

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

магістр

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

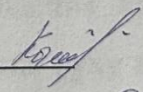
на тему «Розроблення та дослідження електропривода механізму
переміщення вимірювальної фурми у сталеплавильному
виробництві»

Виконав: студент 2 курсу, групи 601МЕ


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 - 2025 рік

РЕФЕРАТ

кваліфікаційної роботи на тему

«Розроблення та дослідження електропривода механізму переміщення вимірювальної фурми у сталеплавильному виробництві»

Робота містить 74 сторінок, 22 рисунків, 3 таблицю, 22 використані джерела.

Ключові слова електропривод, вимірювальна фурма, конвертер, система керування, двигун постійного струму, тиристорний перетворювач, автоматизація, моделювання, система автоматичного керування

Предметом дослідження у даній магістерській роботі є електропривод механізму переміщення вимірювальної фурми, призначений для контролю параметрів процесу плавлення сталі.

Об'єктом дослідження є технологічний процес виплавки сталі в кисневому конвертері, його основні параметри, характеристики та умови протікання, що потребують контролю та регулювання в процесі виробництва.

Основна увага в роботі приділяється аналізу особливостей процесу плавлення сталі та технологічних вимог до механізму вимірювання, які визначають вибір структури електропривода, його основних елементів і системи автоматичного керування. У роботі розглянуто вплив умов експлуатації металургійного виробництва на роботу електропривода та вимоги до його надійності, точності й енергоефективності.

Розроблений електропривод механізму переміщення вимірювальної фурми забезпечує точне позиціонування та регулювання руху відповідно до вимог технологічного процесу, що сприяє підвищенню стабільності контролю параметрів плавлення сталі, однорідності складу металу та загальної ефективності виробництва.

Робота має практичну цінність, а отримані результати після відповідної адаптації та деталізації можуть бути використані при модернізації або впровадженні електроприводів аналогічних механізмів на підприємствах металургійної галузі.

ABSTRACT

of the qualification thesis entitled

“Development and Study of an Electric Drive for the Measuring Lance Movement Mechanism in Steelmaking Production”

The qualification thesis consists of 74 pages, 22 figures, 3 tables, and 22 references.

Keywords: electric drive, measuring lance, converter, control system, DC motor, thyristor converter, automation, modeling, automatic control system.

The **subject of the research** in this master’s thesis is the electric drive of the measuring lance movement mechanism intended for controlling the parameters of the steel melting process.

The **object of the research** is the technological process of steel melting in an oxygen converter, its main parameters, characteristics, and operating conditions that require monitoring and regulation during production.

The main focus of the thesis is on the analysis of the features of the steel melting process and the technological requirements for the measuring mechanism, which determine the selection of the electric drive structure, its main components, and the automatic control system. The influence of the operating conditions of metallurgical production on the performance of the electric drive, as well as the requirements for its reliability, accuracy, and energy efficiency, are considered.

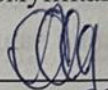
The developed electric drive of the measuring lance movement mechanism provides accurate positioning and motion control in accordance with the requirements of the technological process. This contributes to improved stability in monitoring steel melting parameters, increased homogeneity of the metal composition, and overall production efficiency.

The thesis has practical value, and the obtained results, after appropriate adaptation and further refinement, can be used for the modernization or implementation of electric drives for similar mechanisms at metallurgical enterprises.

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри
автоматики, електроніки та
телекомунікацій


« 15 » 09 2025 р. О.В.Шефер

ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Корнійчуку Олександровичу Володимировичу

1. Тема роботи «Розроблення та дослідження електропривода механізму переміщення вимірювальної фурми у сталеплавильному виробництві»
керівник роботи Єрмілова Наталя Василівна, к.т.н., доцент
затверджена наказом вищого навчального закладу від 03.09.2025 р.
№ 1025 - ф.а
2. Строк подання студентом проекту (роботи) 22.12.2025 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/с², 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 переміщення вимірювальної фурми, постановка задач на проектування. Розрахунок потужності, вибір та перевірка вибору електродвигуна. Вибір основного силового електрообладнання. Розроблення системи захисту електроприводу. Розроблення та реалізація схеми САК. Розрахунок та аналіз динамічних характеристик САК. Висновки до роботи.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових плакатів):

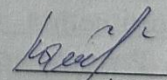
- 1) загальний вигляд та основні елементи кислородного конвертора;
- 2) кінематична схема механізму підйому;
- 3) навантажувальна діаграма та тахограма роботи механізму підйому;
- 4) силова схема тиристорного перетворювача;
- 5) регулювальні характеристики тиристорного перетворювача;
- 6) функціональна схема електроприводу механізму контролю параметрів;
- 7) схема САК електроприводу механізму підйому;
- 8) графіки досліджень;
- 9) висновки.

6. Дата видачі завдання 15.09.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН


Пор. №	Назва етапів кваліфікаційної роботи бакалавра	Термін виконання етапів роботи			Примітка (плакати)
1	Опис технологічного процесу плавлення сталі, опис механізму для контролю параметрів цього процесу	7.10.25		10%	Пл. 1
2	Характеристики електроприводу механізму переміщення вимірювальної фурми, постановка задач на проектування	14.10.25		15%	Пл. 2
3	Розрахунок потужності, вибір та перевірка вибору електродвигуна	21.10.25	I	25%	Пл. 3
4	Розроблення системи захисту електроприводу	11.11.25		50%	Пл. 4
5	Вибір основного силового електрообладнання	18.11.25	II	60%	Пл. 5,6
6	Розроблення та реалізація схеми САК. Розрахунок та аналіз динамічних характеристик САК	09.12.25		80 %	Пл. 7,8
7	Оформлення магістерської роботи	22.12.25	III	100%	Пл. 9

Студент


(підпис)

Корнійчук О.В.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи


(підпис)

Єрмілова Н.В.
(прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

Вступ.....	8
1.Технологічна частина	11
1.1 Технологічний процес виплавки сталі в кисневому конвертері	11
1.2 Особливості технології та механізмів вимірювання	13
1.3 Конструкція та робота механізму вимірювальної фурми	15
1.4 Технічні характеристики та діаграми	18
Висновки до розділу	20
2. Характеристика електроприводів плавильно-вимірювальної машини	21
2.1 Описання приводів.....	21
2.2 Вимоги до електроприводу мехатронної системи вимірювальної фурми.....	22
Висновки до розділу	23
3 Розрахункова частина	24
3.1Розрахунок статичних моментів.....	24
3.2Попередній вибір двигуна.....	24
3.3Розрахунок і побудова тахограми і діаграми навантаження	25
3.4Перевірка на нагрівання двигуна до перевантаження.....	30
Висновки до розділу	31
4 Вибір і характеристики основного силового електрообладнання	32
4.1 Вибір і характеристики тиристорного перетворювача	32
4.2 Вибір і характеристики силового трансформатора	34
4.3 Вибір і характеристика джерела живлення для збудження двигуна	35
4.4 Розрахунок і побудова характеристик регулювання перетворювача	36
Висновок до розділу.....	38
5 Аналіз динаміки електроприводу	39
5.1 Підбір структури САР і розробка основних параметрів.....	39
5.2 Розрахунок структурної схеми САР і підбір параметрів регулятора	40
5.2.1 Розрахунок контуру регулювання струму якоря	42
5.2.2 Оцінка впливу ЕРС двигуна.....	42

5.2.3 Регулятор інтенсивності струму якоря	43
5.2.4 Регулятор швидкості	44
5.2.5 Регулятор інтенсивності швидкості	45
5.3 Реалізація схеми САР електроприводу	47
5.3.1 Характеристики модуля SINAMICS DCM	47
5.3.2 Регулятор швидкості	49
5.3.3 Регулятор швидкості	49
5.3.4 Регулятор струму	50
5.3.5 Аналогові виходи	53
5.3.6 Сигнали на аналогових виходах	53
5.3.7 Процес оптимізації	54
5.3.8 Контроль і діагностика	55
5.3.9 Опис структури імітаційної моделі	56
5.3.10 Процеси під час пуску	57
5.3.11 Дослідження якості гальмування	59
Висновок до розділу	60
6 Розроблення системи захисту електроприводу	61
6.1 Аналіз умов роботи та класифікація аварійних режимів	61
6.2 Захист силових кіл змінного струму та вибір кабельної продукції	62
6.3 Розробка захисту перетворювального агрегату	64
6.4 Комплексна система захисту електродвигуна	65
6.5 Технологічні захисти та блокування механізму фурми	66
6.6 Охорона праці та техніка безпеки при експлуатації	66
Висновок до розділу	69
Висновок	70
Перелік посилань	72
Додатки	74

ВСТУП

Процес виплавки сталі в кисневих конвертерах є однією з найважливіших інновацій у металургійній промисловості. Це дозволяє значно зменшити витрати на виробництво сталі, покращити її якість і прискорити технологічні процеси порівняно з традиційними методами. З моменту впровадження кисневих конвертерів процес сталеплавлення зазнав суттєвих змін, що безпосередньо вплинуло на розвиток металургійного виробництва по всьому світу.

Актуальність теми: Сучасні тенденції в металургії, зокрема в процесах виплавки сталі, вимагають постійного вдосконалення технологій і обладнання, що забезпечує високу точність і стабільність виробничих параметрів. Одним із ключових аспектів є ефективне управління механізмами, що забезпечують точний контроль параметрів плавлення сталі в реальному часі. Зважаючи на постійний розвиток виробництва, а також потребу у зниженні енергоспоживання і підвищенні ефективності, питання розробки нових електроприводів для таких механізмів є вкрай важливим. Ця проблема є актуальною для металургійних підприємств, які прагнуть до досягнення високих техніко-економічних результатів і зниження впливу на навколишнє середовище.

Мета роботи: Метою даної роботи є розробка ефективного електроприводу для механізму переміщення вимірювальної фурми в процесі плавлення сталі. Це дозволить забезпечити точний контроль за ключовими параметрами, такими як температура і хімічний склад сталі, що, у свою чергу, сприятиме підвищенню якості кінцевого продукту і зниженню енергетичних витрат.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

1. **Аналіз сучасних методів і технологій плавлення сталі:** Оцінка основних тенденцій в металургійній галузі та визначення вимог до покращення існуючих технологічних процесів. Вивчення впливу новітніх

технологій, таких як автоматизовані системи управління, на продуктивність та якість виробництва.

2. Проектування електроприводу: Розробка концепції електроприводу з урахуванням специфіки сталеплавильного процесу, вимог до точності, надійності та ефективності управління. Підбір типу електродвигуна, перетворювальних пристроїв та системи автоматизації для забезпечення безперебійної роботи.

3. Експериментальне дослідження та оптимізація: Проведення серії випробувань для оцінки ефективності електроприводу в умовах реального виробництва, оптимізація параметрів роботи з метою досягнення максимального техніко-економічного ефекту.

4. Оцінка результатів і впровадження: Аналіз отриманих результатів з погляду практичного застосування, а також оцінка потенційних переваг та недоліків запропонованого рішення в контексті існуючих умов виробництва.

Предметом дослідження є електропривод механізму переміщення вимірювальної фурми в процесі плавлення сталі.

Об'єктом дослідження є технологічний процес оперативного контролю параметрів плавки (температури та хімічного складу) рідкої сталі в кисневому конвертері Ключові переваги процесу кисневого перетворення в сталеварному виробництві:

Однією з основних переваг кисневого процесу є висока інтенсивність і контрольованість технологічного процесу, що дозволяє досягати високої якості сталі при знижених витратах. Це також спрощує інтеграцію з безперервним процесом лиття сталі, що є важливим фактором для підвищення продуктивності. Автоматизація процесів, зокрема за допомогою програмованих логічних контролерів (ПЛК), дозволяє значно знизити енергоспоживання, підвищити точність управління і скоротити час на налаштування технологічних параметрів.

Висока надійність електрообладнання є критично важливою, оскільки сталеплавильне обладнання працює в умовах високих температур і агресивних

середовищ, електроприводи та їх компоненти повинні бути надзвичайно надійними. Навіть незначні збої в роботі приводів можуть призвести до серйозних технічних наслідків, таких як виведення обладнання з ладу або порушення технологічного процесу. Тому до електричних приводів у металургії висувуються надзвичайно жорсткі вимоги щодо надійності та безпеки.

Автоматизація та впровадження нових технологій: Високотехнологічні електроприводи для сталеплавильних механізмів повинні враховувати специфіку циклічного характеру процесу, обмеження на прискорення під час роботи з рідким металом і вимоги до високих температур. Водночас, для досягнення високої продуктивності і ефективності процесу необхідно забезпечити безперебійне функціонування усіх систем, зокрема шляхом використання тиристорних систем перетворення, які здатні оптимізувати процес керування приводами та знизити енергетичні втрати.

Таким чином, завдяки розвитку нових електроприводних систем, автоматизації процесів і впровадженню інноваційних технологій, можливо досягти значних техніко-економічних переваг і підвищити ефективність виробництва сталі.

1 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

1.1 Технологічний процес виплавки сталі в кисневому конвертері

Процес виплавки сталі в кисневих конвертерах є одним із найважливіших та найбільш широко застосовуваних технологічних процесів у металургії, що дозволяє досягти високої продуктивності і точного контролю за хімічним складом сталі. Основною відмінністю цього процесу є використання чистого кисню для окислення небажаних елементів у чавуні, таких як вуглець, сірка і фосфор, що дозволяє значно підвищити якість металу та зменшити кількість додаткових матеріалів, необхідних для досягнення бажаних властивостей сталі. Завдяки високій температурі, що досягається в процесі продувки киснем, можна досягти ефективного видалення шкідливих домішок.

Кисневий конвертер представляє собою великий, грушоподібний агрегат, що обертається навколо горизонтальної осі. Основними етапами процесу є завантаження шихти, продувка киснем, додавання шлаку і легуючих добавок, а також вивантаження готової сталі. Під час продувки киснем в конвертері утворюються оксиди, які виводяться разом із шлаком, що дозволяє знизити вміст вуглецю, сірки та фосфору в чавуні, а також додати легуючі елементи для отримання сталі потрібної марки.

Процес може бути автоматизований, що дозволяє підвищити ефективність і точність управління. Завдяки автоматизації, постійний моніторинг та корекція технологічних параметрів дають змогу досягати стабільної якості сталі, знижуючи ризик помилок, які можуть виникати при ручному управлінні.

Сучасні автоматизовані системи використовують програмовані логічні контролери (ПЛК), що дають змогу забезпечити точний контроль за параметрами процесу в реальному часі. Кисневий конвертер має кілька переваг у порівнянні з іншими методами плавки сталі, такими як доменні печі. Зокрема, це висока швидкість процесу, здатність швидко виготовляти сталь різних марок, відсутність необхідності в значних обсягах матеріалів для

окислення, а також можливість регулювання температури та хімічного складу металу в процесі плавлення. Це дозволяє досягти високої ефективності і скорочення витрат на виробництво.

Процес плавлення сталі в кисневих конвертерах включає кілька основних етапів:

1. Завантаження шихти, яка складається з чавуну та металургійного брухту.

2. Продувка кислороду, що здійснюється через спеціальні сопла на фурмі, за допомогою яких кисень рівномірно розподіляється по всій масі розплавленого чавуну.

3. Вивантаження готової сталі після завершення реакцій, коли вуглець та інші шкідливі елементи окислюються і видаляються з конвертера. Під час цього процесу використовуються спеціальні технологічні прийоми для забезпечення рівномірного розподілу кисню і контролю температури, що критично важливо для досягнення оптимальних властивостей сталі. Підвищення температури в конвертері також дозволяє зменшити час на переробку чавуну і отримати сталеві сплави з заданими характеристиками.

Один із важливих аспектів процесу — це використання автоматичних систем контролю, які дозволяють оптимізувати продуктивність конвертера. Завдяки цим системам можна точно керувати подачею кисню, температурою плавлення та іншими параметрами, що дає змогу значно підвищити ефективність процесу та знизити енергоспоживання.

Кисневий конвертер може обробляти до кількох сотень тонн сталі за одну зміну, що робить його одним із найшвидших методів плавки сталі, порівняно з іншими методами. Це дозволяє металургійним підприємствам досягати високих темпів виробництва, що особливо важливо для задоволення потреб у сталі на великих ринках. Основною метою процесу виплавки сталі є отримання сталі з потрібними властивостями, такими як висока міцність, корозійна стійкість, добра зварюваність та інші. Для досягнення цих

властивостей контролюються не лише основні елементи складу, але й додаткові елементи легування, що додаються до сталі в процесі плавлення.

Технології вуглецевих та низьковуглецевих сталей, що виплавляються на кисневих конвертерах, є основними для забезпечення широкого діапазону продукції.

1.2 Особливості технології та механізмів вимірювання

Вимірювання температури і відбір проб металу є важливими етапами в процесі плавлення сталі, які безпосередньо впливають на якість кінцевого продукту. Всі технологічні процеси, що відбуваються в сталеплавильному цеху, потребують постійного контролю температури для забезпечення стабільності процесу та уникнення дефектів в готовому продукті.

Раніше ці операції виконувалися вручну: працівник використовував спеціальні інструменти для вимірювання температури та відбору проб металу з металургійного конвертера. Це вимагало значного часу і знижувало загальну ефективність виробничого процесу. Тому автоматизація цих операцій стала важливою частиною модернізації сталеплавильних цехів. Сучасні технології дозволяють повністю механізувати вимірювання температури та відбір проб металу, що значно підвищує точність і скорочує час, витрачений на ці операції. Наприклад, для вимірювання температури в рідкій сталі застосовуються спеціальні зондові прилади, які занурюються в металеву ванну на кілька секунд і швидко передають дані на пульт управління.

Для механізації процесу вимірювання температури та відбору проб були розроблені спеціальні машини, які включають у себе такі основні компоненти: раму, канатний механізм для переміщення каретки, гідравлічний механізм для нахилу рейки і вимірювальну трубку. Це дозволяє здійснювати вимірювання без необхідності втручання оператора, що знижує ризик людських помилок.

Машини для вимірювання температури та відбору проб металу оснащені системами автоматичного управління, що дозволяють в реальному часі передавати результати вимірювань на диспетчерський пульт, де оператори

можуть коригувати технологічні параметри, якщо це необхідно. Це сприяє високій точності та стабільності процесу плавлення.

Процес автоматизованого вимірювання температури та відбору проб металу включає кілька етапів:

1. Розміщення вимірювальної фурми в правильному положенні щодо ванни розплавленого металу.
2. Проведення вимірювання температури або відбір проби металу за допомогою зонда.
3. Передача отриманих даних до системи управління для аналізу і прийняття рішень.

Одним із найбільш важливих аспектів є захист вимірювальних приладів від високих температур, тому зонд повинен бути оснащений спеціальним охолоджувальним механізмом, що дозволяє уникнути його небезпеки при тривалому контакті з розплавленим металом. Зазвичай використовуються рідини або інертні гази, які забезпечують охолодження приладів та зменшують вплив високих температур.

Використання автоматизованих систем для вимірювання температури та відбору проб металу дозволяє значно підвищити ефективність плавлення сталі, зменшити енергетичні витрати і скоротити час на виконання операцій. Всі ці чинники сприяють зниженню витрат на виробництво та підвищенню якості продукції.

Один із важливих аспектів автоматизації вимірювання температури — це наявність автоматичних систем корекції, які можуть змінювати параметри плавлення в реальному часі в залежності від отриманих даних. Це дозволяє постійно підтримувати оптимальні умови для виробництва сталі.

Для реалізації цієї технології використовуються спеціальні програми, які дозволяють не лише вимірювати температуру, але й автоматично розраховувати потрібні корекції процесу. Це забезпечує постійну оптимізацію всього виробничого циклу.

1.3 Конструкція та робота механізму вимірювальної фурми

Механізм вимірювальної фурми є важливою частиною технологічного процесу в сталеплавильних цехах. Він забезпечує вимірювання температури і відбір проб металу з розплавленої ванни сталі для подальшого аналізу її хімічного складу. Для забезпечення точності та швидкості цих операцій фурма повинна бути оснащена високотехнологічними приладами, що дозволяють автоматично проводити всі вимірювання з мінімальним втручанням оператора.

Конструкція механізму вимірювальної фурми включає в себе кілька важливих елементів, які забезпечують її стабільну роботу. Основними компонентами є: каретка, на якій розташована вимірювальна трубка, канатний механізм для переміщення каретки, гідравлічний механізм для нахилу рейки, а також система охолодження для захисту приладів від високих температур.

Каретка механізму має чотири колеса, які дозволяють рухатися по направляючій рейці. Ця рейка встановлена на опорних кронштейнах поворотної колони, що дає змогу механізму рухатися по необхідній траєкторії і забезпечує стабільну роботу під час вимірювання. Каретка підвішена на тросі, який обертається на барабані, що дозволяє точніше керувати переміщенням фурми в заданому напрямку. Конструкція машини для вимірювання температури ванни і відбору проб металу показана на рисунку 1.1.

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, 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, прогін 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.

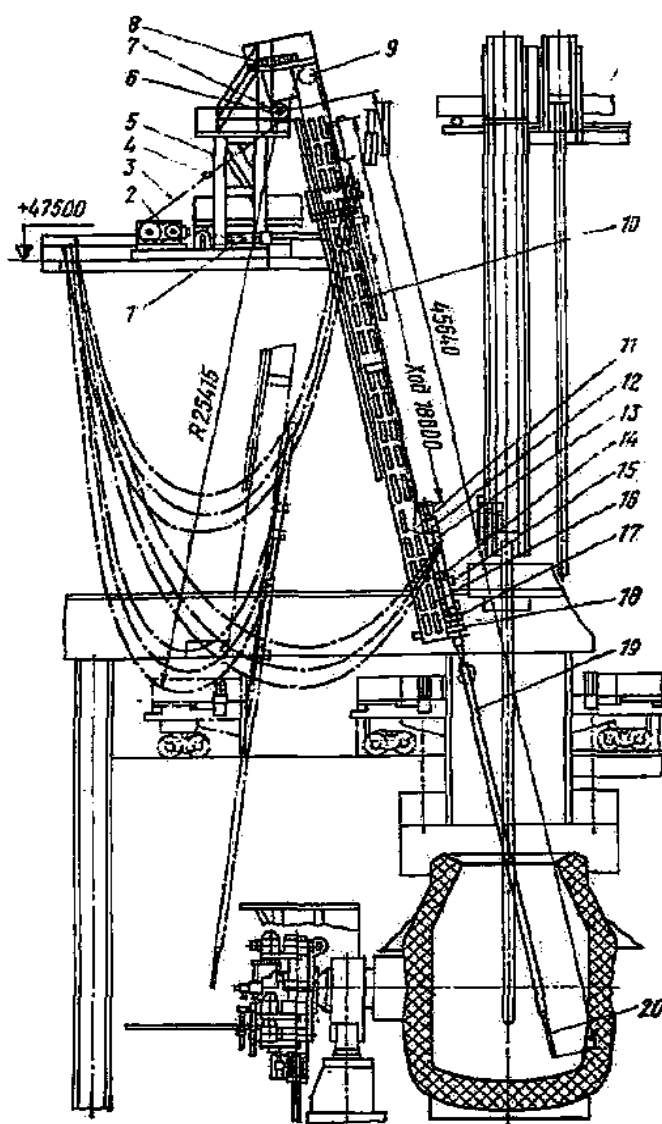


Рисунок 1.1 – Механізм підйому вимірювальної фурми

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.

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. Спис 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. Канатний механізм складається з мотузки, яка з одного боку закріплена на каретці, а з іншого — на барабані лебідки. Цей механізм забезпечує точне і плавне переміщення вимірювальної фурми до необхідного місця в конвертері, де фурма занурюється в рідкий метал для вимірювання температури. Для контролю цього процесу використовуються спеціальні датчики натягу каната. Гідравлічний механізм відповідає за нахил рейки, на якій знаходиться каретка з вимірювальною трубкою. Цей механізм дозволяє регулювати

положення фурми у відповідності до необхідних технологічних параметрів. Гідроциліндри системи надають можливість плавно нахилити каретку під заданим кутом, що важливо для досягнення точних результатів при вимірюванні. Одним із важливих аспектів конструкції є система охолодження фурми, оскільки вимірювальна трубка та інші елементи механізму піддаються впливу високих температур. Для захисту від перегріву, зонд оснащений спеціальними охолоджувальними системами, які забезпечують безпечну та ефективну роботу навіть в умовах тривалого контакту з розплавленим металом. При роботі механізму вимірювальна фурма занурюється в рідкий метал на глибину до 700 мм. Це дозволяє проводити точне вимірювання температури на різних глибинах металеві ванни. Для відбору проб металу використовуються спеціальні насадки, які дозволяють безпечно вибірково забирати проби, не порушуючи процесу плавлення. Для підвищення надійності механізм фурми оснащений системами аварійного відключення, що запобігають несправностям при виході з ладу окремих компонентів. Наприклад, при обриві тросу або несправності гідравлічного механізму активується система аварійного зупинення, яка автоматично зупиняє роботу фурми.

Всі ці компоненти працюють у комплексі, забезпечуючи точне, швидке та безпечне вимірювання температури і відбір проб металу в умовах високих температур та агресивного середовища, що є необхідним для досягнення високої якості продукції в сталеплавильних цехах.

1.4 Технічні характеристики та діаграми

Технічні характеристики обладнання для вимірювання температури та відбору проб металу є важливим аспектом для забезпечення ефективної роботи механізму вимірювальної фурми. Основні характеристики включають точність вимірювання, здатність витримувати високі температури, а також надійність і стабільність роботи в умовах агресивного середовища.

Один із найважливіших параметрів — це точність вимірювання температури. Сучасні вимірювальні фурми здатні забезпечувати точність до

десять градусів Цельсія, що є необхідним для коректного визначення температури рідкої сталі в конвертері. Висока точність вимірювань дозволяє точно контролювати процес плавлення, що в свою чергу забезпечує високий рівень якості продукції (рис. 1.2).

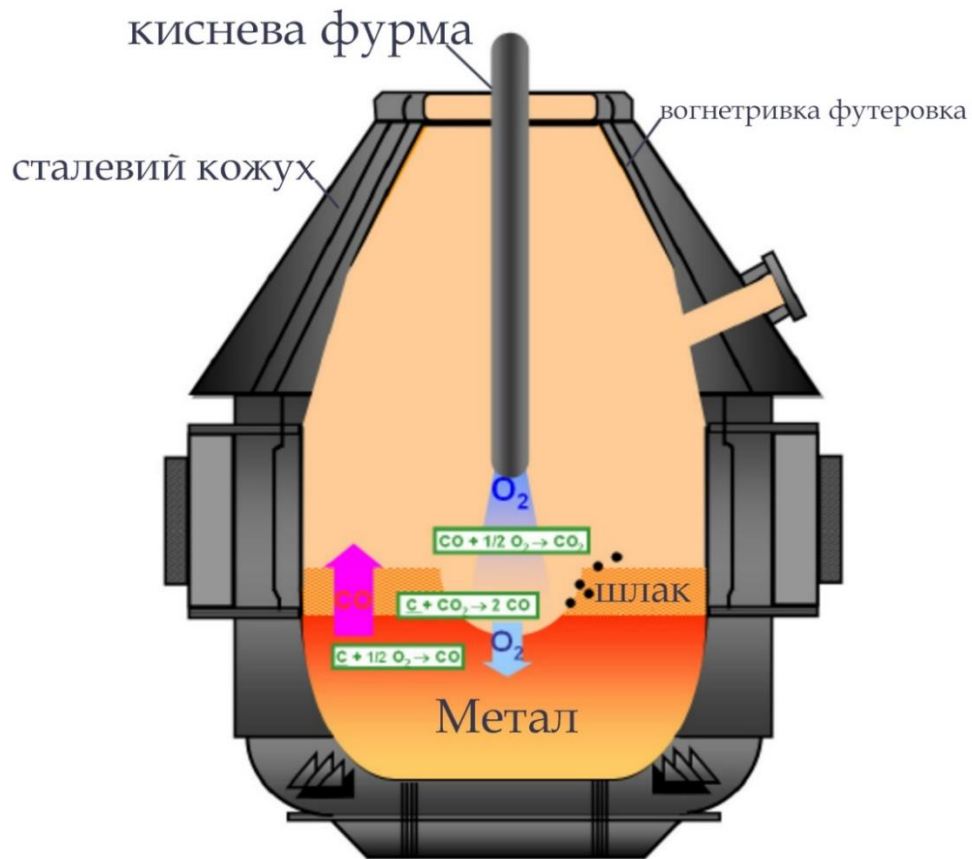


Рисунок 1.2 – Кисневий конвертер: введення вимірювальної фурми для контролю параметрів плавлення сталі

Вимірювальні фурми повинні також витримувати температури, що досягають 1600-1700 градусів Цельсія, адже це температура рідкої сталі в процесі плавлення. Для забезпечення надійної роботи в таких умовах конструкція фурм оснащена спеціальними охолоджувальними системами, що дозволяють захистити чутливі елементи приладів від перегріву.

Ще одним важливим аспектом є швидкість реагування механізмів на зміни температури. Швидкість вимірювальних приладів дозволяє здійснювати

вимірювання за кілька секунд, що є критичним для своєчасної корекції технологічних параметрів під час плавлення сталі.

Основними технічними характеристиками механізму вимірювання є:

- 1) Температурний діапазон: до 1700°C;
- 2) Точність вимірювання температури: до 10°C;
- 3) Час реакції вимірювального приладу: до 5 секунд;
- 4) Довговічність елементів: до 1000 циклів;
- 5) Споживана потужність охолодження: до 1 кВт.

Висновки до розділу.

Розглянуто процес виплавки сталі в кисневому конверторі, а також особливості технології та механізмів вимірювання. Крім того ми перейшли від ручного вимірювання температури та відбору проб металу до повністю автоматизованої системи зі спеціальними машинами. Це значно підвищило точність і прискорило процес.

Розглянули, як влаштована і працює вимірювальна фурма. Її основні частини - це каретка, канатний механізм для переміщення по вертикалі, гідравліка для нахилу рейки та система охолодження, яка захищає все від жахливої спеки (до 1700°C). Сучасне обладнання дуже точне (до 10°C) і швидке (час реакції до 5 секунд).

Виходить, що ці автоматизовані системи контролю - це необхідність, щоб кисневі конвертери працювали краще, споживали менше енергії і забезпечували високу якість сталі.

2 ХАРАКТЕРИСТИКА ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ПЛАВИЛЬНО-ВІМІРЮВАЛЬНОЇ МАШИНИ

2.1 Описання приводів

2.1.1 Привід електродвигуна

Основним робочим приводом механізму опускання та підйому вимірювальної трубки було обрано електродвигун постійного струму типу ДМП-125-520. Номінальна потужність двигуна – 95 кВт, номінальна напруга – 460 В, струм якоря – 240 А. Швидкість обертання – 900 об/хв. Живлення здійснюється через тиристорний перетворювач серії КТЕ450/520-15.

2.1.2 Привід аварійної фурми

Для аварійного відводу фурми застосовується асинхронний двигун АМР160М6 потужністю 18,5 кВт, номінальною швидкістю 970 об/хв та напругою 400 В. Редуктор черв'ячного типу має передавальне число 68.

2.1.3 Приводи гідравлічних насосів

Гідравлічна система складається з двох насосів НП-45/32, кожен приводиться в рух двигуном типу 4АМ100L4, потужність 4,5 кВт, номінальна напруга 380 В, номінальний струм 8,2 А.

Таблиця 2.1 – Технічні дані підйомного механізму вимірювальної фурми

Параметр і позначення	Одиниця виміру	Значення
Підйом ваги списа – G_f	кН	29
Швидкість руху робочої фурми – V_p	м/с	3.1
Швидкість руху зворотна – V_y	м/с	0.15
Максимальне прискорення – a	м/с ²	1.45
Передавальне число – i	-	4.7
ККД коробки передач – η_p	-	0.94

ККД барабана – η_{br}	-	0.82
Діаметр барабана – d_k	м	0.55
Момент інерції зведений – $J_{мех}$	кг·м ²	132
Тривалість одного циклу – t_p	с	49
Шпаруватість теплового циклу – t_u	хв	47
Опускання вниз – S_1	м	25.4
Підйом списа вгору – S_3	м	25.4

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 (до + 40 ° С) і низької (до -30 ° С) температури та підвищеної запиленості;
- повинні забезпечувати роботу механізму в умовах підвищеної вібрації (1-35 Гц);
- забезпечити роботу механізму підйому стріли на двох швидкостях: робоча швидкість 3.6 м/с і низька швидкість 0,12 м/с;
- падіння статичного струму не повинно перевищувати 5%;
- високе перевантаження по струму і імпульс приводу ($\lambda_1 = 2,5$);
- допустиме відносне збільшення струму якоря – обмежене 200 В/с;
- допустимий динамічний струм не повинен перевищувати 1,5 В;
- зниження статичної швидкості не повинно перевищувати 5%;
- задані значення граничного прискорення і уповільнення -1,2 м/с²;
- точність зупинки 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.

Висновки до розділу.

Головний механізм, який опускає та підіймає вимірювальну трубку (так званий спис), є найважливішим. Для нього використовується потужний електродвигун постійного струму (ДМП-125-520). Цей тип двигуна обраний тому, що він дозволяє максимально точно контролювати швидкість руху.

3 РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА

3.1 Розрахунок статичних моментів

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

Статичний момент при підйомі фурми обчислюється за формулою (3.1):

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

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

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

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

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

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 $M_{\text{при}}$ приведену до вала двигуна задається формулою (3,4):

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

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

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 обраний для приводу підйомного механізму вимірювальної головки [2]. 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 вимірів	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,	-	1400
Опір обмотки збудження, r_b	Ом	36,0
Перевантажувальна здатність по струму якоря, λ	-	2,5
Максимальна швидкість, $n_{макс}$	об/хв	1770
Максимальний крутний момент, $M_{макс}$	Нм	5212
Момент інерції якоря,	кг·м ²	10,25
Магнітний потік на полюс, P_{hn}	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 тахограму приводу.

Для початкового часу приймаються 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:

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

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

Коефіцієнт крутного моменту двигуна задається формулою:

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

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

Номинальна кутова швидкість двигуна задається формулою:

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

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

Опір якірного ланцюга при робочій температурі 85°C відповідає формулі:

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

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

де β - температурний коефіцієнт зміни лобового опору двигунів серії Д.

Динамічний крутний момент при запуску і гальмуванні:

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

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

Статичний момент при опусканні фурми (двигун працює в рекуперативному режимі) можна розрахувати за формулою:

$$M_{с1} = M_{опуск} = \frac{G_{\Phi}}{i} \cdot 2 \frac{d_k}{2} \cdot \eta_p \cdot \eta_k; \quad (3.9)$$

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

Пусковий момент двигуна при опусканні фурми відповідає формулі:

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

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

Гальмівний момент двигуна при опусканні фурми відповідає формулі:

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

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

Сумарний момент інерції електроприводу відповідає формулі:

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

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

Час розгону (гальмування) до робочої швидкості розраховуємо за формулою:

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

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

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

$$w_{дву} = \frac{V_y \cdot i}{d_k}; \quad (3.14)$$

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

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

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

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

Час гальмування від робочої швидкості до заданої (час розгону від заданої швидкості до робочої швидкості) задається формулою:

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

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

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

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

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

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

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

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

Відстані, пройдені при розгоні (гальмуванні) до заданої швидкості і від заданої швидкості до робочої розраховуємо 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 наступною формулою:

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

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

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 :

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

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

Гальмівний момент двигуна при підйомі фурми відповідає формулі:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Час повного циклу розраховуємо за формулою:

$$T_2 = 2 \cdot t_{п1} + t_{pi} + 2 \cdot t_{п2} + t_{y1} + 2 \cdot t_{п3} + t_{p2} + t_{y2} + t_{паузи}; \quad (3.26)$$

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

$$\beta_0 := 0,25,$$

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

Де $\beta = 0.25$ — коефіцієнт, що визначає відносну тривалість динамічних процесів;

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

3.4.2 Перевірка двигуна на перевантажувальну здатність

Двигун не буде перевантажений, якщо виконується наступна умова:

$$M_{\Pi} \geq \lambda \cdot M_H; \quad (3.27)$$

де M_{Π} - пусковий момент двигуна при підйомі фурми.

Так як маємо величину $\lambda \cdot M_H = 5212$ Н·м, а пусковий момент маємо $M_{\Pi} = 5371$ Н·м, то обраний двигун не буде перегріватися, тому що умова виконується.

Висновок за розділом.

В рамках цього розділу було здійснено обґрунтування та розрахунок електропривода механізму переміщення вимірювальної фурми. На основі кінематичних та силових розрахунків було обрано та перевірено на нагрівання та перевантаження асинхронний двигун.

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 такі їх величини:

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

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.

Схема тиристорного перетворювача показана 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.

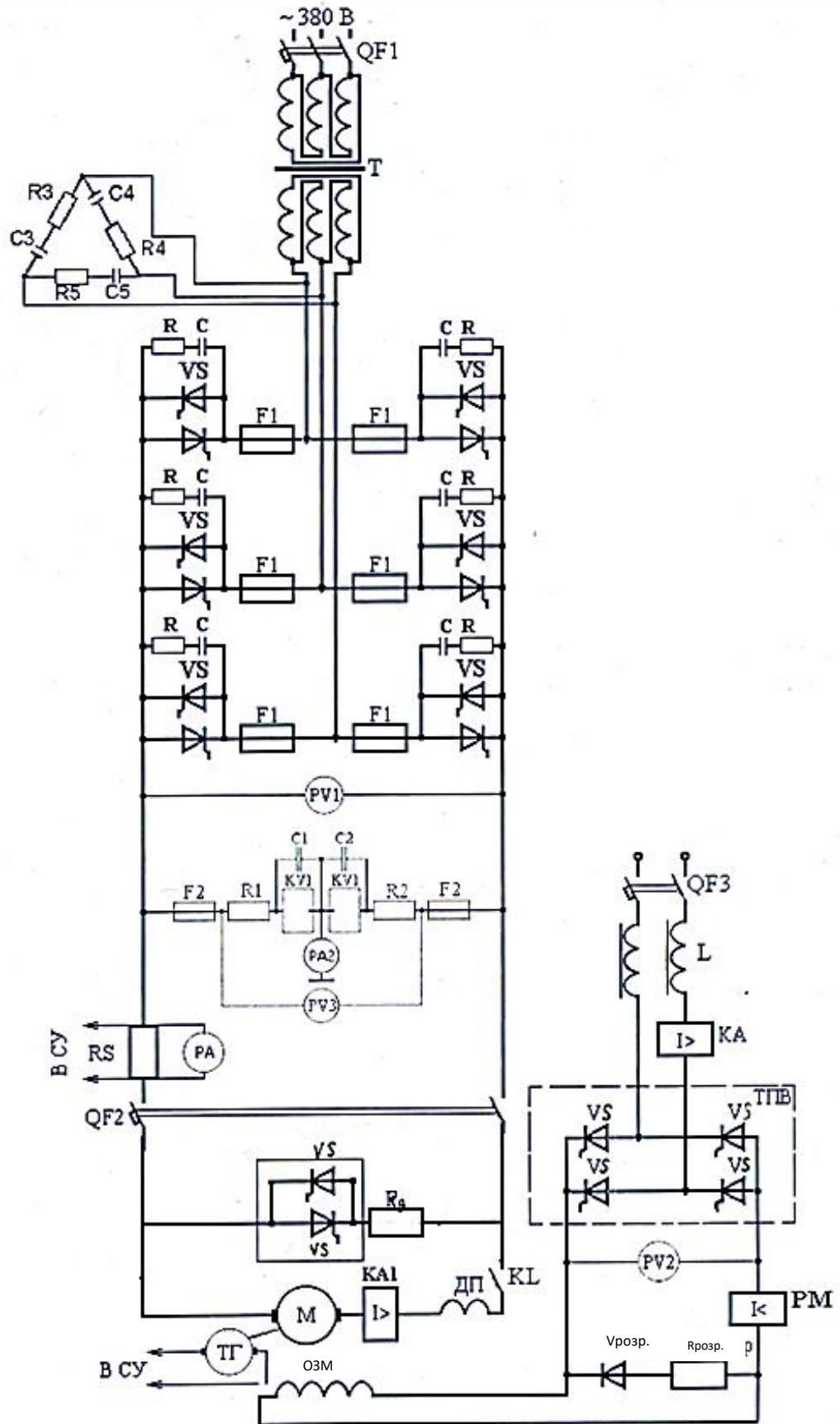


Рисунок 4.1 – Силовая схема электроприводу з тиристорним перетворювачем

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 4.1 - Технічні дані трансформатора ЦЗП-250/0,7УЗ

Група Підключення	S _Н кВА	Номінальна напруга, В			Номінальні струми, А		ек%, %	Втрати, Вт		I _о , %
		U _{1л}	U _{2л}	U _{dh}	I _{2л}	I _{dh}		ΔP _{xx}	ΔP _{кз}	
Δ/Δ-0	230	380	416	460	326	400	4,7	915	3700	5,2

Максимальне значення випрямленої ЕРС знаходиться по 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 по 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):

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

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

Згладжуюча дросельна заслінка в нашому випадку не вибирається, так як двигун серії D допускається до роботи без додаткової дросельної заслінки.

4.3 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 $I = 5,5 \text{ А}$ 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 . Змінна напруга 220 В знімається з вторинної обмотки допоміжного трансформатора.

4.4 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»):

$$E_d = \pm E_{d0} \cdot \cos\left(\alpha_{\text{поч}} \mp \frac{\pi}{2} \cdot \frac{U_y}{U_{\text{оп.м}}}\right) = \pm 561,6 \cdot \cos\left(95^\circ \mp \frac{\pi}{2} \cdot \frac{U_y}{8}\right), \quad (4.8)$$

де $\alpha_{\text{поч}}$ - початковий кут збігу характеристик, який приймається рівним 95° ;

$U_{\text{оп.м}}$ - 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 4.2 - Регулювальні характеристики СІФУ і оборотного ТП

$U_{y,B}$	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8
ГРУПА «ВПЕРЕД»																	
$E_{d1,B}$	-534	-534	-534	-492	-430	-352	-259	-157	48,9	61,1	169	270	361	438	498	534	534
ГРУПА «НАЗАД»																	
$E_{d1,B}$	-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 перемикування 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,

δ - кут відновлення замкових властивостей тиристора:

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

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

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

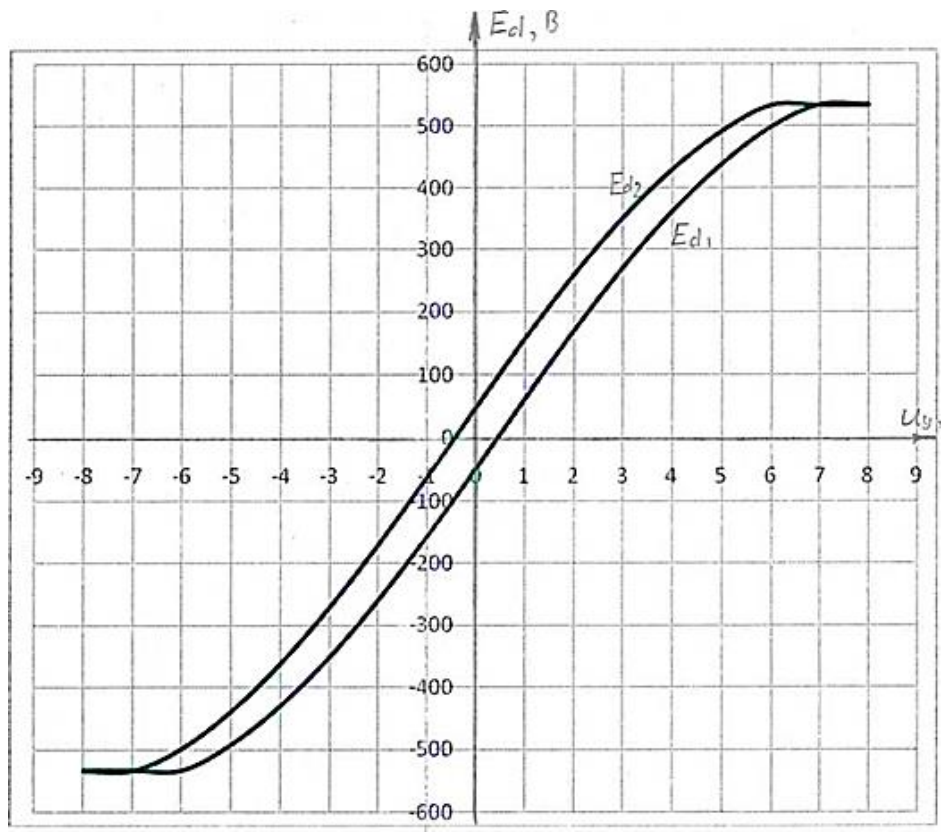


Рисунок 4.2 – Регулювальні характеристики тиристорного перетворювача

Висновок до розділу

У розділі виконано вибір основного силового електрообладнання для електропривода механізму переміщення вимірювальної фурми. На підставі розрахунків обрано двигун постійного струму Д814У2 та тиристорний перетворювач КТЕ-7/220-9-УХЛ4, які забезпечують необхідні режими роботи при заданих навантаженнях. Для живлення електропривода застосовано силовий трансформатор ЦЗП-250/0,7У3 потужністю 250 кВА. Розрахунки показали, що використання додаткових дроселів не є доцільним. Отримані результати підтверджують коректність вибору обладнання та можливість ефективної роботи електропривода

5 АНАЛІЗ ДИНАМІКИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

5.1 Вибір структури САР і розробка основних параметрів

Відповідно до вимог технологічного процесу, електропривод САР 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 повинен бути 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 (асинхронної тягової системи) 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.

Внутрішня схема управління - це схема управління струмом якоря двигуна. При необхідності обмеження швидкості зміни струму якоря (для полегшення перемикання двигуна) на вході регулятора струму також встановлюють регулятор струму.

На вході регулятора струму знаходиться різниця між опорною напругою струму і струмом зворотного зв'язку. Остання напруга генерується датчиком струму якоря в ланцюзі якоря двигуна.

Наступна реалізація такого функціонального графа можлива за допомогою модулів управління SINAMICS DCM. Корпус містить мікропроцесорну цифрову систему управління SINAMICS DCM фірми Siemens. Функціональна схема електроприводу вимірювальної фурми показана на рисунку 5.1.

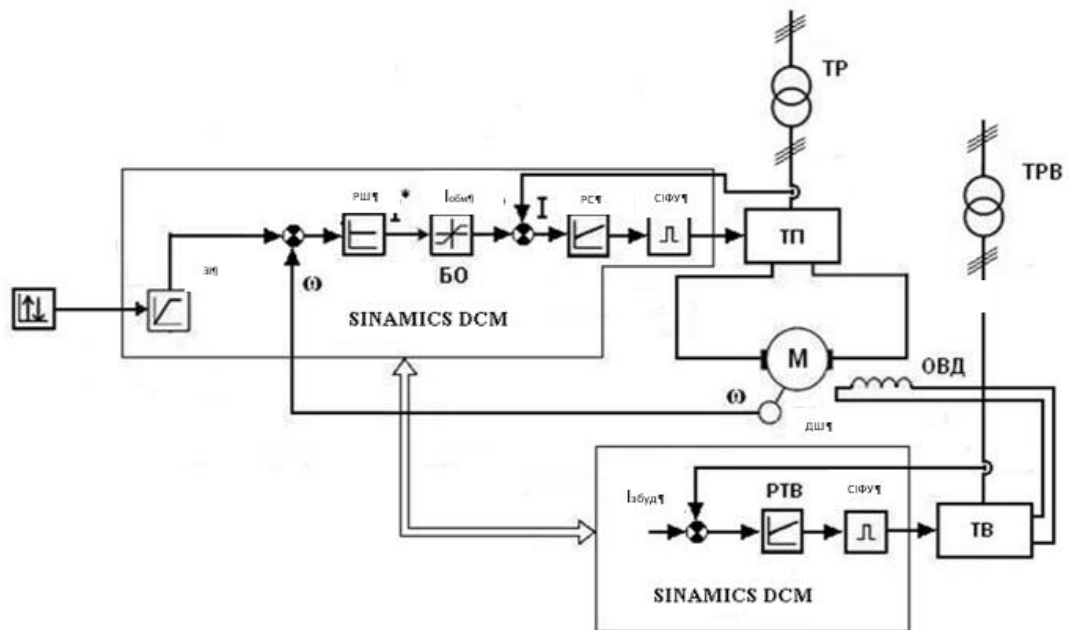


Рисунок 5.1 – Функціональна схема електроприводу вимірювальної фурми

5.2 Розрахунок структурної схеми САР і вибір параметрів регулятора

Динамічний вигреш ТП задається формулою (5.1):

$$k_{ТП} = \frac{\Delta E_d}{\Delta U_y}; \quad (5.1)$$

$$k_{\text{ТП}} = \frac{242-213}{6-5} = 30.$$

Константа часу ТП приймається рівною $T_{\mu} = 0,0033$ с.

Еквівалентна індуктивність схеми випрямлення дорівнює формулі (5.2):

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

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

Еквівалентний опір ланцюга якоря двигуна задається формулою (5.3):

$$R_e = 1,1 \cdot R_{\text{Я}} + a_e \cdot \left(R_T + \frac{X_{T.m}}{2 \cdot \pi} \right); \quad (5.3)$$

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

де R_e – опір якорного ланцюга при робочій температурі 85°C .

Опір ланцюга якоря при робочій температурі 85°C відповідає формулі (5.4):

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

де β - температурний коефіцієнт зміни лобового опору двигунів серії D.

Еквівалентна електромагнітна постійна часу схеми випрямлення може бути розрахована по формулі (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:

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

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

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.

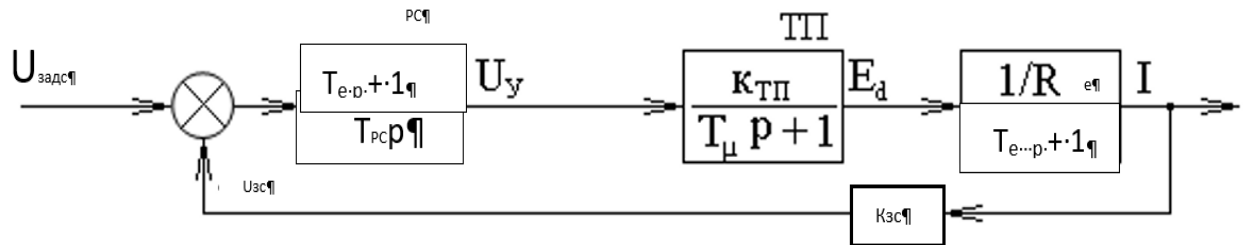


Рисунок 5.2 – Контур регулювання струму якоря

Сигнал струму знімається з датчиків струму. Коефіцієнт передачі ланцюга зворотного зв'язку по струму задається формулою (5.7):

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

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

де, I_{max} - максимальний струм електродвигуна.

Передавальна функція регулятора струму відповідає формулі (5.8):

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

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

5.2.2 Оцінка впливу ЕРС двигуна

При обліку ЕРС двигуна просадка струму ΔI в усталених режимах роботи приводу може бути розраховани за формулою (5.9):

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

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

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

5.2.3 Регулятор інтенсивності 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 (5.10).

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

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

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.

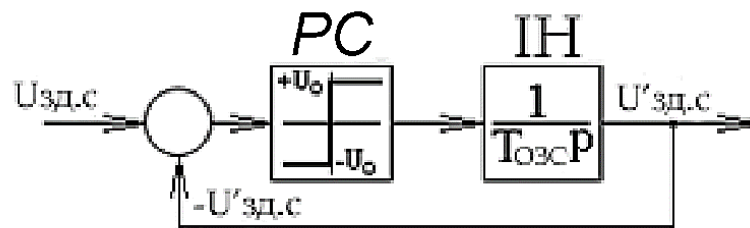


Рисунок 5.3 – Задавач інтенсивності струму якоря

Гранична напруга U задавача сили струму дорівнює 8 В, тоді постійна часу $T_{\text{озс}}$ знаходять за наступною формулою (5.11)

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

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

де $(di_a^*/dt)_{\text{additional}}$ - 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, можна використовувати П-регулятор швидкості.

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.

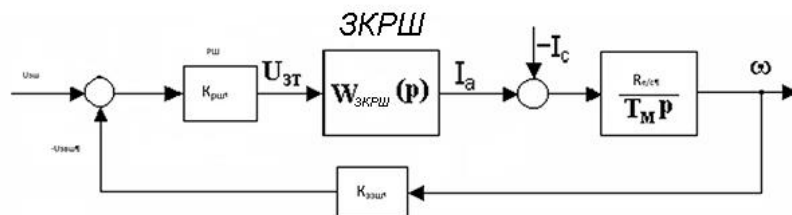


Рисунок 5.4 – Контур регулювання швидкості з Р-регулятором

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

$$K_{зз} = \frac{U_{зз\max}}{\omega_H}; \quad (5.13)$$

$$K_{зз} = \frac{8}{56} = 0,143 \text{ В} \cdot \text{с},$$

де $U_{зз\max}$ - максимальне значення напруги швидкості роботи.

Коефіцієнт регулятора швидкості ВРХ за формулою (5.14):

$$K_{рс} = \frac{T_M}{4 \cdot T_\mu} \cdot \frac{c}{R_e} \cdot \frac{K_{озз}}{K_{зз}}; \quad (5.14)$$

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

5.2.5 Регулятор інтенсивності швидкості

Для обмеження максимального прискорення приводу перед регулятором швидкості встановлений задавач інтенсивності швидкості, структурна схема якого показана на малюнку 5.5.

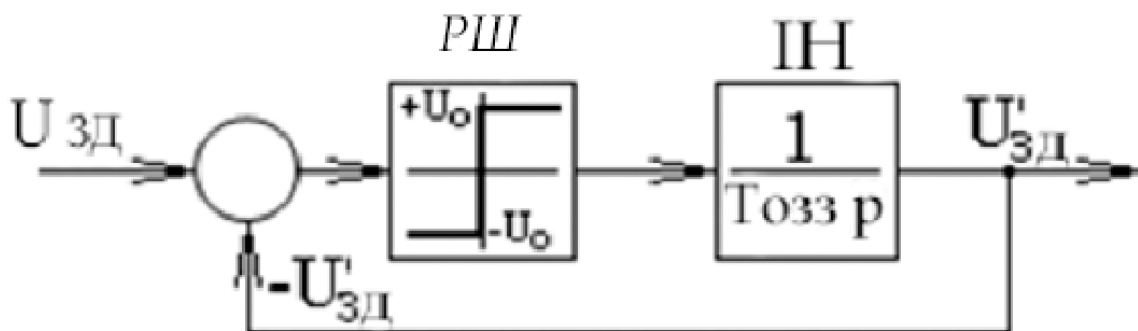


Рисунок 5.5 – Регулятор інтенсивності швидкості

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

$$\varepsilon_{\max} = \frac{M_{\text{дин max}}}{J_\Sigma} = \frac{I_{\text{дин max}} \cdot K\Phi_H}{J_\Sigma} = \frac{1,5 \cdot I_N \cdot K\Phi_H}{J_\Sigma}^{-2}; \quad (5.15)$$

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

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

$$T_{\text{ОЗЗ}} = \frac{U_0}{K_{\text{ОЗЗ}} \cdot \varepsilon_{\max}}; \quad (5.16)$$

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

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

Загальна структурна схема електроприводу наведена на рисунку 5.6.

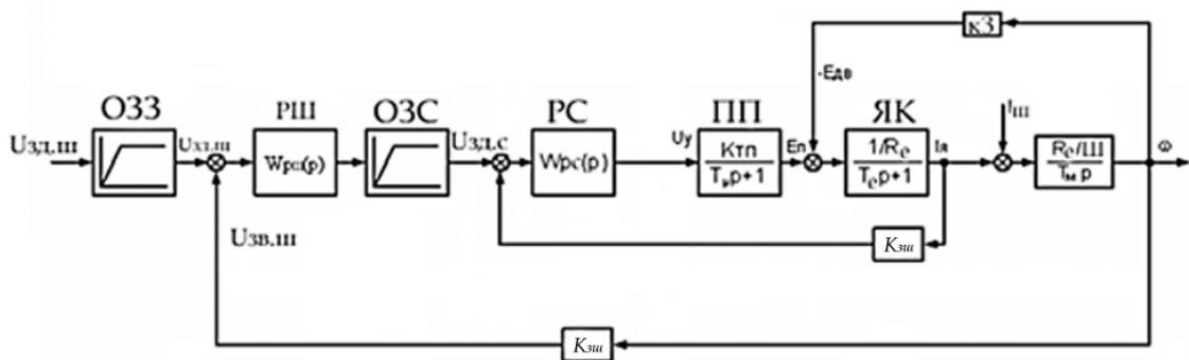


Рисунок 5.6 – Структурна схема електроприводу підйому вимірювальної форми

Структурна схема електропривода описує роботу всієї системи керування швидкістю та струмом двигуна. На вході знаходиться обмежувач з швидкості (ОЗЗ), який не дозволяє подавати різкі стрибки сигналу. Він робить завдання плавним, щоб електропривід не ривками набирив швидкість. Після цього сигнал надходить на суматор, де порівнюється з реальною швидкістю двигуна, що приходить зі зворотного зв'язку.

Отримане відхилення подається до регулятора підсилення швидкості (РШ). Він визначає, наскільки сильно треба впливати на двигун, щоб досягти заданої швидкості. Далі сигнал проходить через обмежувач зони стабілізації (ОЗС), який потрібен для коректної роботи привода на малих швидкостях: він контролює, щоб система не "переганяла" необхідну дію і працювала стійко.

Після цього оброблений сигнал надходить до регулятора струму (РС). Його задача — забезпечити такий струм у якорі, який відповідає команді від регулятора швидкості. РС реагує швидше за регулятор швидкості, бо струмова петля є внутрішньою, більш жорсткою.

Сигнал з регулятора струму керує потужним підсилювачем або перетворювачем (ПП), який формує керуючу напругу E_n . Ця напруга подається на якорне коло двигуна (ЯК), у якому враховуються електричні параметри, індуктивність і інші динамічні властивості. На виході якорного кола утворюється струм I_a .

Цей струм формує момент двигуна, який через механічну частину перетворюється у кутову швидкість. Механічний блок враховує інерцію, навантаження та механічні втрати. Отримана фактична швидкість через канал зворотного зв'язку (Кзс) повертається на вхід суматора, де знову порівнюється із заданою. Таким чином працює основна швидкісна петля.

Окремо контролюється і струм: реальний струм I_a знімається через Кзс, після чого порівнюється із сигналом регулятора струму. Якщо струм перевищує допустимий або не відповідає команді, РС негайно його коригує. Це захищає двигун і забезпечує стабільний пуск та роботу при навантаженні.

Уся система працює за принципом двоконтурного керування: — внутрішня петля струму забезпечує швидке та точне регулювання моменту; — зовнішня петля швидкості забезпечує плавне й точне досягнення заданої швидкості без коливань.

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 перемикаати 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 5.7.

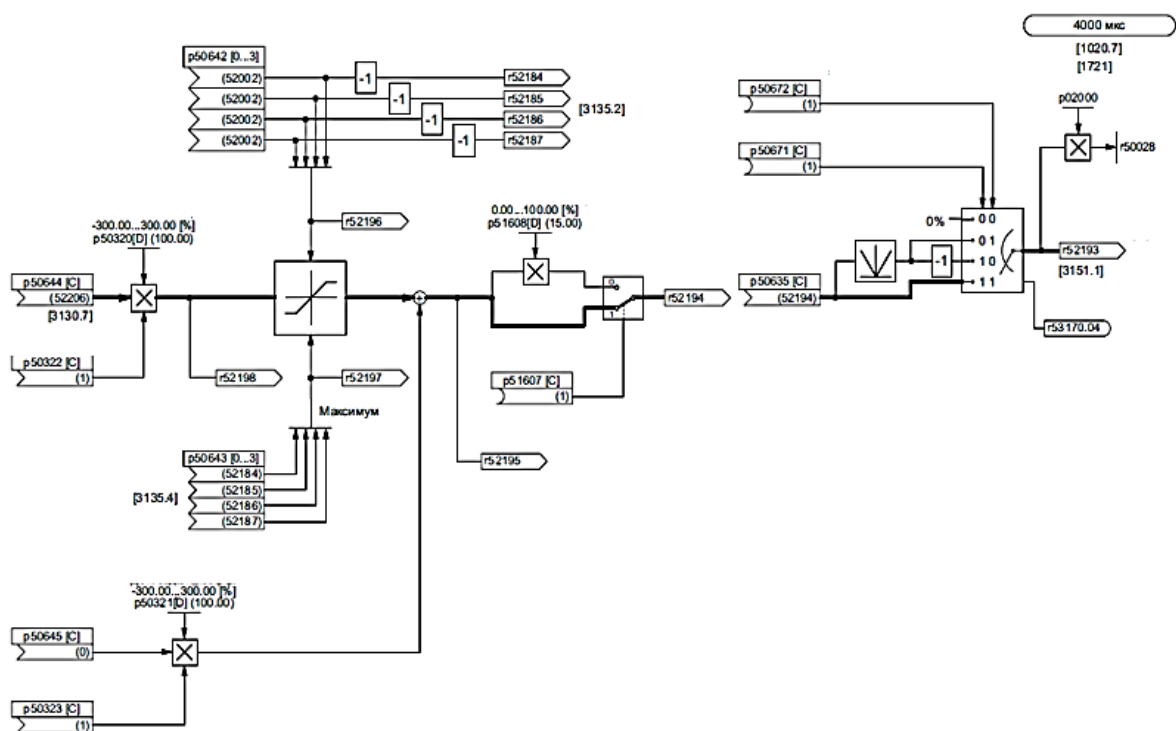


Рисунок 5.7 - Функціональна схема задавача інтенсивності

5.3.2 Регулятор швидкості

Регулятор швидкості порівнює задане значення і поточне значення швидкості i , в разі відхилення, виводить відповідне задане значення струму в регулятор струму (принцип: регулювання швидкості за допомогою допоміжного регулятора струму). Регулятор швидкості виконаний у вигляді P-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 P-регулятора швидкості можна встановити відповідно до поточного значення швидкості, поточного значення, різниці між встановленим значенням і поточним значенням.

5.3.3 Регулятор інтенсивності швидкості

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. 5.8, 5.9.

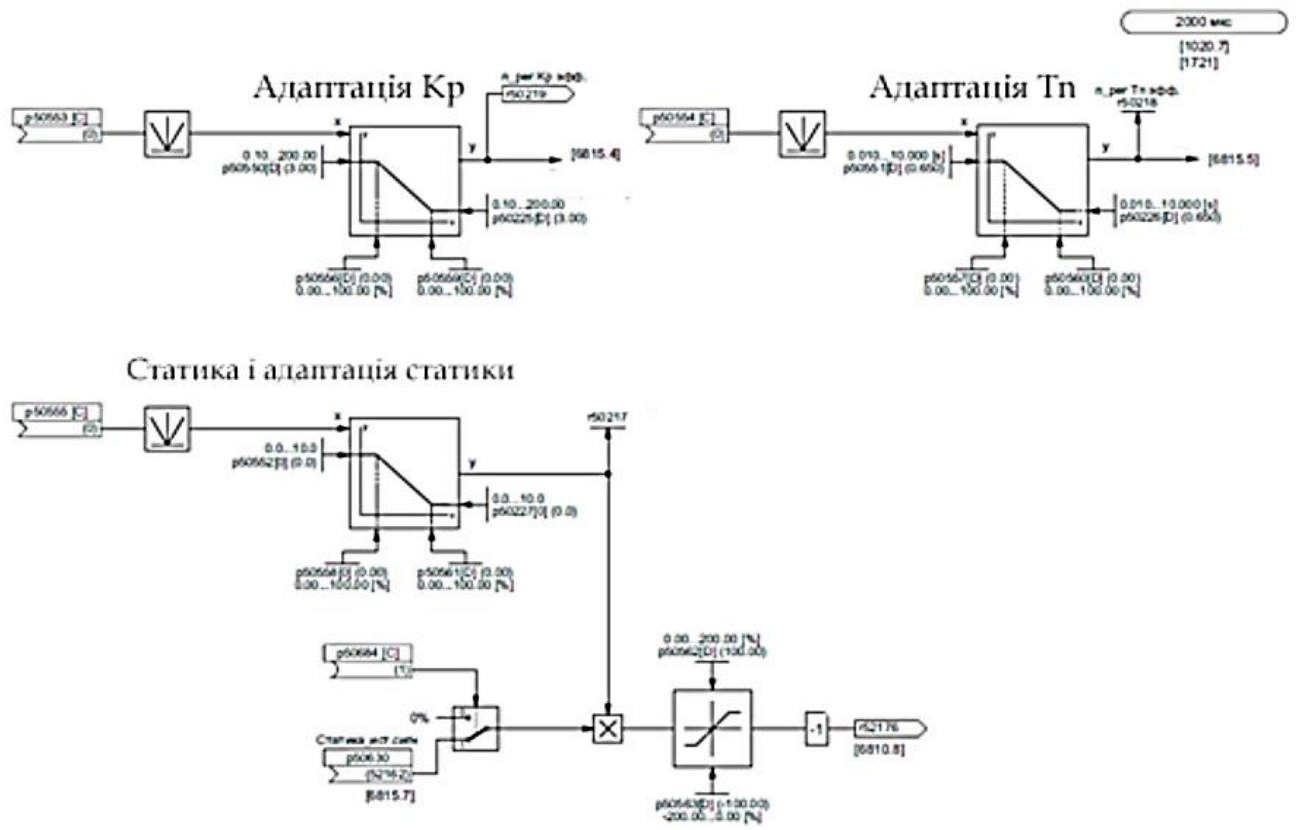


Рисунок 5.8 – Функціональна схема регулятора швидкості

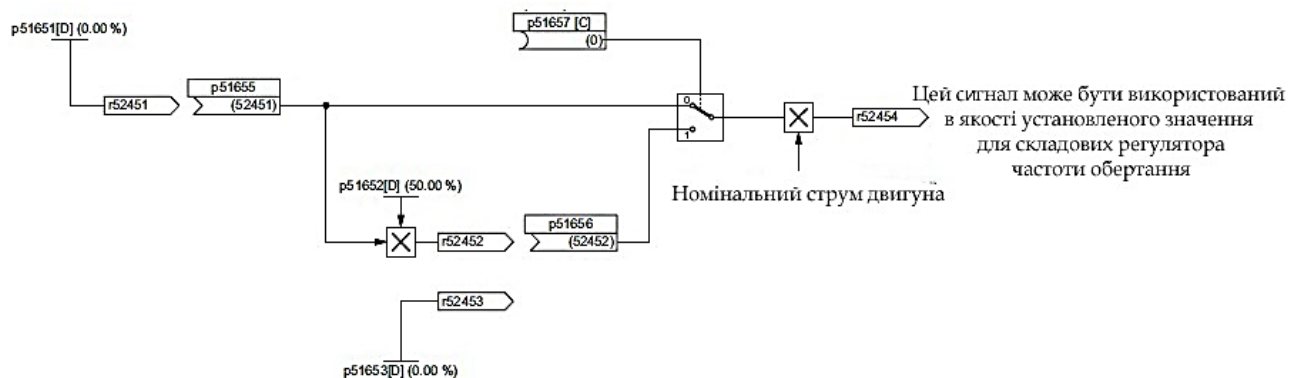


Рисунок 5.9 – Елементи функціональної схеми регулятора швидкості

5.3.4 Регулятор струму

Регулятор струму виконаний як контролер і самовідновлювальних і своєчасних керівництва по управлінню. При цьому компоненти P і I 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 вирази 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.

5.3.5 Аналогові виходи

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 посилання, а також як вторинне еталонне значення та значення обмеження.

Використовувані аналогові входи показані на рисунку 5.12.

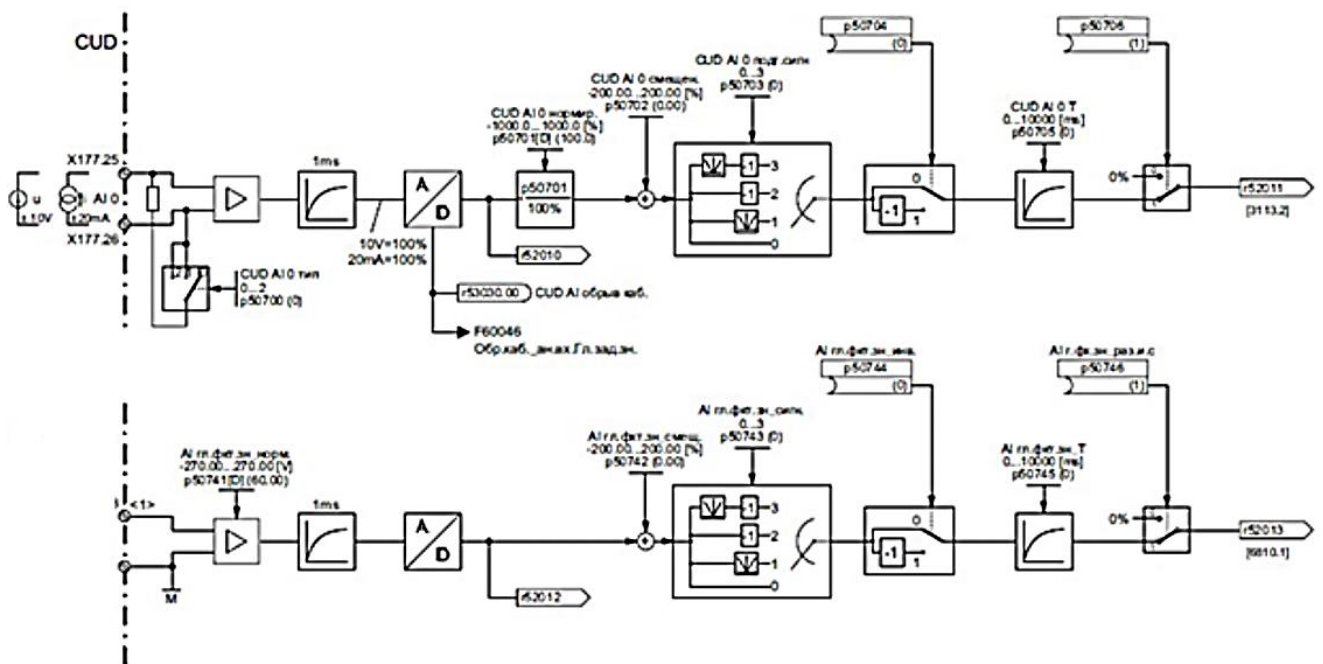


Рисунок 5.12 - Діаграма функцій аналогового входу

5.3.6 Сигнали на аналогових виходах

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 рисунку 5.13.

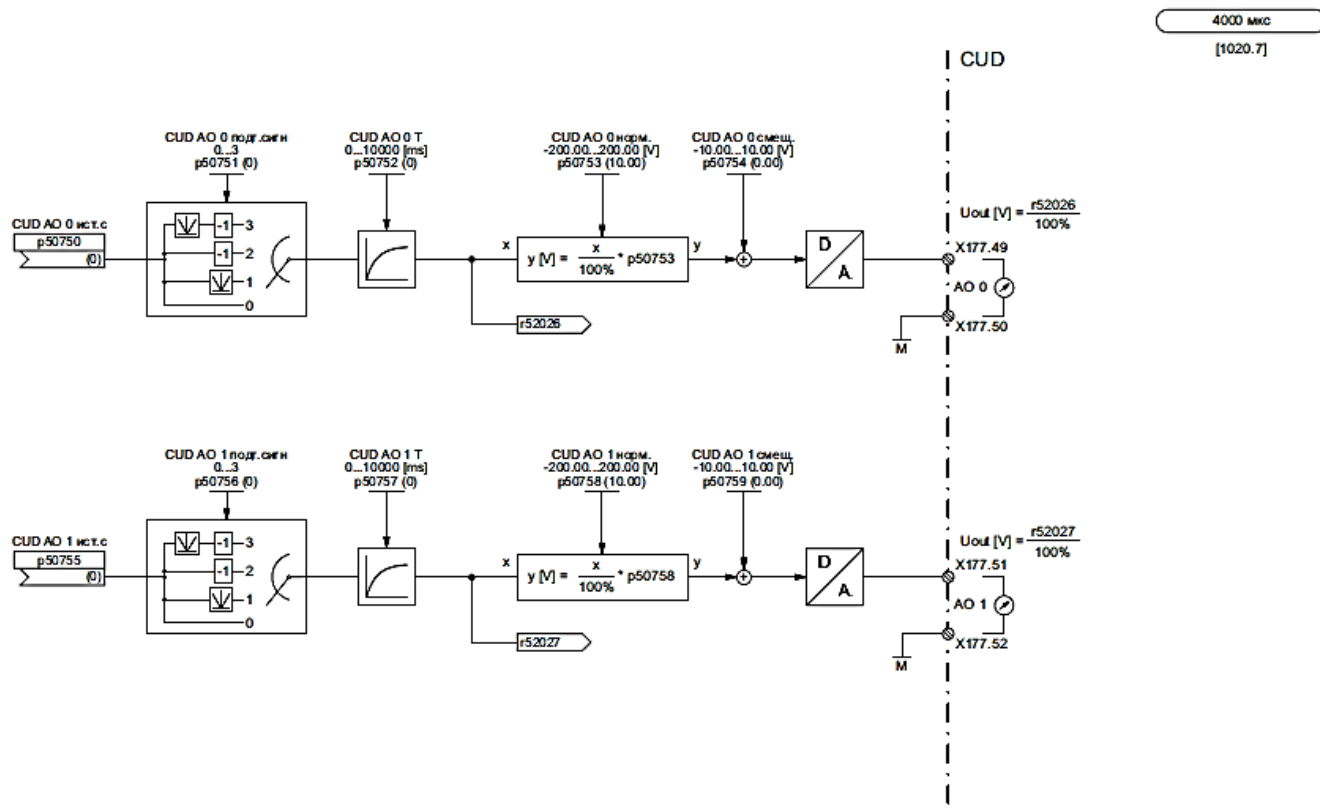


Рисунок 5.13 - Функціональна схема аналогових виходів

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 Контроль 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.

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 фурми показані на рисунках 5.18, 5.19. Усталене динамічне значення струму становить 480 А, максимальне значення струму - 530 А, а викид струму - за формулою (5.20):

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

$$\Delta I = \frac{530 - 480}{480} \cdot 100\% = 6.6\%.$$

Математична модель САР наведена на рисунках 5.16 і 5.17

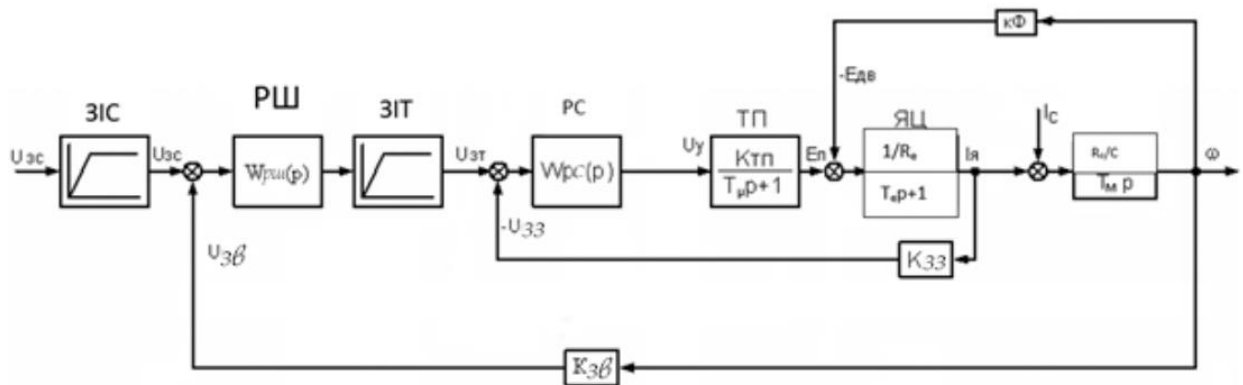


Рисунок 5.16 – Структурна схема САР електроприводу підйомного механізму вимірювальної

5.3.9 Опис структури імітаційної моделі

Для дослідження динамічних властивостей було зроблено модель у програмі MATLAB Simulink (рис. 5.17). Модель побудована за принципом підпорядкованого регулювання координат і складається з наступних функціональних блоків, параметри яких були розраховані у попередніх розділах:

1. **Контур струму:** Включає ПІ-регулятор струму, який налаштовано кращий покзни для компенсації електромагнітної сталої часу якоря. Тирсторний перетворювач (ТР) змодельовано як аперіодичну ланку першого порядку з коефіцієнтом підсилення та сталою часу. Це дозволяє врахувати дискретність роботи вентилів та затримку сигналу керування.

2. **Об'єкт керування (Двигун):** Представлений ланками, що описують електричну частину (якірне коло з опором та індуктивністю та механічну частину (інтегруюча ланка з електромеханічною сталою часу

3. **Контур швидкості:** Зовнішній контур містить ПІ-регулятор швидкості (RSp) із задавачем інтенсивності (ZIS) на вході. Задавач

інтенсивності обмежує прискорення приводу, формуючи трапецеїдальну діаграму швидкості, що є критично важливим для механізму переміщення фурми, де недопустимі ривки троса.

4. **Зворотні зв'язки:** У моделі реалізовано від'ємні зворотні зв'язки за струмом та швидкістю через коефіцієнт що відповідає реальним датчикам системи.

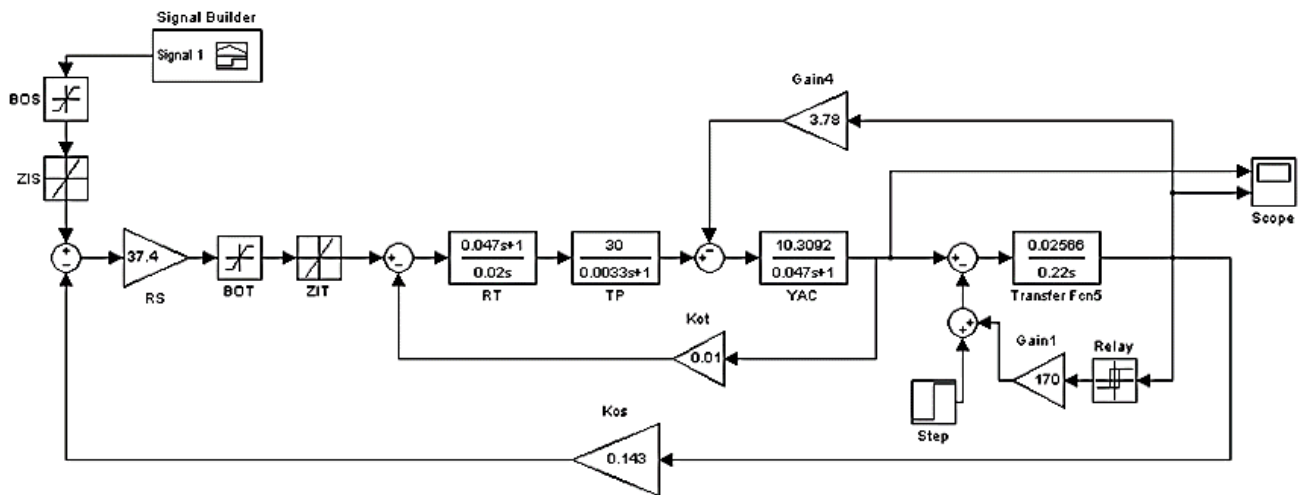


Рисунок 5.17 – Математична модель САР електроприводу підйому вимірювальної фурми

5.3.10 Процеси під час пуску

На рисунку 5.18 видно, як змінюється струм якоря $I(t)$ та швидкість обертання $w(t)$, коли ми розганяємось до потрібної швидкості. Якщо подивитись на графіки, то можна побачити три основні моменти:

Перший момент: Струм росте (0 – 0,05 секунди).

Коли ми даємо команду, струм якоря починає швидко зростати. Але завдяки спеціальному пристрою, який контролює інтенсивність, і добре налаштованому контуру струму, струм не росте надто швидко (менше 200 А/с). Це потрібно, щоб захистити двигун від пошкоджень. Струм досягає максимального рівня, який ми встановили в налаштуваннях SINAMICS DCM.

Другий момент: Розгін з однаковим прискоренням (0,05 – 0,55 секунди).

Тут струм якоря тримається майже на одному рівні, близько до максимально дозволеного ($I_{\max} \approx 530$ А). Оскільки струм майже не змінюється, то і момент двигуна постійний. А це означає, що швидкість обертання ω зростає рівномірно.

На графіку швидкості (внизу на рис. 5.18) видно, що вона зростає майже як по лінійці. Це говорить про те, що все працює добре, і немає різких змін моменту. Це дуже добре для того, щоб трос підйомного механізму був натягнутий рівномірно.

Третій момент: Виходимо на потрібну швидкість (після 0,55 секунди). Коли швидкість наближається до заданої, регулятор швидкості зменшує сигнал, і струм якоря падає до рівня, необхідного для підтримки ваги вантажу ($I_{\text{ст}} \approx 775$ А).

Як видно з графіків, все відбувається плавно, без різких стрибків. Це означає, що регулятор швидкості налаштований правильно.

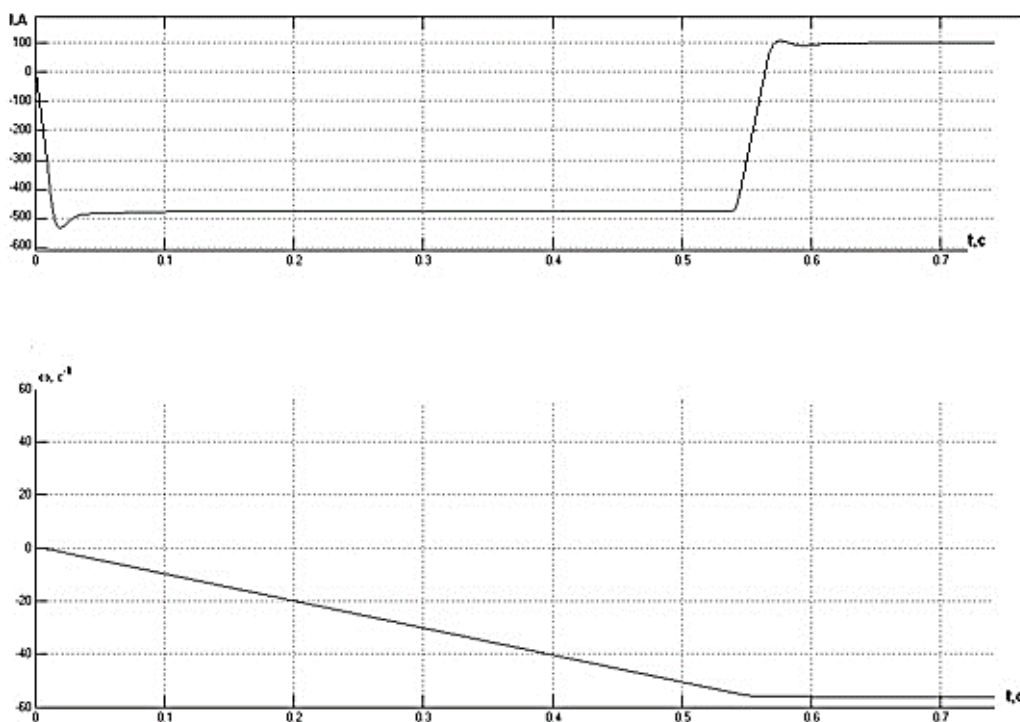


Рисунок 5.18 – Графіки залежностей $I = f(t)$ і $\omega = f(t)$ при розгоні до робочої швидкості при опущеній фурмі

5.3.11 Дослідження якості гальмування

На рисунку 5.19 видно, як механізм гальмує і точно зупиняється. Це дуже важливо, бо треба, щоб вимірювальна прилад чітко стала навпроти металу.

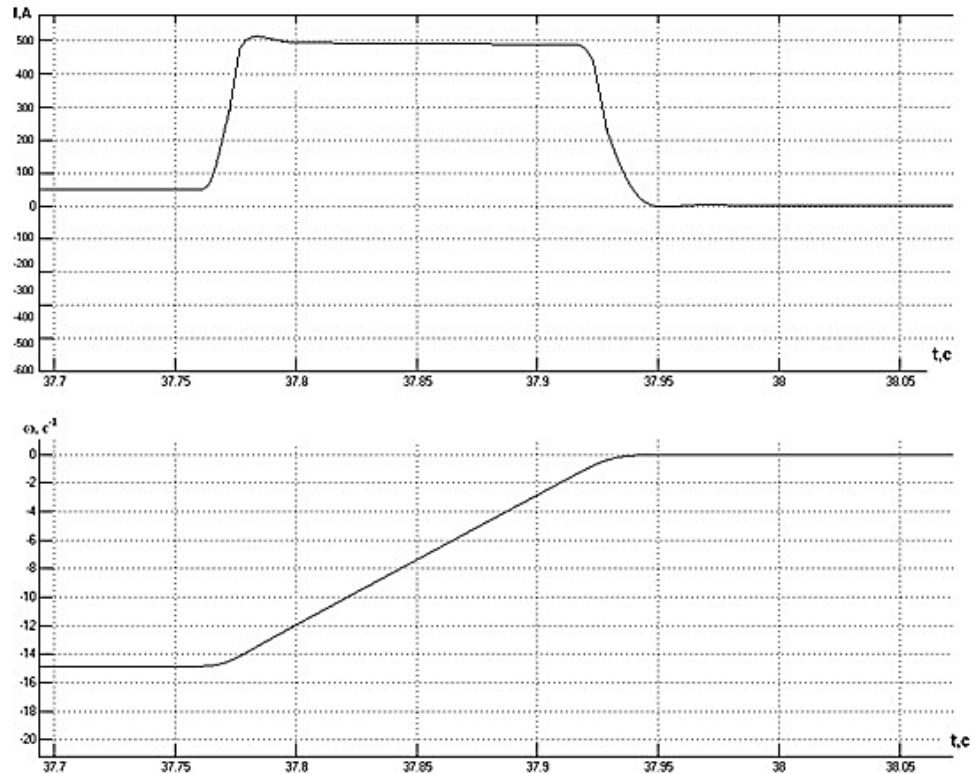


Рисунок 5.19 - Графіки залежностей $I = f(t)$ і $\omega = f(t)$ при гальмуванні механізму фурми

Як видно з таблиці, розроблена система керування яка повністю задовольняє технологічні вимоги. Невелике перевищення струму в динаміці (530 А) є допустимим для обраного двигуна (який допускає короткочасні перевантаження) та повністю перекривається потужністю обраного тиристорного перетворювача.

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

Висновки до розділу

У цьому розділі було проведено аналіз динамічних та статичних властивостей розробленої системи електропривода механізму переміщення вимірювальної фурми

1. Зробили математичну модель. Ми взяли просту схему і зробили імітацію системи автоматичного управління (САУ) електроприводом в MATLAB Simulink. Це дало нам змогу розглянути, як система поводить себе за різних умов, без потреби все тестувати наживо на початкових етапах.

2. Було розглянуто, що відбувається під час перехідних процесів. Ми отримали графіки, які показують, як змінюється швидкість (ω) та струм (I), коли все розганяється до робочої швидкості та коли фурма опускається. Графіки показали, що система плавно регулює координати та чітко слідує заданому шляху.

3. Оцінили, наскільки добре йде регулювання. Результати моделювання показали, що перехідні процеси відбуваються дуже добре. Струм стабілізується на рівні 480 А. Найбільше значення струму під час перехідних процесів – 530 А. Перерегулювання за струмом (ΔI), за нашими розрахунками, становить 6,6%.

4. Підтвердили, що система працює відповідно до норм технологічного процесу. Перерегулювання в 6,6% – це нормально для таких електромеханічних систем і означає, що ми правильно налаштували регулятори і система стійка до різних збоїв. Обрана нами структура управління забезпечує потрібну швидкість та точність для позиціонування вимірювальної фурми на сталеплавильному виробництві. Отже, комп'ютерне моделювання показало, що наш електропривод може працювати і його варто впроваджувати.

6 РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ ЗАХИСТУ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

6.1 Аналіз умов роботи та класифікація аварійних режимів

Електропривод механізму переміщення вимірювальної фурми функціонує в умовах сталеплавильного цеху, які відносяться до категорії особливо складних з точки зору експлуатації електрообладнання. Основними дестабілізуючими факторами є висока температура навколишнього середовища, наявність струмопровідного пилю, вібрації від роботи суміжних механізмів (конвертера, кранів) та циклічний характер навантаження.

Надійність роботи системи автоматизованого контролю (САК) безпосередньо залежить від правильно спроектованої системи захисту. Згідно з ПУЕ [17] та технічними вимогами до електроприводів металургійних агрегатів, система захисту повинна забезпечувати миттєве відключення живлення при виникненні аварійних ситуацій для запобігання руйнуванню обладнання та травмуванню персоналу.

Для електроприводу на базі обраного двигуна постійного струму Д814У2 та тиристорного перетворювача типу КТЕ можливі наступні аварійні режими:

1. Короткі замикання (КЗ). Це найбільш небезпечний режим, який виникає при порушенні ізоляції між струмоведучими частинами різних фаз або між фазою та корпусом. Струми КЗ можуть досягати значень у десятки кілоампер, що призводить до динамічних ударів по обмотках трансформатора та двигуна, а також до термічного руйнування ізоляції та напівпровідникових структур тиристорів.

2. Перевантаження по струму. Виникають при перевищенні моментом опору номінального моменту двигуна. У випадку механізму фурми це може статися через заклинювання каретки на напрямних рейках, налипання металу або шлаку на фурму, а також при порушенні технологічного циклу (занадто довге перебування в зоні розплаву). Тривале перевантаження викликає перегрів обмоток якоря вище допустимої температури класу ізоляції, що різко скорочує термін служби двигуна.

3. Перенапруги. Комутаційні перенапруги виникають в процесі роботи тиристорного перетворювача при замиканні та розмиканні силових ключів. Зовнішні перенапруги можуть приходити з мережі живлення. Вони небезпечні для р-n переходів тиристорів.

4. Зникнення поля збудження. Для двигуна незалежного збудження обрив ланцюга обмотки збудження при підключеному якорі призводить до аварійного зростання швидкості (ω прямує до нескінченності). Це загрожує механічним руйнуванням якоря (так званий "рознос" двигуна).

5. Технологічні аварії. До них відносяться перепідйом фурми (вихід за межі робочої зони), ослаблення канату лебідки, відмова гальмівної системи.

6.2 Захист силових кіл змінного струму та вибір кабельної продукції

Захист силового вводу здійснюється автоматичним вимикачем, який поєднує функції захисту від струмів короткого замикання (електромагнітний розчіплювач) та захисту від перевантажень (тепловий розчіплювач).

6.2.1 Розрахунок та вибір автоматичного вимикача

Вихідні дані для вибору апарату захисту базуються на характеристиках силового трансформатора ТСЗП-250/0,7УЗ, обраного в попередніх розділах.

- Номінальна потужність трансформатора: $S_{tr} = 250$ кВА.
- Напруга первинної обмотки: $U_1 = 380$ В.
- Номінальний струм первинної обмотки: $I_{1nom} = 357$ А.

Умова вибору за номінальним струмом:

$$I_{n.aut} \geq I_{load.max} \quad (6.1)$$

Враховуючи можливі технологічні перевантаження та коефіцієнт запасу, рівний 1,1:

$$I_{n.aut} \geq 1,1 \cdot 357 = 392,7 \text{ А} .$$

Умова вибору уставки електромагнітного розчіплювача (відсічки) I_{em} . Відсічка повинна бути відлаштована від пускових струмів двигуна. Максимальний струм при пуску обмежений системою керування на рівні $\lambda =$

2,5 від номінального:

$$I_{\text{peak}} = I_{1\text{nom}} \cdot 2,5 = 357 \cdot 2,5 = 892,5 \text{ А} \quad (6.2)$$

Струм спрацювання відсічки вибирається з коефіцієнтом надійності

$$K_{\text{над}} = 1,25:$$

$$I_{\text{em}} \geq 1,25 \cdot I_{\text{peak}} = 1,25 \cdot 892,5 = 1115,6 \text{ А} \quad (6.3)$$

На основі розрахунків обираємо автоматичний вимикач серії ВА57-39 (виробництва "Контактор" або аналог) з наступними характеристиками:

- Номінальний струм корпусу: 630 А.
- Номінальний робочий струм розчіплювача: 400 А.
- Тип розчіплювача: комбінований (тепловий + електромагнітний).
- Уставка електромагнітного розчіплювача: регульована, приймаємо $4 \cdot I_n = 1600 \text{ А}$, що задовольняє умові $1600 > 1115,6 \text{ А}$.
- Гранична комутаційна здатність (I): 40 кА (достатньо для цехових мереж).

6.2.2 Вибір кабельної лінії живлення

Надійність захисту також залежить від правильно обраного перерізу кабелю. Якщо переріз занижений, ізоляція перегріватиметься навіть при номінальних струмах, що призведе до КЗ.

Розрахунковий струм лінії: $I_p = 357 \text{ А}$. Для прокладання в умовах металургійного цеху (підвищена температура, можливість механічних пошкоджень) обираємо кабель з мідними жилами марки ВВГнг (вінілова ізоляція, вінілова оболонка, негорючий) у металевому лотку або трубі.

Згідно з ПУЕ (Таблиця 1.3.4), для трьохжильного мідного кабелю, прокладеного відкрито, допустимий тривалий струм повинен перевищувати розрахунковий. Обираємо кабель перерізом 185 мм^2 , для якого допустимий струм становить $I_{\text{доп}} = 428 \text{ А}$.

Перевірка умови:

$$I_{\text{доп}} (428 \text{ А}) > I_p (357 \text{ А})$$

Таким чином, умова виконується.

Перевірка на падіння напруги ΔU . Допустиме падіння напруги для силових мереж становить 5%.

$$\Delta U = (\sqrt{3} \cdot I_p \cdot L \cdot (R_0 \cdot \cos\varphi + X_0 \cdot \sin\varphi) / U_{\text{ном}}) \cdot 100\% \quad (6.4)$$

Приймаємо довжину лінії $L = 50$ м (від цехової підстанції до шафи керування). Активний та реактивний опір кабелю 185 мм^2 : $R_0 \approx 0,099 \text{ Ом/км}$, $X_0 \approx 0,063 \text{ Ом/км}$. Розрахунок показує, що втрати напруги будуть значно меншими за 5%, отже, обраний кабель підходить.

6.3 Розробка захисту перетворювального агрегату

Тиристорний перетворювач КТЕ-320/440 є найбільш чутливою ланкою електроприводу. Напівпровідникові прилади мають малу теплову інерцію, тому стандартні автоматичні вимикачі не встигають захистити їх при "глухому" короткому замиканні.

6.3.1 Захист від внутрішніх коротких замикань

Для захисту тиристорів від струмів КЗ, що виникають при пробіі плеча моста або зриві інвертування, застосовуються швидкодіючі плавкі запобіжники. Вони повинні перегоріти швидше, ніж кристал тиристора нагріється до критичної температури руйнування.

Вибір здійснюється за умовою захисного показника (інтеграл Джоуля). У комплекті перетворювача КТЕ штатно встановлюються запобіжники серії ПП57 або аналогічні. Номінальний струм плавкої вставки обирається за середнім струмом через тиристор:

$$I_{\text{vst}} = I_{\text{d.nom}} / \sqrt{3} \approx 320 / 1,73 = 185 \text{ А} \quad (6.6)$$

Враховуючи циклічне навантаження та умови охолодження, обираємо найближчий стандартний номіналом 250 А.

6.3.2 R-C ланцюги (демпфуючі кола)

Кожен тиристор силового моста шунтується R-C ланцюгом. Це необхідно для:

1. Обмеження швидкості наростання прямої напруги (du/dt), щоб запобігти самовільному відкриванню тиристора.

2. Розсіювання енергії комутаційних перенапруг, що виникають при запиранні тиристорів (ефект розсмоктування носіїв заряду). Типові параметри для силових блоків КТЕ: резистор 10–30 Ом (потужністю 25–50 Вт) та конденсатор 0,25–0,5 мкФ (на напругу не менше 1000 В).

6.4 Комплексна система захисту електродвигуна

Електродвигун Д814У2 є дорогим та відповідальним вузлом. Його захист реалізується комбінованим способом: апаратними засобами та програмними функціями мікропроцесорної системи керування.

6.4.1 Максимальний струмовий захист (відсічка)

Цей вид захисту призначений для запобігання виникненню "кругового вогню" на колекторі при різких кидках струму. Захист реалізований програмно в блоці керування CUD. Сигнал від датчиків струму (трансформаторів струму на вході змінного струму або шунта в колі якоря) надходить до регулятора. Якщо миттєве значення струму перевищує уставку:

$$I_{\text{cut}} = 2,5 \cdot I_{\text{ном}} = 2,5 \cdot 274 = 685 \text{ А} \quad (6.7)$$

Система керування миттєво (за час менше 10 мс) зсуває кути керування тиристорами в інверторну область ($\alpha \rightarrow 150^\circ$), що призводить до швидкого спадання струму до нуля і відключення приводу.

6.4.2 Тепловий захист

Захист від перевантаження, яке не досягає рівня відсічки, але триває довго, базується на тепловій моделі двигуна. Мікропроцесор перетворювача в реальному часі обчислює інтеграл квадрата струму. Якщо розрахункова температура перевищує допустиму для класу ізоляції обмоток, привід спочатку видає попередження оператору, а потім здійснює аварійну зупинку.

6.4.3 Захист від втрати поля (Field Loss)

Для двигуна незалежного збудження критично важливо контролювати наявність струму в обмотці збудження. У колі збудника (КТЕ-7/220)

встановлено реле мінімального струму (або використовується внутрішній компаратор перетворювача). Уставка спрацювання:

$$I_{\min.f} = 0,8 \cdot I_{f.\text{nom}} . \quad (6.8)$$

Якщо струм збудження падає нижче цього рівня, блок керування блокує імпульси на якірний перетворювач і відключає головний контактор, запобігаючи розгону двигуна.

6.5 Технологічні захисти та блокування механізму фурми

Специфіка роботи вимірювальної фурми (переміщення над розплавленим металом, точність позиціонування) вимагає ряду специфічних захистів.

1. Кінцеві вимикачі переміщення: Схема автоматизації передбачає використання індуктивних або механічних кінцевих вимикачів серії ВУ-222 або аналогічних.

2. Захист від слабини канату: При опусканні фурми можлива ситуація, коли сама фурма застрягне у напрямних (через викривлення або шлак), а лебідка продовжить розмотувати трос. Це призведе до утворення петель і заплутування троса. Для захисту встановлюється важільний вимикач, який контролює натяг канату. При зникненні натягу привід опускання негайно зупиняється.

3. Електромагнітне гальмо: На валу двигуна встановлено нормально-замкнене колодкове гальмо (наприклад, ТКГ-300). Його електромагніт підключається паралельно якорю двигуна або живиться від окремого випрямляча, керованого перетворювачем. При зникненні напруги (аварія, відключення світла) пружини гальма автоматично затискають шків, утримуючи фурму від падіння під власною вагою.

6.6 Охорона праці та техніка безпеки при експлуатації

Розробка системи захисту була б неповною без розгляду організаційних та технічних заходів безпеки. Експлуатація електроприводу здійснюється відповідно до вимог НПАОП 40.1-1.21-98 «Правила безпечної експлуатації

електроустановок споживачів» [17].

6.6.1 Заземлення

Для захисту персоналу від ураження електричним струмом при пошкодженні ізоляції всі металеві неструмоведучі частини електрообладнання підлягають заземленню. До них відносяться:

- Корпус електродвигуна Д814У2.
- Корпус шафи тиристорного перетворювача.
- Каркас пульта управління.
- Металеві конструкції лебідки та напрямні рейки.

В цехових мережах з глухозаземленою нейтраллю (система TN-C-S або TN-S) заземлення виконується шляхом приєднання корпусів до захисного провідника РЕ. Опір заземлюючого пристрою не повинен перевищувати 4 Ом (для мережі 380 В).

Розрахунок заземлюючого провідника: переріз РЕ-провідника вибирається залежно від перерізу фазного провідника ($S_{\text{фаз}} = 185 \text{ мм}^2$).

Згідно з ПУЕ [17], якщо $S_{\text{фаз}} > 35 \text{ мм}^2$, то переріз захисного провідника $S_{\text{РЕ}}$ повинен бути не менше $S_{\text{фаз}} / 2$.

$$S_{\text{РЕ}} = 185 / 2 = 92,5 \text{ мм}^2.$$

Обираємо найближчий стандартний переріз 95 мм^2 (або використовуємо сталеву смугу $40 \times 4 \text{ мм}$, прокладену по конструкціях, що еквівалентно за провідністю).

6.6.2 Організаційні заходи безпеки

До обслуговування електроприводу допускається персонал, який:

- Пройшов медичний огляд.
- Пройшов навчання та перевірку знань з електробезпеки і має групу допуску не нижче III.
- Пройшов інструктаж на робочому місці.

При проведенні ремонтних робіт на електроприводі фурми необхідно

виконати наступні технічні заходи:

1. Вимкнення напруги: Відключити автоматичний вимикач ВА57-39 та видимий розрив (якщо є рубильник).

2. Запобігання помилковому вмиканню: На приводах комутаційних апаратів вивісити заборонні плакати «Не вмикати! Працюють люди», заблокувати рукоятки замками.

3. Перевірка відсутності напруги:

За допомогою повіреного покажчика напруги переконатися у відсутності напруги на струмоведучих частинах.

4. Встановлення заземлення: Накласти переносні заземлення на відключені струмоведучі частини з усіх боків, звідки може бути подана напруга.

6.6.3 Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ)

Персонал, що обслуговує електропривод, повинен бути забезпечений:

- Діелектричними рукавичками (для операцій перемикання).
- Діелектричним взуттям або килимками біля щитів керування.
- Захисними касками (враховуючи роботу в цеху з крановими вантажами).
- Інструментом з ізольованими ручками.

Висновки до розділу

У даному розділі розроблено комплексну систему захисту електроприводу механізму переміщення вимірювальної фурми.

1. Проведено аналіз аварійних режимів та обрано апаратуру захисту силових кіл. Обрано автоматичний вимикач типу ВА57-39 з номінальним струмом 400 А та кабель живлення ВВГнг 3x185+1x95.

2. Обґрунтовано вибір швидкодіючих запобіжників для захисту тиристорного перетворювача КТЕ.

3. Описано функціональні можливості мікропроцесорної системи захисту двигуна (відсічка, теплова модель, контроль поля).

4. Розроблено схему технологічних блокувань з використанням кінцевих вимикачів, що виключає аварійні ситуації механічного характеру.

5. Визначено заходи з електробезпеки та розраховано параметри заземлюючого пристрою, що забезпечує безпечні умови праці для обслуговуючого персоналу.

ВИСНОВОК

У даній магістерській роботі виконано розроблення та дослідження електропривода механізму переміщення вимірювальної фурми, що застосовується у сталеплавильному виробництві з використанням кисневих конвертерів. Актуальність теми обумовлена необхідністю підвищення точності контролю параметрів плавлення сталі, зменшення тривалості технологічного циклу та підвищення енергоефективності електроприводних систем у складних умовах металургійного виробництва.

У ході роботи було проаналізовано технологічний процес виплавки сталі в кисневому конвертері та визначено роль механізму вимірювальної фурми у забезпеченні оперативного контролю температури і хімічного складу рідкого металу. Розглянуто конструкцію, принцип дії та особливості експлуатації механізму вимірювальної фурми, що працює в умовах високих температур, запиленості та вібрацій.

На основі вихідних технічних даних виконано розрахунок статичних і динамічних навантажень, побудовано тахограму та навантажувальну діаграму електропривода. Обґрунтовано вибір електродвигуна постійного струму типу Д814У2, який забезпечує необхідний запас потужності, високу перевантажувальну здатність і відповідає вимогам надійної роботи в умовах металургійного виробництва. Проведені перевірки показали, що обраний двигун не перегрівається та не перевантажується у всіх режимах роботи механізму.

Здійснено вибір основного силового електрообладнання, зокрема тиристорного перетворювача та силового трансформатора. Розраховано регульовальні характеристики тиристорного перетворювача, що підтвердило можливість плавного та надійного регулювання швидкості електропривода у заданих межах. Запропонована система електроживлення та збудження двигуна забезпечує стабільну роботу привода і відповідає вимогам безпеки та енергоефективності.

У роботі розроблено структуру системи автоматичного керування

електроприводом, виконано аналіз її динамічних властивостей та обґрунтовано вибір регуляторів струму і швидкості. Запропонована система керування забезпечує необхідну точність позиціонування вимірювальної фурми, обмеження прискорень та струмів, а також надійну роботу в реверсивних і переривчастих режимах.

Отримані результати підтверджують, що розроблений електропривод відповідає всім технічним вимогам завдання, забезпечує підвищення точності вимірювань, скорочення тривалості технологічного циклу та зниження енергетичних витрат. Запропоновані технічні рішення можуть бути рекомендовані для практичного впровадження на металургійних підприємствах та використані при модернізації існуючих систем електроприводів вимірювальних механізмів.

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. 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
17. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). – Х.: Форт, 2015.
18. Leonhard W. Control of Electrical Drives. – 3rd ed. – Berlin: Springer-Verlag, 2001. – 460 p.
19. Bose B.K. Modern Power Electronics and AC Drives. – Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2002. – 710 p.
20. Siemens AG. SINAMICS DCM DC Drives System Overview. – Germany, 2018. – 210 p.
21. Корнійчук О.В., Єрмілова Н.В. Модернізація електроприводу механізму переміщення вимірювальної фурми у сталеплавильному виробництві / Корнійчук О.В., Єрмілова Н.В. // Збірник наукових праць за матеріалами XI Всеукраїнської науково-практичної конференції «Електронні та мехатронні системи: теорія, інновації, практика». (Полтава, 18 грудня 2025 р.) – Полтава: Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2025.
22. Шефер О.В., Єрмілова Н.В. Методичні рекомендації до виконання кваліфікаційної роботи для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня зі спеціальності G3 «Електрична інженерія» (141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка») – Полтава: Національний університет імені Юрія Кондратюка, 2025. – 26 с.

ДОДАТОК А

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

Кафедра автоматики, електроніки та телекомунікацій

**Розроблення та дослідження електропривода механізму переміщення
вимірювальної фурми у стагелавильному виробництві**

Кваліфікаційна робота магістра

Виконав:

Студент гр. 601МЕ

Корнійчук О.В.

Керівник:

Доцент, к.т.н.

Єрмілова Н.В.

Полтава 2026

Актуальність теми Сучасні тенденції в металургії, зокрема в процесах виплавки сталі, вимагають постійного вдосконалення технологій і обладнання, що забезпечує високу точність і стабільність виробничих параметрів. Одним із ключових аспектів є ефективне управління механізмами, що забезпечують точний контроль параметрів плавлення сталі в реальному часі. Зважаючи на постійний розвиток виробництва, а також потребу у зниженні енергоспоживання і підвищенні ефективності, питання розробки нових електроприводів для таких механізмів є вкрай важливим. Ця проблема є актуальною для металургійних підприємств.

Метою роботи є розробка ефективного електроприводу для механізму переміщення вимірювальної фурми в процесі плавлення сталі. Це дозволить забезпечити точний контроль за ключовими параметрами, такими як температура і хімічний склад сталі, що, у свою чергу, сприятиме підвищенню якості кінцевого продукту і зниженню енергетичних витрат.

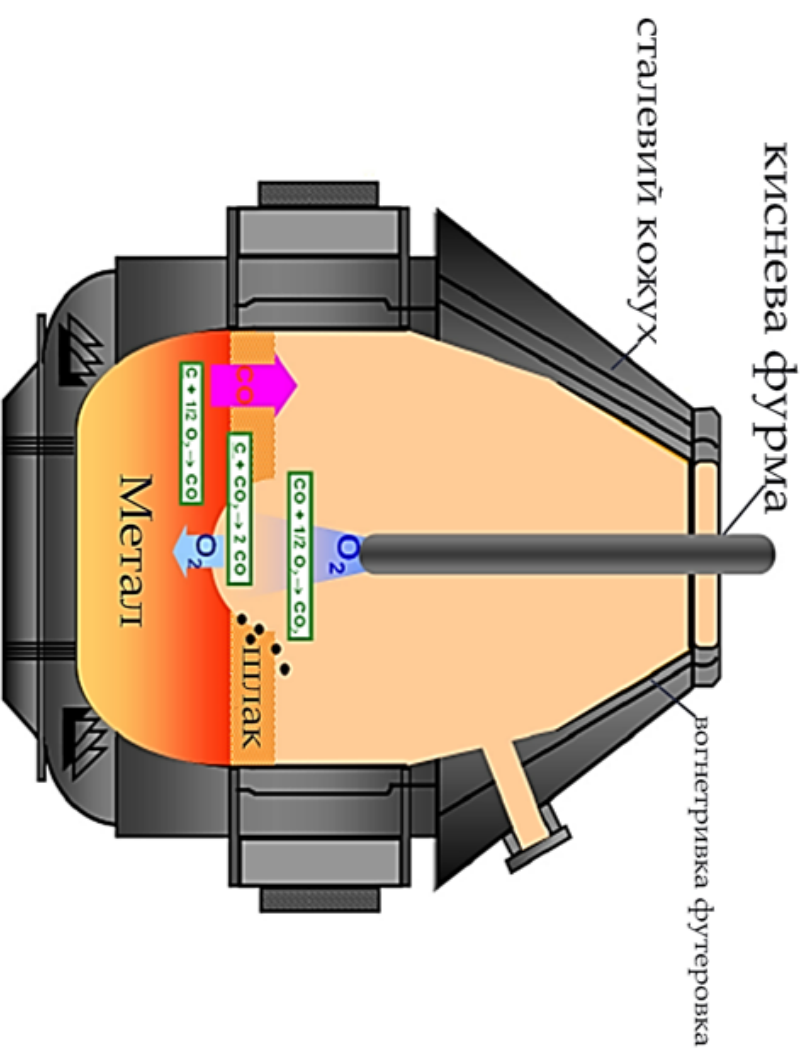
Об'єктом дослідження є процес оперативного контролю параметрів плавки (температури та хімічного складу) рідкої сталі в кисневому конвертері

Предметом дослідження є електропривод механізму переміщення вимірювальної фурми, його структура, режими роботи та система автоматичного керування, призначені для забезпечення контролю параметрів процесу плавлення сталі.

Будова кисневого конвертора

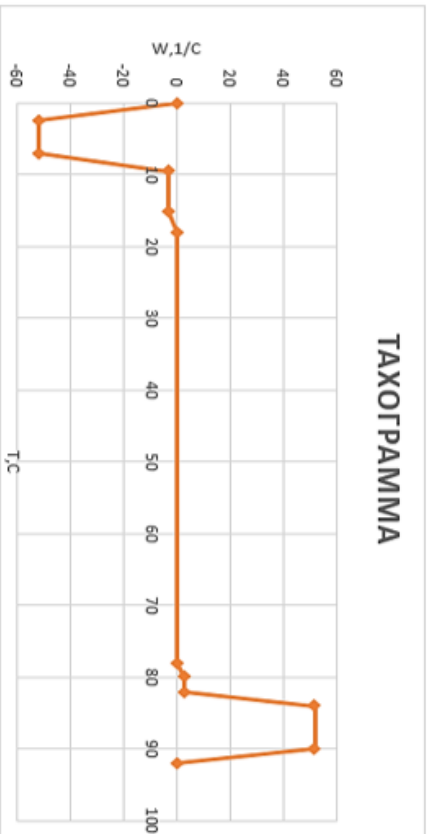
3

Кисневий конвертер складається з металевого корпусу з вогнетривкою футерівкою, механізму повороту, системи подачі кисню та газовідведення. Контроль параметрів плавлення здійснюється за допомогою вимірювальної фурми, робота якої потребує точного та надійного електропривода.



Характеристики роботи двигуна вимірювальної фурми

4

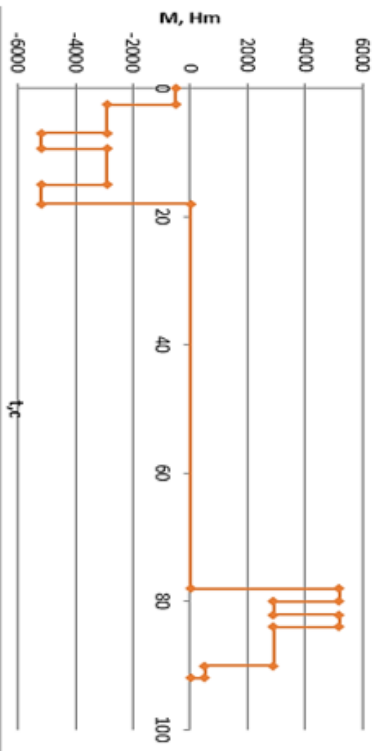


Тахограма відображає зміну кутової швидкості електродвигуна в часі протягом одного повного циклу роботи механізму.

На початку циклу здійснюється розгін двигуна до робочої швидкості, що відповідає швидкості переміщення фурми. Час розгону забезпечує обмеження динамічних навантажень і відповідає допустимому прискоренню механізму. Після розгону фурма рухається з постійною робочою швидкістю на ділянці опускання до висоти 5 м над рівнем металу. Далі на тахограмі видно **зниження швидкості до малої – 0,12 м/с**, що необхідно для точного та безпечного підведення зонда до рідкого металу.

Спочатку здійснюється підйом з **малою швидкістю**, після чого відбувається **розгін до робочої швидкості** та рух у верхнє положення. Наприкінці циклу реалізується **гальмування двигуна до нульової швидкості**.

Таким чином, тахограма має чітко виражені ділянки розгону, усталеного руху, зниження швидкості та гальмування, що відповідає технологічному алгоритму роботи механізму.

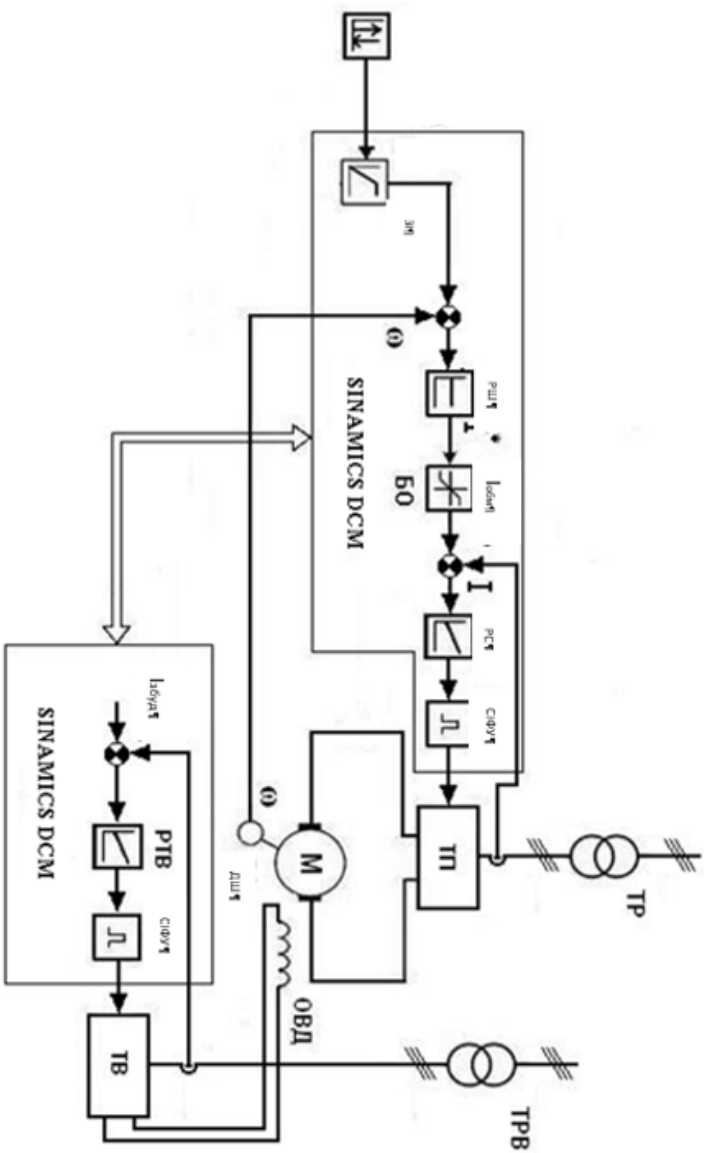


Навантажувальна діаграма показує зміну крутного моменту електродвигуна протягом циклу опускання та підйому вимірювальної фурми. Найбільше навантаження виникає під час підйому фурми, коли пусковий момент досягає **5371 Н·м**. При опусканні привод працює в гальмівному режимі з меншим навантаженням. Аналіз діаграми підтверджує, що обраний електродвигун працює в допустимих межах по моменту та не перевантажується.

Структурна схема системи автоматичного регулювання електропривода

5

Наведено структурну схему системи автоматичного регулювання електропривода механізму підйому за принципом підпорядкованого регулювання та містить **контур струму якоря та контур швидкості**. Внутрішній контур струму забезпечує швидку реакцію привода та обмеження струму в перехідних режимах, а зовнішній контур швидкості формує заданий закон руху фурами. Така структура забезпечує стійку роботу електропривода, необхідну точність регулювання швидкості та виконання технологічних вимог.

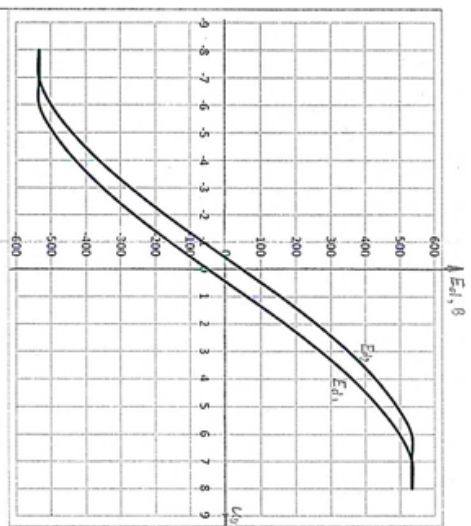


Тиристорний перетворювач електропривода: схема та регульовальні характеристики

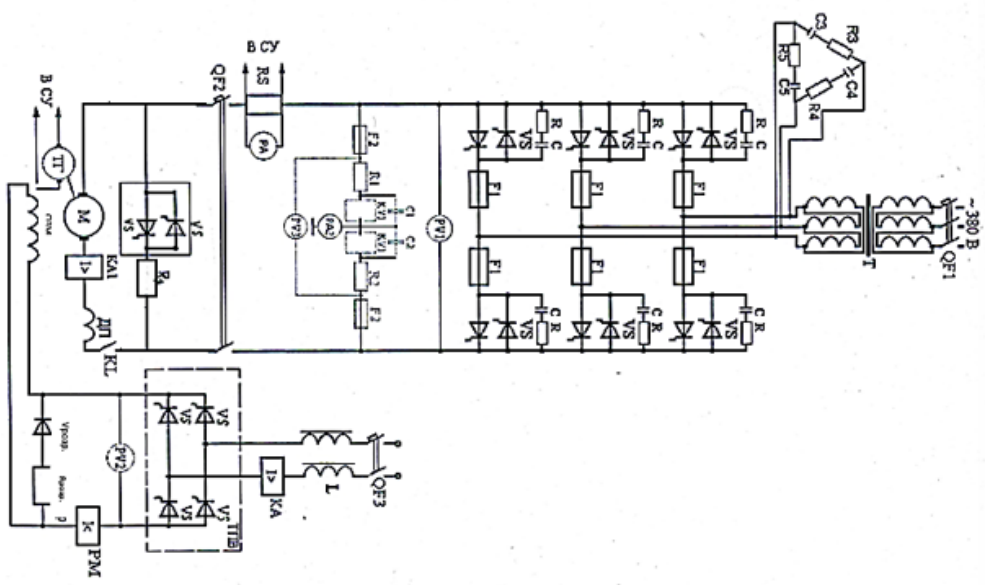
Силова схема тиристорного перетворювача, що

забезпечує регулювання напруги живлення електродвигуна постійного струму шляхом керування кутом відкриття тиристорів. Схема реалізує реверсивний режим роботи та забезпечує надійну роботу електропривода в динамічних режимах.

Регульовальні характеристики тиристорного перетворювача, які відображають залежність вихідної напруги від керуючого сигналу. Характеристики підтверджують можливість плавного регулювання швидкості електродвигуна та стабільність роботи системи керування.



Силова схема тиристорного перетворювача

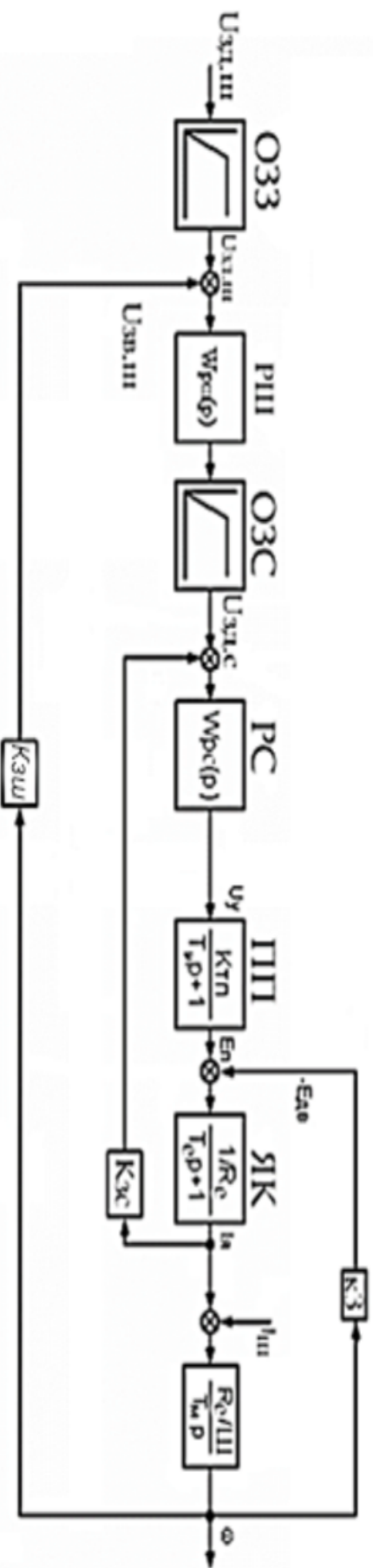


Регульовальні характеристики тиристорного перетворювача

Структурна схема електроприводу підйому вимірювальної фурми

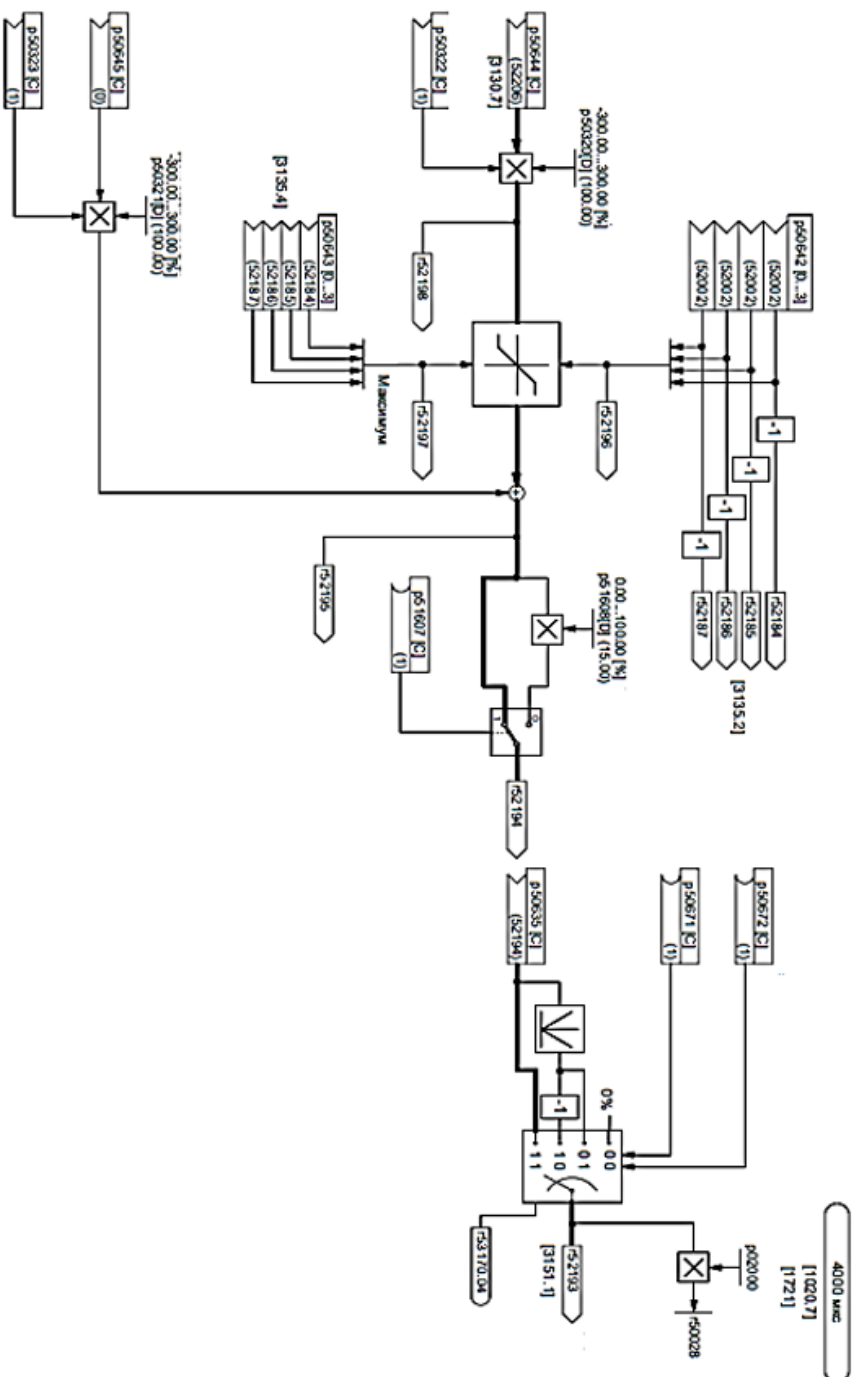
7

Структурна схема електропривода описує роботу всієї системи керування швидкістю та струмом двигуна. На вході знаходиться **обмежувач завдання швидкості (ОЗЗ)**, який не дозволяє подавати різкі стрибки сигналу. Він робить завдання плавним, щоб електропривід не ривками набірав швидкість. Після цього сигнал надходить на **суматор**, де порівнюється з реальною швидкістю двигуна, що приходить зі зворотного зв'язку



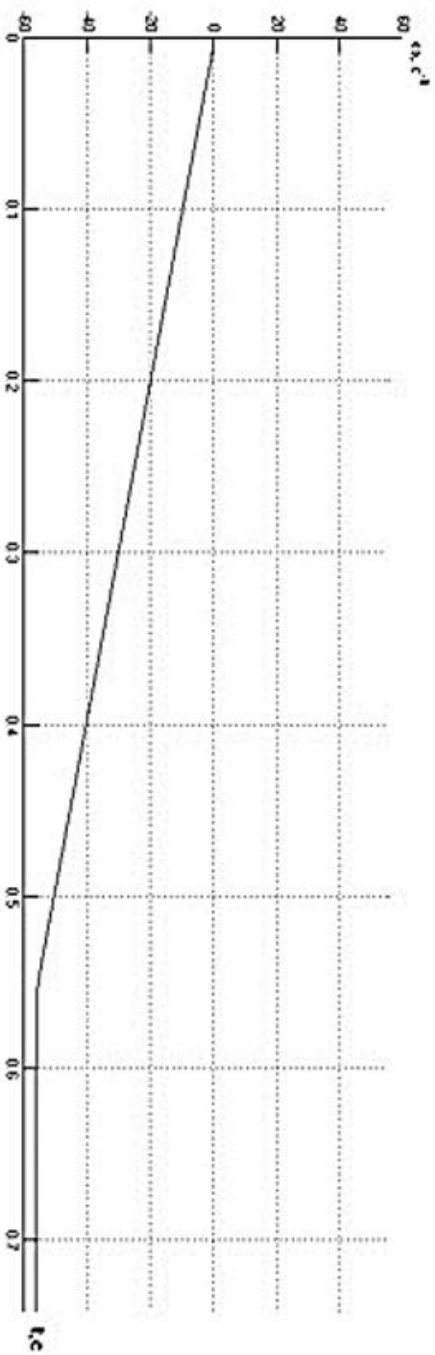
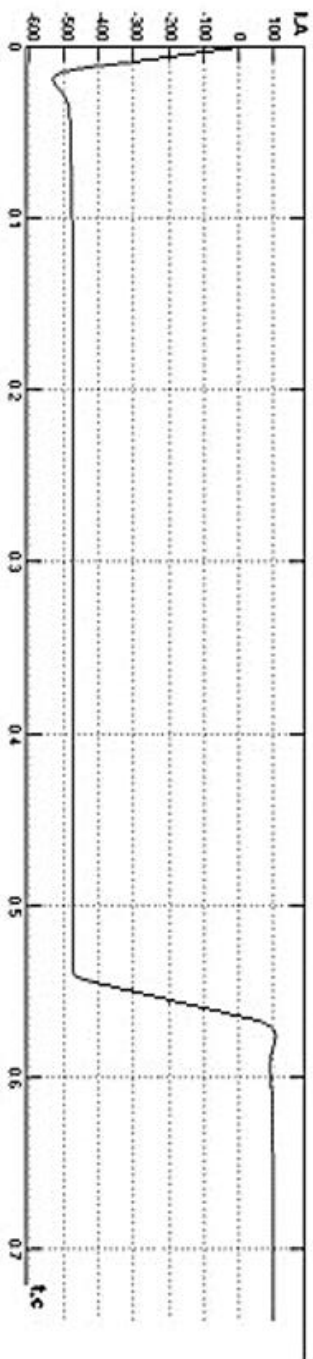
Функціональна схема задавача інтенсивності

Формувач інтенсивності
 призначений для формування
 плавної зміни заданого сигналу
 швидкості електропривода
 підйому вимірювальної фурми.
 Задавач обмежує прискорення
 та уповільнення, що дозволяє
 зменшити динамічні
 навантаження на електропривод
 і механізм.



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

10



На графіках показано перехідні процеси струму та швидкості під час розгону електроприводу при максимальному навантаженні, яке відповідає опущеній фурмі. Видно, що система автоматичного керування забезпечує плавний розгін без різких стрибків струму та з досягненням заданої швидкості за нормативний час

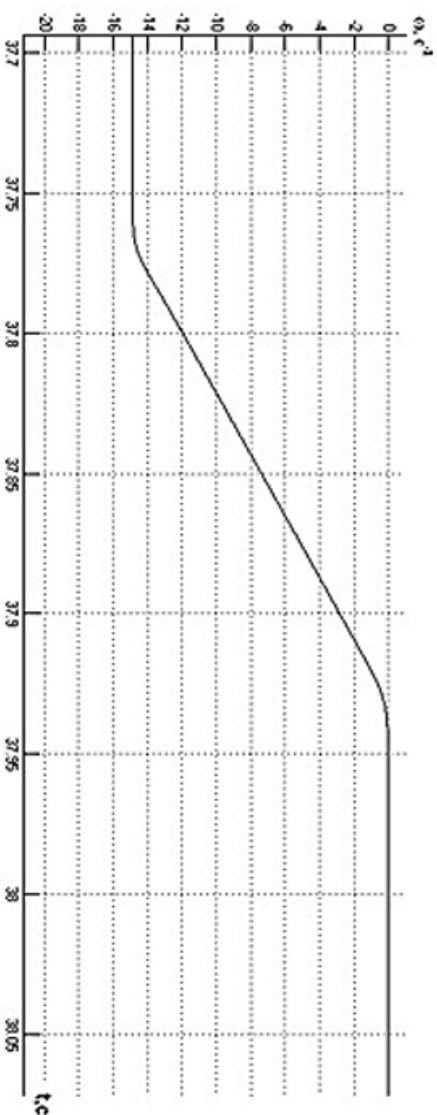
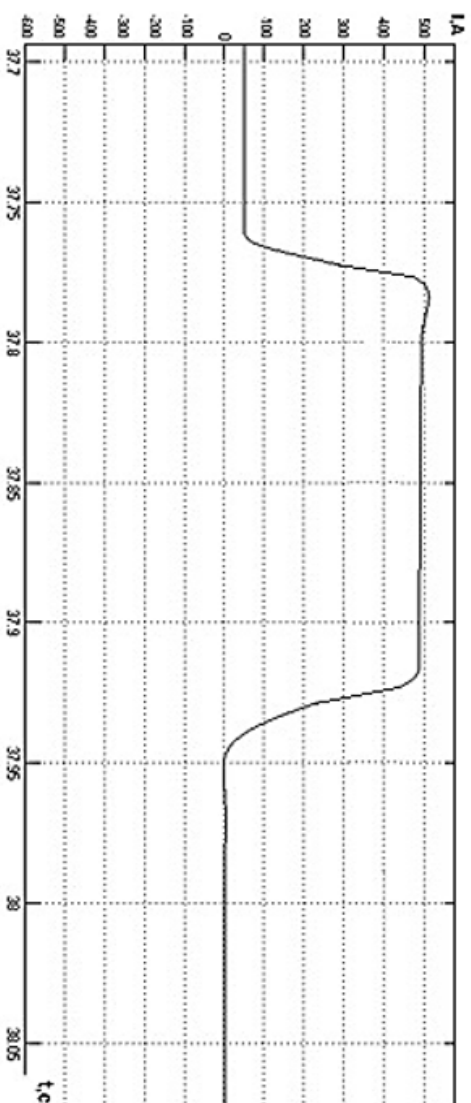
Графіки залежностей $I = f(t)$ і $\omega = f(t)$ при гальмуванні механізму формуи

11

Демонструють якість роботи розробленої системи автоматичного керування (САК) у перехідному режимі зупинки.

На графіку зміни швидкості відображено плавне та безперерульоване сповільнення двигуна Д814У2 до повної зупинки, що забезпечується лінійною характеристикою задавача інтенсивності для дотримання технологічного обмеження щодо прискорення не більше $1,3\text{ м/с}^2$.

Графік зміни струму підтверджує, що в процесі гальмування динамічні сплески надійно обмежуються налаштованим регулятором струму на рівні, який не перевищує допустимі $1,5$ ном, гарантуючи захист тиристорного перетворювача від перевантажень. Загалом оцилограми підтверджують стійкість САК та її відповідність технічним вимогам щодо часу регулювання (до 1 с) і точності позиціонування формуи.



ВИСНОВКИ

11

У даній магістерській роботі виконано розроблення та дослідження електропривода механізму переміщення вимірювальної фурми, що застосовується у сталеплавильному виробництві з використанням кисневих конвертерів. У ході роботи було проаналізовано технологічний процес виплавки сталі в кисневому конвертері та визначено роль механізму вимірювальної фурми у забезпеченні оперативного контролю температури і хімічного складу рідкого металу.

Розглянуто конструкцію, принцип дії та особливості експлуатації механізму вимірювальної фурми, що працює в умовах високих температур, запаленості та вібрації. На основі вихідних технічних даних виконано розрахунок статичних і динамічних навантажень, побудовано тахограму та навантажувальну діаграму електропривода. Обґрунтовано вибір електродвигуна постійного струму типу Д814У2, який забезпечує необхідний запас потужності, високу перевантажувальну здатність і відповідає вимогам надійної роботи в умовах металургійного виробництва. Здійснено вибір основного силового електрообладнання, зокрема тиристорного перетворювача та силового трансформатора. Розраховано регульовальні характеристики тиристорного перетворювача, що підтвердило можливість плавного та надійного регулювання швидкості електропривода у заданих межах. У роботі розроблено структуру системи автоматичного керування електроприводом, виконано аналіз її динамічних властивостей та обґрунтовано вибір регуляторів струму і швидкості. Запропонована система керування забезпечує необхідну точність позиціонування вимірювальної фурми, обмеження прискорень та струмів, а також надійну роботу в реверсивних і переривчастих режимах.

Отримані результати підтверджують, що розроблений електропривод відповідає всім технічним вимогам завдання, забезпечує підвищення точності вимірювань, скорочення тривалості технологічного циклу та зниження енергетичних витрат. Запропоновані технічні рішення можуть бути рекомендовані для практичного впровадження на металургійних підприємствах та використані при модернізації існуючих систем електроприводів вимірювальних механізмів.

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ПОЛТАВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА ІМЕНІ ЮРІЯ КОНДРАТЮКА»**

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ
за матеріалами XI Всеукраїнської науково-практичної конференції
**«ЕЛЕКТРОННІ ТА МЕХАТРОННІ СИСТЕМИ:
ТЕОРІЯ, ІННОВАЦІЇ, ПРАКТИКА»**
18 грудня 2025 року



Полтава 2025

УДК 621.745

О.В. Корнійчук, магістрант,

Н.В. Єрмілова, к.т.н., доцент

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

**МОДЕРНІЗАЦІЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ МЕХАНІЗМУ
ПЕРЕМІЩЕННЯ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ФУРМИ
У СТАЛЕПЛАВИЛЬНОМУ ВИРОБНИЦТВІ**

В роботі досліджується електропривод 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. [1, 4]

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[3].

У роботі детально розглянуто технологічний процес виплавки сталі у кисневому конвертері, зокрема етап вимірювання температури і відбору проб металу. Раніше ці операції виконували вручну, що збільшувало тривалість плавки та створювало додаткові ризики. Сучасні вимірювальні машини дозволяють повністю автоматизувати цей процес. Їх робота базується на переміщенні вимірювальної фурми за допомогою електроприводу (рис.1)[3].

Механізм переміщення являє собою спеціалізовану лебідку з електроприводом, яка забезпечує вертикальний рух фурми через отвір у накришному зонті конвертера. Головним завданням механізму є швидке та точне занурення вимірювального зонда у розплав металу на задану глибину без необхідності зупинки продувки чи нахилу конвертера [2]

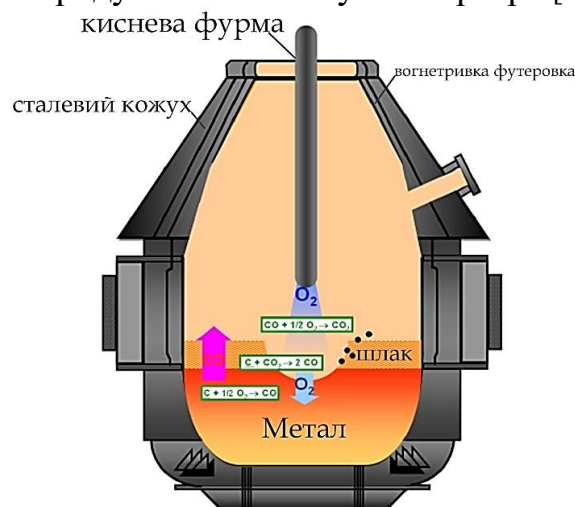


Рис. 1 – Кисневий конвертер: Введення вимірювальної фурми для контролю параметрів плавки

В ході аналізу технологічних умов були сформульовані основні вимоги до електроприводу підйомника вимірювальної фурми. Виходячи з вимог технології, був обрахований та обраний двигун постійного струму типу Д814У2 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 з напругою 220 В змінного струму. Проаналізовано керуючі характеристики перетворювача потужності, що довело доцільність його встановлення.

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. Програмне управління електроприводом забезпечує всі необхідні налаштування електроприводу фурми. [5]

Проведена модернізація системи електроприводу дозволила суттєво підвищити точність позиціонування фурми та зменшити динамічні навантаження на механізм. Це забезпечило стабільність процесу відбору проб, підвищило надійність обладнання та сприяло загальному скороченню часу циклу плавки

ЛІТЕРАТУРА:

1. Сидоренко О.М., Коваленко Л.В. *Контроль параметрів плавлення у сучасній металургії. // Металургійний вісник. - 2019. - Т.6, №4. - С. 56-67.*
2. Павленко М.М. *Використання електроприводів у промислових процесах. // Інженерні технології. - 2021. - Т.11, №3. - С. 22-33.*
3. Романюк Д.Д. *Автоматизація процесів плавлення сталі на сучасних підприємствах. - Харків: Основа, 2016. - 215 с.*
4. Hughes, E., Hiley, J., Brown, K., & Smith, I. M. *Electrical and Electronic Technology (12th ed.). Published by Pearson. Edinburgh (May 23, 2016). © 2016.*
5. Cadick, J., Capelli-Schellpfeffer, M., & Neitzel, D. (2019). *Electrical Safety Handbook (5th ed.). McGraw-Hill Education.*

MODERNIZATION OF THE ELECTRIC DRIVE OF THE MEASURING TUNNELING MOVEMENT MECHANISM IN STEEL MOLDING PRODUCTION

O.Korniichuk, undergraduate?

N. Yermilova, Ph.D., Associate professor

National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic»