

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

БР.АКПз-43.00.00.000 ПЗ

Група АКПз-22-1

Владислав Колодій

2026

Міністерство освіти і науки України
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Факультет автоматизації та енергетики
Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Колодій Владислав Олегович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 681.5: 669.187.2

(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Розроблення автоматизованої системи керування дуговою піччю

(назва роботи)

Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(назва освітньої програми)

174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

(шифр і назва спеціальності)

Робота містить результати власних досліджень, використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Нормоконтроль

доцент

(посада)

(підпис)

(дата)

О.В. Кучмистенко

(ініціали та прізвище)

Здобувач освітнього ступеня

АКПз-22-1

(шифр групи)

(підпис)

(дата)

В.О. Колодій

(ініціали та прізвище)

Рецензент

доцент

(посада)

(підпис)

(дата)

Л.Я. Чигур

(ініціали та прізвище)

Науковий керівник

доцент

(посада)

(підпис)

(дата)

В.С. Борин

(ініціали та прізвище)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

доцент

(посада)

(підпис)

(дата)

А.І. Лагойда

(ініціали та прізвище)

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Освітній рівень перший (бакалаврський)

Спеціальність 174 - Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АКІТ

«__» _____ 20__ року

З А В Д А Н Н Я
НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

Колодію Владиславу Олеговичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення автоматизованої системи керування дуговою піччю

керівник роботи Борин Василь Степанович, к.т.н., доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затвержені наказом закладу вищої освіти від « 29 » травня 2026 року № 38/8

2. Строк подання студентом роботи 12.06.2026

3. Вихідні дані до роботи Матеріали переддипломної практики, методичні Вказівки, технічна література, інтернет-ресурс.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Аналіз процесу дугової печі металургійного виробництва..

2. Синтез автоматичної системи керування.

3. Розробка проектної складової системи автоматичного керування.

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

Лист 1– Електродугова піч – БР.АКП-43.00.00.001;

Лист 2–Структурні схеми – БР.АКП-43.00.00.002;

Лист 3– Частотні характеристики – БР.АКП-43.00.00.003;

Лист 4 – Результати синтезу АКК– БР.АКП-43.00.00.003;

Лист 5 – Функціональна схема автоматизації – БР.АКП-43.00.00.005.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 06.11.2025р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз процесу дугової печі Металургійного виробництва.	30.04.2026	
2	Синтез автоматичної системи керування.	30.05.2026	
3	Розробка проектної складової системи автоматичного керування.	12.06.2026	

Студент _____
(підпис)

В.О. Колодій _____
(ініціали та прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

В.С. Борин _____
(ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Бакалаврська робота містить: 64 сторінок друкованого тексту, 37 рисунків, 6 таблиць, 7 джерел у переліку посилань.

Тема: «Розроблення автоматизованої системи керування дуговою піччю».

Об'єктом дослідження є технологічний процес виплавки сталі в дуговій сталеплавильній печі.

Предметом дослідження є автоматизована система керування технологічним процесом дугової сталеплавильної печі, що забезпечує контроль і регулювання основних технологічних параметрів плавлення.

Мета роботи: розроблення автоматизованої системи керування технологічним процесом дугової сталеплавильної печі.

Методи дослідження: методи теорії автоматичного керування, математичного моделювання динамічних систем, аналізу стійкості систем автоматичного регулювання, структурного та параметричного синтезу регуляторів, а також засоби комп'ютерного моделювання.

Результати кваліфікаційної роботи: виконано аналіз конструкції, принципу роботи та технологічних особливостей дугової сталеплавильної печі як об'єкта автоматизації. Визначено основні контрольовані та регульовані параметри технологічного процесу, побудовано математичну модель системи керування та отримано передатні функції її елементів. Проведено дослідження динамічних характеристик і стійкості системи автоматичного регулювання, виконано оцінювання якості перехідних процесів. Здійснено синтез P-, PI- та PID-регуляторів і обґрунтовано вибір PID-регулятора як найбільш ефективного засобу керування. Розроблено функціональну схему автоматизації, виконано вибір програмованого логічного контролера та комплексу технічних засобів автоматизації.

Ключові слова: автоматизація, дугова піч, PID-регулятор, автоматичне регулювання.

ABSTRACT

The bachelor's thesis contains: 64 pages of printed text, 37 figures, 6 tables, and 7 references.

Title: Development of an Automated Control System for an Electric Arc Furnace.

Object of research: the technological process of steel production in an electric arc furnace.

Subject of research: an automated control system for the technological process of an electric arc furnace, which provides monitoring and control of the main process parameters of steel melting.

Purpose of the work: development of an automated control system for the technological process of an electric arc furnace.

Research methods: methods of automatic control theory, mathematical modeling of dynamic systems, stability analysis of automatic control systems, structural and parametric synthesis of controllers, as well as computer simulation tools.

Results of the qualification work: an analysis of the design, operating principle, and technological features of the electric arc furnace as an automation object was carried out. The main controlled and regulated parameters of the technological process were determined, a mathematical model of the control system was developed, and transfer functions of its elements were obtained. The dynamic characteristics and stability of the automatic control system were investigated, and the quality of transient processes was evaluated. P, PI, and PID controllers were synthesized, and the PID controller was justified as the most effective control solution. A functional automation scheme was developed, and a programmable logic controller along with a set of automation hardware was selected.

Keywords: automation, electric arc furnace, PID controller, automatic control.

ЗМІСТ

	ВСТУП.....	9
1	АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ ДУГОВОЇ ПЕЧІ МЕТАЛУРГІЙНОГО ВИРОБНИЦТВА.....	11
	1.1 Особливості технологічного процесу в дуговій печі.....	11
	1.3 Різновиди конструкцій дугових печей.....	14
	1.4 Конструкція та принцип роботи електродугової печі.....	18
	1.5 Використання дугової печі.....	20
	1.6 Параметри контролю та регулювання дугової печі.....	21
	Висновки до розділу.....	23
2	СИНТЕЗ АВТОМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ.....	25
	2.1 Розробка структурної схеми та отримання математичної моделі АСУ ТП дугової печі.....	35
	2.2 Отримання результатів моделювання розімкненої системи керування піччю.....	32
	2.3 Аналіз динамічних властивостей АСУ печі.....	35
	2.4 Оцінювання якості перехідного процесу АСУ ТП печі.....	39
	2.5 Синтез регулятора системи керування піччю різними методами...	43
	Висновки до розділу.....	49
3	РОЗРОБКА ПРОЕКТНОЇ СКЛАДОВОЇ САК.....	51
	3.1 Розроблення функціональної схеми автоматизації.....	51
	3.2 Вибір програмованого логічного контролера.....	56
	3.3 Вибір технічних засобів автоматизації.....	58
	Висновки до розділу.....	62
	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	63
	ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА.....	64

					БР.АКПз-43.00.00.000 ПЗ			
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Розроблення автоматизованої системи керування дуговою піччю	Літ.	Арк.	Акрушів
Розроб.		Колодій В.О.				6	5	
Перевір.		Борин В.С.						
Реценз.		Чигур Л.Я.						
Н. Контр.		Кучмистенко О.В.				Група АКПз-22-1 ІФНТУНГ		
Затверд.		Лагойда А.І.						

ВСТУП

Металургійна промисловість є однією з базових галузей економіки, що забезпечує виробництво металопродукції для машинобудування, будівництва, енергетики, транспорту та інших сфер господарської діяльності. Одним із найважливіших агрегатів сучасного сталеплавильного виробництва є дугова сталеплавильна піч, яка завдяки високій продуктивності, гнучкості технологічного процесу та можливості переробки різноманітної металеві сировини набула широкого поширення в металургії.

Сучасні умови виробництва вимагають підвищення якості металопродукції, зниження енерговитрат, раціонального використання ресурсів та забезпечення безпечної експлуатації обладнання. Досягнення цих вимог неможливе без впровадження ефективних автоматизованих систем керування технологічними процесами. Автоматизація роботи дугових сталеплавильних печей дозволяє забезпечити стабільність режимів плавлення, підвищити точність підтримання технологічних параметрів, зменшити вплив людського фактора та покращити техніко-економічні показники виробництва.

Технологічний процес виплавки сталі в дуговій печі характеризується складністю, багатопараметричністю, значною тепловою інерційністю та наявністю численних збурюючих впливів. До основних параметрів, що потребують безперервного контролю та регулювання, належать температура металеві ванни, потужність електричної дуги, положення графітових електродів, витрати природного газу та кисню, а також параметри систем охолодження. Забезпечення оптимальних режимів роботи печі потребує застосування сучасних засобів вимірювання, програмованих логічних контролерів, систем диспетчерського керування та ефективних алгоритмів автоматичного регулювання.

Метою роботи є розроблення автоматизованої системи керування технологічним процесом дугової сталеплавильної печі, що забезпечує підвищення

					БР.АКПз-43.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ефективності плавлення, стабільність технологічних режимів, покращення якості готової продукції та зниження енергетичних витрат.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз конструкції, принципу роботи та особливостей експлуатації дугової сталеплавильної печі;
- дослідити піч як об'єкт автоматизації та визначити основні параметри контролю й регулювання;
- розробити структурну та функціональну схеми автоматизованої системи керування;
- отримати математичну модель об'єкта керування та дослідити його динамічні характеристики;
- виконати аналіз стійкості та якості системи автоматичного керування;
- здійснити синтез регулятора та вибрати найбільш ефективний закон керування;
- обрати програмований логічний контролер, засоби візуалізації та технічні засоби автоматизації.

					БР.АКПз-43.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

1 АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ ДУГОВОЇ ПЕЧІ МЕТАЛУРГІЙНОГО ВИРОБНИЦТВА

1.1 Особливості технологічного процесу в дуговій печі

Дугова сталеплавильна піч являє собою електротермічний агрегат, у якому теплова енергія для плавлення металу утворюється внаслідок горіння електричної дуги між графітовими електродами та металевою шихтою. Завдяки високій температурі дугового розряду, яка може перевищувати 3000–3500 °С, забезпечуються сприятливі умови для інтенсивного плавлення металу, проведення окиснювально-відновних реакцій та отримання високоякісної металопродукції.

Широке застосування дугових сталеплавильних печей у сучасній металургії обумовлене рядом технологічних і економічних переваг. Насамперед такі печі дозволяють створювати в плавильному просторі температури до 1800 °С і вище, що забезпечує ефективне видалення небажаних домішок та проведення процесів рафінування металу. Крім того, електроплавка дає можливість отримувати широкий асортимент сталей і сплавів із точно заданим хімічним складом та високими механічними властивостями. Важливою перевагою є також висока точність регулювання температурного режиму, що позитивно впливає на якість кінцевої продукції. У порівнянні з іншими способами виплавки спостерігається зниження втрат металу внаслідок угару та створюються оптимальні умови для керованого перебігу окиснювально-відновних процесів.

Одним із ключових факторів ефективної роботи дугової печі є підтримання необхідного температурного режиму. Температура визначає інтенсивність теплообміну між електричною дугою та металевою ванною, швидкість плавлення шихти, характер розподілу тепла в робочому просторі печі та інтенсивність утворення окалини. Відхилення температури від заданих значень призводить до погіршення якості металу, збільшення тривалості плавки та підвищення питомих витрат електроенергії. Саме тому сучасні дугові печі оснащуються

					БР.АКПз-43.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

автоматизованими системами контролю та регулювання температури, які забезпечують стабільність технологічного процесу.

Вихідною сировиною для процесу електроплавки є шихта, склад якої залежить від виду продукції та технологічного призначення печі. У загальному випадку шихта може містити металобрухт, чавун, феросплави, флюси та інші компоненти. Підготовлена шихта завантажується у робочий простір печі за допомогою спеціальних завантажувальних механізмів. Після завантаження електроди опускаються до рівня шихти, на них подається напруга, і між електродами та металом виникає електрична дуга.

Під дією високої температури дуги відбувається поступове плавлення шихти та формування рідкої металевої ванни. Одночасно з процесом плавлення здійснюється утворення шлаку, який виконує важливу металургійну функцію. Шлаковий шар захищає метал від контакту з атмосферним повітрям, зменшує теплові втрати та сприяє видаленню шкідливих домішок із металу. Для інтенсифікації процесу плавлення в сучасних печах широко використовуються кисневі фурми та паливно-кисневі пальники, які забезпечують додатковий приплив теплової енергії та прискорюють плавлення металобрухту [1].

Технологічний процес плавки умовно поділяється на три основні стадії: плавлення, окиснення та відновлення. На стадії плавлення відбувається розплавлення шихти та утворення рідкого металу. Окиснювальний період характеризується активним видаленням із металу вуглецю, кремнію, марганцю, фосфору та інших небажаних домішок шляхом їх окиснення. При цьому температура металевої ванни підвищується, а шкідливі елементи переходять до складу шлаку.

Під час відновлювального періоду здійснюється остаточне коригування хімічного складу металу. До ванни вводяться легувальні матеріали та розкиснювачі, які забезпечують отримання сталі із заданими властивостями. У результаті відновлювальних реакцій відбувається очищення металу від залишкових оксидів та

					БР.АКПз-43.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

інших небажаних включень, а його хімічний склад приводиться у відповідність до вимог нормативної документації.

Після завершення плавки здійснюється випуск металу через спеціальний випускний отвір у сталерозливний ківш. Одночасно відбувається відділення шлаку та підготовка печі до наступного циклу роботи. У сучасних електросталеплавильних агрегатах широко застосовується технологія еркерного (ексцентричного донного) випуску сталі, яка дозволяє мінімізувати потрапляння шлаку до ковша та покращити якість металопродукції.

З точки зору теорії автоматичного керування процес електроплавки є складним багатопараметричним об'єктом із суттєвою інерційністю та значною кількістю збурюючих впливів. Вхідними параметрами процесу виступають електроенергія, склад і маса шихти, витрати кисню та допоміжних матеріалів. Вихідними параметрами є температура металу, його хімічний склад, маса готового продукту та кількість утвореного шлаку.

Особливістю дугової печі як об'єкта автоматизації є великий об'єм металевої ванни, що обумовлює значну теплову інерційність процесу. Крім того, на роботу печі впливають численні зовнішні та внутрішні збурення: зміна складу шихти, зношування футерівки, вигоряння електродів, нестабільність електричної дуги, коливання напруги живлення та зміни електричного опору металевої ванни. Наявність таких факторів вимагає застосування сучасних автоматизованих систем керування, здатних у режимі реального часу підтримувати оптимальні параметри плавки.

Для сучасних дугових сталеплавильних печей характерні такі технологічні рішення: початок плавлення на залишку металу попередньої плавки, використання паливно-кисневих пальників для прискорення нагрівання шихти, застосування довгих електричних дуг, що працюють під шаром пінистого шлаку, інтенсивне використання технічного кисню та еркерний випуск сталі. Використання зазначених технологій дозволяє підвищити продуктивність печі, знизити питомі витрати електроенергії та забезпечити стабільну якість готової продукції.

					БР.АКПз-43.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

Таким чином, дугова сталеплавильна піч є складним електротехнологічним об'єктом, ефективність роботи якого значною мірою залежить від якості автоматичного керування процесами плавлення, регулювання електричних параметрів і підтримання оптимальних технологічних режимів.

1.3 Різновиди конструкцій дугових печей

Електродугові печі класифікуються за способом нагрівання, типом електроживлення, конструкцією робочого простору та технологічним призначенням. Різноманітність конструктивних рішень обумовлена широким спектром технологічних завдань, які виконуються в сучасній металургії. Основними типами електродугових печей є печі прямого нагріву, непрямого нагріву, руднотермічні печі та плазово-дугові установки.

Найбільшого поширення в електросталеплавильному виробництві набули дугові печі прямого нагріву. У таких печах електрична дуга виникає безпосередньо між графітовими електродами та металевою шихтою або рідким металом. При цьому електричний струм проходить через розплавлений метал, а тепла енергія виділяється як у дузі, так і в самій металевій ванні. Це забезпечує високу інтенсивність нагрівання та ефективне використання електричної енергії.

Типова сучасна трифазна дугова сталеплавильна піч складається з металевого корпусу, футерованого вогнетривкими матеріалами, водоохолоджуваного склепіння, трьох графітових електродів, механізму нахилу печі та системи випуску металу. Для підвищення продуктивності додатково використовуються киснево-паливні пальники, системи подачі кисню та вуглецю, а також автоматичні системи регулювання положення електродів.

Основними перевагами печей прямого нагріву є висока продуктивність, можливість використання металобрухту як основної сировини, швидке плавлення шихти та придатність до комплексної автоматизації технологічного процесу.

					БР.АКПз-43.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

Руднотермічні печі належать до печей із закритою або зануреною дугою. У них електроди занурюються безпосередньо в шар шихти, а електрична дуга формується всередині матеріалу. Теплова енергія виділяється як за рахунок дугового розряду, так і внаслідок електричного опору шихти. Такі печі широко застосовуються для виробництва феросплавів, феросиліцію, ферохрому, карбиду кальцію та інших матеріалів.

Основною перевагою руднотермічних печей є високий коефіцієнт корисної дії та ефективне використання теплової енергії. Крім того, закритий характер процесу дозволяє зменшити втрати тепла та покращити екологічні показники виробництва.

Найбільш поширеними у світовій практиці є трифазні дугові печі змінного струму (АС EAF). Вони живляться від трифазної електромережі та використовують три графітові електроди. Дуга виникає між кожним електродом і металевою ванною. Автоматична система регулювання електродів підтримує оптимальну довжину дуги та стабільність електричного режиму.

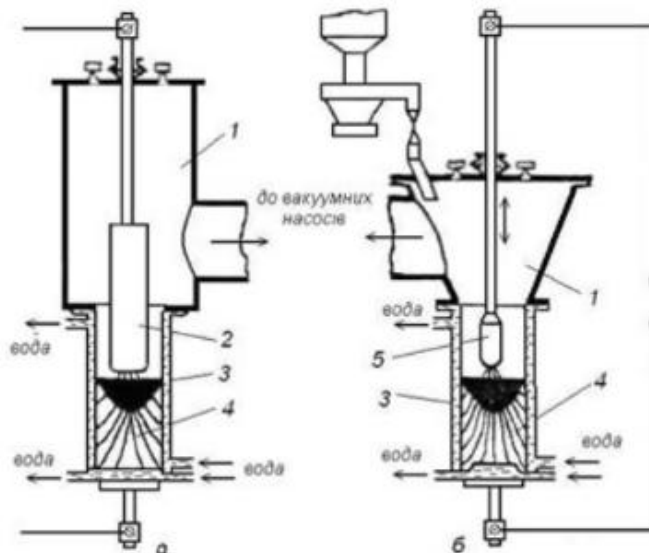
Залежно від питомої потужності трансформатора печі змінного струму поділяються на:

- печі звичайної потужності (RP);
- печі підвищеної потужності (HP);
- надпотужні печі (UHP).

Надпотужні електропечі дозволяють суттєво скоротити тривалість плавки та підвищити продуктивність агрегату.

Печі постійного струму (DC EAF) відрізняються тим, що мають один верхній графітовий електрод і донний електрод, розташований у нижній частині печі. Струм проходить між цими електродами через металеву ванну. Така конструкція забезпечує більш стабільне горіння дуги та рівномірніший розподіл тепла в об'ємі розплаву [5].

					БР.АКПз-43.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16



1 – вакуумна камера; 2 – електрод, що витрачається; 3 – кристалізатор; 4 – злиток, який наплавляється; 5 – живильник для подачі шихти; 6 – тугоплавка насадка електрода, який не витрачається.

Рисунок 1.3 – Вакуумні дугові печі з електродами

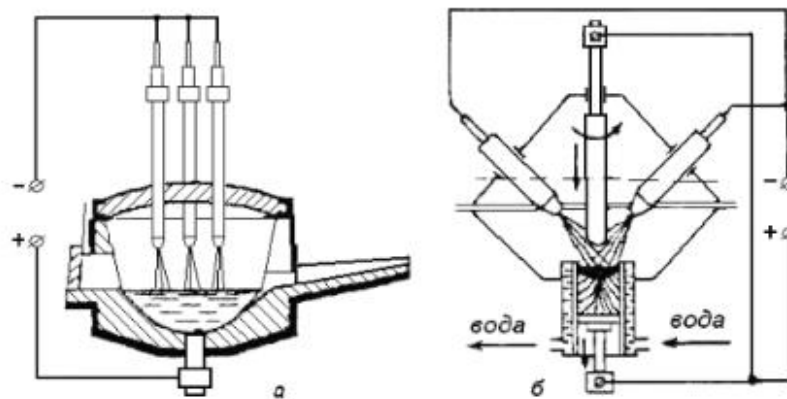
Порівняно з печами змінного струму вони характеризуються:

- меншим споживанням графітових електродів;
- зниженим рівнем електромагнітних завад;
- меншими втратами електроенергії;
- стабільнішими режимами плавлення.

Однак складність конструкції донного електрода та вища вартість обладнання обмежують їх широке застосування.

Перспективним напрямом розвитку електрометалургії є плазмово-дугові печі. У таких установках джерелом теплової енергії виступає плазмова дуга, яка створюється спеціальними плазмотронами. Температура плазмового струменя значно перевищує температуру звичайної електричної дуги, що дозволяє ефективно плавити тугоплавкі матеріали та отримувати метали особливо високої чистоти.

										Арк.
										17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БР.АКПз-43.00.00.000 ПЗ					



а – з керамічним тиглем; б – з водоохолоджуванним кристалізатором

Рисунок 1.4 – Плазмово-дугові печі

Для роботи плазмотронів використовують аргон, азот, водень або їх суміші, що дозволяє створювати нейтральну або відновлювальну атмосферу в робочому просторі печі. Такі агрегати застосовуються при виробництві спеціальних сталей, титанових та нікелевих сплавів, а також для переробки металургійних відходів.

Таким чином, сучасні електродугові печі представлені широкою номенклатурою конструкцій, що відрізняються принципом роботи, електричними характеристиками та сферою застосування. Для виробництва сталі найбільшого поширення набули трифазні дугові печі прямого нагріву змінного струму, які характеризуються високою продуктивністю, надійністю та широкими можливостями автоматизації технологічного процесу.

1.4 Конструкція та принцип роботи електродугової печі

Електродугова піч (ЕДП) є одним із найефективніших агрегатів для виплавки сталі та інших металів. Принцип її роботи ґрунтується на використанні теплової енергії електричної дуги, яка виникає між графітовими електродами та металевією шихтою. Температура в зоні дуги може досягати 3500 °С, що забезпечує інтенсивне плавлення металу.

										Арк.
										18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БР.АКПз-43.00.00.000 ПЗ					

Основними конструктивними елементами електродугової печі є сталевий водоохолоджуваний корпус, вогнетривка футерівка, рухоме склепіння, графітові електроди, система подачі кисню та вуглецю, механізм нахилу печі, система газовідведення та випускний отвір для зливу металу. У верхній частині печі встановлюються три графітові електроди, через які підводиться трифазний змінний струм. Внутрішня поверхня корпусу футерується вогнетривкими матеріалами для захисту металевої конструкції від дії високих температур.

Технологічний процес роботи електродугової печі складається з кількох послідовних стадій. На першому етапі виконується завантаження шихти, яка може складатися зі сталевого брухту, чавуну, заліза прямого відновлення (DRI), феросплавів та інших компонентів. Завантаження здійснюється спеціальними кошиками або автоматизованими системами подачі матеріалів.

Після завантаження шихти електроди опускаються всередину печі та на них подається висока напруга. Між кінцями електродів і металевою шихтою виникає електрична дуга, енергія якої перетворюється на тепло. Під дією теплового випромінювання та конвекції відбувається нагрівання й поступове плавлення металу. Для підтримання стабільного режиму плавлення система автоматичного регулювання безперервно змінює положення електродів залежно від значення струму та напруги дуги.

З метою прискорення плавлення та покращення якості металу в сучасних електродугових печах застосовуються киснево-паливні пальники та інжектори кисню. Подача кисню забезпечує окиснення домішок і додаткове виділення теплової енергії. Одночасно здійснюється формування шлаку, який поглинає небажані домішки та захищає метал від взаємодії з атмосферою.

Після завершення плавлення проводиться коригування хімічного складу металу шляхом введення феросплавів та розкиснювачів. Після досягнення необхідних технологічних параметрів піч нахиляється, і розплавлений метал через випускний отвір зливається в сталерозливний ківш для подальшої обробки або безперервного лиття заготовок.

					БР.АКПз-43.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

Ефективність роботи електродугової печі значною мірою залежить від автоматизації процесу плавлення. Автоматизована система керування забезпечує підтримання оптимальної довжини електричної дуги, контроль температури металу, регулювання потужності печі, моніторинг роботи системи охолодження та реалізацію аварійного захисту обладнання. Використання сучасних систем автоматичного керування дозволяє підвищити продуктивність печі, знизити енергоспоживання та покращити якість готової продукції [3].

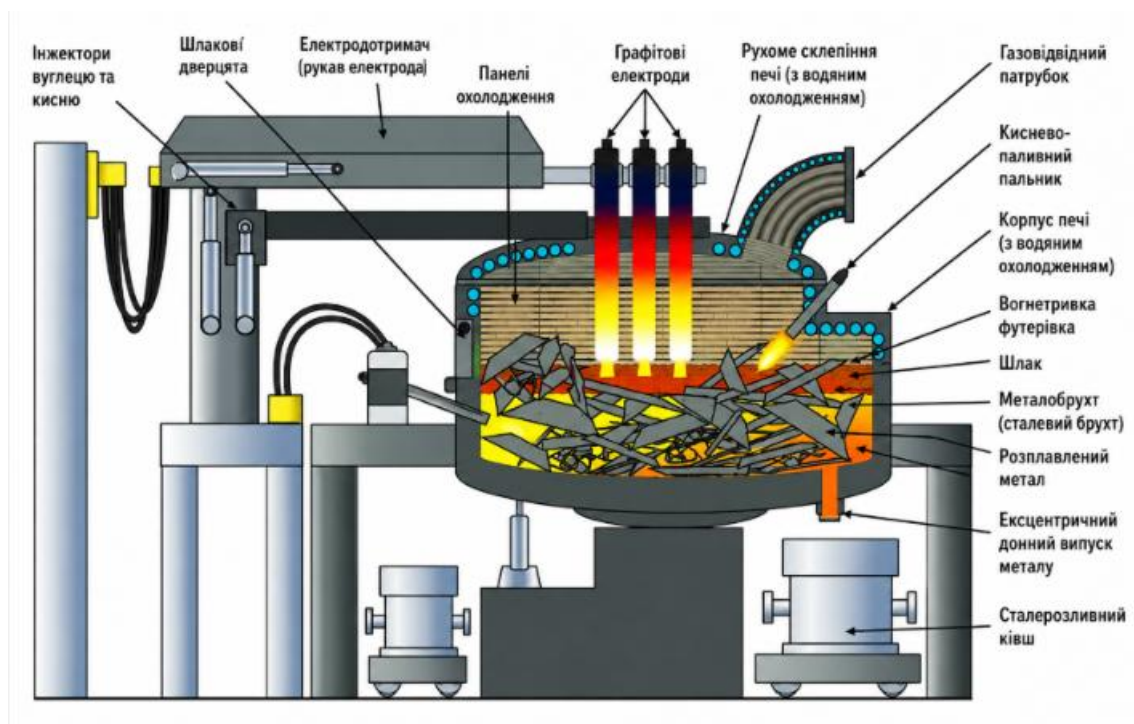


Рисунок 1.6 – Електродугова піч

1.5 Використання дугової печі

Електродугові печі широко використовуються в сучасній металургії для виплавки сталі, чавуну та спеціальних сплавів. Основною перевагою даного типу печей є можливість отримання високих температур, що забезпечує швидке плавлення металу та ефективно проведення металургійних процесів.

Найбільшого поширення електродугові печі набули в сталеплавильному виробництві. Вони застосовуються для переплавлення металобрухту,

						Арк.
					БР.АКПз-43.00.00.000 ПЗ	20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

прямовідновленого заліза (DRI), чавуну та інших металевих матеріалів з метою отримання якісної сталі заданого хімічного складу. Використання електродугових печей дозволяє виробляти конструкційні, інструментальні, нержавіючі та леговані сталі.

Крім чорної металургії, електродугові печі використовуються в кольоровій металургії для плавлення міді, нікелю, титану та інших металів. Вони також застосовуються у виробництві феросплавів, електротехнічних матеріалів і спеціальних сплавів з підвищеними експлуатаційними характеристиками.

Сучасні електродугові печі оснащуються автоматизованими системами керування, що забезпечують регулювання електричних параметрів, контроль температури металу, керування положенням електродів та моніторинг роботи допоміжного обладнання. Завдяки цьому підвищується продуктивність виробництва, знижується споживання електроенергії та покращується якість готової продукції.

Основними перевагами використання електродугових печей є висока продуктивність, можливість використання вторинної сировини, точне регулювання температурного режиму, екологічність та гнучкість виробничого процесу. Це робить електродугові печі одним із найперспективніших видів обладнання сучасної металургії.

1.6 Параметри контролю та регулювання дугової печі

Електродугова піч належить до складних електротехнологічних об'єктів із великою кількістю взаємопов'язаних параметрів, які визначають ефективність процесу плавлення та якість готової продукції. Для забезпечення стабільного перебігу технологічного процесу необхідно здійснювати безперервний контроль і регулювання електричних, теплових та технологічних параметрів.

Особливе значення мають електричні параметри дугового розряду. До них належать сила струму, напруга дуги, активна та реактивна потужність, коефіцієнт потужності, а також витрати електроенергії. Значення сили струму безпосередньо

					БР.АКПз-43.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

впливає на інтенсивність плавлення шихти та швидкість нагрівання металеві ванни. Напряга дуги характеризує відстань між електродом і металом та визначає стабільність процесу горіння дуги. Контроль зазначених параметрів дозволяє підтримувати оптимальний режим роботи печі та зменшувати питомі витрати електроенергії.

Одним із найважливіших технологічних параметрів є температура металеві ванни. Вона визначає швидкість протікання металургійних реакцій, інтенсивність плавлення шихти та якість готової сталі. Одночасно контролюється температура шлаку, футерівки, елементів конструкції печі та охолоджувальної води. Для вимірювання температури застосовуються термопари, оптичні та інфрачервоні пірометри, що забезпечують високу точність контролю навіть за умов надвисоких температур.

Стабільність електричного режиму значною мірою залежить від положення графітових електродів. Зміна відстані між електродами та металеві ванною призводить до зміни довжини дуги, її електричних характеристик та кількості теплової енергії, що передається металу. Тому сучасні системи керування оснащуються автоматичними регуляторами положення електродів, які здійснюють їх підйом або опускання залежно від значень струму та напруги дуги.

Важливе місце в системі автоматизації займає контроль параметрів охолодження. Надійна робота водоохолоджуваних панелей, склепіння печі та струмопідвідних елементів забезпечується постійним контролем температури, тиску та витрати охолоджувальної води. Відхилення цих параметрів від допустимих значень може призвести до перегрівання обладнання та виникнення аварійних ситуацій.

Для забезпечення необхідного хімічного складу металу контролюються витрати кисню, природного газу, вуглецевмісних матеріалів і легувальних добавок. Додатково здійснюється контроль рівня металу та шлаку у ванні печі, що дозволяє підвищити точність керування процесом плавлення та зменшити втрати металу під час випуску плавки.

					БР.АКПз-43.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

Основним регульованим параметром електродугової печі є електричний режим дуги. Автоматична система керування підтримує задані значення струму та напруги шляхом зміни положення електродів. Крім того, система забезпечує регулювання температури металеві ванни, подачі кисню, роботи пальникових пристроїв та параметрів охолодження. Комплексне регулювання зазначених величин дозволяє забезпечити стабільний перебіг технологічного процесу, підвищити продуктивність печі, зменшити енерговитрати та покращити якість готової металопродукції.

Таким чином, система контролю та регулювання дугової печі охоплює широкий спектр взаємопов'язаних параметрів, від точності підтримання яких залежить ефективність роботи обладнання, економічність виробництва та відповідність металу встановленим вимогам якості.

Висновок до розділу

У даному розділі проведено аналіз конструкції, принципу роботи та особливостей експлуатації дугових сталеплавильних печей. Встановлено, що електродугова піч є одним із найбільш ефективних агрегатів сучасної металургії, який забезпечує отримання високоякісної сталі завдяки високим температурам плавлення, можливості точного регулювання технологічного процесу та використанню широкого спектра металеві сировини.

Розглянуто основні різновиди конструкцій дугових печей, їх будову, принцип дії та сферу застосування. Визначено, що найбільшого поширення у сталеплавильному виробництві набули трифазні дугові печі прямого нагріву змінного струму, які характеризуються високою продуктивністю, надійністю та широкими можливостями автоматизації.

Проаналізовано технологічний процес плавлення металу в дуговій печі з використанням електричної дуги, природного газу та кисню. Встановлено, що застосування паливно-кисневих пальників дозволяє інтенсифікувати процес

					БР.АКПз-43.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

плавлення, скоротити тривалість плавки та знизити питомі витрати електроенергії. Значний вплив на ефективність роботи печі мають режими подачі природного газу, кисню та стабільність електричного режиму дуги.

Виконано аналіз дугової печі як об'єкта автоматизації. Визначено основні параметри контролю та регулювання, до яких належать температура металеві ванни, витрата природного газу, витрата кисню, тиск газового середовища, електричні параметри дуги, положення електродів, а також параметри системи охолодження. Встановлено, що технологічний процес характеризується значною тепловою інерційністю, багатопараметричністю та наявністю численних збурюючих факторів, що ускладнює процес керування.

На основі проведеного аналізу обґрунтовано необхідність впровадження автоматизованої системи керування технологічним процесом дугової печі, яка забезпечуватиме безперервний контроль технологічних параметрів, стабілізацію режимів роботи обладнання, підвищення енергоефективності виробництва та покращення якості готової металопродукції. Отримані результати є основою для подальшого розроблення структури автоматизованої системи керування та вибору технічних засобів автоматизації.

					БР.АКПз-43.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

2 СИНТЕЗ АВТОМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

2.1 Розробка структурної схеми та отримання математичної моделі АСУ ТП дугової печі

Одним із найважливіших завдань під час проєктування автоматизованої системи керування технологічним процесом дугової сталеплавильної печі є розробка структурної схеми системи автоматичного регулювання. Структурна схема дозволяє визначити взаємозв'язок між окремими елементами системи, встановити напрямки передачі інформаційних та керуючих сигналів, а також сформулювати математичну модель об'єкта керування [6].

Основним регульованим параметром у дуговій печі є температура металеві ванни. Від її значення залежить швидкість плавлення шихти, інтенсивність металургійних реакцій, якість готової сталі та енергоефективність процесу. Підтримання температури на заданому рівні забезпечується автоматичною системою регулювання, яка формує керуючі впливи на механізм переміщення електродів.

Структурно система автоматичного регулювання складається з об'єкта керування, вимірювального пристрою, регулятора, підсилювального пристрою, виконавчого механізму та регулюючого органу.

Об'єктом керування виступає дугова сталеплавильна піч, у якій відбувається процес плавлення металу під дією теплової енергії електричної дуги. Піч характеризується значною тепловою інерційністю, нелінійністю процесів теплопередачі та наявністю значної кількості збурюючих факторів, таких як зміна складу шихти, коливання напруги живлення, зношування електродів та зміна параметрів футерівки.

Вимірювання температури металеві ванни здійснюється за допомогою термометра опору. Термометр опору є первинним вимірювальним перетворювачем, принцип роботи якого базується на залежності електричного опору металевого

					БР.АКПз-43.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

провідника від температури. Виміряна температура перетворюється у стандартизований електричний сигнал і надходить до регулятора.

Регулятор виконує порівняння поточного значення температури із заданим значенням та визначає величину похибки регулювання. На основі отриманого сигналу формується керуюча дія, спрямована на усунення відхилення температури від встановленого значення.

Оскільки потужність вихідного сигналу регулятора недостатня для безпосереднього керування приводом, у систему вводиться підсилювач. Підсилювач забезпечує збільшення потужності керуючого сигналу до рівня, необхідного для роботи виконавчого механізму.

Виконавчий двигун призначений для перетворення електричного сигналу керування у механічне переміщення. У системах керування дуговими печами найчастіше використовуються електромеханічні або електрогідравлічні приводи, які забезпечують переміщення електродів у вертикальному напрямку.

Між виконавчим двигуном та регулюючим органом встановлюється редуктор. Його призначення полягає у зменшенні швидкості обертання та збільшенні крутного моменту, що дозволяє здійснювати плавне та точне регулювання положення електродів.

Регулюючим органом системи є механізм переміщення графітових електродів. Зміна положення електродів призводить до зміни довжини електричної дуги, а отже, до зміни її електричної потужності та кількості теплової енергії, що передається металевій ванні.

Принцип роботи системи полягає в наступному. При зниженні температури металу нижче заданого значення регулятор формує сигнал, який через підсилювач надходить на виконавчий двигун. Привід переміщує електроди таким чином, щоб збільшити потужність дуги та інтенсивність нагрівання. У випадку перевищення температурою встановленого значення відбувається зворотний процес — потужність дуги зменшується шляхом зміни положення електродів.

					БР.АКПз-43.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

Таким чином реалізується замкнений контур автоматичного регулювання температури дугової печі за принципом негативного зворотного зв'язку.



Рисунок 2.1 – Структурна схема системи керування піччю

Опис АСУ печі та побудова її функціональної схеми.

Підсилювач (П) – це реальний компонент, який є важливим елементом автоматизованої системи керування і призначений насамперед для підсилення вхідного сигналу перед підключенням виконавчого двигуна.

Термометр опору (ТО) – це датчик вимірювання температури, який використовує залежність між електричним опором металів і температурою вимірюваного середовища.

Виконавчий двигун (ВД) – механізм, що впливає на регулюючий пристрій шляхом перетворення електричного сигналу в кутове переміщення вала.

Дугова сталеплавильна піч (ДСП) – електроплавильна піч, яка використовує тепловий вплив електричної дуги для плавлення різних матеріалів, у тому числі металів.

Редуктор – механізм, основною метою якого є передача потужності через обертання вала, при цьому він зменшує зусилля, необхідне приводу.

Рівняння та передатні функції АСУ печі.

Піч:

$$\Delta\theta = \theta_3 - \theta, \quad (2.1)$$

$$T_0 \frac{dt}{dt} \Delta\theta + \Delta\theta = k_0 \cdot \mu - k \cdot f. \quad (2.2)$$

Потенціометричний міст:

$$u_m = k_d \cdot \theta. \quad (2.3)$$

Підсилювач:

$$T_m \cdot \frac{d}{dt} u_u + u_u = k_m \cdot u_m. \quad (2.4)$$

Двигун з редуктором:

$$T_{дв} \cdot \frac{d^2}{dt^2} \mu + \frac{d}{dt} \mu = k_{дв} \cdot u_u. \quad (2.5)$$

де θ – температура печі;

θ_3 – задане значення температури печі;

$\Delta\theta$ – відхилення температури;

u_0 – напруга живлення моста;

u_m – вихідна напруга моста;

μ – переміщення клапана;

f – відкриття.

У таблиці 2.1 наведені дані для схеми.

Таблиця 2.1 – Вхідні дані

T_0, C	$k_0,$ см	$k_1,$ см	$k_d,$ см	$T_m,$ см	k_m	$T_{дв},$ С	$k_{дв},$ см/Вс	$F, см$
3,0	6,0	1,5	0,7	0,02	22	0,06	0,15	1+0,7t

Отримаємо такі передатні функції елементів АСУ печі:

Потенціометричний міст:

$$G_m(s) = \frac{u_m}{\theta} = K_d = 0.8 \text{ (пропорційна ланка)}. \quad (2.6)$$

Підсилювач:

$$G_y(s) = \frac{k_m}{T_m s + 1} = \frac{22}{0.02s + 1} \text{ (аперіодична ланка 1-го порядку)}. \quad (2.7)$$

Двигун з редуктором:

$$G_{ID}(s) = \frac{k_{дв}}{T_{дв} s + s} = \frac{0.15}{0.06s^2 + s} \text{ (інтегруюча ланка)}. \quad (2.8)$$

Отримання структурної схеми для розімкненої та замкненої систем керування піччю.

На рисунку 2.3 показано структурну схему розімкненої системи керування піччю.

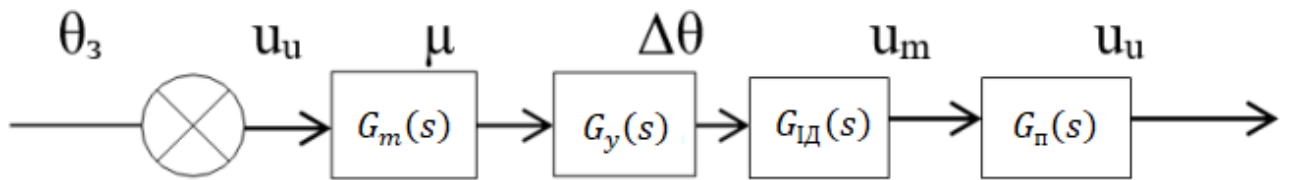


Рисунок 2.2 – Структурна схема розімкненої системи керування піччю

Відповідно до структурної схеми отримаємо передатну функцію для розімкненої системи:

$$G_{pc}(s) = G_m(s) \cdot G_y(s) \cdot G_{ID}(s) \cdot G_{II}(s), \quad (2.10)$$

$$G_{pc}(s) = \frac{7}{0.001s^4 + 0.1505s^3 + 2.09s^2 + 1}. \quad (2.11)$$

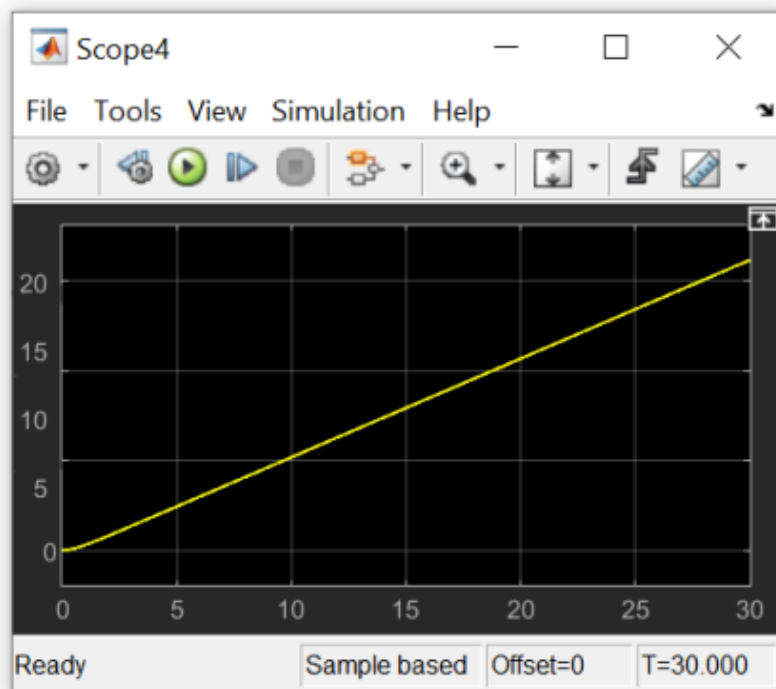
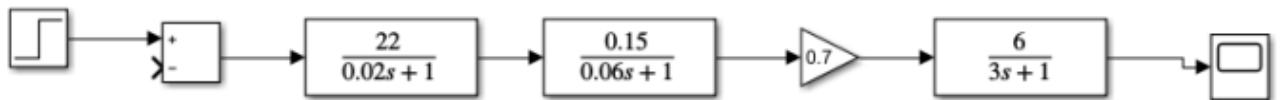


Рисунок 2.3 – Перехідний процес розімкненої системи

На рисунку 2.4 показано структурну схему замкненої системи керування піччю.

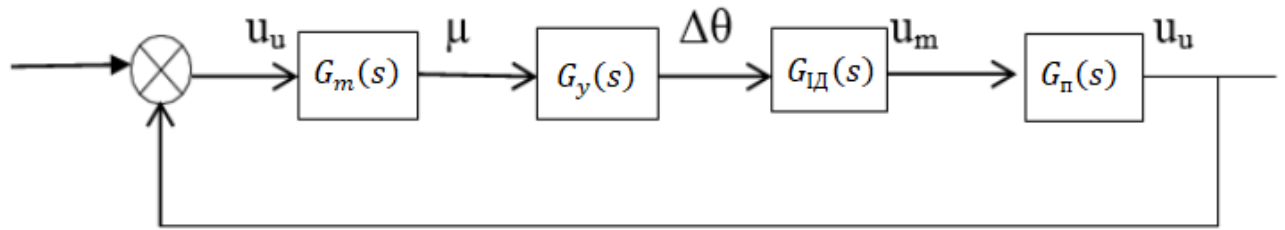


Рисунок 2.4 – Структурна схема замкненої системи керування піччю

Передатна функція для замкненої системи:

$$G_{ЗС}(s) = \frac{G_{PC}(s)}{1+G_{PC}(s)}, \quad (2.12)$$

$$G_{ЗС}(s) = \frac{7}{0.001s^4+0.1505s^3+2.09s^2+1}. \quad (2.13)$$

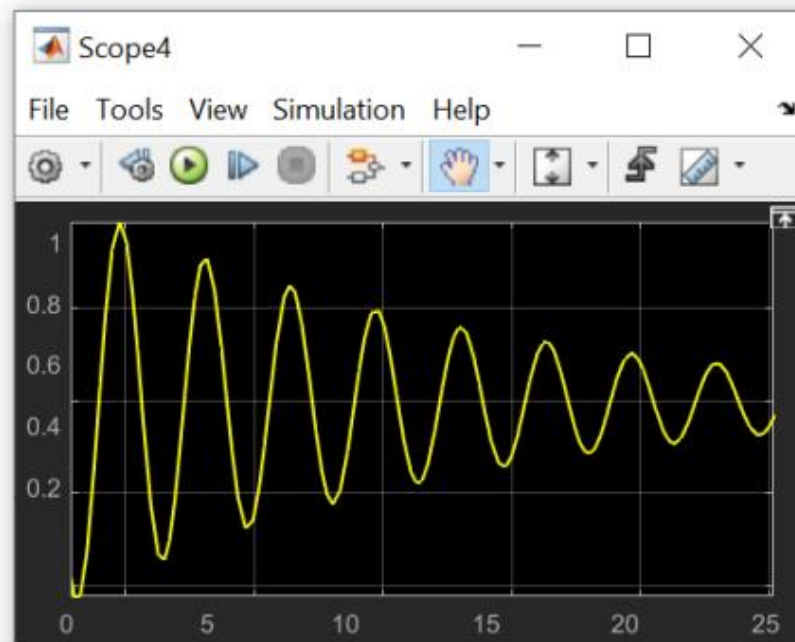
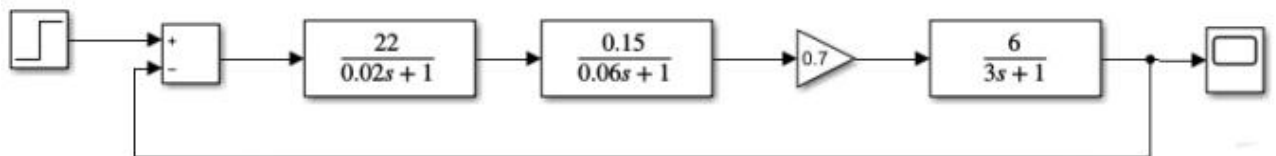


Рисунок 2.5 – Перехідний процес замкненої системи

З рисунка 2.5 видно, що в замкненій системі перехідний процес змінився: збільшилася кількість коливань.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

2.2 Отримання результатів моделювання розімкненої системи керування піччю

Перехід від операторної форми передатної функції розімкненої системи керування піччю до частотної форми [7].

Для отримання дійсної та уявної частин розімкненої системи застосуємо перетворення Лапласа:

$$G_p(jw) = \frac{7}{0.001w^3 - 0.1505jw^2 - 2.09jw + 1}. \quad (2.14)$$

Помножимо дріб на спряжене число:

$$G_p(jw) = \frac{7 \cdot (0.001w^3 - 0.1505jw^2 - 2.09jw - 1)}{(0.001w^3 - 0.1505jw^2 - 2.09jw + 1) \cdot (0.001w^3 - 0.1505jw^2 - 2.09jw - 1)},$$

$$G_p(jw) = \frac{0.007w^3 + 1.0535jw^3 - 14.63w - 7}{0.000001w^6 + 0.0226w^3 + 4.3681w^2 + 1}. \quad (2.15)$$

Дійсну та уявну частини обчислюємо за такою формулою:

$$G_p(jw) = U(jw) + V(jw),$$

$$U(w) = \frac{0.007w^3 - 14.63w}{0.000001w^6 + 0.0226w^3 + 4.3681w^2 + 1} \quad (2.16)$$

$$V(w) = \frac{1.0535jw^3 - 7}{0.000001w^6 + 0.0226w^3 + 4.3681w^2 + 1} \quad (2.17)$$

У виразі (2.17) отримується дійсна частина розімкненої системи, а у виразі (2.18) — уявна частина.

Амплітудно-фазова частотна характеристика розімкненої системи керування піччю.

Для побудови АФХ змінюємо значення частоти та обчислюємо дійсну й уявну частини розімкненої системи. У таблиці 2.2 наведені отримані результати.

Таблиця 2.2 – Таблиця результатів дійсної та уявної частин розімкненої системи

ω	3	2	1.5	0.5
<i>Re</i>	-2.04	-4.23	-8.81	-13.5
<i>Im</i>	-1.25	-2.21	-7.42	-22.2

Амплітудно-фазова частотна характеристика наведена на рисунку 2.6.

Амплітудно-частотна та фазово-частотна характеристики розімкненої системи керування піччю.

Амплітудно-частотна характеристика:

$$|G(\omega)| = \sqrt{Re^2(\omega) + Im^2(\omega)}. \quad (2.18)$$

Знаходиться з використанням значень дійсної та уявної частин розімкненої системи:

$$M(\omega) = \frac{\sqrt{(0.000049\omega^6 + 214.04\omega^4 + 1.109\omega^3 + 49\omega^2)}}{0.000001\omega^6 + 0.0226\omega^4 + 4.3681\omega^2 + 1}. \quad (2.19)$$

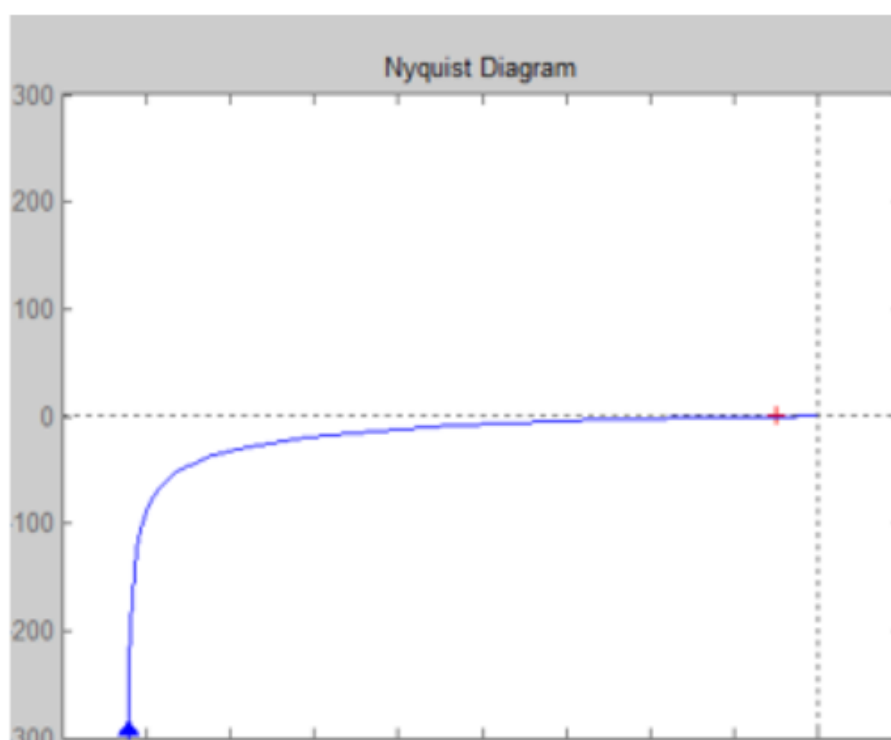


Рисунок 2.6 – Амплітудно-фазова частотна характеристика

Залежно від зміни частоти обчислюються значення амплітудно-частотної характеристики. Значення амплітудно-частотної характеристики наведені в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Таблиця значень амплітудно-фазової частотної характеристики

ω	0	3.5	12	∞
$M(\omega)$	∞	-4.61	-32.53	0

Амплітудно-частотна характеристика розімкненої системи керування піччю наведена на рисунку 2.7.

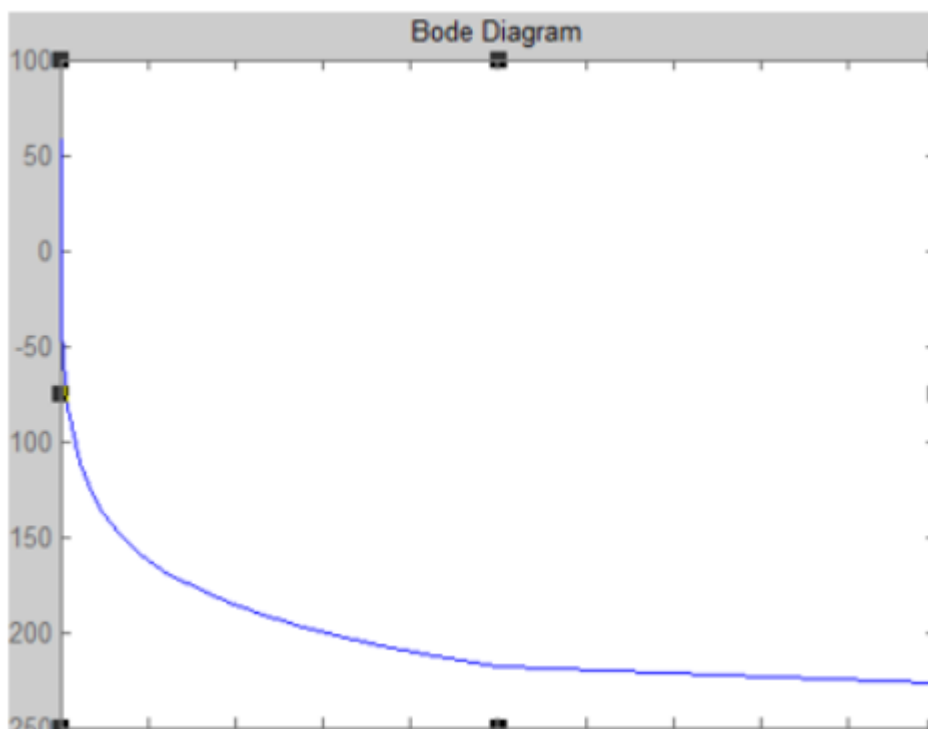


Рисунок 2.7 – Фазово-частотна характеристика розімкненої системи

Фазово-частотна характеристика:

$$\varphi(\omega) = \operatorname{arctg} \left(\frac{\operatorname{Re}(w)}{\operatorname{Im}(w)} \right),$$

$$\varphi(\omega) = \operatorname{arctg} \left(\frac{-1.0535\omega^3 - 7\omega}{0.007\omega^4 - 14.63\omega^2} \right). \quad (2.20)$$

Аналогічно обчислюються значення фазово-частотної характеристики розімкненої системи керування піччю. Отримані результати наведені в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Таблиця значень фазово-частотної характеристики

ω	1	10	100	1000	∞
$\Phi(\omega)$	-164	-220	-288	-346	360

Фазово-частотна характеристика розімкненої системи керування піччю наведена на рисунку 2.8.

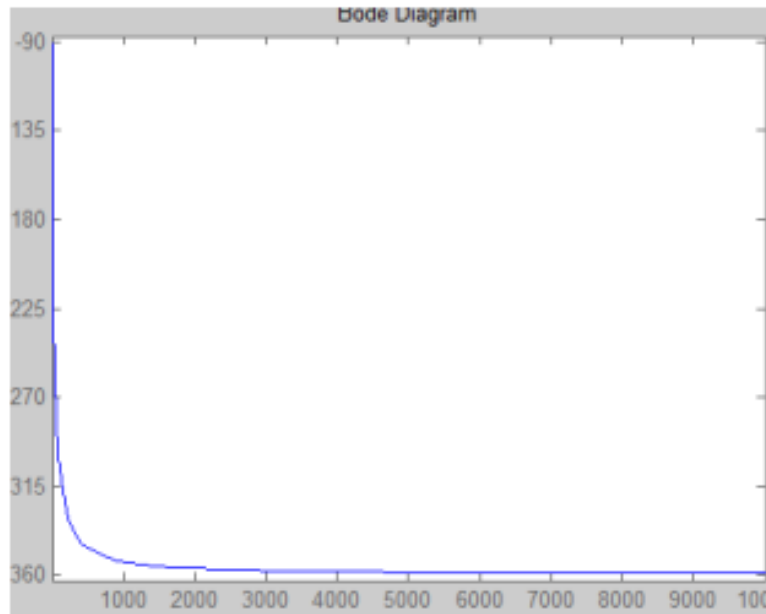


Рисунок 2.8 – Фазово-частотна характеристика розімкненої системи

Логарифмічна амплітудно-частотна та логарифмічна фазово-частотна характеристики розімкненої системи керування піччю.

Рівняння логарифмічної амплітудно-частотної характеристики:

$$L(\omega) = \lg(M(\omega)). \quad (2.21)$$

Логарифмічна амплітудно-частотна характеристика розімкненої системи керування піччю наведена на рисунку 2.9.

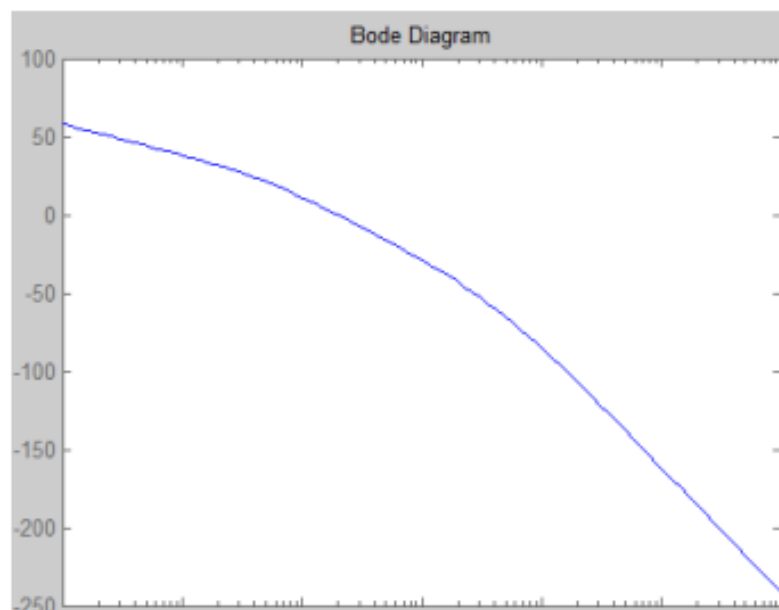


Рисунок 2.9 – Логарифмічна амплітудно-частотна характеристика

Рівняння логарифмічної амплітудно-частотної характеристики:

$$\varphi(\omega) = \operatorname{arctg} \left(\frac{\operatorname{Re}(\omega)}{\operatorname{Im}(\omega)} \right). \quad (2.22)$$

На рисунку 2.10 наведена логарифмічна фазово-частотна характеристика розімкненої системи керування піччю.

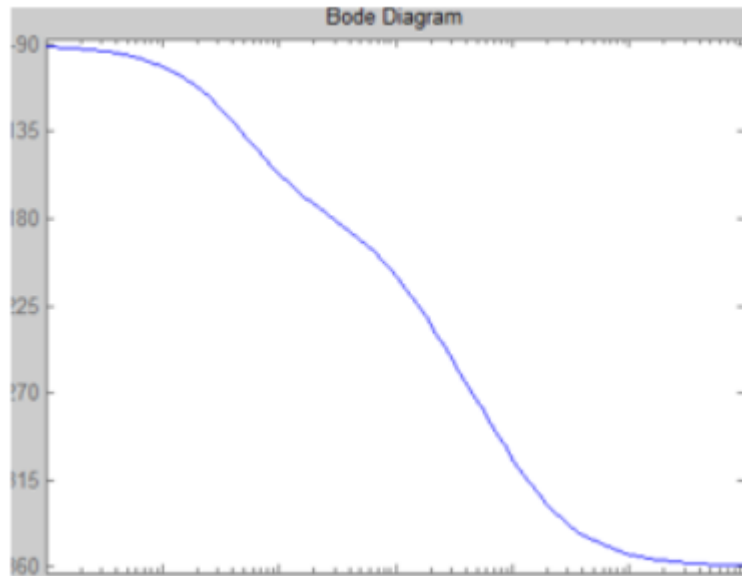


Рисунок 2.10 – Логарифмічна фазово-частотна характеристика

Використання логарифмічних шкал у частотних характеристиках усуває проблему відображення значень амплітуди та частоти під час аналізу й порівняння частотних характеристик.

2.3 Аналіз динамічних властивостей АСУ печі

Аналіз стійкості за першим методом Ляпунова

Передатна функція розімкненої системи керування:

$$G_{pc}(s) = \frac{7}{0.001s^4 + 0.1505s^3 + 2.09s^2 + 1}. \quad (2.23)$$

Характеристичне рівняння:

$$0.001s^4 + 0.1505s^3 + 2.09s^2 + 1 = 0. \quad (2.24)$$

Корені характеристичного рівняння:

$$s_1 = 0;$$

$$\begin{aligned} s_2 &= -100; \\ s_3 &= -20; \\ s_4 &= -0.5. \end{aligned} \quad (2.25)$$

За першим методом Ляпунова розімкнена система перебуває на межі стійкості, оскільки один полюс передатної функції дорівнює нулю, а решта є від'ємними.

Стійкість замкненої системи

Передатна функція замкненої системи:

$$G_{pc}(s) = \frac{7}{0.001s^3 + 0.1505s^2 + 2.09s + 1 + 7}. \quad (2.26)$$

Характеристичне рівняння:

$$0.001s^3 + 0.1505s^2 + 2.09s + 8 = 0. \quad (2.27)$$

Корені характеристичного рівняння:

$$\begin{aligned} s_1 &= -99.9; \\ s_2 &= -20.2; \\ s_3 &= -0.122 + 1.99i; \\ s_4 &= -0.122 - 1.98i. \end{aligned} \quad (2.28)$$

За першим методом Ляпунова замкнена система є стійкою, оскільки два полюси від'ємні, а решта мають від'ємні дійсні частини.

Стійкість відкритої АСУ печі за критерієм Гурвіца

Характеристичне рівняння розімкненої системи (2.19):

$$0.001s^3 + 0.151s^2 + 2.09s + 1 = 0. \quad (2.29)$$

Параметри характеристичного рівняння:

$$\begin{aligned} a_0 &= 0.001; \\ a_1 &= 0.151; \\ a_2 &= 2.09; \\ a_3 &= 1; \\ a_4 &= 0. \end{aligned} \quad (2.30)$$

Матриця Гурвіца будується за знайденими параметрами.

Матриця Гурвіца:

					БР.АКПз-43.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

Стійкість замкненої АСУ печі за логарифмічним критерієм Найквіста

Замкнена система керування дуговою піччю є стійкою, оскільки ЛАЧХ розімкненої системи проходить через частоту зрізу раніше, ніж через точку частоти -180° . Цей графік наведено на рисунку 2.12.

За першим методом Ляпунова замкнена система є стійкою, оскільки два полюси від'ємні, а решта мають від'ємні дійсні частини. За першим методом Ляпунова розімкнена система перебуває на межі стійкості, оскільки один полюс передатної функції дорівнює нулю, а решта є від'ємними.

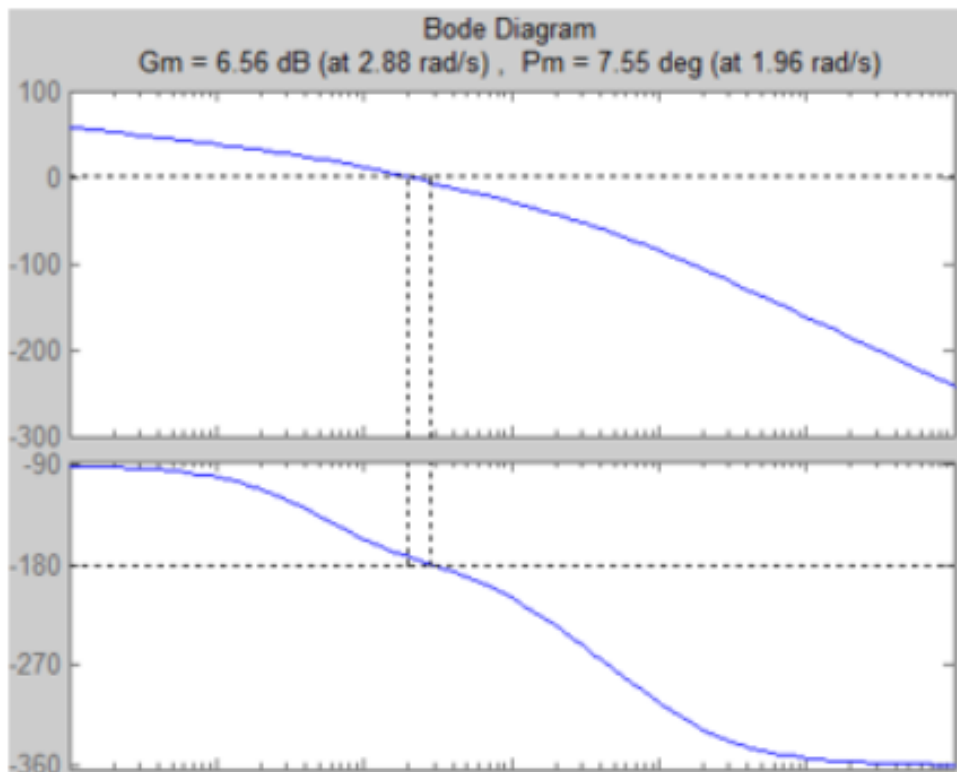


Рисунок 2.12 – Логарифмічна амплітудно-частотна та логарифмічна фазово-частотна характеристики розімкненої системи

Аналіз запасів стійкості системи за логарифмічними характеристиками

Запас стійкості за амплітудою наведений на рисунку 2.13 і становить 6,56 дБ. Запас стійкості за фазою наведений на рисунку 2.13 і становить $-7,55^\circ$.

						БР.АКПз-43.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			38

2.4 Оцінювання якості перехідного процесу АСУ ТП печі

Пряме оцінювання якості перехідного процесу замкненої системи керування піччю.

На рисунку 2.13 отримано пряму оцінку якості перехідного процесу замкненої АСУ ТП печі.

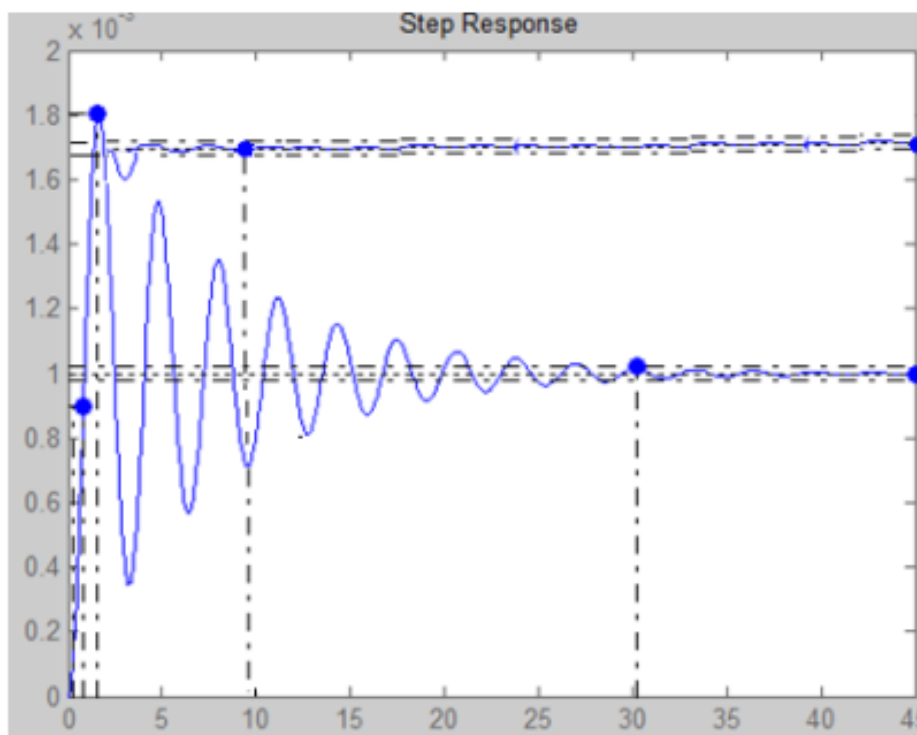


Рисунок 2.13 – Перехідний процес замкненої АСУ ТП печі

Пряма оцінка якості перехідного процесу:

1. Час регулювання, $T_{set} = 30c$;
2. Перерегулювання, $P_{ov} = 80\%$;
3. Кількість коливань -7 ;
4. Частота коливань: $\omega_{osc} = \frac{2\pi}{T} = 2$;
5. Час досягнення першого максимуму, $T_{max} = 1.59c$;
6. Час наростання, $T_R = 0.55c$;
7. Декремент затухання: $\chi = \frac{|y_{max1} - y_{ss}|}{|y_{max2} - y_{ss}|} = \frac{1.88 - 1}{1.69 - 1} = 1.24$.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Непряма оцінка якості перехідного процесу замкненої системи керування піччю

За допомогою графіка АЧХ (рисунок 2.15) отримуємо непряму оцінку якості замкненої АСУ ТП печі:

Амплітуда $M(0) = 0,45$ при частоті $\omega = 0$ визначає пропускну здатність:

$$0.606 M(0) = 0.606 \cdot 0.45 = 0.273$$

$$\omega = (0; 0.33).$$

- Амплітуда $M = 1$, $\omega_{cf} = 2.78$.
- Амплітуда $M_{max} = 17.7$, $\omega_p = 1.87$.

Непрямі оцінки якості:

1. Показник коливальності,

$$\mu = \frac{M_{max}(0)}{M(0)} = \frac{17.7}{0.35} = 50.6. \quad (2.32)$$

2. Резонансна частота, $\omega_p = 1.98$.
3. 3 Смуга пропускання системи, $\omega_{bandwhise} = (0.034)$
4. Частота зрізу, $\omega_{cf} = 2.89$.

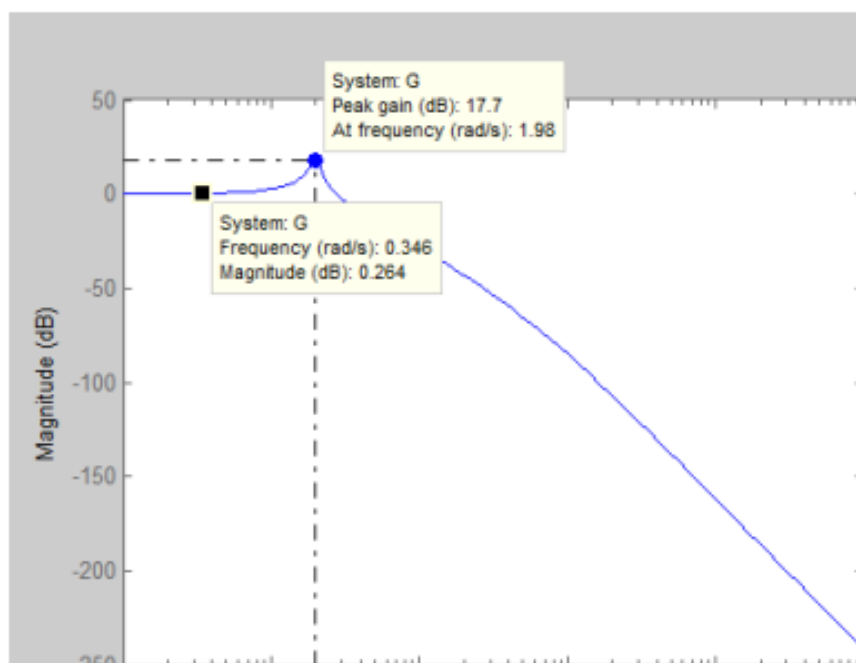


Рисунок 2.14 – Непряма оцінка якості за АФЧХ

Використовуючи кореневі методи, знайдемо непряму оцінку якості системи. За допомогою команди Pzmap отримуються полюси передатної функції, наведені на рисунку 2.15.

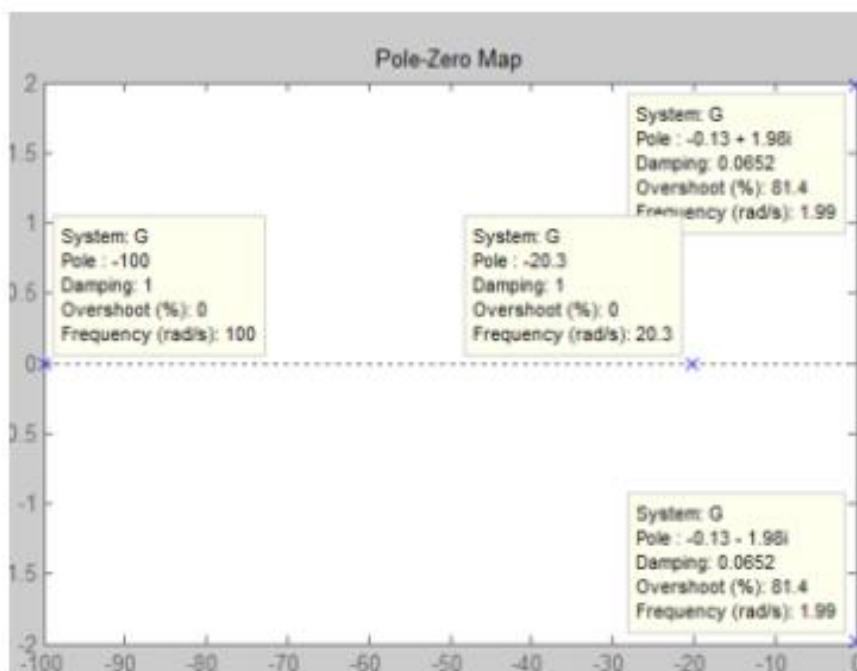


Рисунок 2.15 – Полюси передатної функції на комплексній площині

Для отримання власних значень (eigenvalues), власних частот (natural frequencies) та коефіцієнтів демпфування (damping factors) передатної функції, наведених на рисунку 2.16, використовується команда damp.

Pole	Damping	Frequency (rad/seconds)	Time Constant (seconds)
-1.30e-01 + 1.98e+00i	6.52e-02	1.99e+00	7.71e+00
-1.30e-01 - 1.98e+00i	6.52e-02	1.99e+00	7.71e+00
-2.03e+01	1.00e+00	2.03e+01	4.94e-02
-1.00e+02	1.00e+00	1.00e+02	1.00e-02

Рисунок 2.16 – Дані передатної функції, отримані за допомогою damp

Полюси передатної функції:

$$s_1 = -99.98;$$

$$s_2 = -22.15;$$

$$s_3 = -0.13425 + 1.9756i;$$

$$s_4 = -0.13243 - 1.9987i. \quad (2.33)$$

Використовуючи кореневу оцінку, визначаються такі показники якості системи керування піччю:

1. Час регулювання;

$$T_{set} = \frac{5}{|\sigma|} = \frac{5}{0.230} = 31.34. \quad (2.34)$$

2. Перерегулювання;

$$P_{ov} = e^{\frac{-\varepsilon\pi}{\sqrt{1-\varepsilon^2}}} \cdot 100\% = e^{-0.637} \cdot 100\% = 562\%. \quad (2.35)$$

3. Максимальне значення, використовуючи y_{max} , y_{ss} та ε :

$$y_{max} = y_{ss} \cdot \left(1 + \frac{P_{ov}}{100}\right) = 1.4. \quad (2.36)$$

4. Ступінь коливальності;

$$\mu = \frac{\omega_d}{\sigma} = \frac{0.198}{0.13} = 1.44\%. \quad (2.37)$$

5. Частота коливань;

$$\omega_{osc} = \omega_n \cdot \sqrt{1 - \varepsilon^2} = 0.199\sqrt{1 - 0.42} = 0.14\text{с}. \quad (2.38)$$

6. Час досягнення першого максимуму;

$$T = \frac{\pi}{\omega_n \cdot \sqrt{1 - \varepsilon^2}}. \quad (2.39)$$

7. Швидкодія та ступінь стійкості;

$$\eta = |\sigma_{min}| = 21.2. \quad (2.40)$$

Таблиця 2.5 – Оцінка якості замкненої системи

№	Оцінка якості	Позначення	Пряма	Непряма	Відповідність вимогам
Основні					
1	Час регулювання (Settling time)	T_{set}	31,1	31,34 с	Відповідає
2	Перерегулювання (Overshoot)	P_{ov}	80,4 %	62 %	Не відповідає

Продовження таблиці 2.5

№	Оцінка якості	Позначення	Пряма	Непряма	Відповідність вимогам
3	Кількість коливань	M	7	1	Не відповідає
4	Коливальність (Oscillation)	M	65,36	48,2	Не відповідає
5	Частота коливань (Oscillation frequencies)	ω_{osc}	2 с	0,14 с	Не відповідає
Додаткові					
6	Час досягнення першого максимуму (Peak time)	T_p	1,44 с	20,8 с	Не відповідає
7	Час наростання (Rise time)	T_R	0,65 с	0,436 с	Відповідає
8	Декремент затухання	χ	1,355		

Аналіз показників якості, наведених у таблиці 2.5, показує, що перерегулювання, коливальність, кількість коливань, частота коливань і час досягнення першого максимуму не відповідають вимогам.

2.5 Синтез регулятора системи керування пичю різними методами

Найпоширенішим типом регуляторів є PID-регулятор, який вирізняється своєю простотою, зрозумілим принципом роботи, доступною вартістю та широким

										Арк.
										43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БР.АКПз-43.00.00.000 ПЗ					

застосуванням у різних галузях промисловості. PID означає пропорційно-інтегрально-диференціальний, що відображає основний принцип його роботи.

Пропорційний зв'язок спеціально призначений для керування швидкодією системи з урахуванням неузгодженості між вхідним сигналом і сигналом похибки. Інтегральний зв'язок, навпаки, передбачає інтегрування сигналу похибки для підвищення точності системи. Диференціальний зв'язок відіграє вирішальну роль у зменшенні коливальності системи шляхом оцінювання похідної сигналу похибки. Таким чином, сигнал похибки $e(t)$ може розглядатися як комплексний показник якості. Схема PID-регулятора наведена на рисунку 2.17.

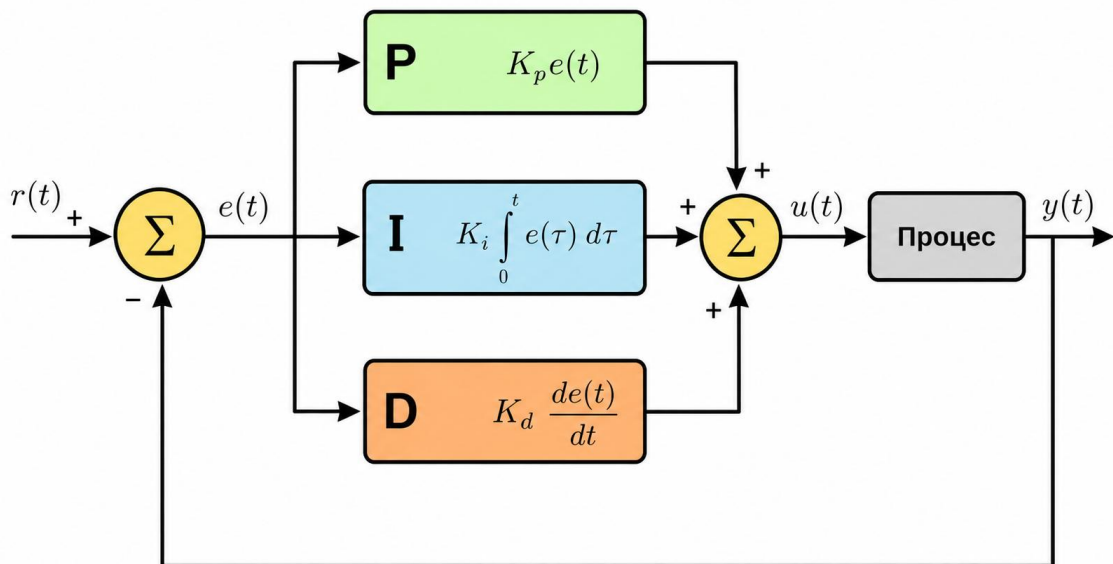


Рисунок 2.17 – Синтез процесу за допомогою PID-регулятора

Для спрощення синтезу регулятора для замкненої системи можна скористатися функцією «Автоналаштування» (Auto Tune) у Simulink. Нижче наведено різні схеми регуляторів та результати їх синтезу для електричної печі.

Simulink – це пакет, інтегрований у MatLab, який забезпечує платформу для побудови та віртуального тестування електричних схем, зокрема схем автоматизації. Simulink має можливість автоматичного налаштування PID-

регуляторів шляхом обчислення та відображення найбільш оптимального перехідного процесу на схемі, що забезпечує високоефективне рішення.

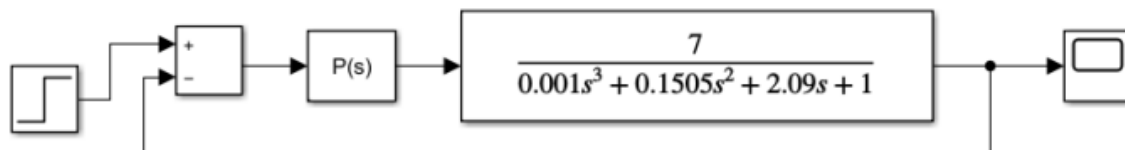


Рисунок 2.18 – Синтез процесу за допомогою Р-регулятора



Рисунок 2.19 – Значення коефіцієнта Р

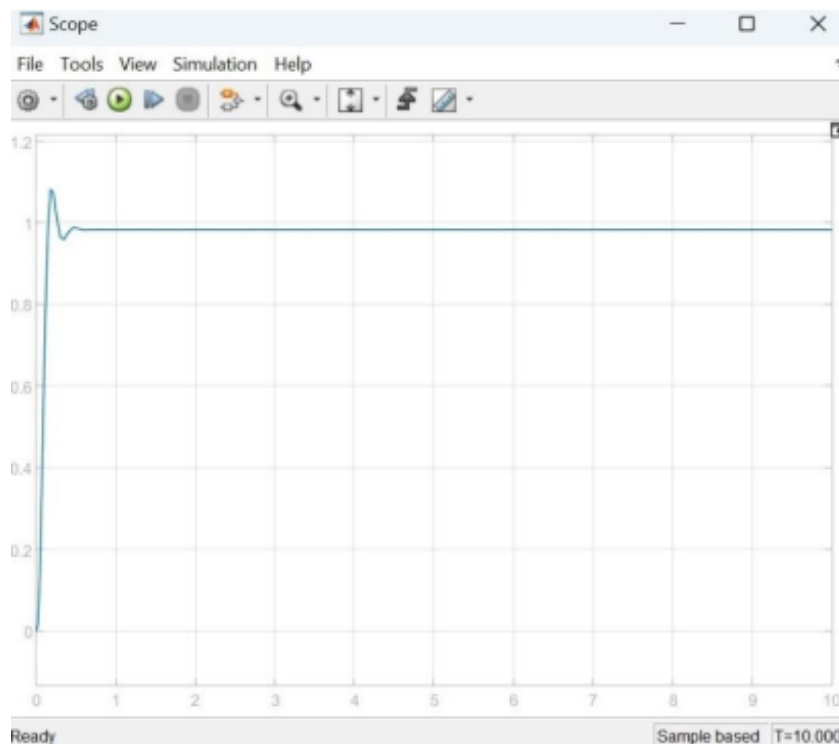


Рисунок 2.20 – Результат синтезу Р-регулятора

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

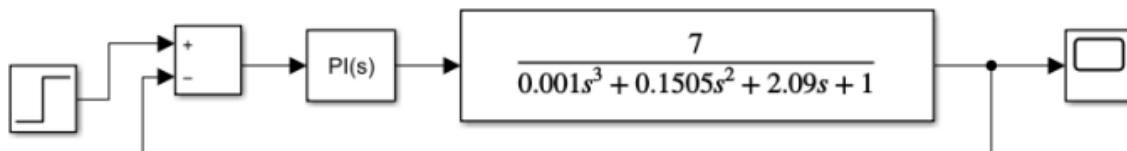


Рисунок 2.21 – Синтез процесу за допомогою PI-регулятора

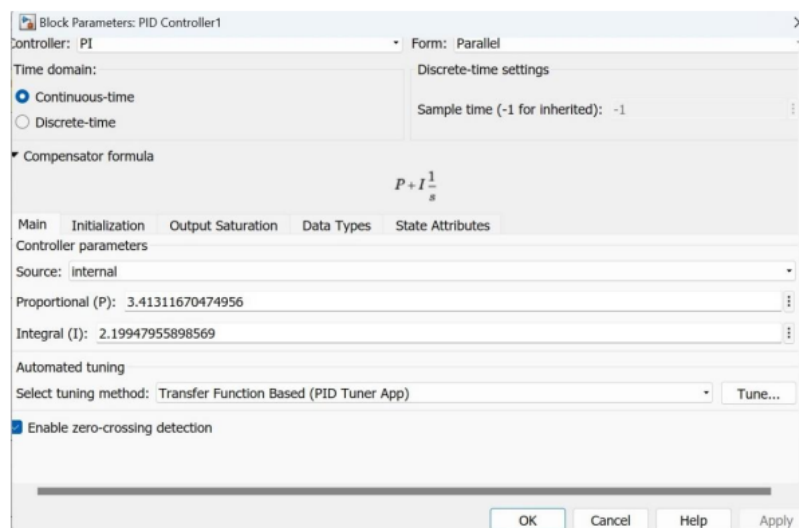


Рисунок 2.22 – Значення коефіцієнтів PI

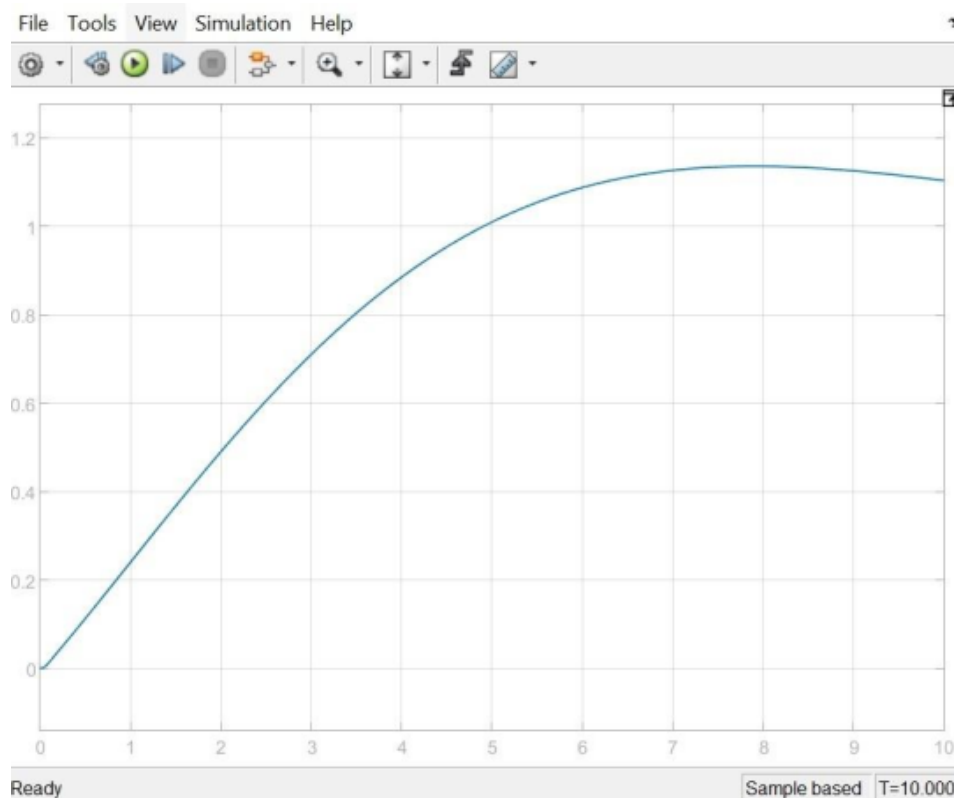


Рисунок 2.23 – Результат синтезу PI-регулятора

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

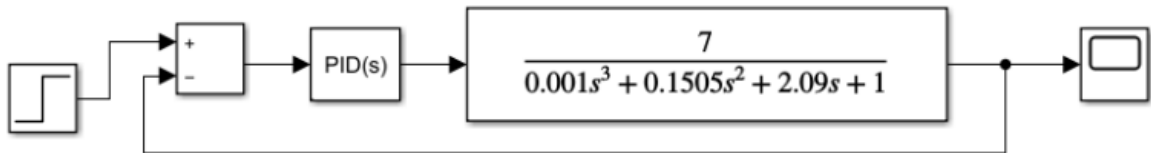


Рисунок 2.24 – Синтез процесу за допомогою PID-регулятора

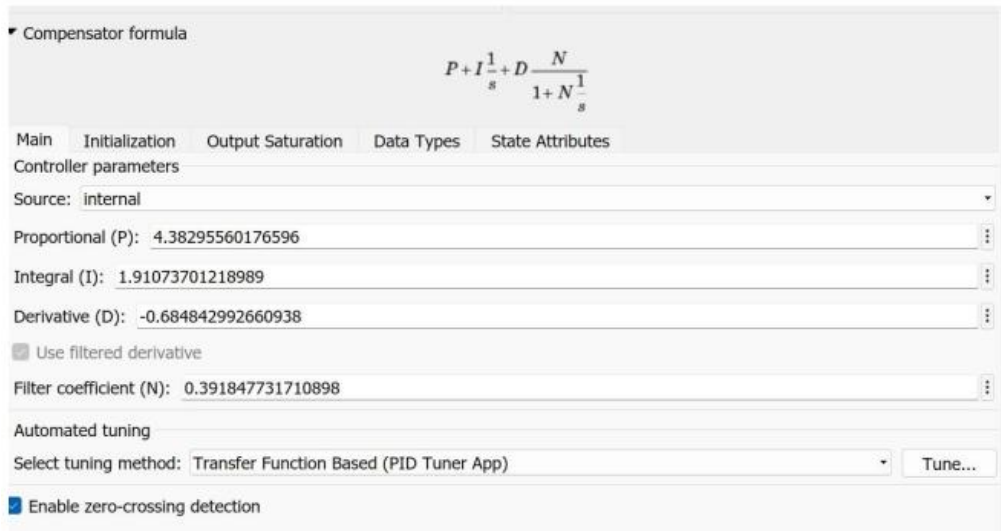


Рисунок 2.25 – Значення коефіцієнтів PID

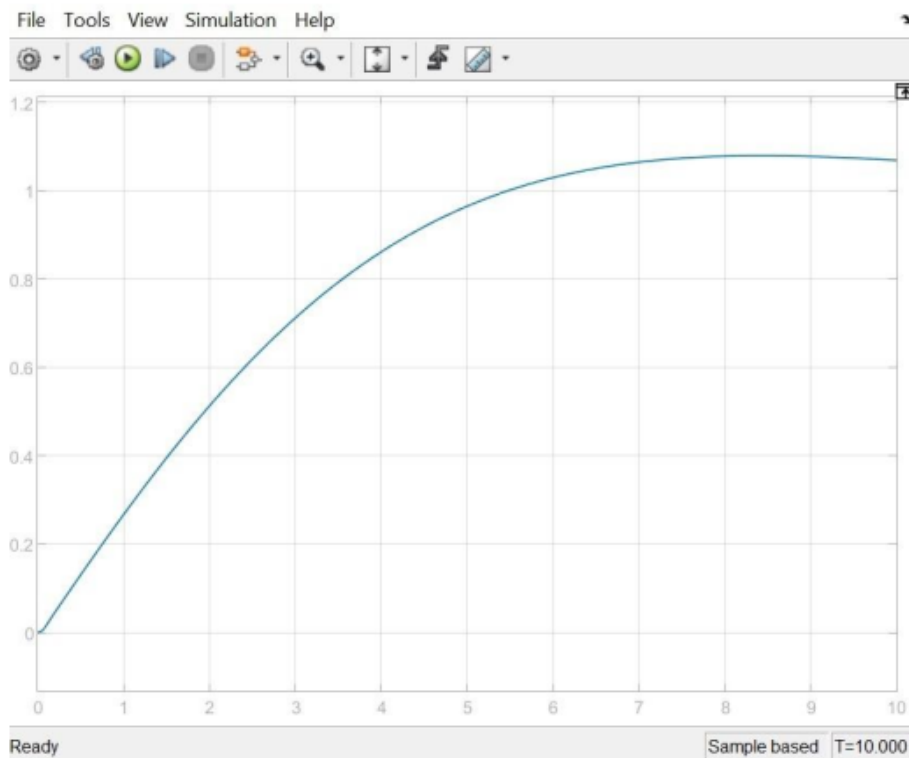


Рисунок 2.26 – Результат синтезу PID-регулятора

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

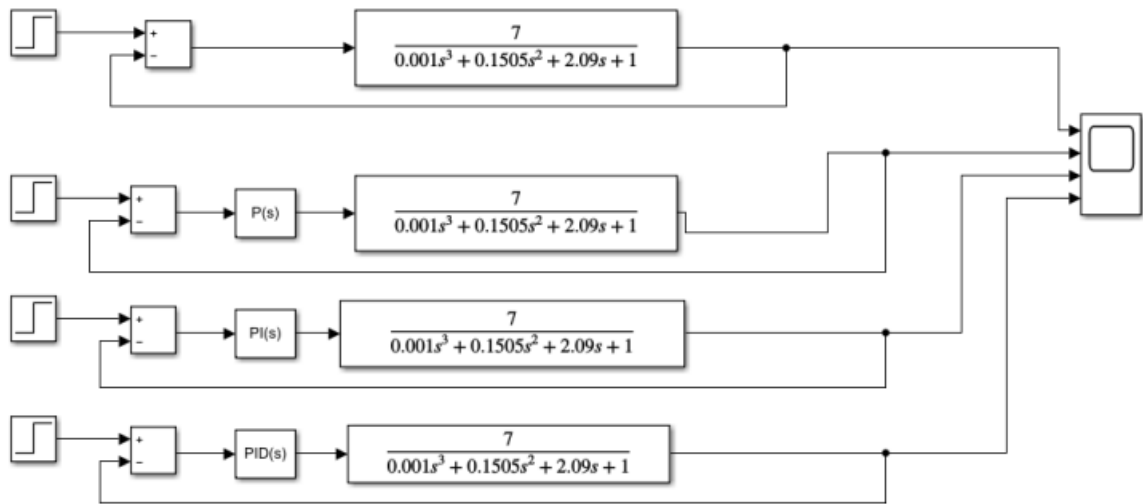


Рисунок 2.27 – Синтез процесу за допомогою регуляторів

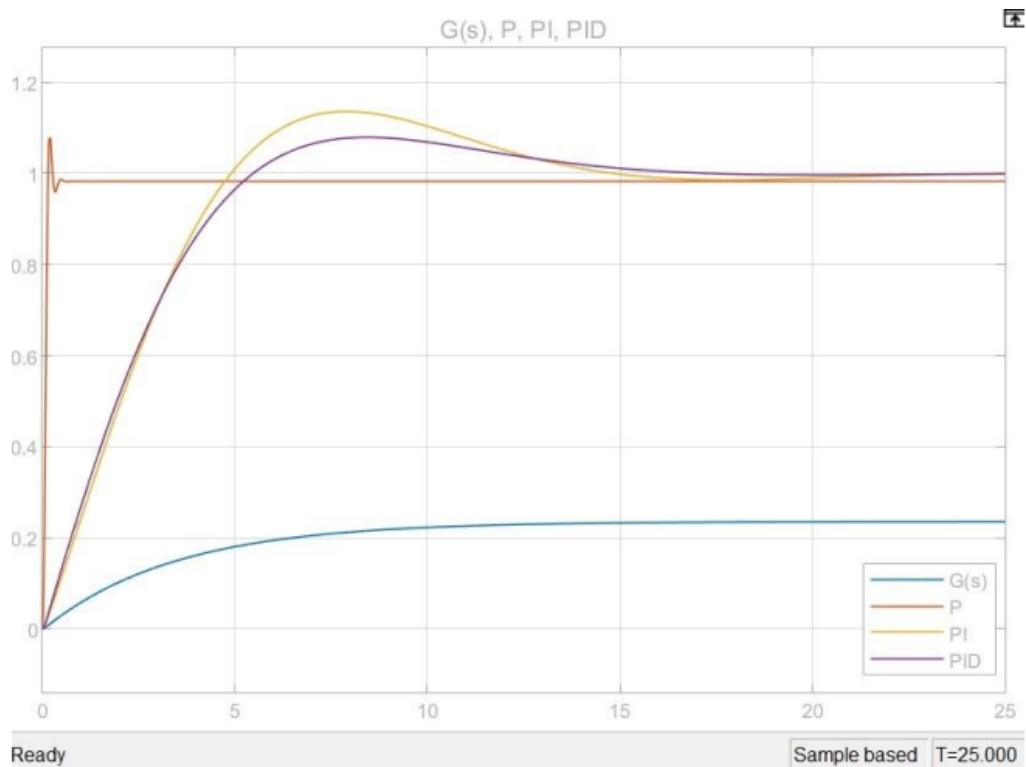


Рисунок 2.28 – Результати синтезу з регуляторами

На основі рисунка 2.28 можна зробити декілька висновків.

Використання P-регулятора в системі дало прийнятні результати, підвищивши точність системи у чотири рази. Проте важливо відзначити наявність значних коливань і перерегулювання, які мають досить великі значення. Незважаючи на ці покращення, система все ще не досягає необхідного рівня точності.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Впровадження PI-регулятора підвищило точність системи, усунувши статичну похибку процесу. Однак перерегулювання все ще присутнє, а час регулювання становить приблизно 18 секунд.

Додавання PID-регулятора ще більше підвищило точність системи завдяки ефективному усуненню коливань. Крім того, порівняно з PI-регулятором зменшилося перерегулювання, а час регулювання скоротився приблизно до 16 секунд.

На підставі наведених висновків для електричної печі як регулятор було обрано PID-регулятор.

Висновок до розділу

У даному розділі було проведено дослідження автоматизованої системи керування технологічним процесом дугової сталеплавильної печі. Розроблено структурну схему системи керування, визначено основні елементи АСУ та встановлено їх взаємозв'язок. На основі математичного опису окремих елементів отримано передатні функції та сформовано структурні схеми розімкненої і замкненої систем.

У результаті моделювання виконано аналіз динамічних характеристик системи, побудовано перехідні процеси, амплітудно-фазові, амплітудно-частотні, фазово-частотні та логарифмічні частотні характеристики. Проведена оцінка стійкості.

Оцінювання якості перехідного процесу засвідчило наявність значного перерегулювання, підвищеної коливальності та великої кількості коливань, що не відповідає встановленим вимогам до якості керування. Це обумовило необхідність синтезу регулятора для покращення динамічних показників системи.

У ході синтезу було досліджено роботу P-, PI- та PID-регуляторів. Порівняльний аналіз результатів моделювання показав, що PID-регулятор

					БР.АКПз-43.00.00.000 ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

забезпечує найкращі показники якості керування: зменшує перерегулювання, знижує коливальність системи, скорочує час регулювання та забезпечує високу точність підтримання температури металеві ванни. Тому для подальшої реалізації системи автоматичного керування дуговою сталеплавильною піччю доцільно використовувати PID-регулятор.

Таким чином, поставлені в розділі завдання виконано, а отримані результати підтверджують ефективність застосування сучасних методів аналізу та синтезу систем автоматичного керування для підвищення якості роботи дугової сталеплавильної печі.

					БР.АКПз-43.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

3 РОЗРОБЛЕННЯ ПРОЕКТНОЇ СКЛАДОВОЇ САК

3.1 Розроблення функціональної схеми автоматизації

Функціональні компоненти дугової сталеплавильної печі відповідають за забезпечення та підтримання процесу плавлення металу. До них належать:

1. Система електроживлення забезпечує подачу електричної енергії, необхідної для здійснення процесу плавлення. Вона зазвичай складається з пічного трансформатора, який знижує напругу електромережі до необхідного рівня та забезпечує високі значення струму, а також струмопровідів і шин, через які електроенергія підводиться до електродів печі.

2. Дугова система призначена для створення та підтримання електричної дуги між графітовими електродами та металевою шихтою. Вона складається з графітових електродів, механізмів їх переміщення та системи регулювання довжини дуги. Саме електрична дуга є основним джерелом теплової енергії, необхідної для плавлення металу.

3. Система охолодження використовується для відведення тепла від елементів печі, які зазнають впливу високих температур під час плавлення. До таких елементів належать електродотримачі, струмопроводи, склепіння, стінки корпусу та інші вузли. Як правило, система охолодження являє собою мережу водоохолоджуваних трубопроводів, по яких циркулює охолоджувальна вода.

4. Система видалення шлаку призначена для відведення шлакових продуктів, що утворюються під час плавлення та рафінування металу. Вона включає спеціальні жолоби, канали та механізми, які забезпечують випуск і транспортування шлаку за межі печі.

5. Система керування технологічним процесом забезпечує контроль і регулювання основних параметрів плавлення. До її складу входять датчики температури, тиску, витрати газу, положення електродів та інших технологічних величин, а також програмований логічний контролер і програмне забезпечення для

					БР.АКПз-43.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

обробки даних та формування керуючих впливів. Система автоматизації дозволяє підтримувати оптимальні режими роботи печі, підвищувати ефективність процесу плавлення та забезпечувати безпечну експлуатацію обладнання.

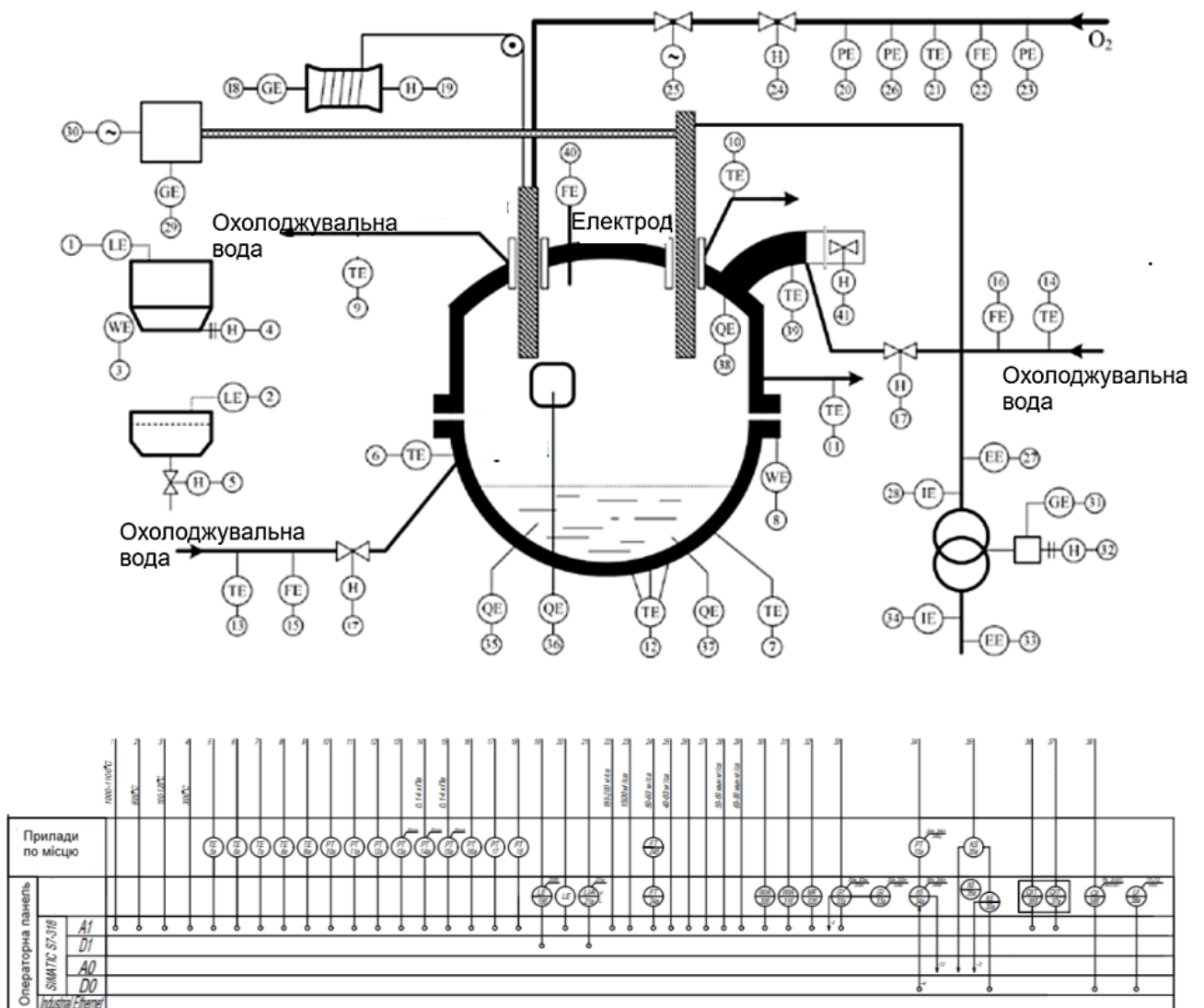


Рисунок 3.1 – Функціональна схема автоматизації

Конструкція корпусу дугової сталеплавильної печі складається з двох основних частин — днища та корпусу, які розділені межею між водоохолоджуваними панелями та вогнетривкою футерівкою. Нижня частина печі має форму ванни та призначена для розміщення розплавленого металу і шлаку. Внутрішня поверхня днища та стінок футерується вогнетривкими матеріалами,

здатними витримувати значні теплові навантаження, різкі температурні перепади та хімічний вплив розплавленого металу і шлаку.

У найбільш навантажених зонах печі застосовуються високовуглецеві вогнетривкі матеріали, які забезпечують підвищену стійкість до термічного та механічного зношування. У нижній частині ванни можуть розміщуватися спеціальні отвори для встановлення продувних фурм або інших технологічних елементів, що використовуються для інтенсифікації металургійних процесів.

Корпус печі являє собою просторову зварну конструкцію, утворену системою горизонтальних і вертикальних елементів. У середині корпусу встановлюються водоохолоджувані панелі, які захищають металеві конструкції від дії високих температур. Використання розбірних з'єднань забезпечує можливість швидкої заміни окремих елементів конструкції під час ремонту та технічного обслуговування. Водночас трубчаста конструкція каркаса дозволяє використовувати його як елемент системи охолодження, через який циркулює вода.

Для зменшення маси конструкції та підвищення її довговічності корпус печі обладнується ефективною системою водяного охолодження. У стінках корпусу передбачаються спеціальні технологічні отвори для встановлення паливно-кисневих пальників, кисневих фурм, інжекторів та інших допоміжних пристроїв. Також у корпусі розташовуються робочі вікна для виконання технологічних операцій та випуску металу.

Верхня частина печі закривається склепінням, яке разом із корпусом утворює робочий простір агрегату. Склепіння складається з центральної та периферійної частин. Центральна частина виготовляється з вогнетривких матеріалів і має отвори для проходження графітових електродів. Конструкція склепіння забезпечує можливість швидкої заміни окремих елементів футерівки під час ремонту. У периферійній частині розміщуються отвори для завантаження шихтових матеріалів, введення шлакоутворюючих добавок та відведення димових газів.

Каркас склепіння виконує функцію несучої конструкції для водоохолоджуваних панелей. Панелі забезпечують ефективне відведення тепла та

										Арк.
										53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БР.АКПз-43.00.00.000 ПЗ					

знижують теплове навантаження на металеві елементи печі. Їх кріплення здійснюється за допомогою спеціальних рамних конструкцій, які забезпечують надійну фіксацію та можливість обслуговування.

Основою дугової печі є міцна зварна рама, на якій встановлюється корпус агрегату. Конструкція опорної частини дозволяє нахилити піч у різних напрямках для виконання операцій випуску сталі та видалення шлаку. Нахил корпусу здійснюється за допомогою спеціального приводу, що забезпечує плавне та безпечне керування положенням печі.

Підйом і опускання графітових електродів здійснюються електромеханічними або гідравлічними механізмами переміщення. Електродотримачі закріплюються на вертикальних стояках і можуть переміщуватися вздовж вертикальної осі. Автоматична система регулювання положення електродів підтримує необхідну довжину електричної дуги, забезпечуючи стабільний режим плавлення та ефективно використання електричної енергії.

Автоматизація дугових сталеплавильних печей відіграє важливу роль у підвищенні ефективності роботи металургійних агрегатів незалежно від того, працюють вони на змінному чи постійному струмі. Впровадження сучасних автоматизованих систем керування дозволяє значно зменшити участь обслуговуючого персоналу в процесі ведення плавки, автоматизувати контроль електричних режимів роботи печі, здійснювати моніторинг стану технологічного обладнання та керувати допоміжними механізмами.

Завдяки автоматизації оператор може зосередитися на контролі основних технологічних параметрів процесу, таких як температура металу, його хімічний склад та якість готової продукції. Крім того, автоматизовані системи забезпечують стабільність режимів плавлення незалежно від рівня кваліфікації персоналу, що сприяє підвищенню повторюваності технологічних результатів і якості металу.

Основним завданням автоматизованої системи керування дуговою піччю є підтримання необхідного електричного режиму роботи, який забезпечує стабільне підведення потужності до металевої ванни. Для цього використовуються контури

									Арк.
									54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БР.АКПз-43.00.00.000 ПЗ				

автоматичного регулювання параметрів електричної дуги та системи керування електродами.

У дугових печах змінного струму основними регульованими параметрами є положення графітових електродів і напруга пічного трансформатора. Зміна положення електродів безпосередньо впливає на довжину електричної дуги та її електричний опір, а регулювання напруги трансформатора дозволяє змінювати рівень потужності, що підводиться до печі.

У печах постійного струму, крім регулювання положення електродів і напруги трансформатора, додатково використовується система керування випрямлячем, яка забезпечує підтримання необхідного значення струму дуги. Такий підхід дозволяє більш точно контролювати електричні параметри процесу плавлення та стабілізувати потужність, що надходить до металеві ванни.

У результаті дугові печі змінного струму, як правило, оснащуються системами регулювання напруги або імпедансу дуги, тоді як печі постійного струму додатково мають контур регулювання струму. Наявність двох незалежних контурів регулювання дозволяє підвищити точність підтримання електричного режиму та покращити енергетичні показники процесу плавлення.

Центральним елементом автоматизованої системи керування є програмований логічний контролер, який виконує функції збору, обробки та аналізу інформації від датчиків, а також формує керуючі сигнали для виконавчих механізмів. До складу системи входять вимірювальні канали струму, напруги, температури, тиску, витрати природного газу та інших технологічних параметрів. Виконавчими пристроями виступають механізми переміщення електродів, регулюючі клапани подачі природного газу та кисню, приводи нахилу печі, механізми відкривання склепіння та інше допоміжне обладнання.

Окрім регулювання електричних параметрів, автоматизована система виконує контроль температури металу, параметрів системи охолодження, стану газового господарства, роботи димовидалення та інших технологічних підсистем. Також

					БР.АКПз-43.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

реалізуються функції аварійного захисту, діагностики обладнання та реєстрації технологічних даних.

Сучасні системи керування будуються за модульним принципом, що забезпечує гнучкість їх конфігурації та можливість подальшого розширення. Така структура дозволяє інтегрувати систему керування дуговою піччю до загальної інформаційної мережі підприємства, забезпечувати обмін даними з SCADA-системами, архівування технологічної інформації та формування виробничої звітності.

Таким чином, автоматизована система керування дуговою сталеплавильною піччю забезпечує підтримання оптимальних режимів плавлення, підвищує продуктивність агрегату, покращує якість металопродукції, знижує витрати енергоресурсів та підвищує рівень безпеки експлуатації обладнання.

3.2 Вибір програмованого логічного контролера

Для забезпечення нижнього рівня автоматизації використовується програмований логічний контролер SIMATIC S7-300 [8], а також розподілені периферійні модулі, які взаємодіють із контролером через промислові мережі PROFIBUS DP, Modbus та Industrial Ethernet. Використання розподіленої периферії дозволяє розміщувати модулі введення-виведення безпосередньо поблизу технологічного обладнання печі. Такий підхід зменшує довжину кабельних ліній, скорочує витрати на монтаж та підвищує надійність роботи системи. Усі модулі функціонують як єдина інтегрована система, формуючи спільну інформаційну мережу.

					БР.АКПз-43.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

сигналів керування здійснюється на основі аналізу відхилення фактичних електричних параметрів від заданих значень.

Після завершення розрахунків контролер передає керуючі сигнали виконавчим приводам механізму переміщення електродів. У результаті змінюється положення електродів, довжина електричної дуги та потужність, що підводиться до металеві ванни. Такий принцип керування забезпечує стабільність процесу плавлення, підвищує енергоефективність роботи печі та покращує якість готової металопродукції.

Структурна схема регулятора потужності дугової печі змінного струму, побудована на основі електромеханічного приводу з частотним регулюванням швидкості, наведена на відповідному рисунку.

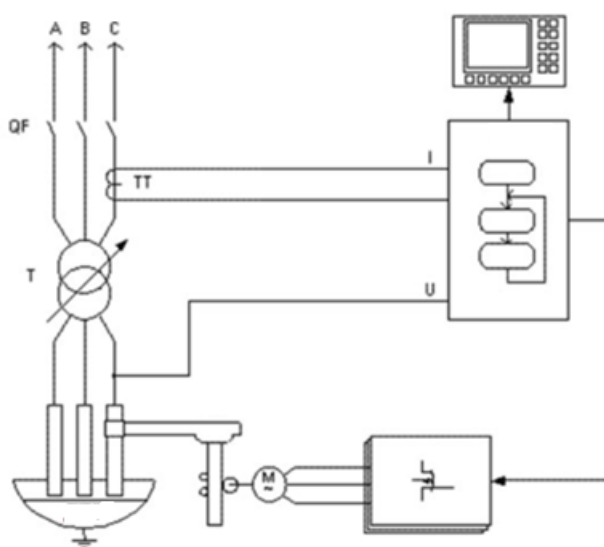


Рисунок 3.3 – Структурна схема регулятора потужності

3.3 Вибір технічних засобів автоматизації

Процес виплавки сталі в дуговій сталеплавильній печі є складним багатопараметричним процесом, який потребує безперервного контролю великої кількості технологічних параметрів. Для забезпечення стабільної роботи печі, підвищення якості металу та ефективності виробництва застосовується комплекс вимірювальних засобів, що здійснюють контроль температури, тиску, рівня

					БР.АКПз-43.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

матеріалів, складу газового середовища, витрати природного газу та інших параметрів технологічного процесу.

Одним із найважливіших контрольованих параметрів є температура. Від температурного режиму залежать швидкість плавлення шихти, інтенсивність металургійних реакцій, енергетичні витрати та якість готової продукції. Для вимірювання температури в різних зонах печі можуть використовуватися термопари, термоопори та безконтактні інфрачервоні пірметри.

Термопари працюють на основі термоелектричного ефекту та формують електрорушійну силу, пропорційну різниці температур між спаями. Вони характеризуються простотою конструкції, швидкодією та можливістю роботи за високих температур. Термоопори забезпечують більш високу точність вимірювання, однак мають обмежений температурний діапазон і застосовуються переважно для контролю температури охолоджувальної води, корпусних елементів та допоміжного обладнання.

Оскільки температура електричної дуги та металеві ванни в окремих зонах печі може перевищувати 3000 °С, для безпосереднього контролю температури технологічного процесу доцільно використовувати інфрачервоні пірметри. Вони здійснюють безконтактне вимірювання за тепловим випромінюванням об'єкта та забезпечують високу швидкість і безпечність контролю.

Контроль тиску газового середовища в печі здійснюється за допомогою датчиків тиску. Інформація про тиск використовується для контролю процесів горіння, оцінювання роботи системи димовидалення та підтримання безпечних умов експлуатації агрегату. Найбільшого поширення набули тензорезистивні, ємнісні та п'єзоелектричні перетворювачі тиску.

Тензорезистивні датчики працюють за принципом зміни електричного опору чутливого елемента під дією механічної деформації. Вони відрізняються високою точністю, швидкодією та відносно невисокою вартістю. Ємнісні датчики визначають тиск за зміною ємності між двома електродами, а п'єзоелектричні

					БР.АКПз-43.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

використовують ефект виникнення електричного заряду в кристалічних матеріалах під дією механічного навантаження.

Для контролю рівня рідкого металу та шлаку використовуються датчики рівня. Отримана інформація дозволяє оцінювати стан технологічного процесу та своєчасно коригувати режими плавлення. У металургійному виробництві найчастіше застосовуються ємнісні, ультразвукові та радарні рівнеміри.

Ємнісні датчики визначають рівень за зміною електричної ємності між чутливими електродами. Ультразвукові рівнеміри вимірюють час проходження звукової хвилі до поверхні матеріалу та назад. Найбільш надійними в умовах високих температур і запиленості є радарні рівнеміри, які використовують електромагнітні хвилі надвисокої частоти та забезпечують високу точність вимірювання незалежно від умов навколишнього середовища.

Важливе значення для ефективності плавки має контроль складу газового середовища. Для цього застосовуються газоаналізатори, які вимірюють концентрацію кисню, оксиду вуглецю, діоксиду вуглецю, азоту та інших компонентів димових газів. Отримані дані використовуються для оптимізації процесу горіння природного газу, регулювання подачі кисню та зниження енергетичних витрат.

У системі автоматизованого керування дуговою піччю також використовуються датчики витрати природного газу та кисню. Контроль витрати дозволяє забезпечити стабільну роботу паливно-кисневих пальників та підтримувати оптимальний тепловий режим печі. Для цих цілей застосовуються вихрові, турбінні та масові витратоміри.

Для контролю положення графітових електродів використовуються датчики переміщення. Вони забезпечують безперервне вимірювання координати електрода та передають інформацію до системи автоматичного регулювання. На основі цих даних контролер підтримує необхідну довжину електричної дуги та стабільність електричного режиму плавлення.

					БР.АКПз-43.00.00.000 ПЗ	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 3.1 – Підібрані технічні засоби автоматизації

Контрольований параметр	Технічний засіб автоматизації	Основні характеристики
Температура металеві ванни та дуги	Optris CTlaser 3M або Fluke Endurance Series	Безконтактне вимірювання до 3000 °С, вихід 4–20 мА, висока швидкодія
Температура охолоджувальної води та обладнання	Термоопір Pt100 з перетворювачем температури	Діапазон –50...+600 °С, висока точність
Контроль тиску газів	Endress+Hauser Cerabar PMP71	Тензорезистивний датчик, вихід 4–20 мА/HART
Контроль розрідження в газоході	Siemens SITRANS P DS III	Вимірювання надлишкового та диференціального тиску
Рівень металу та шлаку	VEGA VEGAPULS 6X	Радарний рівнемір 80 ГГц, стійкий до пилу та високих температур
Контроль кисню, СО, СО ₂	ABB Advance Optima або Siemens ULTRAMAT 23	Багатокомпонентний газоаналізатор
Витрата природного газу	Endress+Hauser Proline Prowirl F 200	Вихровий витратомір, висока точність для газів
Витрата кисню	Emerson Micro Motion ELITE	Масовий витратомір, цифровий вихід
Положення графітових електродів	Лінійний датчик переміщення Temposonics R-Series	Магнітострикційний принцип, висока точність позиціонування

Таким чином, комплекс датчиків, що використовується в дуговій сталеплавильній печі, забезпечує отримання повної інформації про стан

					БР.АКПз-43.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

технологічного процесу. Це дозволяє реалізувати ефективне автоматичне керування, підвищити продуктивність агрегату, знизити витрати енергоресурсів та покращити якість готової металопродукції.

Висновок до розділу

У даному розділі було розглянуто функціональну структуру автоматизованої системи керування дуговою сталеплавильною піччю та виконано вибір основних технічних засобів автоматизації. Проаналізовано призначення основних функціональних компонентів печі, зокрема систем електроживлення, підтримання електричної дуги, охолодження, видалення шлаку та керування технологічним процесом. Встановлено, що ефективність роботи дугової печі значною мірою залежить від рівня автоматизації та якості контролю технологічних параметрів.

Розроблена функціональна схема автоматизації дозволяє здійснювати безперервний моніторинг і регулювання основних параметрів процесу плавлення, забезпечуючи стабільність електричного режиму, підтримання необхідної температури металеві ванни та безпечну експлуатацію обладнання. Особливу увагу приділено системі автоматичного регулювання положення графітових електродів, від роботи якої залежить стабільність електричної дуги та енергоефективність процесу.

Для реалізації нижнього рівня керування обрано програмований логічний контролер SIMATIC S7-300, який забезпечує високу надійність, модульність, можливість роботи в промислових умовах та підтримку сучасних мережевих протоколів обміну даними.

Також виконано вибір сучасних засобів вимірювання та контролю технологічних параметрів, зокрема температури, тиску, рівня, витрати газів і положення електродів. Запропоновані технічні засоби характеризуються високою точністю, надійністю та пристосованістю до роботи в складних умовах металургійного виробництва.

					БР.АКПз-43.00.00.000 ПЗ	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У результаті виконання роботи було проведено комплексне дослідження технологічного процесу виплавки сталі в дуговій сталеплавильній печі та розроблено автоматизовану систему керування її роботою.

У першому розділі виконано аналіз конструкції, принципу дії та технологічних особливостей дугових сталеплавильних печей. Визначено основні параметри, що впливають на ефективність процесу плавлення, та обґрунтовано необхідність автоматизації керування температурним і електричним режимами роботи печі. Встановлено, що дугова сталеплавильна піч є складним багатопараметричним об'єктом керування з високою тепловою інерційністю та значною кількістю збурюючих впливів.

У другому розділі розроблено структурну схему автоматизованої системи керування, отримано математичну модель об'єкта керування та визначено передатні функції основних елементів системи. Проведено аналіз динамічних характеристик, досліджено стійкість системи, а також виконано оцінювання якості перехідних процесів. Результати моделювання показали необхідність використання регулятора для покращення показників якості керування. У процесі синтезу та порівняння різних типів регуляторів встановлено, що PID-регулятор забезпечує найкращі показники швидкодії, точності та стійкості системи.

У третьому розділі розроблено функціональну схему автоматизації дугової сталеплавильної печі, виконано вибір програмованого логічного контролера SIMATIC S7-300, засобів диспетчерського керування та моніторингу на базі SCADA-системи WinCC, а також підібрано комплекс сучасних технічних засобів автоматизації для контролю температури, тиску, витрати газів, рівня металу та положення електродів. Обрані технічні рішення забезпечують надійну роботу системи в умовах металургійного виробництва та відповідають сучасним вимогам до автоматизованих систем керування.

					БР.АКПз-43.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

1. Милосердов, В. О. Електротехнологічні установки та пристрої навчальний посібник / В. О. Милосердов. Вінниця: ВНТУ, 2009. – 135 с.
2. Рижков, В. Г. Електробезпека [Текст]: навчальний посібник – Запоріжжя, ЗДІА, 2016.
3. Електрична дугова піч: все, що потрібно знати // Jinsun Carbon. 2024. URL: Jinsun Carbon – Електрична дугова піч (дата звернення: 09.06.2026).
4. Люта А. В. Удосконалення систем управління приводом переміщення електродів дугових сталеплавильних печей: монографія / А. В. Люта. – Краматорськ : ДДМА, 2020. – 147 с.
5. Принцип дії електросталеплавильних печей [Електронний ресурс] // Studfile. URL: <https://studfile.net/preview/9743094/page:3/> (дата звернення: 10.06.2026).
6. Теорія автоматичного керування : навчальний посібник / П. В. Леонтєв та ін. ; за заг. ред. П. В. Леонтєва. – Суми : Сумський державний університет, 2024. – 296 с.
7. Теорія автоматичного керування: Дослідження системи автоматичного регулювання: Курсова робота [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», спеціалізації «Системи управління виробництвом і розподілом електроенергії» / А. А. Марченко, В. С. Гулий, Д. В. Настенко ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 31 с.
8. Siemens AG. SIMATIC S7-300 Programmable Controller. System Manual. – Nuremberg : Siemens, 2022. – 620 p.

					БР.АКПз-43.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64