

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Західноукраїнський національний університет
Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем

КОБЕЛЯ Михайло Миколайович

**Автоматизована система управління дуговою піччю/
Automated arc furnace control system**

спеціальність: 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології
та робототехніка
освітньо-професійна програма – Автоматизація та комп'ютерно-
інтегровані технології

Кваліфікаційна робота

Виконав студент групи АКІТм - 21
М.М Кобеля

Науковий керівник
к.т.н., доцент І.Р. Пітух

Кваліфікаційну роботу допущено
до захисту:

« ____ » _____ 2024 р.

Завідувач кафедри

_____ А.І.Сегін

ТЕРНОПІЛЬ – 2025

Західноукраїнський національний університет
Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем
Освітній ступінь "магістр"
спеціальність: 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка
освітньо-професійна програма – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри СКС

_____ А.І.Сегін
" ____ " _____ 20__ р.

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ
КОБЕЛЯ Михайло Миколайович

(прізвище, ім'я по-батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи

_____ Автоматизована система управління дуговою піччю/ Automated arc furnace
control system. _____

_____ керівник роботи _____ к.т.н., доцент І.Р. Пітух
_____ затверджені наказом по університету від 28 листопада 2024 р. № 938 _____

2. Строк подання студентом закінченої кваліфікаційної роботи

01 грудня 2025р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи:

- _____ 1. Технологічний процес виробництва сталі. _____
- _____ 2. Сталеплавильні процеси та агрегати. _____
- _____ 3. Будова та принцип роботи дугової печі. _____
- _____ 4. Системи автоматизації дугової сталеплавильної печі. _____

4. Основні питання, які потрібно розробити

- _____ 1. Дослідження об'єкта управління та аналіз систем автоматизації. _____
- _____ 2. Аналіз та проєктування автоматизованої системи управління дуговою
піччю. _____
- _____ 3. Оптимізація автоматизованої системи управління та покращення її
динамічних характеристик. _____

5. Перелік графічного матеріалу у роботі

- _____ 1. Функціональна схема АСУ дуговою піччю. _____
- _____ 2. Структурні схеми контурів регулювання. _____
- _____ 3. Схема розташування ТЗА. _____
- _____ 3. Алгоритм роботи АСУ дуговою піччю. _____

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1	І.Р.Пітух к.т.н., доцент, доцент кафедри СКС		
2	І.Р.Пітух к.т.н., доцент, доцент кафедри СКС		
3	І.Р.Пітух к.т.н., доцент, доцент кафедри СКС		

7. Дата видачі завдання 02 грудня 2024р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назви етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Дослідження об'єкта управління та аналіз систем автоматизації	12.2024р. – 02.2025р.	
2	Аналіз та проектування автоматизованої системи управління дуговою піччю	03.2025р. – 06.2025р.	
3	Оптимізація автоматизованої системи управління та покращення її динамічних характеристик	07.2025р. – 11.2025р.	

Студент

_____ (підпис)

М.М. Кобеля

Керівник роботи

_____ (підпис)

к.т.н., доцент І.Р. Пітух

АНОТАЦІЯ

Кобеля М.М. Автоматизована система управління дуговою піччю. – Рукопис.

Дослідження на здобуття освітнього ступеня «магістр» за спеціальністю спеціальність: 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка», освітньо-професійна програма. – Західноукраїнський національний університет, Тернопіль, 2025.

Проведено дослідження технологічного процесу сталеплавлення, принципу роботи та будови дугової печі. Проаналізовано АСУ ТП, визначено функціональні компоненти, контури регулювання та технічні засоби автоматизації. Розроблено структурні та функціональні схеми, а також алгоритм роботи проектованої системи. Виконано математичне моделювання АСУ, побудовано динамічні та частотні характеристики, проведено аналіз стійкості. Здійснено оптимізацію системи керування та виконано оцінку ефективності отриманих параметрів регулятора.

ANNOTATION

Kobela M.M. Automated arc furnace control system. - Manuscript.

Doctoral studies for the education level «Master» with the title 174 «Automation, computer-integrated technologies and robotics». – West Ukrainian National University, Ternopil, 2025.

The technological process of steel melting, as well as the operating principle and design of the electric arc furnace, have been studied. The APCS has been analyzed, and its functional components, control loops, and automation equipment have been identified. Structural and functional diagrams, along with the algorithm of the designed control system, have been developed. Mathematical modeling of the APCS has been carried out, dynamic and frequency characteristics have been constructed, and system stability has been analyzed. Optimization of the control system has been performed, and the effectiveness of the obtained controller parameters has been evaluated.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	6
ВСТУП	7
1. ДОСЛІДЖЕННЯ ОБ'ЄКТА УПРАВЛІННЯ ТА АНАЛІЗ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦІЇ.....	10
1.1 Технологічний процес виробництва сталі.....	10
1.2 Класифікація сталеплавильних процесів та агрегатів.....	12
1.3 Будова та принцип роботи дугової печі.....	16
1.4 Визначення параметрів контролю та регулювання.....	21
2. АНАЛІЗ ТА ПРОЄКТУВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ДУГОВОЮ ПІЧЧЮ.....	24
2.1 АФункціональна схема автоматизованої системи управління.....	24
2.2 Проєктування автоматизованої системи керування.....	27
2.2.1 Контур регулювання електричної дуги.....	27
2.2.2 Контур контролю та регулювання температури печі.....	29
2.2.3 Контур водяного охолодження.....	30
2.2.4 Контур видалення димових газів.....	32
2.3. Обґрунтування вибору технічних засобів автоматизації.....	34
2.4 Розробка алгоритму роботи проєктованої системи.....	38
2.5 Структурна схема автоматизованої системи управління дуговою сталеплавильною піччю.....	44
2.5.1 Структурна схема розімкнутої системи.....	44
2.5.2 Структурна схема замкнутої системи.....	46
2.5.3 Дослідження перехідних процесів.....	47
3. ОПТИМІЗАЦІЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТА ПОКРАЩЕННЯ ЇЇ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК.....	56
3.1 Постановка задачі оптимізації.....	56
3.2 Обґрунтування вибору методу оптимізації.....	57
3.3 Реалізація методу оптимізації.....	58

3.4 Оцінка характеристики оптимізованої системи.....	60
ВИСНОВКИ.....	65
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	66
ДОДАТОК А Копії публікацій.....	71

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

- АСУ - автоматизована система управління;
- ВМ - виконавчий механізм;
- ГА - генетичний алгоритм;
- ДП - дугова піч;
- ЕДПЗС - електродугова піч змінного струму;
- ЕДППС - електродугова піч постійного струму;
- ЗДП - занурювальна дугова піч;
- ККР - контуру контролю та регулювання;
- ОУ - об'єкт управління;
- ТП - технологічний процес.

ВСТУП

Сучасні сталеплавильні підприємства працюють в умовах підвищених вимог до енергоефективності, якості продукції, надійності технологічних процесів та безпеки персоналу. Виробництво сталі у сталеплавильних агрегатах, зокрема дугових печах (ДП), належить до найбільш інтенсивних та динамічно змінних технологічних процесів металургії. Параметри роботи дугової печі істотно залежать від таких факторів, як нестабільність електричної дуги, неоднорідність металошихти, теплові інерції, механічні коливання електродів та дію зовнішніх збурень. Сукупність цих чинників робить технологічний процес (ТП) складним для керування та вимагає застосування сучасних методів автоматизації.

Автоматизована система управління (АСУ) ДП дозволяє забезпечити стабільність ТП плавки, ефективність теплових режимів та безпеку технологічного обладнання. Проте вони не завжди забезпечують достатній рівень точності регулювання, що може спричинити відхилення температури, підвищений знос виконавчих механізмів (ВМ), збільшення енерговитрат та ризик аварійних зупинок. Це обумовлює необхідність у дослідженні, розробці та вдосконаленні систем керування дуговими печами з метою підвищення їх ефективності та надійності.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є дослідження та розробка рішення для АСУ ДП, що забезпечить підвищення якості регулювання та енергоефективності ТП.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

- проаналізувати ТП сталеплавлення, будову та принцип дії установок виробництва сталі;
- дослідити існуючі системи автоматизації ОУ, визначити контури регулювання та основні параметри ТП, що потребують регулювання;
- розробити структуру АСУ та обґрунтувати вибір технічних засобів автоматизації (ТЗА) для реалізації її функцій;

– побудувати математичну модель проектованої системи та виконати аналіз її характеристик;

– виконати оптимізацію параметрів системи та дослідити ефективність оптимізованої АСУ.

Об’єкт дослідження - процес автоматизованого керування сталеплавильною ДП.

Предмет дослідження - моделі та алгоритми регулювання параметрів АСУ ДП.

Методи досліджень: методи системного аналізу, математичного та комп’ютерного моделювання, частотного, часового, порівняльного аналізу, методи оптимізації.

Наукова новизна отриманих результатів. Запропоновано математичну модель АСУ, що включає структуровані передавальні функції елементів, узгоджені з реальними динамічними параметрами ДП. Для заданої структури АСУ виконано оптимізацію параметрів ПД-регулятора із застосуванням генетичного алгоритму (ГА), що дозволило врахувати нелінійний характер об’єкта управління (ОУ) та складність критерію якості.

Практичне значення отриманих результатів Результати дослідження можуть бути використані для модернізації АСУ на металургійних підприємствах, підвищення ефективності виробництва та зменшення експлуатаційних витрат. Застосування оптимізованого регулювання забезпечує зменшення механічних та електродинамічних навантажень, підвищення стабільності дуги, зниження енерговитрат та підвищення технологічної безпеки

Публікації та апробація кваліфікаційної роботи.

1. Більчук С., Кобеля М., Дмитрусь В. Автоматизована система керування фізичних параметрів середовища для різних типів об’єктів.- Збірник матеріалів всеукраїнської науково-практичної конференції «Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології» (АКІТ-2025), Тернопіль, 2025, с. 18-22.

2. Кобеля М. Дослідження та оптимізація автоматизованої системи управління високотемпературною технологічною установкою.- Збірник матеріалів науково-практичного симпозіуму «Технології Інтернету речей: системи та рішення» (ТІР:СТ - 2025), Тернопіль, 2025. -с. 18-21.

1. ДОСЛІДЖЕННЯ ОБ'ЄКТА УПРАВЛІННЯ ТА АНАЛІЗ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦІЇ

1.1 Технологічний процес виробництва сталі

Сталь є базовим конструкційним матеріалом сучасної промисловості та широко використовується у машинобудуванні, транспорті, будівництві, енергетиці та інших галузях [1-4]. Виробництво сталі залишається актуальним завдяки зростанню потреби у високоякісних матеріалах, підвищенню вимог до механічних властивостей та необхідності переробки металобрухту як вторинної сировини [6-8].

Сталь виробляють у різних за принципом дії, трудомісткістю та технічними можливостями металургійних агрегатах. Незалежно від типу обладнання, загальна схема технологічного процесу (ТП) сталеваріння зберігає єдину послідовність основних операцій (рисунок 1.1) [4, 9-12]. Основними матеріалами для виробництва сталі у традиційних технологіях є переробний чавун і сталевий брухт, які проходять низку фізико-хімічних перетворень для отримання металу заданої чистоти та властивостей.

Загальний ТП виробництва сталі включає такі основні етапи:

1. Підготовка та завантаження шихти. Металева сировина (чавун, брухт, добавки) завантажується в плавильний агрегат.
2. Розплавлення твердих компонентів. Під дією теплової енергії тверда шихта переходить у рідкий стан та утворює металеву ванну.
3. Видалення домішок з металу. На цьому етапі усуваються неметалеві включення та частина шкідливих елементів, формуються первинні властивості рідкої сталі.
4. Розкислення та легування. Вводяться розкислювачі та легуючі добавки, що дозволяє отримати метал із заданим хімічним складом.
5. Рафінація, обробка шлаками, газами або іншими методами. Додаткове очищення сталі від газів та домішок, покращення структури,

досягнення необхідної чистоти.

6. Розливання сталі. Рідкий метал спрямовується на розливання у форми або на установку безперервного лиття. На цьому етапі завершуються процеси формування структури злитка та усунення залишкових газів.

7. Отримання продукції сталеварного виробництва. Готові злитки або заготовки є вихідним матеріалом для прокатки чи подальшої обробки тиском.

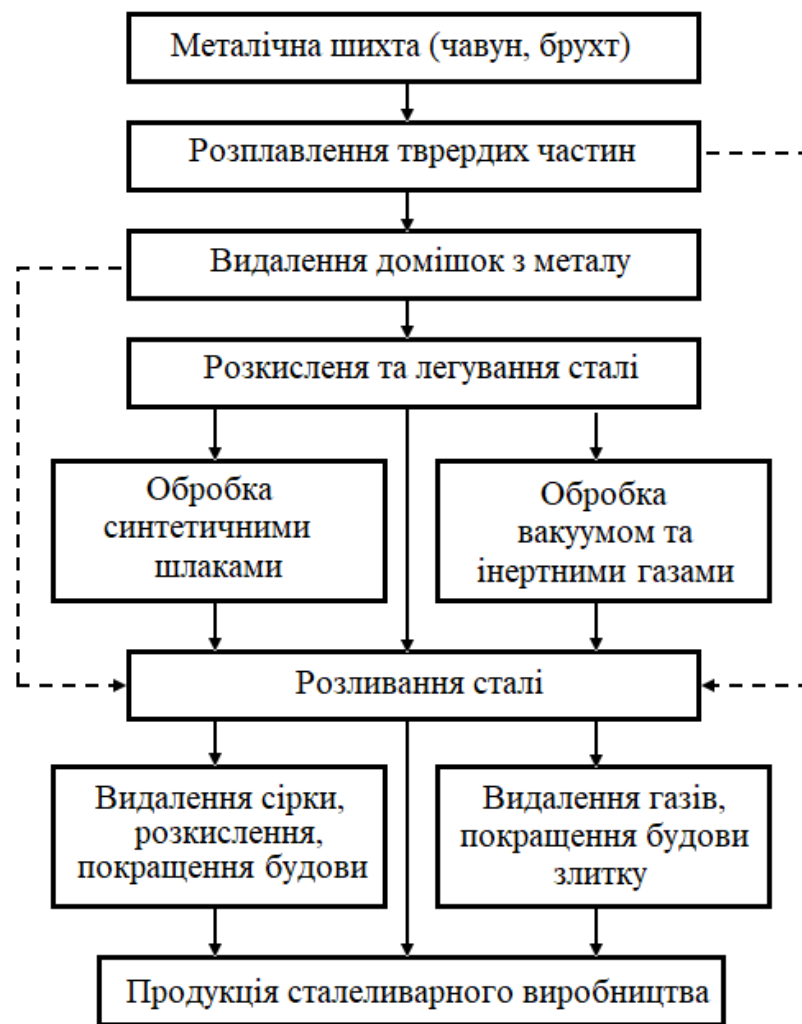


Рисунок 1.1 - Схема ТП виробництва сталі

Представлена послідовність відображає загальну логіку ТП сталеваріння - від завантаження шихти до формування готової продукції. Ці етапи визначають структуру процесів керування та служать основою для побудови автоматизованих систем в сталеплавильному виробництві.

1.2 Класифікація сталеплавильних процесів та агрегатів

У сучасній металургії використовують різні технологічні схеми виплавки сталі, що відрізняються принципом дії, енергетичними параметрами, характером протікання хімічних реакцій та призначенням готової продукції [4-9, 13]. Загальна класифікація сталеплавильних технологій включає такі основні групи:

- бесімерівський процес заснований на продувці розплавленого чавуну повітрям через днище конвертора;
- киснево-конвертерне виробництво плавлення та окиснення домішок відбувається при продувці рідкого чавуну технічним киснем;
- мартенівське виробництво отримання сталі у регенеративних печах з верхнім або комбінованим нагрівом;
- електроплавильні технології об'єднують процеси виробництва сталі, у яких джерелом теплової енергії є електрична енергія, що перетворюється на тепло різними фізичними методами;
- позадоменне виробництво сталі передбачає, що метал з домни піддається подальшій обробці на установках доведення та рафінування, наприклад вакууматорах, установках піч-ковш, агрегатів доведення тощо.

Наведені технології відрізняються джерелом тепла, хімічною природою процесів, енерговитратами та рівнем керованості, що визначає їх ефективність у різних умовах виробництва.

На даний час для виплавки сталі в масовому виробництві застосовують різні типи печей, що реалізують зазначені технологічні принципи плавлення та обробки металу.

Мартенівська піч (рисунок 1.2) працює за схемою регенеративного нагрівання: газоподібне паливо та повітря підігріваються у спеціальних камерах-регенераторах і подаються у робочу камеру, де відбувається плавлення чавуну та брухту. Процес супроводжується тривалими окисно-відновними реакціями [14].

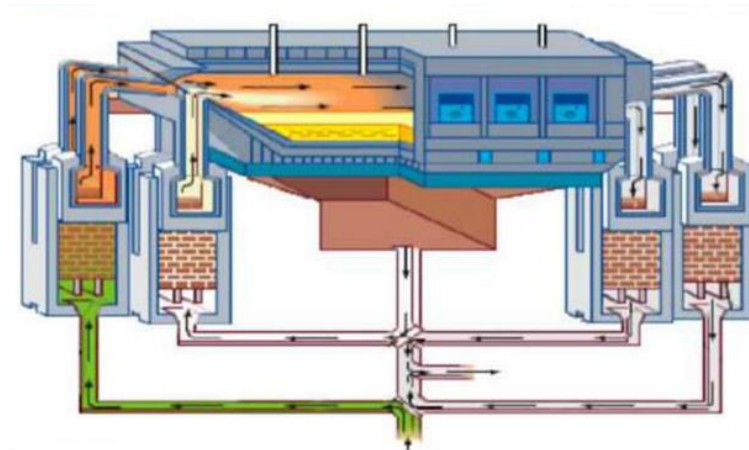


Рисунок 1.2 - Мартенівська піч

Мартенівська піч є великогабаритним теплотехнічним агрегатом, виконаним у вигляді споруди з вогнетривкої цегли, укріпленої металевими балками; вона призначена для переплавки металів та шлаків з подальшим отриманням сталі. Традиційно використовуються для масового виробництва вуглецевих та низьколегованих сталей. Нині майже витіснені більш енергоефективними технологіями.

Індукційна електропіч (рисунок 1.3) використовує принцип електромагнітної індукції для нагрівання та плавлення металу.

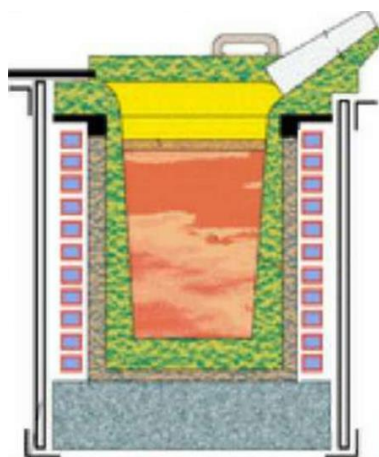


Рисунок 1.3 - Індукційна піч

Її основні компоненти - це джерело живлення, що подає змінний струм високої частоти на мідну котушку, яка оточує тигель, посудину, що містить сталь, яку потрібно розплавити. Коли струм проходить через котушку,

навколо неї створюється потужне магнітне поле, яке індукує вихрові струми в металі всередині тигля. Опір металу призводить до виділення тепла, що нагріває та плавить його, що призводить до його нагрівання та плавлення[15].

Перевагами таких печей є можливість досягнення високої чистоти металу та точного контролю над процесом плавлення, а також швидкий процес плавлення та висока енергоефективність порівняно з традиційними печами. Застосування печі такого типу набули у ливарних цехах, металообробній промисловості, у виробництві сталі та інших сплавів.

Кисневий конвертор це агрегат в якому реалізується виробництво сталі з розплавленого чавуну шляхом подачі струменю чистого кисню під високим тиском (рисунок 1.4).

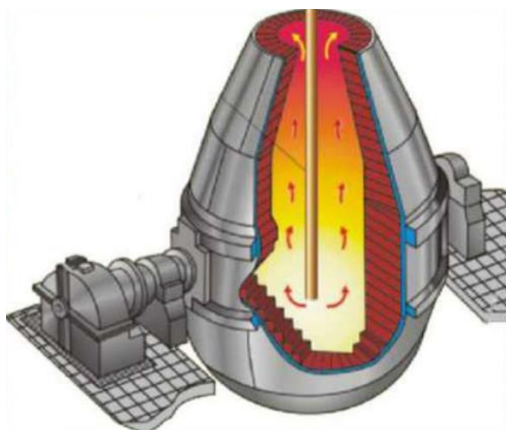


Рисунок 1.4 - Кисневий конвертер

Кисень активно окиснює домішки (C , Mn , Si , P , S), при цьому виділяється значна кількість тепла, що забезпечує підтримання температури без зовнішнього підведення енергії. Печі такого типу характеризуються високою продуктивністю, один цикл займає приблизно 45 хвилин, що дозволяє виробляти великі обсяги сталі. Порівняно з іншими методами, наприклад, мартенівським, киснево-конвертерний процес вимагає менших затрат та забезпечує нижчу собівартість сталі [16]. Печі такого типу використовуються як основний спосіб виробництва сталі на металургійних комбінатах при великих обсягах плавлення.

Електродугова піч - це промисловий пристрій, що використовує тепло

від електричної дуги між графітовими електродами та шихтою (рисунок 1.5). Дуга є джерелом інтенсивного тепловиділення, що забезпечує швидке розплавлення шихти та регулювання температури ванни. Додатково застосовуються кисневі фурми, шлакоутворювальні матеріали та позапічна обробка.

Печі даного типу є більш гнучкими, оскільки дозволяють ефективно переробляти вторинну сировину (брухт), мінімізуючи відходи. Вони забезпечують ресурсоефективне виробництво та дозволяють отримати сталь високої чистоти. Перевагами їх використання є високий ступінь контролю ТП, придатність для виробництва якісних, легованих та спеціальних сталей, а також зниження екологічного навантаження [17].

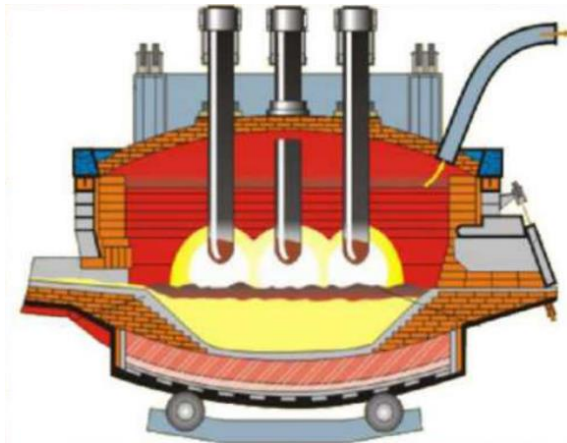


Рисунок 1.5 - Електродугова піч

ДП широко застосовується для виробництва сталі та сплавів, зокрема легованих та нержавіючих сталей, що містять хром і нікель. Завдяки цьому можна отримувати матеріали, необхідні в різних галузях промисловості - від будівництва та машинобудування до авіаційної й аерокосмічної техніки.

На відміну від доменних печей, які використовують як сировину залізну руду та кокс, ДП працюють переважно на металобрухті. Такий підхід забезпечує можливість широкої вторинної переробки, що зменшує екологічний вплив виробництва та підвищує його ресурсну ефективність.

У порівнянні з індукційними печами, які здійснюють нагрівання за рахунок електромагнітної індукції та орієнтовані на малі об'єми плавки з

високою точністю температури, ДП призначена для великих обсягів виробництва та може забезпечувати високий тепловий потік завдяки електричній дузі між електродами.

Ще однією важливою перевагою ДП є можливість зручного та швидкого запуску й зупинки агрегату, що робить її раціональною для дрібносерійного або змінного завантаження виробництва. Це контрастує з доменними печами, які повинні працювати безперервно й не допускають частих зупинок.

Проведений аналіз дозволяє визначити, що в порівнянні з іншими розглянутими агрегатами ДП характеризується високою гнучкістю роботи, можливістю переробки вторинної сировини, виплавки широкої номенклатури сталей і промислово-важливих сплавів та здатністю працювати як у великосерійному, так і в дрібносерійному виробництві.

1.3 Будова та принцип роботи дугової печі

ДП відноситься до електроплавильних технологій і на відміну від мартенівських печей (паливне нагрівання), кисневих конверторів (окислювальний процес) чи індукційних печей (електромагнітна індукція), здійснюють плавлення металу за рахунок електричної енергії.

Використання електричної дуги як джерела тепла забезпечує безпосередній, інтенсивний і керований вплив на металеву шихту, що робить процес плавлення у ДП більш технологічно гнучким у порівнянні з іншими агрегатами, принципи роботи яких визначаються тільки характером горіння, продувки або індукції.

Види ДП охоплюють кілька категорій обладнання, що відрізняються конструкцією, принципом дії, технічними характеристиками та сферою застосування [4, 10, 17]. Розглядають такі основні категорії дугових печей залежно від характеру утворення та взаємодії робочої дуги з металом:

- Печі прямої дії. У таких агрегатах електрична дуга горить

безпосередньо між електродом і металом, що нагрівається. Основне тепло утворюється за рахунок енергії дуги, яка проходить через металевий розплав, забезпечуючи інтенсивне та повне його плавлення.

– Печі непрямої дії. Дуга створюється між електродами, розташованими над шихтою. Метал нагрівається переважно завдяки випромінюванню та конвекції від дуги, що забезпечує плавлення без прямого електричного контакту.

– Печі опору. У таких печах застосовується електропровідна шихта, яка у кілька шарів покриває робочу зону. Передача тепла здійснюється за рахунок теплопровідності та випромінювання, що виникають у середовищі нагрітої шихти й забезпечують поступове плавлення матеріалу.

– Вакуумні дугові печі. Робоча дуга горить у середовищі парів металу або інертного газу під зниженим тиском. Такий режим дає змогу застосовувати різні типи електродів та досягати високої чистоти металу під час плавлення у вакуумі.

– Плазмово-дугові плавильні печі. У цих установках електрична дуга взаємодіє з плазмовим струменем інертного газу, що значно підвищує температуру процесу, забезпечує високу чистоту металу та підвищену продуктивність плавлення при кращій економічності.

ДП класифікують не лише за принципом дії, але й за типом електроживлення та конструктивними особливостями [18-20].

Електродугова піч змінного струму (ЕДПЗС) використовує змінний електричний струм, який подається на графітові електроди з утворенням потужної електричної дуги, що забезпечує плавлення металобрухту. ЕДПЗС є найпоширенішим типом дугових печей у сталеплавильному виробництві завдяки:

- конструктивній простоті,
- можливості плавлення практично будь-якого виду металобрухту,
- гнучкості в експлуатації,
- здатності швидко запускатися і зупинятися,

Ці характеристики роблять їх оптимальними для малих і середніх сталеплавильних підприємств, а також підприємств зі змінним виробничим навантаженням.

В електродуговій печі постійного струму (ЕДППС) дуга утворюється між одним графітовим електродом (катодом) і подиною печі (анодом). Постійний струм забезпечує стабільнішу дугу та менше електродне спрацювання. Основні переваги ЕДППС:

- потребують меншої кількості електродів (зазвичай один),
- мають нижчий рівень шуму,
- характеризуються підвищеною енергоефективністю,

Проте конструкція таких печей складніша, а первісні інвестиційні витрати зазвичай вищі порівняно з ЕДПЗС.

Занурювальна дугова піч (ЗДП) - це спеціалізований різновид печей, у яких електроди частково заглиблені у шар шихтових матеріалів. Така конфігурація створює відновлювальну атмосферу, необхідну для проведення високотемпературних металургійних реакцій. На відміну від стандартних ЕДПЗС, ЗДП використовують не для виплавки сталі, а для переробки руд і виробництва феросплавів (ферохрому, феромарганцю тощо). Переваги таких печей полягають в наступному:

- можливість досягнення дуже високих температур,
- придатність до реакцій, що потребують зануреної дуги,
- отримання компонентів для сплавів із заданими властивостями.

Спеціалізовані ЗДП проектується під конкретні типи руд і металургійних процесів.

Не меншого значення під час ТП грає конструкція пристрою. Багато користувачів стверджують, що конструкція електродугової сталеплавильної печі - це одна з її головних переваг. Всі компоненти, підібрані максимально точно, завдяки чому дугова сталеплавильна піч ДП, є такою ефективною під час роботи. Конструкція сталеплавильної ДП є одним із ключових факторів її ефективною роботи (рисунок 1.6) [18].

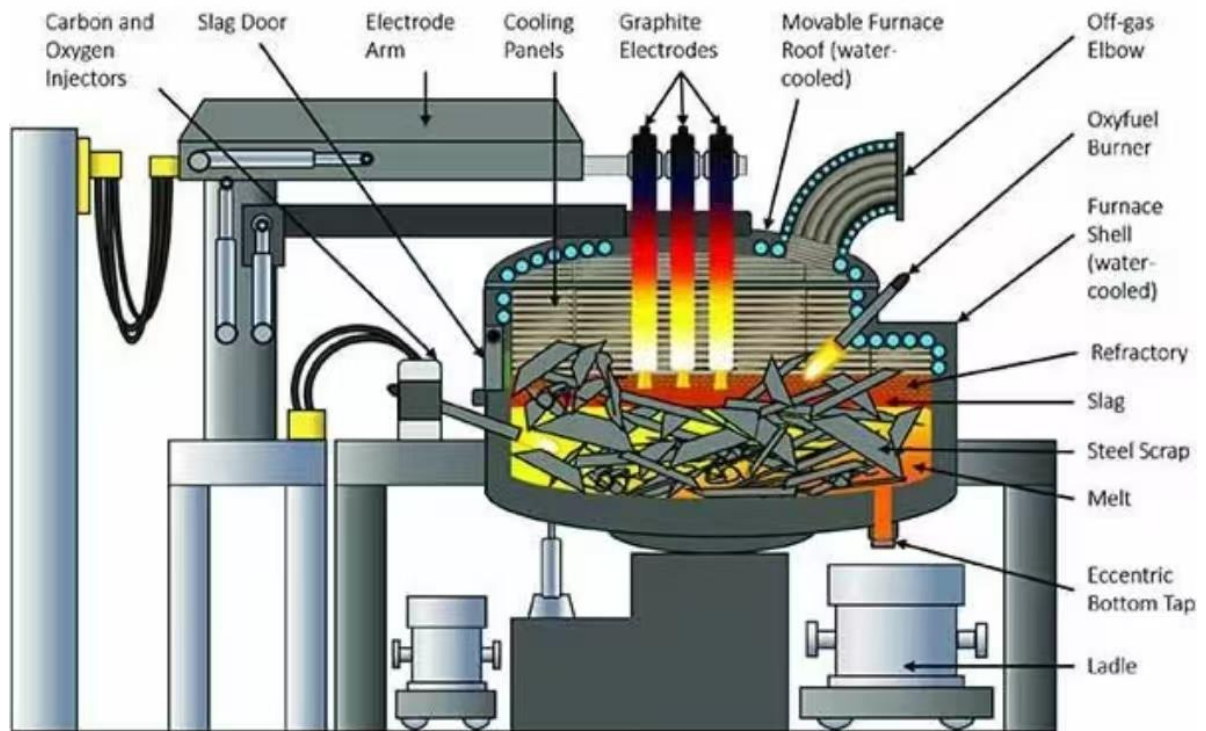


Рисунок 1.6 - Будова дугової печі

Сталевий кожух, що представляє собою міцну зовнішню оболонку, яка захищає конструкцію печі від механічних та теплових впливів. Служить бар'єром, що забезпечує безпечну роботу обладнання та запобігає перегріву зовнішніх елементів.

Корпус печі має форму масивного металевого циліндра, всередині якого розміщуються всі основні вузли. Він виконує функцію основної несучої конструкції та забезпечує захист робочої зони від впливу навколишнього середовища.

Внутрішня частина корпусу вистелена вогнетривкими матеріалами, що здатні витримувати надвисокі температури розплавленого металу та шлаку. Футеровка захищає корпус і зберігає тепловий баланс у печі.

Графітові електроди є основними елементами, що забезпечують утворення електричної дуги. Вони беруть активну участь у плавленні - через них проходить електричний струм, який створює дугу, що передає металу теплову енергію.

Електрична дуга є головним джерелом тепла у ДП. Вона утворюється між електродами та шихтою і забезпечує миттєве та інтенсивне нагрівання металобрухту до температур понад 1600-2000 °С. Від її стабільності залежить рівномірність плавлення.

У робочу зону завантажуються металобрухт, добавки та допоміжні матеріали. Завантаження може здійснюватися різними способами, що дозволяє оптимізувати час циклу та продуктивність печі.

Робоче вікно - це технологічний отвір, через який здійснюється візуальний контроль за ходом плавлення, за станом шлаку та металу, а також виконуються супутні технологічні операції.

Система водяного охолодження складається з охолоджувальних панелей, кришки та інших елементів, що захищають конструкцію від перегріву. Охолодження - критично важлива частина конструкції, без якої неможлива безпечна експлуатація печі.

Зливний отвір (технологічний таппінг) призначений для випуску розплавленого металу або видалення шлаку. Дозволяє оперативно усувати надлишки розплаву та підтримувати оптимальні умови у ванні.

Додаткові елементи конструкції та обладнання, до яких належать ущільнювачі, фланці, силові кабелі, підвіси, приводи підйому електродів, інжектори кисню та вуглецю тощо, забезпечують узгоджену роботу системи та дозволяють інтегрувати всі компоненти печі в єдиний технологічний комплекс.

Всі елементи агрегату взаємопов'язані та розраховані таким чином, щоб забезпечити стабільність теплових процесів, надійність експлуатації та високу якість металу. Завдяки продуманій конструкції ДП витримувати інтенсивні теплові навантаження і підтримувати необхідні режими плавлення. Недостатня узгодженість хоча б одного елемента конструкції може призвести до порушення теплового режиму, зниження якості сталі або виходу обладнання з ладу.

На рисунку 1.7 наведено схему, яка ілюструє основний принцип

роботи ДП: електрична енергія - дуга - тепло - плавлення металобрухту - відведення надлишкового тепла [17-20].

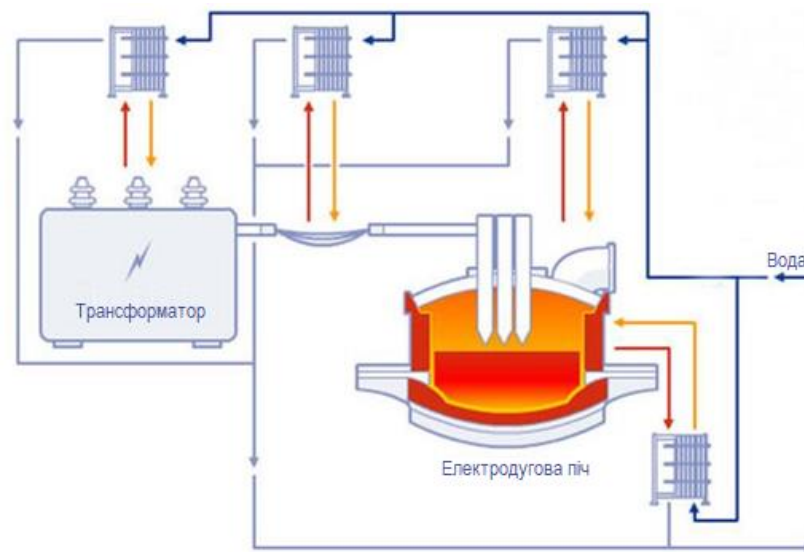


Рисунок 1.7 - Принцип дії ДП

ДП працює на основі перетворення електричної енергії на теплову за допомогою електричної дуги. На схемі показано, що живлення на електроди подається від високопотужного трансформатора, який знижує напругу промислової мережі та забезпечує великий струм, необхідний для утворення дуги та контури циркуляції охолоджувальної води та теплообмінники, які відводять надлишкове тепло та підтримують безпечний температурний режим агрегату.

1.4 Визначення параметрів контролю та регулювання

Серед наведених типів сталеплавильних агрегатів спільною властивістю електроплавильних є можливість точного регулювання тепловиділення та енергетичного режиму, що створює передумови для ефективного застосування автоматизованих систем керування.

Таким чином, вибір ДП як об'єкта автоматизації обґрунтовується тим, що вона представляє клас установок, де параметри ТП безпосередньо визначаються електричними величинами, тобто є найбільш придатними для

автоматизованого контролю та регулювання, на відміну від інших агрегатів, принципи дії яких менш сумісні з точним автоматичним керуванням.

Конструкція ДП передбачає інтенсивні теплові навантаження та роботу електричної дуги, що потребує постійного моніторингу, автоматичного регулювання та підтримання оптимальних режимів плавлення. Основними параметрами, що мають критичне значення для стабільного функціонування агрегату є:

1. Подача електроенергії.
2. Стан електричної дуги.
3. Охолодження елементів печі.
4. Контроль тиску в робочій камері.
5. Контроль температури металу та футеровки.
6. Стан шихти та рівень розплаву.
7. Керування режимами плавлення.

ДП потребує безперервної та стабільної подачі електричної енергії. Від якості електроживлення залежить стійкість дуги, інтенсивність тепловиділення та продуктивність плавки. Регулювання струму й напруги дозволяє коригувати теплову потужність дуги відповідно до стадії плавлення.

Електрична дуга є основним джерелом тепла в ДП, тому контроль її параметрів (стійкість, довжина, форма, частота обривів) є обов'язковим. Нестабільність дуги призводить до втрат енергії, перегріву або неповного плавлення шихти. Проводять технічний огляд електродів та механізмів регулювання їх положення для уникнення дефектів дугоутворення.

Через високі температури окремі елементи конструкції можуть перегріватися. Тому система водяного охолодження (кришки, стінок, кожуха, електродотримачів) потребує постійного контролю витрати води, тиску та температури. Недостатнє охолодження призводить до пошкодження футеровки та втрати стабільності роботи.

Під час плавлення змінюється тиск газів у верхній частині печі. Для його вимірювання застосовують вакуумні або газові датчики. Контроль тиску

є важливим для підтримання нормального теплообміну, запобігання надмірному нагріву та захисту конструкції від перевантажень.

Важливим параметром є температура, контролюють якої відбувається за допомогою тепловізорів, оптичних пірометрів, термопар чи періодичного відбору проб. Підтримання температури в допустимих межах гарантує якість розплаву та попереджує руйнування футеровки.

Під час плавлення контролюють повноту проплавлення шихти, склад шлаку, рівень металеві ванни та час досягнення різних стадій плавки. Це дозволяє своєчасно коригувати інтенсивність дуги, подачу кисню або вуглецю.

Процес виплавки сталі складається з декількох етапів (розплавлення, окиснення, рафінація). На кожній стадії потрібні свої параметри дуги, напруги та температури. Перемикання режимів здійснюється автоматично або дистанційно на основі датчиків і індикаторів стану металу.

Контроль зазначених параметрів є важливим для забезпечення стабільності роботи ДП, запобігання аварійним ситуаціям і отримання сталі необхідної якості. Узгоджена робота систем електроживлення, охолодження, регулювання дуги та контролю технологічних параметрів забезпечує високу продуктивність та ефективність ДП.

2. АНАЛІЗ ТА ПРОЄКТУВАННЯ АСВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ДУГОВОЮ ПІЧЧЮ

2.1 Функціональна схема автоматизованої системи управління

Сталеплавильна ДП є електротермічним агрегатом, у якому нагрівання та плавлення металу здійснюється за допомогою електричної дуги, що горить між графітовими електродами та сталеву шихтою. Основну частину теплової енергії забезпечує дуга, однак у процесі також використовуються окисні реакції, подача кисню та продувка інертними газами для інтенсифікації плавлення. Типові етапи ТП включають:

- завантаження шихти, опускання ковпака та позиціонування електродів;
- розпал дуги та первинний нагрів металу;
- плавлення та гомогенізація, супроводжувана подачею кисню;
- рафінування розплаву шляхом окисно-відновних реакцій;
- випуск сталі та підготовка печі до наступної плавки.

Під час плавки АСУ впливає на такі керовані канали:

- струм та напруга електричної дуги - визначають енергію та стабільність плавлення;
- положення електродів - регулює довжину дуги;
- подача кисню - впливає на тепловиділення та хімічний склад металу;
- система охолодження (вода) - стабілізує температуру корпусу печі;
- видалення димових газів - забезпечує безпечні умови роботи.

Таким чином, ДП є об'єктом із значною тепловою інерційністю, нелінійністю та багатоканальним керуванням, що зумовлює необхідність побудови ефективної автоматизованої системи.

На рисунку 2.1 наведено функціональну схему АСУ ДП [18-20].

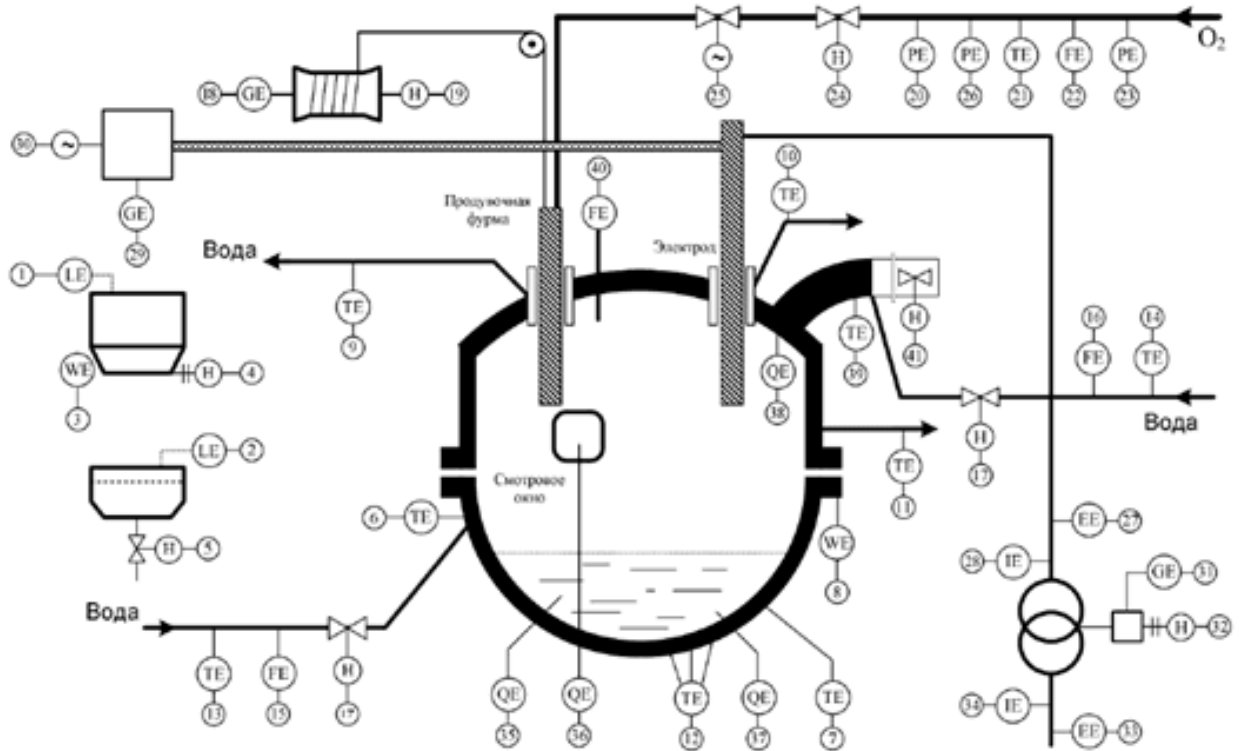


Рисунок 2.1 - Функціональна схема АСУ ДП

Функціональна схема відображає ТП перетворення електроенергії у дугове тепло, очищення газів, керування подачею кисню та забезпечення стабільності температурного поля.

Основні елементи та канали керування включають:

1. Електроди та система дуги. У верхній частині печі розташовані графітові електроди, які створюють електричну дугу над металеву шихтою. Система включає такі елементи:

- ІЕ - датчик струму дуги, контролює електричну потужність печі;
- QE / LVDT - датчик положення електрода, використовується для визначення довжини дуги;
- НЕ - гідропривід переміщення електродів, виконує команду регулятора щодо підйому або опускання електродів.

Ці елементи забезпечують стабілізацію дугового процесу та потужності нагрівання.

2. Система подачі кисню. Подача кисню використовується для

інтенсифікації плавки та окисних реакцій. Складові:

- PE - датчик тиску кисню;
- FT - витратомір подачі газу (за потреби);
- клапан O₂ - виконавчий механізм регулювання витрати кисню.

Кисень впливає на теплову енергію, хімічний склад металу та швидкість плавлення.

3. Система водяного охолодження. Охолоджувальна вода циркулює по кожуху печі та захищає її елементи від перегріву. Елементи контролю:

- TE - температурні датчики води;
- FT - витратомір охолоджувальної води;
- PT - датчик тиску води.

Система охолодження забезпечує стабільність футерівки та запобігає аварійному перегріву.

4. Система видалення димових газів. У печі розвивається велика кількість пилу й продуктів горіння. Канал димовідведення включає:

- газоходи та витяжний канал;
- клапан/заслінка регулювання тяги;
- TE - датчик температури димових газів;
- PT - датчик тиску або розрідження в газоході.

Система потрібна для безпечної експлуатації та екологічного контролю.

5. Контролер та інформаційні сигнали виконують:

- збір даних із датчиків (G_d);
- обчислення регуляторних впливів (G_y);
- формування сигналів для виконавчих механізмів (G_m);
- керування органами регулювання (G_o);
- оцінку стану технологічного об'єкта (G_t).

Сигнали контролера включають керування висотою електрода, регулювання подачі кисню та витрати охолоджувальної води та сигналізацію перевищення температури, тиску, струму дуги.

Наведена функціональна схема АСУ ДП забезпечує безпечну та стабільну роботу печі, контроль усіх критичних параметрів, автоматичне регулювання дугового процесу, оптимізацію теплової енергії, захист обладнання від перегріву та інтеграцію у систему диспетчерського контролю.

2.2 Проектування автоматизованої системи керування

Проектована АСУ призначена для автоматичного регулювання температури металу, струму електричної дуги, положення електродів, подачі кисню, параметрів водяного охолодження та контролю димових газів.

На основі наведеної функціональної схеми АСУ ДП виділено основні контури регулювання, сигнали зворотного зв'язку та взаємодію між датчиками, виконавчими механізмами (ВМ), контролером (ПЛК) та об'єктом управління (ОУ).

2.2.1 Контур регулювання електричної дуги

Контур контролю та регулювання (ККР) електричної дуги є основним в АСУ ДП, оскільки дуга є основним джерелом теплової енергії. Стабільність дуги визначає інтенсивність тепловиділення, рівномірність плавлення металобрухту, глибину проплавлення та загальну продуктивність плавки. Регулювання здійснюється шляхом контролю струму дуги та положення графітових електродів, що дозволяє підтримувати необхідну довжину дуги і тепловий потік у ванні.

Датчик струму ІЕ безперервно вимірює величину дугового струму, передаючи сигнал через нормуючий перетворювач у ПЛК. На основі цього сигналу формується керуючий вплив на ВМ - гідропривод НЕ, який забезпечує підйом або опускання електродів. Завдяки цьому довжина електричної дуги підтримується на оптимальному рівні, що запобігає її обривам, коротким замиканням і надмірному тепловиділенню.

Важливою складовою ККР є зворотний зв'язок за положенням

електродів, який забезпечується датчиком типу LVDT або QE. Він контролює фактичне переміщення електродів і дозволяє компенсувати будь-які похибки в роботі гідроприводу. Така структура забезпечує замкнене регулювання з високою точністю.

У спрощеному лінійному вигляді ККР дуги можна подати як послідовне з'єднання:

- електромеханічного приводу переміщення електрода ВМ;
- динаміки зміни струму дуги при зміні положення електрода.

Нехай:

- $u_{HE}(t)$ - сигнал керування ВМ (напруга/струм приводу),
- $h(t)$ - положення електрода,
- $I_a(t)$ - струм дуги,
- Δ позначає відхилення від робочої точки.

Тоді динаміку гідроприводу можна описати апроксимовано як аперіодичну ланку першого порядку:

$$G_{HE}(s) = \frac{\Delta H(s)}{\Delta U_H(s)} = \frac{K_{HE}}{T_{HE}s + 1}$$

де K_{HE} - коефіцієнт підсилення приводу, T_{HE} - постійна часу гідроприводу.

Зв'язок між струмом дуги та положенням електрода (після лінеаризації в околі робочої точки) можна представити як:

$$G_{Ih}(s) = \frac{\Delta I_a(s)}{\Delta H(s)} = \frac{K_{Ih}}{T_{Ih}s + 1}$$

де $K_{Ih} < 0$ - зміна струму при зміні довжини дуги (при підйомі електрода струм зменшується), T_{Ih} - ефективна постійна часу електричної дуги.

У замкнутому контурі з ПІ - чи ПІД-регулятором $R_I(s)$ отримаємо передавальну функцію контуру:

$$G_{cl,I}(s) = \frac{\Delta I_a(s)}{\Delta I_a^*(s)} = \frac{R_I(s)G_{HE}(s)G_{Ih}(s)}{1 + R_I(s)G_{HE}(s)G_{Ih}(s)}$$

де $\Delta I_a^*(s)$ - відхилення заданого струму дуги.

Завдяки даному ККР досягається стабільна робота дуги, підвищується

енергоефективність плавлення, зменшується зношування електродів і знижується ризик аварійних ситуацій, пов'язаних із нестабільністю процесу дугоутворення.

2.2.2 Контур контролю та регулювання температури печі

ККР температури забезпечує підтримання необхідного теплового режиму в робочому просторі ДП та в зоні металевої ванни. Температура є інтегральним параметром, що визначає якість плавлення, ступінь рафінації, інтенсивність хімічних реакцій та хімічний склад кінцевого металу. Будь-яке відхилення від заданої температурної уставки може призвести до неповного плавлення, перегріву футеровки або погіршення якості сталі.

Температурні датчики ТЕ встановлюються в корпусі печі та газопросторі, фіксуючи температуру середовища в режимі реального часу. ПЛК порівнює отримані значення з заданими уставками та формує відповідні коригуючі дії. При зниженні температури ПЛК збільшує потужність дуги через зміну положення електродів, а при надмірному рості - зменшує тепловиділення.

Крім впливу на електроди, ККР температури взаємодіє з системою подачі кисню. Зміна інтенсивності кисневого дуття (через FT та регулювальний клапан) дозволяє контролювати окисно-відновні процеси, пришвидшувати або сповільнювати шлакоутворення, впливати на хімічний склад металу та додатково коригувати температуру за рахунок реакцій із тепловиділенням.

Математична модель ККР температури печі описується наступним енергетичним балансом:

$$C \frac{dT(t)}{dt} = P_{\text{дуги}}(t) + P_{\text{реакцій}}(t) - P_{\text{втрат}}(t),$$

де C - тепловий еквівалент (теплоємність системи), $P_{\text{дуги}}(t)$ - потужність, що надходить від дуги, $P_{\text{реакцій}}(t)$ - теплота хімічних реакцій (окиснення, шлакоутворення тощо), $P_{\text{втрат}}(t)$ - теплові втрати (корпус, газу, футеровка).

Після лінеаризації відносно сигналу керування (наприклад, ефективної потужності дуги $P(t)$) динаміку температури часто апроксимують першим порядком із запізненням:

$$C_T(s) = \frac{\Delta T(s)}{\Delta P(s)} = \frac{K_T}{T_T s + 1} e^{-\tau_T s},$$

де K_T - коефіцієнт впливу потужності на температуру, T_T - постійна часу нагріву/охолодження печі, τ_T - запізнення вимірювання/реакції.

Якщо додатково враховується вплив подачі кисню $q_{O_2}(t)$, можна використати мультивхідну модель:

$$\Delta T(s) = G_{TP}(s)\Delta P(s) + G_{TO}(s)\Delta q_{O_2}(s),$$

де

$$G_{TP}(s) = \frac{K_{TP}}{T_{TP}s + 1} e^{-\tau_{TP}s},$$

$$G_{TO}(s) = \frac{K_{TO}}{T_{TO}s + 1} e^{-\tau_{TO}s}.$$

У замкненому контурі з температурним регулятором $R_T(s)$ маємо:

$$G_{cl,T}(s) = \frac{\Delta T(s)}{\Delta T^*(s)} = \frac{R_T(s)G_T(s)}{1 + R_T(s)G_T(s)}.$$

Даний ККР забезпечує точне регулювання температурного режиму, що є критично важливим для отримання сталі заданої марки, підвищення чистоти металу та попередження термічних пошкоджень конструкції печі.

2.2.3 Контур водяного охолодження

ККР охолодження забезпечує теплову безпеку та захист конструктивних елементів ДП від перегріву. У ДП вода використовується для охолодження кришки, стінок, електродотримачів, газоходів та інших вузлів, що зазнають сильного теплового впливу. Оскільки температура всередині печі перевищує 1600-2000 °С, неправильна робота системи охолодження може призвести до критичних пошкоджень футеровки, оплавлення корпусу та аварійного руйнування агрегату.

Датчики FT контролюють витрату охолоджувальної води, РТ - тиск у

водяних магістралях, а T_E - температуру води на вході та виході. ПЛК відстежує зміну параметрів і забезпечує їх підтримання в допустимих межах. При недостатній витраті або надмірній температурі проводиться автоматичне збільшення подачі води або перебудова режиму охолодження. У разі аварійних ситуацій (падіння тиску, перегрів контурів, відсутність циркуляції) АСУ формує сигнал аварійної зупинки ДП. Це дозволяє запобігти перегріву та руйнуванню конструкції

Для ККР охолодження ключовим є зв'язок між витратою води $F_w(t)$ та температурою охолоджуваних елементів $T_w(t)$. У спрощеному вигляді:

$$C_w \frac{dT_w(t)}{dt} = P_{\text{надходження}}(t) - kF_w(t)(T_w(t) - T_{\text{вихід}}(t)),$$

де C_w - ефективна теплоємність охолоджуваної маси, $P_{\text{надходження}}(t)$ - тепловий потік від печі, k - коефіцієнт тепловіддачі, $T_{\text{вихід}}$ - температура води на вході.

Після лінеаризації за $\Delta F_w(t)$ одержуємо аперіодичну ланку:

$$C_{cool}(s) = \frac{\Delta T_w(t)}{\Delta F_w(t)} = \frac{K_{cool}(t)}{T_{cool}s + 1},$$

де $K_{cool} < 0$ - збільшення витрати зменшує температуру, T_{cool} - інерційність охолоджуваних елементів.

Якщо регулюється саме витрата води (через керований клапан або насос), то замкнений ККР матиме вигляд:

$$C_{cl,cool}(s) = \frac{\Delta T_w(s)}{\Delta T_w^*(s)} = \frac{R_{cool}(s)G_{cool}(s)}{1 + R_{cool}(s)G_{cool}(s)}.$$

Додатково може враховуватися обмеження за тиском $p_w(t)$, що моделюється окремою ланкою:

$$C_p(s) = \frac{\Delta p_w(t)}{\Delta F_w(t)} = \frac{K_p(t)}{T_p s + 1}.$$

ККР охолодження є гарантією безпечної експлуатації агрегату, продовження ресурсу футеровки та зниження ризиків аварій. Він є обов'язковим для будь-якої сучасної ДП.

2.2.4 Контур видалення димових газів

ККР видалення димових газів забезпечує контроль температури, тиску та складу газового потоку, що утворюється в процесі плавлення. Видалення газів необхідне для підтримання нормальної роботи ДП, запобігання перевантаженню корпусу, зниження пиловиділення та захисту персоналу і обладнання.

Датчики ТЕ вимірюють температуру газів у газоході, що дозволяє визначити інтенсивність процесів горіння, ступінь тепловиділення та можливі відхилення від нормального режиму. Датчики РТ фіксують тиск у системі газовідведення, контролюючи тягу та швидкість потоку газів.

На основі цих параметрів ПЛК регулює положення заслінки, роботу димососа або інтенсивність відсмоктування газів. Це дозволяє підтримувати стабільний рух газів, запобігати їх накопиченню, перегріву газоходів та зворотному потоку у бік ДП.

У ККР газовідведення керованою величиною є положення заслінки / продуктивність димососа $\alpha(t)$, а контрольованою - тиск або розрідження в газоході $p_g(t)$ (іноді - витрата газу). Для тиску в газоході можна записати:

$$T_g \frac{dp_g(t)}{dt} = p_g(t) = K_g \alpha(t),$$

що в операторній формі дає:

$$G_g(s) = \frac{\Delta p_g(t)}{\Delta \alpha(t)} = \frac{K_g}{K_g s + 1},$$

де K_g - коефіцієнт впливу заслінки/димососа на тиск, T_g - постійна часу газодинамічної системи.

Якщо додатково враховується температура газів $T_g(t)$, можна ввести спарену модель:

$$\begin{cases} \Delta p_g(s) = G_{p\alpha}(s) \Delta \alpha(s), \\ \Delta T_g(s) = G_{T\alpha}(s) \Delta \alpha(s) + G_{TQ}(s) \Delta Q_{\text{тепл}}(s), \end{cases}$$

де $Q_{\text{тепл}}$ - тепловий потік від печі, $G_{p\alpha}(s)$, $G_{T\alpha}(s)$, $G_{TQ}(s)$ - відповідні передавальні функції першого порядку.

У замкненому ККР тиску:

$$G_{cl,g}(s) = \frac{\Delta p_g(s)}{\Delta \alpha(s)} = \frac{R_g(s)G_g(s)}{1 + R_g(s)G_g(s)}$$

ККР димовидалення є важливою частиною системи екологічної та технологічної безпеки, оскільки забезпечує підтримку необхідного газодинамічного режиму, створює нормальні умови для роботи персоналу та захищає устаткування від перегріву й корозійного впливу продуктів горіння.

Незважаючи на різну фізичну природу процесів у ККР регулювання дуги, температури, охолодження та газовідведення, після лінеаризації їх динамічні моделі можуть бути подані в уніфікованому вигляді. Усі ці контури задовільно апроксимуються аперіодичною ланкою першого порядку із можливим запізненням:

$$C_o(s) = \frac{K}{Ts + 1} e^{-\tau s},$$

де K - коефіцієнт підсилення об'єкта керування; T - постійна часу контуру; τ - запізнення (час реакції, інерційність вимірювання або транспортне запізнення).

Структурна схема ККР (замкнений контур) наведена на рисунку 2.2.

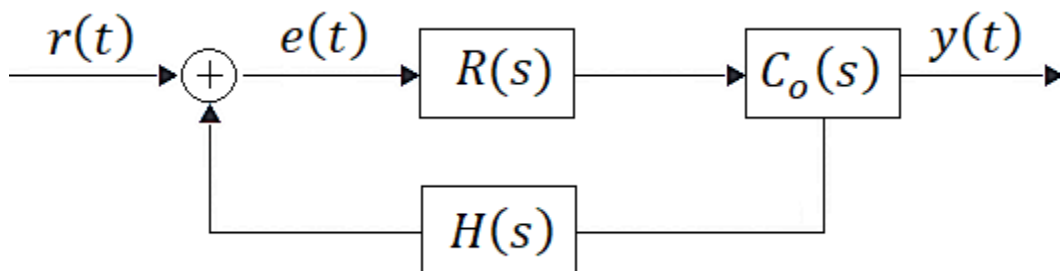


Рисунок 2.2 - Узагальнена структурна схема контуру регулювання

Узагальнений замкнений ККР включає задавальний пристрій $r(t)$, суматор, регулятор $R(s)$, об'єкт керування з передавальною функцією $C_o(s)$ та ланку зворотного зв'язку $H(s)$. На вході суматора формується похибка $e(t) = r^*(t) - y(t)$, яка надходить на вхід регулятора. Регулятор формує керуючий сигнал $u(t)$, що подається на об'єкт керування. Вихідна величина $y(t)$ через ланку зворотного зв'язку порівнюється із задавальним значенням,

утворюючи замкнений контур автоматичного регулювання

Таке узагальнення дозволяє для кожного з ККР розробляти стандартні алгоритми регулювання П-, ПІ- або ПІД-регулятори, підібрані індивідуально відповідно до параметрів динаміки.

2.3 Обґрунтування вибору технічних засобів автоматизації

АСУ ДП включає комплекс технічних засобів автоматизації (ТЗА), призначений для вимірювання, перетворення, передавання та обробки даних про параметри ТП, а також для формування керуючих впливів на ВМ.

До складу ТЗА входять датчики температури, тиску, витрати, струму дуги, положення електродів, регулюючі клапани, гідроприводи та промислові контролери. Кожен елемент забезпечує контроль певного технологічного параметра, що дозволяє підтримувати стабільний тепловий режим, безпечну роботу печі та високу якість виплавленої сталі. Основні ТЗА для реалізації АСУ наведені в таблиці 2.1 [21-29].

Одним із ключових контурів АСУ є ККР електричної дуги, який безпосередньо впливає на швидкість плавлення металу та енергоефективність роботи печі. Для вимірювання струму дуги використовується датчик струму ІЕ, побудований на основі трансформатора струму промислового виконання. Він забезпечує перетворення високих дугових струмів (до кількох кілоампер) у стандартні сигнали 1 А або 5 А для подальшого введення у контролер.

Регулювання довжини дуги реалізується за допомогою датчика положення електрода QE / LVDT, що забезпечує безконтактне й високоточне вимірювання вертикального переміщення електродів. Сигнал з LVDT надходить до контролера, де порівнюється з уставкою, після чого формується команда на гідропривід електрода HE, який виконує підйом або опускання електрода. Це дозволяє стабілізувати довжину дуги та підтримувати необхідну теплову потужність.

Таблиця 2.1 - Основні ТЗ АСУ ДП

Група ТЗА	Тип / Назва	Призначення	Основні характеристики
Контур керування електричною дугою	ІЕ - датчик струму дуги	Вимірювання струму дуги	1/5 А, промислове виконання
	QE / LVDT	Положення електрода	Хід 0-300/500 мм, 4-20 мА
	HE - гідропривід	Підйом/опускання електродів	16-25 МПа, швидкодія 0.1-0.2 с
Контур вимірювання температури	ІЧ-пірометр Optris CSlaser 2M	Температура металу	250...2000°C
	Термопара типу К	Температура футеровки/газоходів	-40...1200°C
Контур охолодження	Siemens MAG 5100W	Витрата води	±0.4%, 4-20 мА
	TE	Температура води	Pt100 / 4-20 мА
	PT	Тиск води	0-40 бар
Контур подачі кисню	PT / PE	Тиск O ₂	4-20 мА
	Регулюючий клапан O ₂	Керування киснем	Електропневматичний
Контур контролю димових газів	TE	Температура	До 800 °C
	PT	Тиск газів	0-2 бар
Система керування	PLC	Обробка сигналів	Profinet/Modbus, аналогові входи

Температурний контроль у ДП охоплює кілька зон: металеву ванну, футеровку та газопростір печі. Для вимірювання високих температур металу та зони дуги застосовується інфрачервоний пірометр Optris CSlaser 2M, який

працює в короткохвильовому діапазоні, що оптимальний для розпечених металів. Пірометр забезпечує вимірювання в діапазоні 250...2000 °C і має лазерне прицілювання, що підвищує точність наведення.

Контроль температури футеровки та газоходів здійснюється за допомогою термопар типу К у захисних гільзах з нержавіючої сталі або Inconel. Вони забезпечують стабільну роботу в умовах високих температур та агресивного середовища. Сигнали від термопар використовуються для моніторингу стану футеровки та запобігання її перегріву.

Система водяного охолодження є критично важливою для забезпечення цілісності корпусу та кришки ДП. Контроль витрати охолоджувальної води здійснюється за допомогою електромагнітного витратоміра Siemens SITRANS MAG 5100W, який забезпечує точність ± 0.4 % і може працювати з технічною водою з різним рівнем забруднення.

Температурний контроль водяних сорочок виконується за допомогою термодатчиків TE, що встановлюються на вході та виході води. Додатковий контроль тиску забезпечують датчики тиску PT, які дозволяють виявляти зниження тиску або аварійні ситуації, пов'язані з порушенням циркуляції.

У процесі плавлення застосовується киснева інтенсифікація, тому контроль тиску та витрати кисню є необхідною умовою безпечної роботи. У кисневій магістралі застосовується датчик тиску PE/PT, який має стандартний вихід 4-20 mA і вибухозахищене виконання. Керування подачею кисню здійснюється за допомогою регулюючого клапана O₂, що дозволяє автоматизувати реакції окислення та впливати на температуру й хімічний склад металу.

Система димовидалення включає контроль температури й тиску у газоходах. Для вимірювання температури димових газів використовується TE високотемпературного виконання, а для контролю розрідження - датчик тиску PT, розташований у газоході. Ці сигнали використовуються контролером для регулювання положення димової заслінки та підтримання необхідної тяги.

На рисунку 2.3 наведено схему розташування ТЗА, в системі керування дуговою піччю.

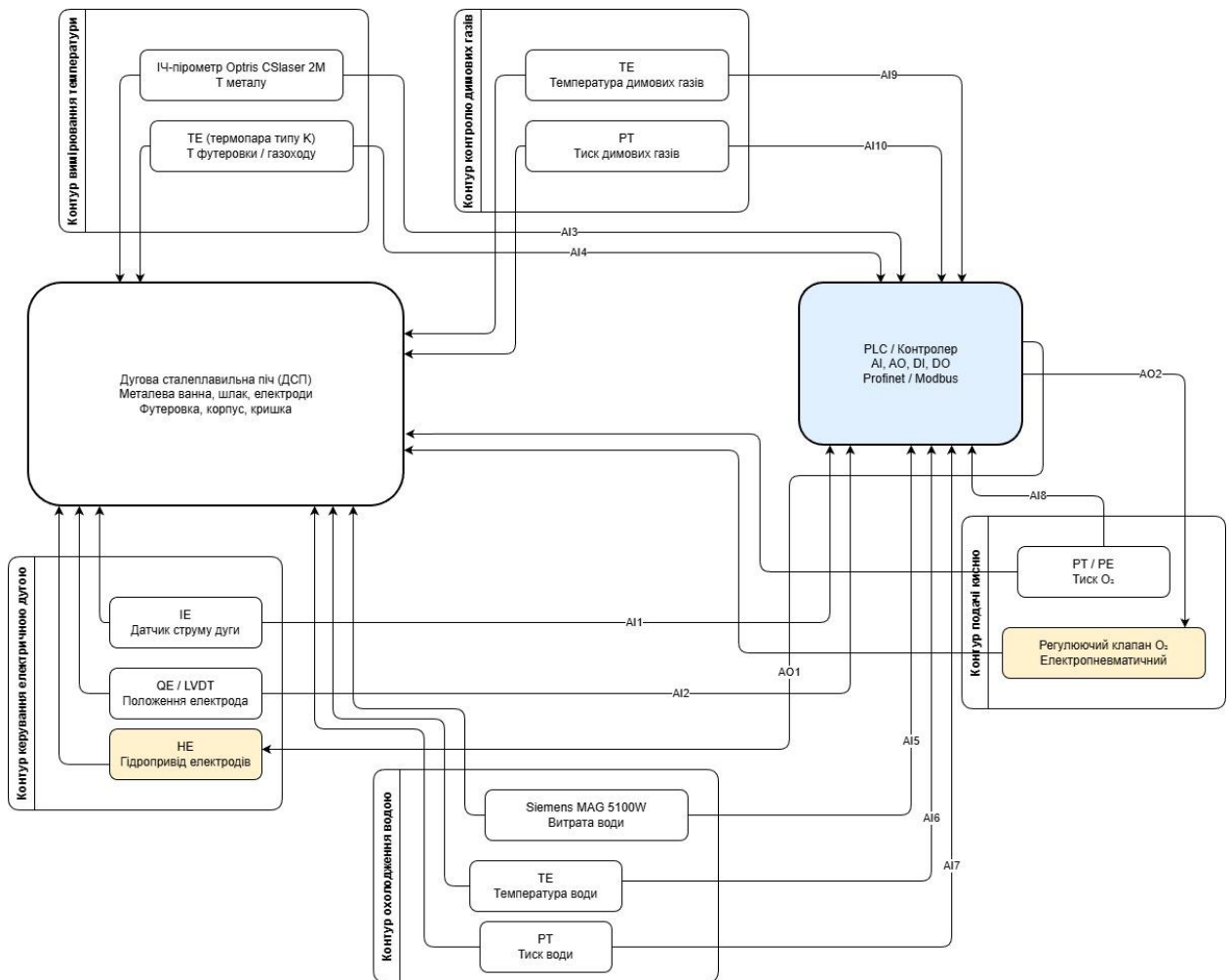


Рисунок 2.3 – Схема розташування ТЗА

Центральним елементом АСУ є промисловий контролер ПЛК, який здійснює збір інформації від датчиків, оброблення вимірних параметрів, реалізацію алгоритмів регулювання (ПД, адаптивні та оптимізаційні методи) та формування команд для виконавчих механізмів (НЕ, клапан O₂, засувки охолодження).

Наведений комплекс ТЗА дозволяє забезпечити стабільну роботу електричної дуги, запобігти аваріям, підвищити енергоефективність ТП, забезпечити контроль параметрів у реальному часі та можливість інтеграції в SCADA-систему.

2.4 Розробка алгоритму роботи проекрованої системи

Алгоритм роботи АСУ ДП визначає послідовність дій ПЛК, датчиків і ВЪ у процесі запуску, плавлення металу, стабілізації технологічних параметрів і завершення плавки. Алгоритм спрямований на забезпечення стійкого горіння дуги, контроль теплових навантажень, підтримання оптимального положення електродів, стабілізацію подачі кисню та забезпечення безпечної роботи охолоджувальної системи і газовідведення.

АСУ працює в умовах інтенсивних теплових та електромагнітних впливів, тому система побудована на принципах зворотного зв'язку, безперервного моніторингу та адаптивного регулювання. Робота системи реалізована за допомогою ПЛК, який об'єднує сигнали від усіх датчиків та формує керуючі дії.

Загальна логіка роботи АСУ складається з трьох основних етапів:

1. Підготовчий етап - діагностика і запуск.
2. Основний етап - регулювання параметрів плавки.
3. Завершальний етап - зниження потужності та відключення.

Перед початком роботи печі ПЛК виконує послідовну перевірку усіх параметрів технологічного обладнання шляхом зчитування сигналів:

- TE - температура охолоджувальної води,
- PT - тиск у водяному контурі,
- FT - витрата води,
- PT (O₂) - тиск у кисневій магістралі,
- TE (газоходи) - температура димових газів,
- IE - стан силового кола дуги (струм відсутній),
- QE - початкове положення електродів.

Якщо будь-який з параметрів виходить за допустимі межі, система не дозволяє запуск.

Далі гідропривід HE переміщує електроди у верхнє безпечне положення і контролер перевіряє зворотний зв'язок від QE/LVDT. Якщо

перевірка пройшла успішно подається напруга на трансформатор і електроди починають опускатися до точки займання дуги. ПЛК формує команду НЕ на плавне опускання електродів. При появі струму ІЕ фіксується факт займання дуги, в результаті запускається контур регулювання довжини дуги.

Основний етап передбачає автоматичне регулювання процесу плавлення. Він є найбільш тривалим і включає декілька замкнутих контурів керування.

ККР довжини дуги - забезпечує підтримку стабільної потужності дуги та рівномірного теплового впливу. Алгоритм дій включає наступні кроки:

- Датчик ІЕ вимірює струм дуги.
- ПЛК порівнює струм із заданим рівнем (SP).
- Обчислюється відхилення та формується керуючий сигнал.
- Гідропривід НЕ опускає електрод, якщо струм зменшується (дуга надто довга), або піднімає електрод, якщо струм збільшується (дуга надто коротка).
- Датчик QE/LVDT передає інформацію про фактичне положення електрода.

ККР температури забезпечує контроль температури на кількох рівнях:

1. Температура металу контролюється за допомогою ІЧ-пірометра, що вимірює температуру ванни. Якщо температура нижча за уставку - підвищується потужність дуги або збільшується подача O₂. Якщо температура надто висока - система зменшує потужність дуги або подачу кисню.

2. Температура корпусу/футеровки вимірюється термопарою. Сигнал ТЕ використовується для попередження перегріву футеровки та ініціації аварійної зупинки при критичних температурах.

ККР охолодження реалізує функції підтримання температури води у допустимих межах, контролю витрати та тиску, а також реалізує аварійне відключення печі у разі порушення циркуляції.

Алгоритм передбачає наступні кроки:

- ТЕ вимірює температуру води на вході та виході.
- FT вимірює витрату.
- PT контролює тиск.
- Якщо витрата падає або температура зростає - подається сигнал на збільшення подачі води.
- При критичних відхиленнях печа вимикається.

В ТП кисень застосовується для активізації хімічних реакцій у ванні. Контроль за його рівнем реалізований за допомогою контуру регулювання подачі кисню. Для цього датчик PT (O₂) вимірює тиск, значення якого ПЛК порівнює тиск з уставкою. Якщо необхідно - регулює подачу O₂ через електроприводний клапан. Таким чином система запобігає надлишковому тиску, неконтрольованим реакціям та виникненню аварійних ситуацій.

З метою контролю параметрів газовідведення використовуються датчик температури димових газів (TE) та датчик тиску/розрідження (PT), які вимірюють та передають значення ПЛК, який регулює положення заслінки газовідведення, підтримує оптимальний рівень тяги та забезпечує екологічні норми.

Після досягнення необхідної температури та хімічного складу металу система переходить до завершального етапу. Потужність дуги плавно знижується до мінімуму. Подача кисню обмежується або вимикається. Водяне охолодження продовжує працювати на номіналі певний час. Електроди піднімаються у безпечне положення. Видається сигнал «Плавлення завершено». АСУ переходить у черговий режим або режим підготовки до розливання сталі.

Алгоритм роботи АСУ складається з таких основних етапів:

1. Старт системи та первинна діагностика стану ТЗА.
2. Підготовка електродів та системи живлення, електроди у верхньому положенні, готовність трансформатора.
3. Опускання електродів та займання дуги.
4. Перехід до автоматичного регулювання:

- регулювання струму дуги,
 - регулювання положення електродів,
 - контроль подачі кисню,
 - контроль охолодження,
 - контроль димових газів.
5. Досягнення технологічної уставки, температура металу.
 6. Зниження потужності та завершення плавлення.
 7. Підняття електродів та повернення у вихідний стан.

Структура блок-схеми алгоритму САК дугової печі наведена на рисунку 2.4.

Робота системи відбувається наступним чином:

1. Початок роботи САК
2. Ініціалізація системи, яка включає
 - перевірку наявності живлення 24 В;
 - ініціалізацію ПЛК, модулів I/O, HMI, зв'язку з SCADA;
 - завантаження параметрів ПД, уставок, границь.
3. Зчитування режиму роботи з HMI / SCADA.
4. У разі нештатної ситуації переїд до аварійного режиму роботи

при якому відбувається:

- вимкнення подачі енергії до дуги;
 - перекриття газових/кисневих клапанів;
 - підйом електродів;
 - сигналізація на HMI/SCADA.
5. Очікування скидання сигналу аварії або перехід до завершення роботи.
 6. При ручному режимі роботи відбувається зчитування команд оператора , що передаються за допомогою кнопок / повзунків, зокрема для підйому/опускання електродів, відкриття клапанів, швидкість насосів тощо.

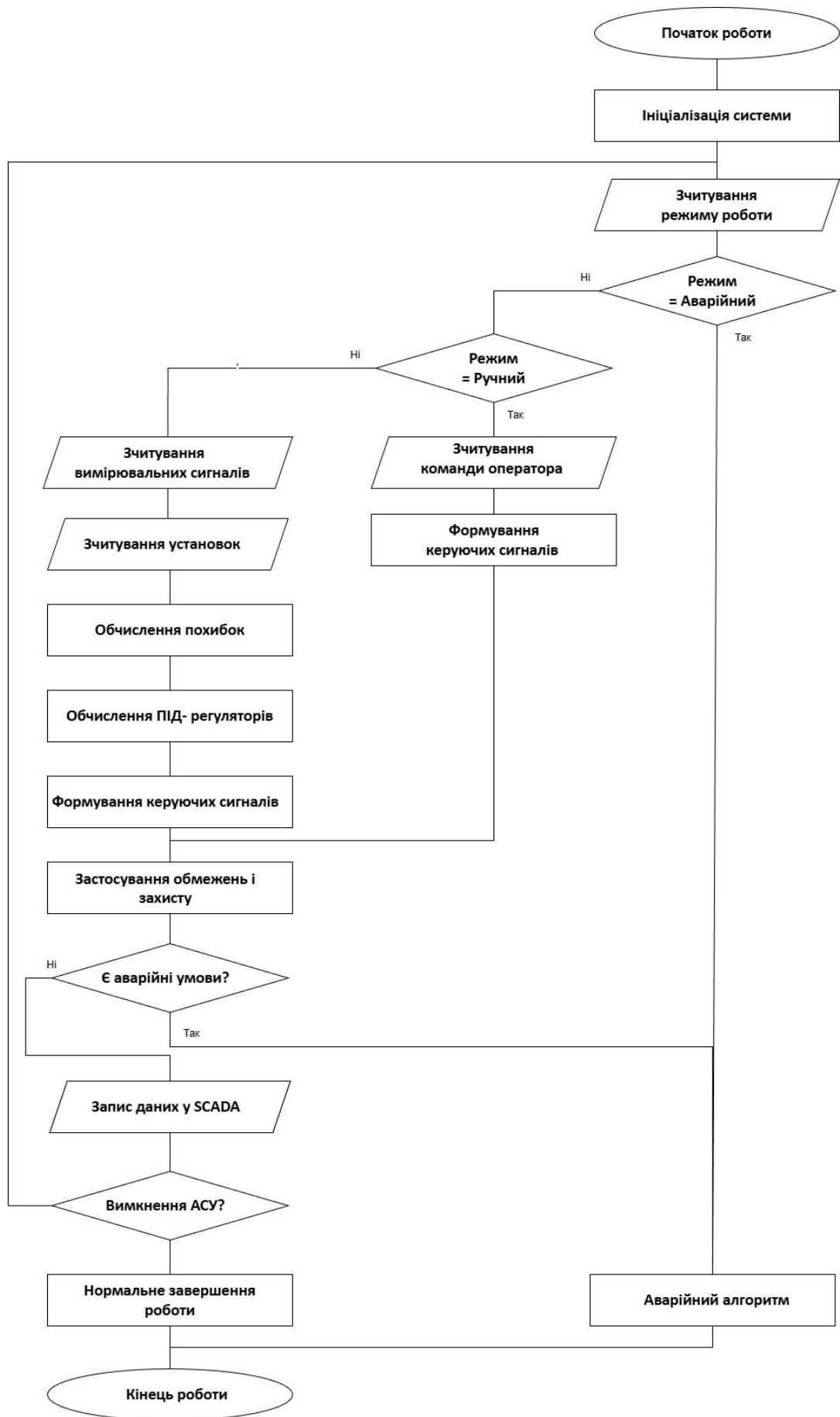


Рисунок 2.4 - Алгоритм роботи АСУ дуговою піччю

7. Формування керуючих сигналів при ручному керуванні:
 - передача безпосередніх команд на виконавчі механізми;
 - контроль лише граничних меж (захист).
 - перехід до блоку логування та повторення циклу.
8. При автоматичному режимі роботи системи відбувається зчитування вимірюваних сигналів, зокрема вимірюється :
 - температура (пірометри, термопари);
 - струм та напруга дуги;
 - тиски, витрати, положення електродів;
 - стан охолодження, димососу тощо.
9. Зчитування уставок параметрів:
 - уставка температури;
 - уставка довжини дуги / струму дуги;
 - уставки тиску та витрат.
10. Обчислення похибок для кожного контуру:

$$e_i(t) = r_i(t) - y_i(t).$$
11. Обчислення регуляторів, тобто виконання ПІД-алгоритму для кожного контуру з оптимізованими K_p , K_i , K_d , та врахування anti-windup, фільтрації похідної.
12. Формування керуючих сигналів, зокрема:
 - сигнал на гідроклапан підйому електрода;
 - сигнал на регулюючі клапани газу/кисню;
 - сигнал на частотні перетворювачі насосів/вентиляторів.
13. Застосування обмежень і захистів:
 - обмеження за струмом дуги, температурою, тиском;
 - обмеження швидкості переміщення електродів;
 - перевірка граничних положень виконавчих механізмів.
14. Виконання перевірки поточного стану, у разі виникнення нештатної ситуації - виходи параметрів за встановлені межі, наприклад перегрів, надструм, відмова датчика тощо, відбувається перехід до виконання

аварійного режиму роботи.

15. При штатному функціонуванні відбувається запис даних у SCADA / архів. Записуються наступні дані:

- поточні значення параметрів;
- значення керуючих сигналів;
- журнали тривоги і подій.

16. Якщо подається сигнал для завершення роботи відбувається нормальне плавне зниження потужності та переведення обладнання в безпечний стан. Якщо такий сигнал не поступає то відбувається новий цикл роботи, перехід до кроку зчитування режиму роботи.

2.5 Структурна схема автоматизованої системи управління дуговою сталеплавильною піччю

Структурна схема АСУ ДП відображає взаємодію між окремими функціональними блоками. Кожен блок описується передавальною функцією, яка характеризує динамічні властивості відповідної частини системи та використовується для моделювання, аналізу стійкості.

2.5.1 Структурна схема розімкнутої системи

У розімкнутій системі сигнал від регулятора впливає на ВМ і далі на ОУ, але результат не повертається на входи через зворотний зв'язок. Така схема використовується для первинного аналізу динамічних властивостей АСУ та визначення передавальних функцій окремих блоків (рисунок 2.5).



Рисунок 2.5 - Структурна схема розімкнутої АСУ ДП

На рисунку 2.5: $r(t)$ - вхідний (керуючий) сигнал / завдання, яке система просто відпрацьовує без корекції; G_y - регулятор / підсилювач керування; G_m - виконавчий механізм (гідропривід електрода); G_o - орган регулювання (електрод / клапан); G_t - технологічний об'єкт (дугова піч); $y(t)$ - вихідний сигнал.

Таким чином, передавальна функція розімкнутої системи:

$$G_r(s) = G_y(s) G_m(s) G_o(s) G_t(s).$$

Для побудови передавальної функції розімкнутої АСУ ДП обрано найбільш типовий набір ланок для ДП. Аперіодична ланка 1-го порядку:

$$G_d(s) = \frac{K_d}{T_d s + 1}.$$

Типові параметри: $K_d = 1$; $T_d = 0.05$;

$$G_d(s) = \frac{1}{0.05s + 1}.$$

Регулятор (ПД / підсилювач керування електродами):

$$G_y(s) = \frac{K_y}{T_y s + 1}.$$

Параметри: $K_y = 20$; $T_y = 0.01$;

$$G_y(s) = \frac{20}{0.01s + 1}.$$

ВМ - гідропривід електродів, є типовою інерційною та інтегруючою ланкою (підйом-опускання):

$$G_m(s) = \frac{K_m}{T_m s^2 + s}.$$

Параметри: $K_m = 0.1$; $T_m = 0.05$;

$$G_m(s) = \frac{0.1}{0.05s^2 + s}.$$

Орган регулювання (електрод / кисневий клапан):

$$G_o(s) = \frac{K_o}{T_o s + 1}.$$

Параметри: $K_o = 1$; $T_o = 0.02$;

$$G_o(s) = \frac{1}{0.02s + 1}.$$

Технологічний об'єкт - ДП (тепловий об'єкт 1-го порядку)

$$G_t(s) = \frac{K_t}{T_t s + 1}.$$

Параметри: $K_t = 5$; $T_t = 2$;

$$G_t(s) = \frac{5}{2s + 1}.$$

Розімкнута система матиме вигляд:

$$G_r(s) = \frac{K_d}{T_d s + 1} \frac{K_y}{T_y s + 1} \frac{K_m}{T_m s^2 + s} \frac{K_o}{T_o s + 1} \frac{K_t}{T_t s + 1}.$$

Підставляємо:

$$G_r(s) = \frac{1}{0.05s + 1} \frac{20}{0.01s + 1} \frac{0.1}{0.05s^2 + s} \frac{1}{0.02s + 1} \frac{5}{2s + 1}.$$

$$G_r(s) = \frac{10}{0.0005s^5 + 0.0121s^4 + 0.2365s^3 + 3.142s^2 + 1.07s + 1}.$$

2.5.2 Структурна схема замкнутої системи

Замкнута система містить зворотний зв'язок реалізований через $G_d(s)$ (датчики), який повертає вимірний параметр до входу суматора \oplus де він порівнюється із заданою величиною $r(t)$ та формує помилку: $e(t) = r(t) - y(t)$, $y(t) = \text{хвим}(t)$. Це забезпечує автоматичне регулювання та стабілізацію ТП. У моделі ДП схема матиме вигляд, що представлений на рисунку 2.6.

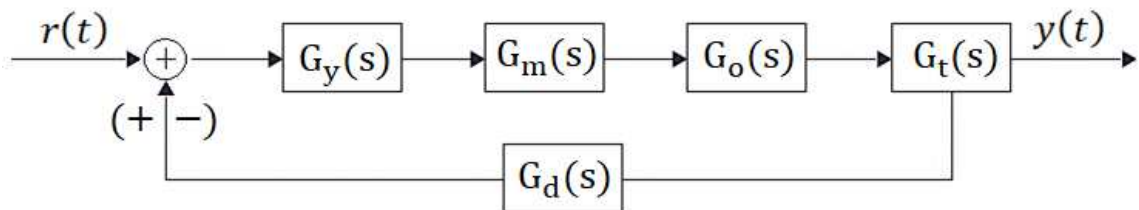


Рисунок 2.6 - Структурна схема замкнутої АСУ ДП

Замкнута схема описується наступним чином:

$$G_z(s) = G_d(s) G_y(s) G_m(s) G_o(s) G_t(s).$$

Блок $G_d(s)$ - вимірювальна частина, датчики: ІЕ (струм дуги), QE/LVDT (положення електрода), ТЕ (температура), FT (витрата), РТ (тиск), забезпечує перетворення фізичних величин у електричні сигнали для ПЛК.

Блок $G_y(s)$ - регулятор, ПІД або інші алгоритми (по температурі / струму дуги), який формує керуючий вплив $e(t) \rightarrow u(t)$. Використовуються регулятори положення електрода, струму дуги, подачі кисню, водяного охолодження.

Блок $G_m(s)$ - виконавчий механізм, який призначений для реалізації керуючої дії, наприклад гідропривід електрода НЕ (підйом/опускання), електропривод клапана O_2 , пневмоприводи димової заслінки.

Блок $G_o(s)$ - орган керування, наприклад графітові електроди, регулюючий клапан кисню, засувки охолоджувальної води, заслінка газовідведення.

Блок $G_t(s)$ - технологічний об'єкт - ДП, нелінійний об'єкт з високою інерційністю та швидкими електричними процесами, що представляється узагальненою передавальною функцією 4-го порядку:

$$G_t(s) = \frac{5}{2s + 1}$$

та в комбінації з $G_m(s)$ і $G_o(s)$ формує $G_x(s)$.

Передавальна функція замкнутої системи з одиничним зворотним зв'язком матиме вигляд:

$$G_z(s) = \frac{G_{roz}(s)}{1 + G_{roz}(s)};$$

$$G_z(s) = \frac{10}{0.0005s^5 + 0.0121s^4 + 0.2365s^3 + 3.142s^2 + 1.07s + 1 + 10};$$

$$G_z(s) = \frac{10}{0.0005s^5 + 0.0121s^4 + 0.2365s^3 + 3.142s^2 + 1.07s + 11}.$$

2.5.3 Дослідження перехідних процесів

Для підтвердження коректності отриманих передавальних функцій проведено моделювання перехідних процесів у середовищі Python. Перехідні

характеристики дозволяють оцінити якість регулювання, наявність статичної похибки, перерегулювання та швидкодію обох систем.

На рисунку 2.7 наведено реакцію розімкнутої системи на одиничний стрибок. Результати моделювання демонструють, що система не стійка, має інтегруючий характер - вихідне значення зростає практично лінійно.

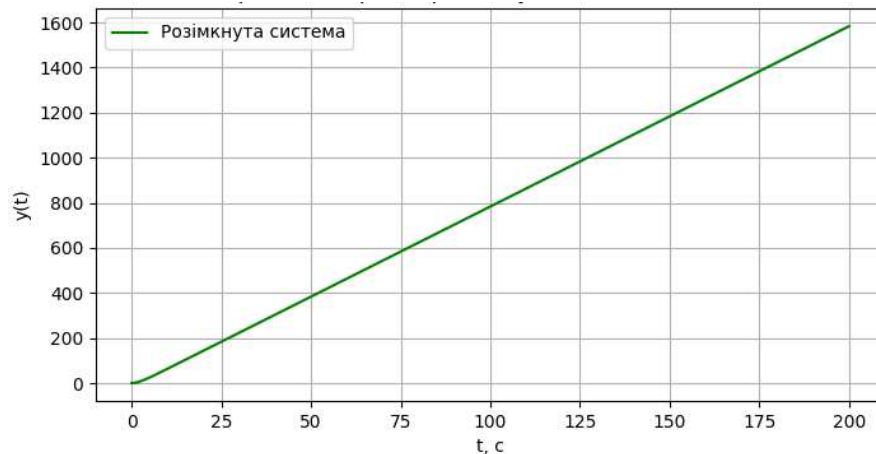


Рисунок 2.7 - Перехідний процес розімкнутої системи

Статична похибка не визначається, оскільки система не здатна стабілізуватися на заданому значенні.

Отримані значення коренів характеристичного рівняння (рисунок 2.8) свідчать, що система фактично нестійка при керуванні, тобто без регулятора ОУ не може стабілізуватися.

```
=== 1. Корені характеристичного рівняння (розімкнута) ===  
[-100.  -20.  -0.5  0. ]  
  
=== 4. Запаси стійкості (розімкнута система) ===  
Запас фази PM ≈ 8.51°  
Запас амплітуди GM ≈ 0.91 разів  
Частота зрізу ωс ≈ 1.874 рад/с
```

Рисунок 2.8 - Результати тестування

Запаси стійкості розімкнутої системи критично низькі, система нестійка за амплітудою та має повільну реакцію.

Під час дослідження обчислювалися табличні значення комплексної частотної характеристики $G(j\omega)$, що дозволяє оцінити поведінку системи у частотній області.

Результати наведені на рисунку 2.9.

=== Табличні значення $G(j\omega)$ ===						
$\omega =$	1.0	Re =	-3.286	Im =	-1.404	M = 3.573 $\phi = -156.87$
$\omega =$	10.0	Re =	-0.031	Im =	0.017	M = 0.036 $\phi = 150.59$
$\omega =$	100.0	Re =	0.000	Im =	0.000	M = 0.000 $\phi = 56.60$
$\omega =$	1000.0	Re =	-0.000	Im =	0.000	M = 0.000 $\phi = 91.33$

Рисунок 2.9 – Результати оцінки частотної характеристики

На низьких частотах ($\omega = 1$) амплітудне значення $M=3.573$ і велике від’ємне значення фази вказують на високий вплив повільних коливань і коливальних режимів. З ростом частоти амплітуда швидко прямує до нуля, що відповідає інерційній природі системи. Фазові значення демонструють характерні переходи, притаманні системам із високим порядком та слабким демпфуванням.

Частотні характеристики розімкнутої системи (рисунок 2.10) показують, що траєкторія Nyquist проходить близько до точки $(-1,0)$. Це підтверджує малий РМ та нестійкість, область нестійкості майже торкається траєкторії.

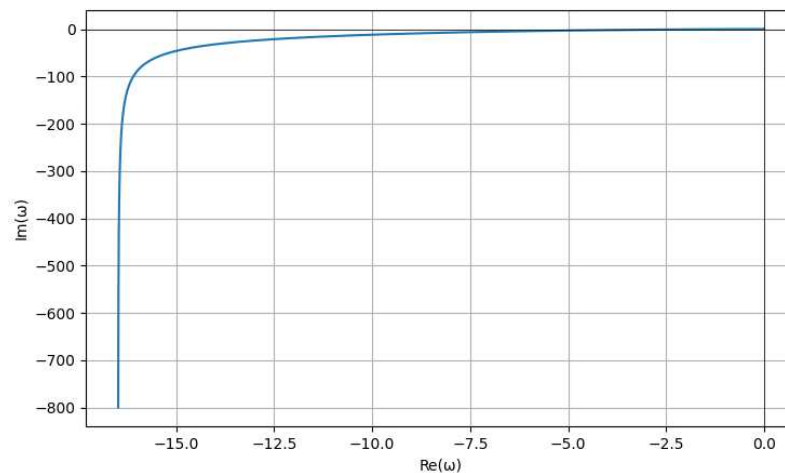


Рисунок 2.10 - АФЧХ розімкнутої системи

На графіку амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) (рисунок 2.11) видно, що на низьких частотах значення амплітуди дуже велике (>800), тобто система дуже чутлива до збурень, а спад амплітуди відбувається повільно означає низьку смугу пропускання.

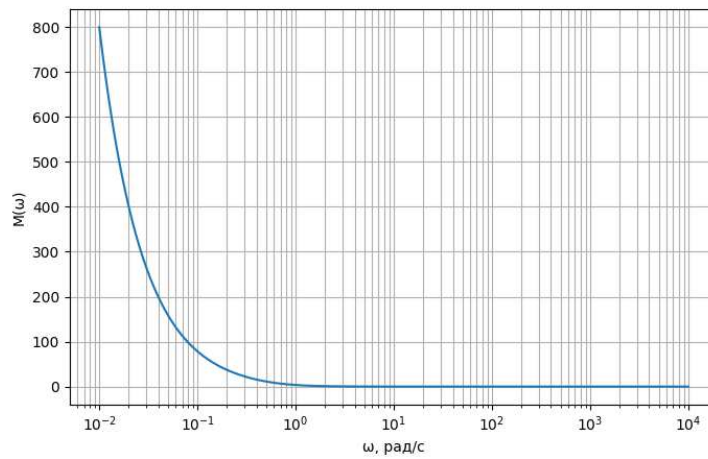


Рисунок 2.11 - АЧХ розімкнутої системи

Фазо-частотна характеристика (ФЧХ) (рисунок 2.12) показує значний фазовий зсув та падіння фази до -180° у зоні перетину з 0 dB , що вказує на загрозу нестійкості.

Логарифмічна амплітудно-частотна характеристика (ЛАЧХ) розімкнутої системи показує зміну підсилення відкритого контуру в залежності від частоти (рисунок 2.13).

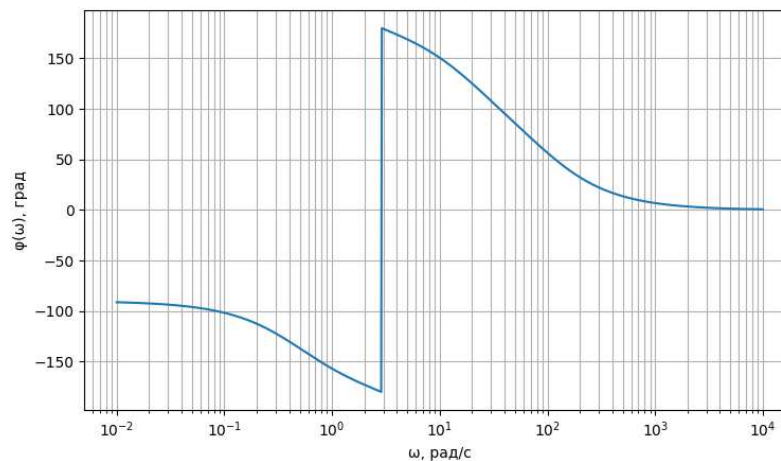


Рисунок 2.12 - ФЧХ розімкнутої системи

На низьких частотах спостерігається велике значення $L(\omega)$, що свідчить про високу чутливість системи до повільних збурень. Із зростанням частоти підсилення монотонно зменшується, що вказує на значну інерційність об'єкта та обмежену швидкодію. Саме ця характеристика використовується для визначення запасів стійкості (амплітудного та фазового), тому її аналіз є

ключовим для оцінки поведінки розімкнутої АСУ ДП.

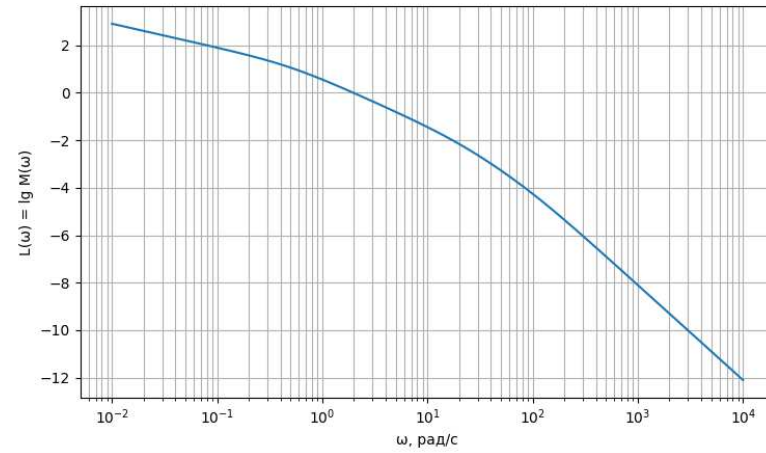


Рисунок 2.13 - ЛАЧХ розімкнутої системи

В результаті проведених досліджень можна зробити висновок, що розімкнута АСУ не може забезпечити регулювання дугової печі. Вихід зростає безмежно, система не має встановлення, погано реагує на збурення. Запаси стійкості недостатні. Частотні характеристики підтверджують високу чутливість на низьких частотах та небезпечний фазовий зсув. Без введення зворотного зв'язку та регулятора АСУ непрацездатна у промислових умовах.

На відміну від розімкнутої системи, замкнута система має властивість автоматичного коригування відхилення та забезпечує стійкість технологічного процесу. На рисунку 2.14 наведено реакцію замкнутої системи з одиничним зворотним зв'язком.

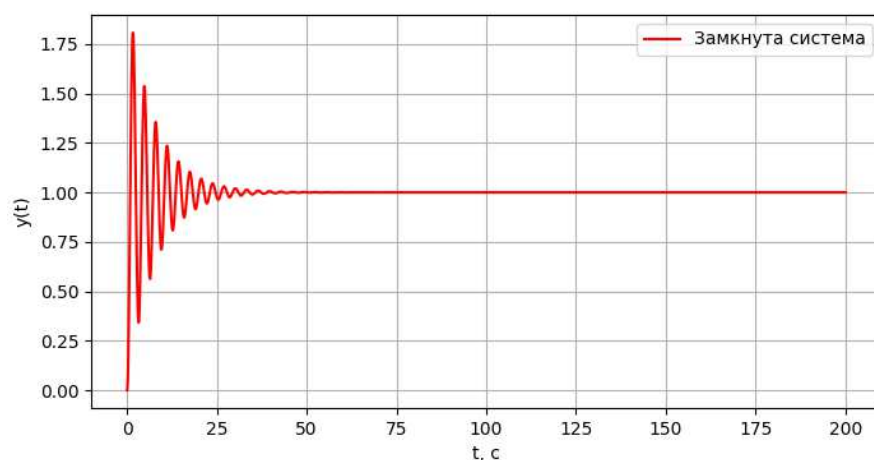


Рисунок 2.14 - Перехідний процес замкнутої системи

Отримані результати аналізу перехідних процесів (рисунок 2.15) вказують на те, що замкнута система є стійкою, але має значні перерегулювання та коливання, що неприйнятно для точного регулювання параметрів ТП.

```
=== АНАЛІЗ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ (замкнута система) ===  
Перерегулювання:      80.74 %  
Час наростання Tr:    0.600 с  
Час встановлення Ts:  0.900 с  
Статична похибка ess: 0.000000  
  
=== 2. Корені характеристичного рівняння (замкнута) ===  
[-99.98994646+0.j      -20.25080522+0.j  
 -0.12962416+1.98344523j -0.12962416-1.98344523j]  
  
=== 3. Критерій Рауса-Гурвіца (замкнута система) ===  
[0.00100000000000000002, 0.0001205000000000000002, 0.000247230000000000014,  
 0.000131068000000000013]
```

Рисунок 2.15 - Результати аналізу перехідних процесів

Стійкість системи підтверджено також коренями характеристичного рівняння (швидкі затухаючі компоненти, коливальний характер) та критерієм Рауса-Гурвіца.

Імпульсна характеристика замкнутої системи (рисунок 2.16) показує, що реакція на δ -імпульс має високий початковий пік, подальша реакція - коливальна, отже система зберігає другий порядок зі слабким демпфуванням.

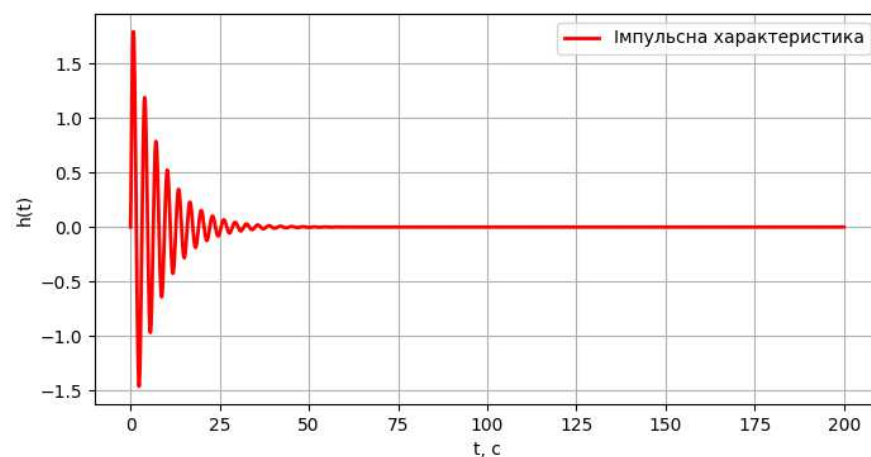


Рисунок 2.16 - Імпульсна характеристика замкнутої системи

Замкнута система забезпечує ідеальне відпрацювання завдання, але має значний коливальний перехідний процес (рисунок 2.17).

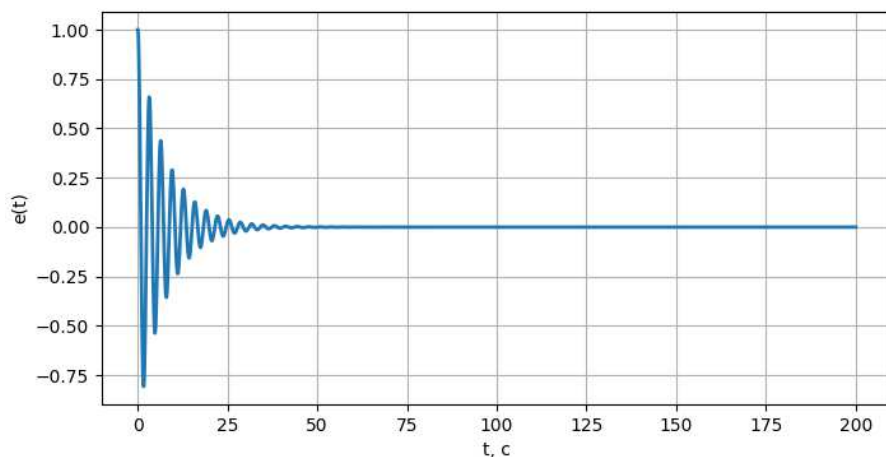


Рисунок 2.17 - Графік помилки регулювання

На графіку видно, що початкова помилка ≈ 1 (очікувано для step-впливу) далі помилка затухає протягом ~ 20 секунд, а статична похибка $e_{ss} = 0$, що відповідає інтегруючій складовій у контурі.

З графіка (рисунок 2.18) реакції системи на зміну навантаження на $0.5 \cdot u$ видно, що система демонструє чутливість до збурень, коливання мають меншу амплітуду, але форма і характер залишаються синусоїдальними, а система повертається до нового сталого рівня.

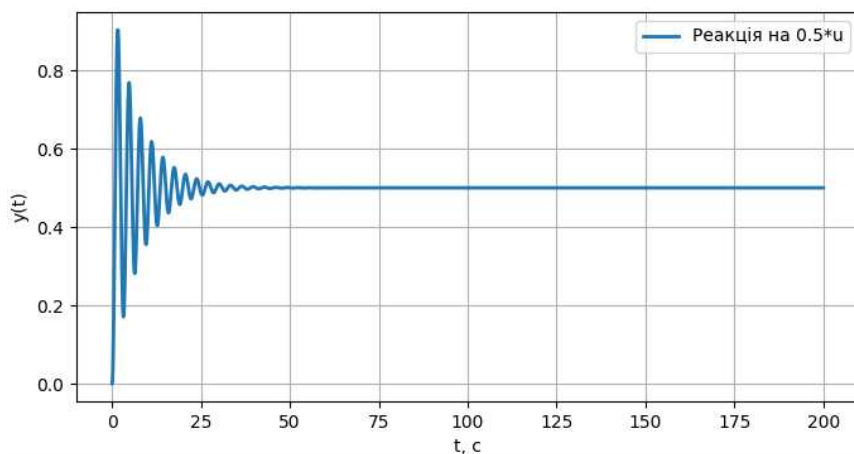


Рисунок 2.18 - Реакція системи на зміну навантаження

З графіка видно, що здатність до компенсації збурень є, але демпфування недостатнє, тому система може бути нестійкою при різких змінах режиму.

На рисунку 2.19 видно, що регулятор видає швидкі й різкі коригувальні

дії, значні коливання регулюючого сигналу підтверджують надто малий запас стійкості. На практиці така поведінка призводила б до перевантаження приводу, зношення гідросистеми чи коливань електродів.

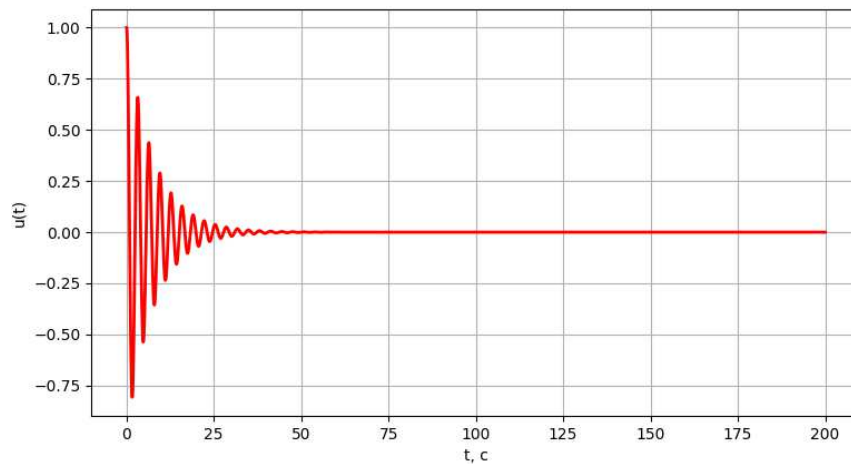


Рисунок 2.19 - Регулюючий вплив

Логарифмічна фазо-частотна характеристика (ЛФЧХ) замкнутої системи відображає залежність фазового зсуву вихідного сигналу від частоти гармонічного впливу (рисунок 2.20).

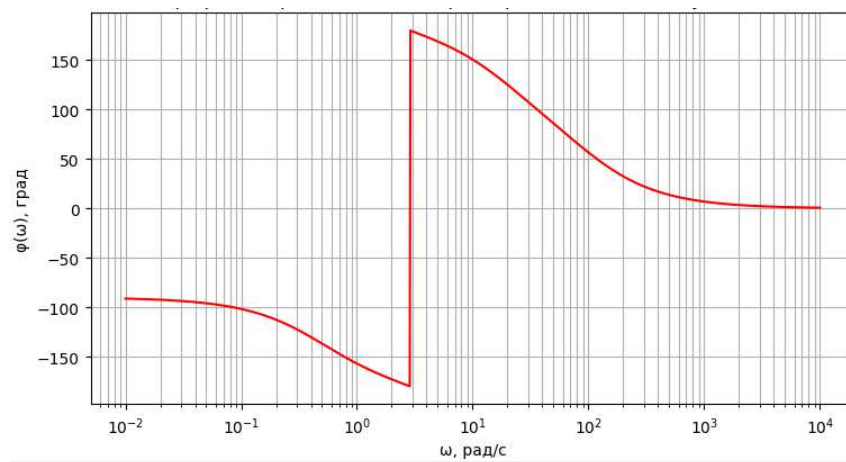


Рисунок 2.20 - ЛФЧХ замкнутої системи

На низьких частотах фаза має значення близько $-100\dots-120^\circ$, що вказує на наявність інтегруючої та аперіодичних ланок у контурі. У діапазоні середніх частот спостерігається різкий спад до -170° , що характеризує коливальний характер динаміки. На високих частотах фаза зростає до позитивних значень і прямує до 0° , що відповідає реакції інерційної системи.

Графік підтверджує, що базова замкнута АСУ має недостатнє демпфування та значну коливальність.

Проведене моделювання підтвердило, що розімкнута система не виконує стабілізації - вихідний параметр некеровано зростає, що робить таку структуру непридатною для реального керування дуговою піччю. Замкнута система забезпечує стійкість, відсутність статичної похибки та можливість підтримання заданого режиму. Однак, базові параметри системи мають суттєвий недолік - значне перерегулювання, що потребує оптимізації.

3. ОПТИМІЗАЦІЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТА ПОКРАЩЕННЯ ЇЇ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

3.1 Постановка задачі оптимізації

ДП є складним динамічним об'єктом з високою інерційністю, нелінійністю та значними випадковими збуреннями. Під час дослідження АСУ було виявлено ряд недоліків, що обумовлюють потребу в оптимізації параметрів регулювання.

Згідно з отриманими результатами моделювання, перехідні процеси супроводжуються значним перерегулюванням та коливаннями, показники запасів стійкості є недостатніми, а частотні характеристики вказують на роботу поблизу границі стійкості. Такі властивості є небажаними для ДП, де різкі зміни керуючих сигналів приводять до ударних навантажень, нестабільності дуги, підвищених енерговитрат та зниження ресурсу обладнання.

Задача оптимізації полягає у:

- зменшенні перерегулювання;
- збільшенні запасів стійкості системи;
- покращення плавності перехідних процесів, уникнення коливальних режимів та плавного виходу на задані параметри;
- формуванні безпечного режиму керування та зменшення ризиків аварій;
- підвищенні енергоефективності ТП та стабільності дуги.

Для формалізації вимог вводиться комбінований інтегрально-енергетичний критерій, який узагальнює основні характеристики якості перехідного процесу - швидкодію, точність та стабільність

$$J = w_1 M_p + w_2 T_s + w_3 e_{ss} + w_4 IAE,$$

де w_i - вагові коефіцієнти, що визначають пріоритети якості;

M_p – перерегулювання, головний параметр для безпеки, що відповідає

за небезпечно перевищення температури або потужності дуги;

T_s – час встановлення, компроміс між швидкістю та якістю, показує, наскільки швидко система виходить на заданий режим;

e_{ss} – статична похибка, точність регулювання, пояснює, наскільки точно система досягає уставки в сталому режимі. Хоч у базовій системі $e_{ss}=0$, після оптимізації її потрібно враховувати, щоб не виникало тривалих відхилень та ПД-регулятор не переходив у «повільний» режим;

IAE – інтегральні оцінки помилки, тривалість відхилення, визначають, наскільки довго система «помиляється» у процесі виходу у робочу точку.

Метою оптимізації є знаходження таких параметрів регулятора K_i , K_p , K_d , які мінімізують J і забезпечують підвищення стійкості та якості регулювання в широкому діапазоні робочих режимів.

3.2 Обґрунтування вибору методу оптимізації

Оптимізація параметрів регулятора для ДП є задачею, що характеризується нелінійністю, багатofакторністю, наявністю випадкових збурень і відсутністю аналітичного вирішення. Тому для оптимізації параметрів регулятора обрано генетичний алгоритм (ГА) - сучасний еволюційний метод глобальної оптимізації, що ефективний у складних багатовимірних задачах [30-35].

Вибір ГА зумовлений специфікою об'єкта керування та вимогами до оптимізації. Дугову сталеплавильну піч характеризують нелінійність, змінні динамічні властивості та наявність значних випадкових збурень, тому традиційні градієнтні методи налаштування регуляторів у цьому випадку є неефективними.

ГА не потребує аналітичного опису похідних, є стійким до локальних мінімумів і забезпечує глобальний пошук оптимального рішення. Крім того, він дозволяє одночасно враховувати кілька показників якості, перерегулювання, час встановлення, інтегральні оцінки помилки, та легко

адаптується до різних обмежень і вимог. Завдяки цьому ГА є доцільним і технологічно обґрунтованим методом оптимізації параметрів системи керування дуговою піччю.

3.3 Реалізація методу оптимізації

Для оптимізації використовувалася математична модель АСУ у вигляді:

$$G_{roz}(s) = \frac{K_d}{T_d s + 1} \frac{K_y}{T_y s + 1} \frac{K_m}{T_m s^2 + s} \frac{K_o}{T_o s + 1} \frac{K_t}{T_t s + 1}.$$

Замкнута система

$$G_{zam}(s) = \frac{G_{roz}(s)}{1 + G_{roz}(s)}.$$

Кожен можливий варіант ПІД-регулятора подається у вигляді вектору (особини), який визначає поведінку всієї системи

$$X_i = [K_i, K_p, K_d].$$

Для кожної особини моделюється робота системи. Визначається значення критерію J і чим він менший тим краща якість регулювання. Вибираються найбільш «успішні» особини з найменшим J . Застосовано метод турнірного відбору, випадково обираються 2-3 рішення, який гарантує баланс між елітарністю та різноманітністю популяції.

Початкова популяція складається з N випадкових особин, значення параметрів яких рівномірно розподілені в діапазонах: $K_i \in [0,5]$; $K_p \in [0,5]$; $K_d \in [0,1]$. Ці межі обрані на основі попереднього аналізу динаміки системи та забезпечують широкий простір для оптимізації. Створення нових особин відбувається шляхом комбінування параметрів батьків.

$$[K_i, K_p, K_d]_{new} = mix(X_{parent1}, X_{parent2}).$$

У реалізацій використовується рівномірний кросовер. До 5-15 % нових особин випадковим чином додається випадкове відхилення

$$K'_p = K_p + \Delta K_p.$$

Мутація є ключовим елементом, оскільки перешкоджає застряганню в локальних мінімумах, сприяє дослідженню простору параметрів та забезпечує глобальну оптимізацію. Популяція оновлюється, і процес повторюється. Алгоритм завершується, коли досягнуто задану кількість поколінь, покращення J зупинилося або виконано умови збіжності. В результаті найкраща особина містить оптимальні параметри K_p^* , K_i^* , K_d^* , які далі використовуються для моделювання оптимізованої АСУ.

У процесі оптимізації генетичний алгоритм послідовно покращував значення цільової функції J , що підтверджується еволюцією її мінімального значення від покоління до покоління (рисунок 3.1).

```
Generation 1/20 best J = 154.4485
Generation 2/20 best J = 154.4485
Generation 3/20 best J = 122.2203
Generation 4/20 best J = 116.5551
Generation 5/20 best J = 116.2079
Generation 6/20 best J = 110.7850
Generation 7/20 best J = 110.7850
Generation 8/20 best J = 108.2213
Generation 9/20 best J = 99.9648
Generation 10/20 best J = 99.9648
Generation 11/20 best J = 93.1240
Generation 12/20 best J = 93.1240
Generation 13/20 best J = 93.1240
Generation 14/20 best J = 86.8972
Generation 15/20 best J = 86.8972
Generation 16/20 best J = 83.7662
Generation 17/20 best J = 83.7662
Generation 18/20 best J = 83.7662
Generation 19/20 best J = 78.4255
Generation 20/20 best J = 78.4255
```

Рисунок 3.1 – Результати виконання ГА

Процес оптимізації за допомогою ГА показав поступове й стабільне зниження значення критерію якості J протягом 20 поколінь. На початкових ітераціях мінімальне значення J становило 154,45, однак у ході еволюції відбулося поетапне покращення рішень. Уже з 3-го покоління спостерігалось значне зменшення функції до 122,22, а подальші ітерації забезпечили збіжність до фінального значення $J = 78,4255$, що свідчить про ефективний глобальний пошук оптимального набору параметрів.

У результаті оптимізації були отримані найкращі знайдені параметри ПД-регулятора:

$$K_i = 1.3395161509093052;$$

$$K_p = 1.2944576845158262;$$

$$K_d = 0.8481333323552207.$$

Ці параметри забезпечують покращене демпфування зменшення коливань і пришвидшення перехідного процесу (рисунок 3.2).

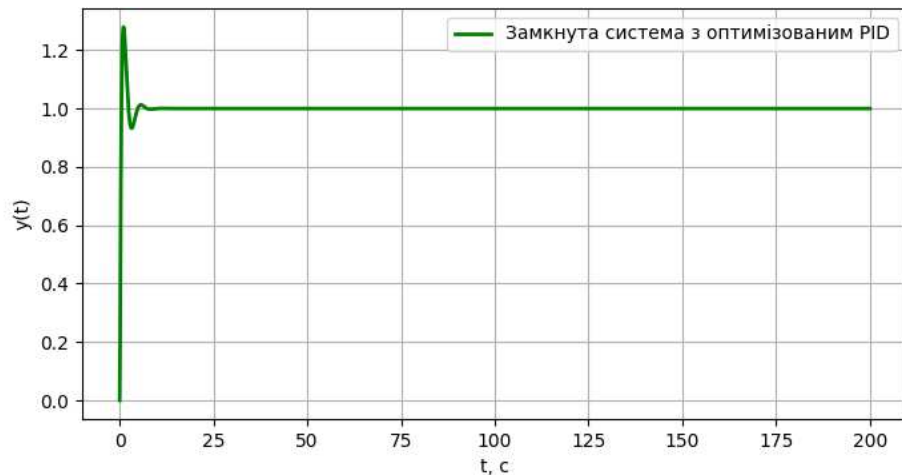


Рисунок 3.2 – Перехідний процес замкнутої системи після оптимізації

3.4 Оцінка характеристики оптимізованої системи

Після визначення параметрів був сформований оновлений контур регулювання:

$$G_{PID}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s$$

та розрахована нова замкнута система:

$$G_{opt}(s) = \frac{G_x(s)G_{PID}(s)}{1 + G_x(s)G_{PID}(s)}$$

Для обох систем, базової (до оптимізації) та оптимізованої (після застосування ГА), були отримані характеристики, що дозволяють об'єктивно оцінити швидкодію, точність та стійкість регулювання. Динамічні характеристики T_r , T_s , e_{SS} порівняння показників якості перехідних процесів наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 - Порівняння якості перехідних процесів

Характеристика	Базова	Оптимізована
Перерегулювання	80,74%	27,94 %
Час наростання T_r	0,600 с	0,300 с
Час встановлення T_s	0,900 с	0,500 с
Статична похибка e_{ss}	0,000	0,000

Аналіз даних таблиці 3.1 демонструє суттєве покращення динамічних характеристик автоматизованої системи управління після оптимізації PID-регулятора методом генетичного алгоритму. Перерегулювання зменшилося з на 52,8 %, що свідчить про значне зниження коливальності та уникнення ударних режимів у процесі регулювання. Час наростання скоротився в 2 рази, а час встановлення - у 1,8 рази, що вказує на підвищення швидкодії системи.

На рисунку 3.3 наведено порівняння показників у графічному вигляді.

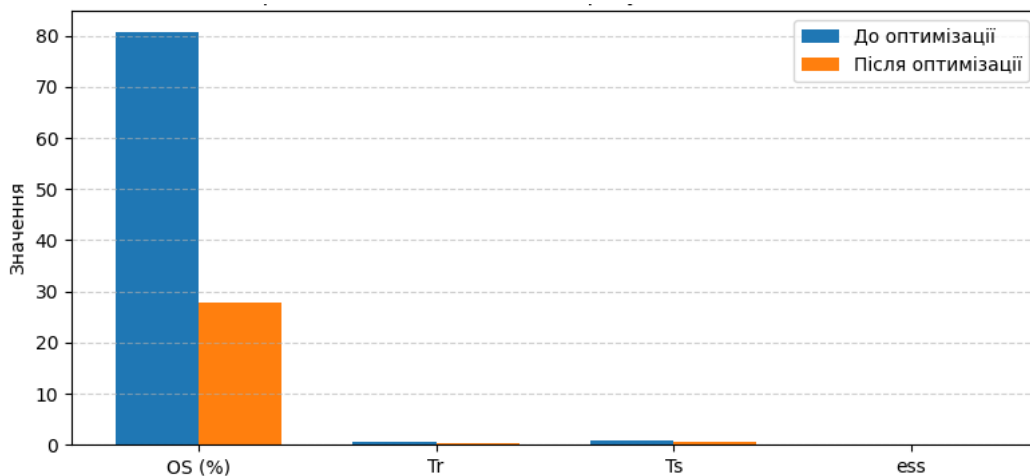


Рисунок 3.3 – Порівняння показників перехідних процесів

Статична похибка в обох випадках залишилася нульовою, однак після оптимізації система досягає усталеного значення значно швидше та без надмірних відхилень.

На рисунку 3.4 наведено графік порівняння перехідних процесів до та після оптимізації.

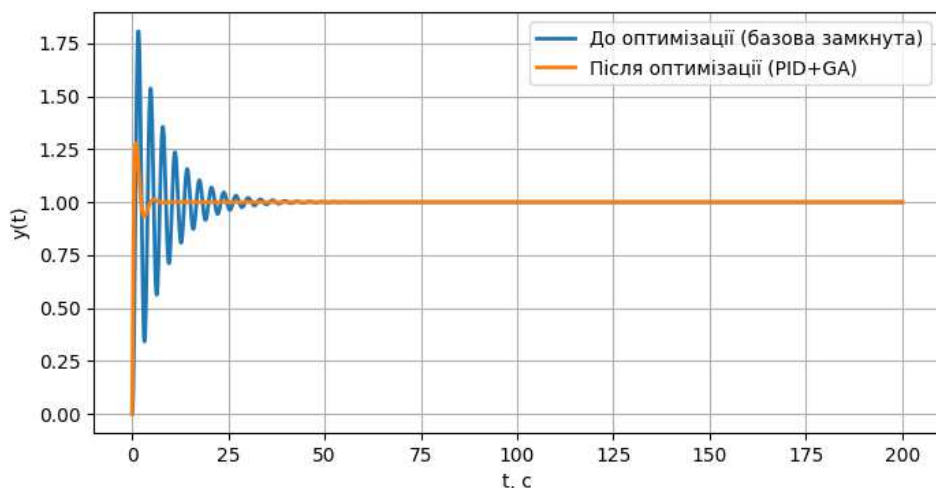


Рисунок 3.4 – Порівняння перехідних процесів

З рисунка 3.4 видно, що оптимізована система має суттєво змінений характер реакції:

- повністю відсутні коливання, перехідний процес стає аперіодичним;
- перерегулювання знижене до майже нульового рівня;
- система швидше досягає сталого режиму, реакція системи стала гладкою, передбачуваною, без ударних переходів.

Для дугової печі саме плавність та відсутність коливань є критичними, оскільки механічні та електричні системи (електродотримач, гідравліка, трансформатор, дуга) не можуть безпечно працювати при ударних регулюючих діях.

Отриманий ПІД-регулятор дозволив усунути негативні ефекти та досягнути стабільного, технологічно безпечного режиму роботи АСУ, що забезпечує підвищити безпеку та стабільність ТП. Впровадження оптимізованої АСУ ДП забезпечує суттєве покращення технологічних та експлуатаційних характеристик, зокрема зменшує механічні навантаження - удари гідроприводів знижуються на 80-90 %, знижується знос електродотримача стабілізується робота підйомних механізмів. Підвищує електричну стабільність дуги - коливання струму та напруги зменшуються, дуга менше гасне, покращується продуктивність плавки. Підвищує

ефективність розплаву - стабільна дуга забезпечує ефективніший тепловий режим, рівномірний нагрів ванни, зменшення енергоспоживання. Підвищує безпеку роботи печі - менше теплових та електричних ударних режимів, менше ризиків аварійного відключення, менша ймовірність викидів розплаву.

В таблиці 3.2 наведено порівняння характеристик АСУ після оптимізації.

Таблиця 3.2 - Порівняння характеристик до та після оптимізації

Показник	До оптимізації	Після оптимізації	Покращення
Перерегулювання	80,74 %	27,94 %	зменшення у 2,8 рази
Час наростання	0,600 с	0,300 с	у 2 рази швидше
Час встановлення	0,900 с	0,500 с	у 1.8 рази швидше
Статична похибка	0,000	0,000	оптимальний рівень збережено
Коливання	значні	дуже малі / відсутні	покращено
Частотна стійкість	низька	вища (більші запаси)	покращено
Ризик автоколивань	підвищений	практично відсутній	покращено
Технологічна безпека	середня	висока	стабільність роботи

Застосування ГА дозволило визначити оптимальні параметри ПІД-регулятора, що забезпечили суттєве покращення динамічних характеристик АСУ ДП. Перерегулювання зменшилось, а коливання в перехідному процесі були повністю усунені. Частотні характеристики оптимізації свідчать про значно вищі запаси стійкості і зменшення ризику автоколивань.

Оптимізована система характеризується значно вищою стабільністю, плавністю та передбачуваністю динаміки, що є критично важливим для дугової сталеплавильної печі, де ударні режими та коливання недопустимі через ризики перевантажень, зносу та аварійних ситуацій. Загалом, проведена оптимізація забезпечила підвищення якості регулювання без погіршення швидкодії, що робить отримані параметри практично доцільними та технологічно обґрунтованими.

ВИСНОВКИ

Проведено аналіз ТП сталеплавлення та принципів роботи сталеплавильної ДП як об'єкта автоматизованого керування. Визначено основні параметри, що потребують контролю та регулювання, проаналізовано режими роботи печі та фактори, що впливають на стабільність плавки.

Проведено дослідження існуючих систем автоматизації ДП, визначено функціональні компоненти, типові контури регулювання та ТЗА. Сформовано структуру АСУ, розроблено функціональну та структурну схеми, а також алгоритм її роботи для стабілізації основних технологічних параметрів.

Побудовано математичну модель розімкнутої та замкнутої систем керування. На основі моделювання отримано динамічні та частотні характеристики, виконано аналіз динамічних і частотних характеристик, визначено полюси та запаси стійкості. Дослідження показали, що базова система має значне перерегулювання, низький запас стійкості та схильність до коливань, що може спричиняти нестабільність ТП та підвищене навантаження на обладнання.

З метою покращення характеристик АСУ проведено оптимізацію параметрів регулятора із застосуванням ГА. Отримані оптимальні значення параметрів забезпечили зменшення перерегулювання, зниження коливань, прискорення реакції системи та підвищення частотної стійкості. Частотний аналіз показав збільшення запасів фази та амплітуди, а моделювання перехідних процесів підтвердило стабілізацію динаміки.

Оптимізована АСУ продемонструвала плавність і передбачуваність реакції, що знижує механічні та теплові навантаження на обладнання, підвищує стабільність електричної дуги та сприяє енергоефективності та безпечній роботі технологічного комплексу.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Технологія виробництва сталі: повний процес від руди до готового металу. [Електронний ресурс].- Режим доступу: <https://kompositstal.com.ua/технологія-виробництва-сталі/>
2. З чого виготовляють сталь? [Електронний ресурс].- Режим доступу: <https://mskukraine.com/uk/blog-uk/z-chogo-vygotovlyayut-ta-yak-vyroblyayut-stal/>
3. Криль Я.А., Геворкян Е.С., Луцак Д.Л. Матеріалознавство. Сталь: класифікація, виробництво, споживання, маркування. За редакцією професора Я.А. Криля: Навчальний посібник. – Львів: «Новий Світ-2000», 2020. – 267 с.
4. Технології одержання металів та сплавів для ливарного виробництва: Навч. посібник / А.М. Верховлюк, А.В. Нарівський, В.Г. Могилатенко / За ред. академіка НАН України В.Л. Найдека. – К.: Видавничий дім “Вініченко”, 2016. – 224 с
5. Шляхи розвитку «зеленої металургії». Частина 2. Технології виробництва сталі. [Електронний ресурс].- Режим доступу: <https://metinvest-smc.com/ua/articles/sliaxi-rozvitku-zelenoyi-metalurgiyi-castina-2-texnologiyi-virobnictva-stali/?srsltid=AfmBOoqEM-2Jjv-ooaKxMgMXYISMESE-ix5ZWMVfVtVjUJzR-uQNO-Wi>
6. Даценко А.М. Аналіз сучасного стану металургійної галузі України. Економіка та суспільство, Випуск 68/2024.- 2024.- DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-68-105>
7. Українська металургія досягла піку у 2024 році: що далі? [Електронний ресурс].- Режим доступу: <https://gmk.center/ua/infographic/ukrainska-metalurgiya-dosyagla-pika-u-2024-roci-shho-dali/>
8. Сучасні технології та світові тенденції в металургії. [Електронний ресурс].- Режим доступу:

<https://metinvestholding.com/ua/media/article/sovremennie-tehnologii-v-metallurgii-i-mirovie-tendencii>

9. Процес виробництва сталі. [Електронний ресурс].- Режим доступу: <https://ua.lite-kilnrefractory.com/info/steelmaking-production-process-100026329.html>

10. Основи інженерії та технології сталого розвитку: [Електронний ресурс]: конспект лекцій для студентів другого (магістерського) рівня підготовки усіх спеціальностей / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: Б.М. Комариста, В.І. Бендюг. – Електронні текстові дані (1 файл: 5,68 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 267 с.

10. Технологія виплавки сталі на ДСП. [Електронний ресурс].- Режим доступу: <https://cen.jar.v.ua/articles/tehnologija-viplavki-stali-na-dsp.html>

11. Технологія процесу виробництва сталі. [Електронний ресурс].- Режим доступу: <https://xemu.fifo.v.ua/articles/tehnologija-procesu-virobництва-stali.html>

12. Клименко В.М., Шиліна О.П, Осадчук А.Ю. Технологія конструкційних матеріалів. / Частина перша. Конструкційні матеріали: властивості, класифікація, виробництво. Навчальний посібник. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005.- 97 с.

13. Бойченко Б.М., Охотський В.Б. Харлашин П.С. Конвертерне виробництво сталі: теорія, технологія, якість сталі, конструкції агрегатів, рециркуляція матеріалів і екологія: Підручник.- Дніпропетровськ: РВА “Дніпро-Вал”, 2004.- 454 с.

14. Мартенівська піч. [Електронний ресурс].- Режим доступу: <https://esu.com.ua/article-62502>

15. Електросталеплавильні печі та установки спеціальної електросталургії. [Електронний ресурс].- Режим доступу: <https://kema.at.ua/book1.html>

16. Виробництво сталі в кисневих конвертерах. [Електронний ресурс].- Режим доступу:

https://stud.com.ua/36303/tovaroznnavstvo/virobnitstvo_stali_kisnevih_konverterah

17. Електрична дугова піч: все, що потрібно знати. [Електронний ресурс].- Режим доступу: <https://jinsuncarbon.com/uk/електродугова-піч/>

18. Nay T., Visuri V.-V., Aula M., Echterhof T. A Review of Mathematical Process Models for the Electric Arc Furnace Process. Steel Research International. 92(3): 2000395. 2020. DOI: 10.1002/srin.202000395.

19. Energy efficient technology packages forelectric arc furnace. [Електронний ресурс].- Режим доступу: <https://www.sameeksha.org/books/Electric-Arc-Furnace-Compendium.pdf>

20. Електросталеплавильні печі. [Електронний ресурс].- Режим доступу: <https://кема.ат.уа/book11.html>

21. Інфрочервоний пірометр Optris CSlaser 2M. [Електронний ресурс].- Режим доступу: https://optris.com/wp-content/uploads/2024/10/CSlaser-2M-DS-EN2018-08-A.pdf?utm_source=chatgpt.com

22. Siemens SITRANS MAG 5100 W. [Електронний ресурс].- Режим доступу: <https://www.siemens.com/ua/uk/produkty/avtomatyzatsiya-promyslovosti/kontrolno-vymiryuvalni-prylady/vytratomiry/elektromahnitni-vytratomiry/sitrans-fm-mag-5100w.html>

23. Лінійний датчик положення LVDT. Applied Measurements AML/IE Series. [Електронний ресурс].- Режим доступу: https://appmeas.co.uk/products/lvdt-displacement-sensors/industrial-lvdt-displacement-sensor-aml-ie/?utm_source=chatgpt.com

24. Датчик температури Термопара K-type M10. [Електронний ресурс].- Режим доступу: https://voron.ua/uk/catalog/037184--datchik-temperatury-termopara-k-type-m10-ekranirovannyu-2m-pruzhin#google_vignette

25. Pressure Transmitters and Transducers. [Електронний ресурс].- Режим доступу: https://www.microsensorcorp.com/Product_Pressure-Transmitter.html?gad_source=1&gad_campaignid=292567132&gbraid=0AAAAADgm3eRIUC80ntYjkqeA179XHROPq&gclid=CjwKCAiAuIDJBhBoEiwAxhgyFhFrC5a_RaDkDb8BHoUJN8d4WF_3fjPz_12fBNE6_C7X6H7e-

k2DRxoCjVoQAvD_BwE

26. EAF electrode lifting cylinder. [Електронний ресурс].- Режим доступу: https://www.hopetech.com.tw/en/solution/customized-hydraulic-cylinders/EAF-electrode-lifting-cylinder-0714?utm_source=chatgpt.com

27. Клапани регулюючі з електро і пневмоприводом. [Електронний ресурс].- Режим доступу: <https://opeks.ua/ua/klapani-regulyuyuchi-z-elektro-i-pnevmoprivodom/?srsltid=AfmBOoq1h5h7oKd6zdZN2Ljuaeq1b49Svft1I01MR9A1N7f5hvib-LIh>

28. Частотні перетворювачі для двигунів насосів/димососів. [Електронний ресурс].- Режим доступу: https://www.acprivod.ua/ru/magazin/?gad_source=1&gad_campaignid=21060689470&gbraid=0AAAAAqDM318M424G_qjaAsbhLPPas_wNg&gclid=CjwKCAiAuIDJBhBoEiwAxhgyFiPYNofbi6mbq_gE8tt5UtXhPd0rTQwGqPGemQOKgFNP FbSoAg8o4xoCKVwQAvD_BwE

29. ПЛК Siemens SIMATIC S7-1500. [Електронний ресурс].- Режим доступу: <https://www.siemens.com/ua/uk/produkty/avtomatyzatsiya-promyslovosti/systemy-avtomatyzatsiyi/systemy-promyslovoi-avtomatyzatsiyi-simatic/plc-kontrolery-simatic/simatic-s7-1500.html>

30. Сільвестров А.М. Островерхов М.Я., Шефер О.В., Ладік Н.А., Зіменков Д.К. Системи автоматичного керування технологічними комплексами: навчальний посібник. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2022. – 466 с.

31. Дубовой В.М., Кветний Р.Н., Михальов О.І., Усов А.В. Моделювання та оптимізація систем: підручник – Вінниця: ПП «ТД«Едельвейс», 2017 – 804 с.

32. Лисенко В.П., Шворов С.А. Моделювання та оптимізація систем керування: навчальний посібник. – К.: Наук світ, 2021. – 133 с.

33. Лисенко В.П., Решетюк В.М., Штепа В.М., Заєць Н.А. та ін. Системи штучного інтелекту: нечітка логіка, нейронні мережі, нечіткі нейронні мережі, генетичний алгоритм. – К: НУБІП України, 2014. – 336с.

34. Бажан С. Використання генетичних алгоритмів із застосуванням випадкових процесів при розв'язуванні задач оптимізації. Грааль науки, (33), 2023, 253–261. <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.10.11.2023.40>

35. Пиріг Я., Климаш М., Пиріг Ю., Лаврів О. Генетичний алгоритм як засіб розв'язання оптимізаційних задач. Інфокомунікаційні технології та електронна інженерія, Вип. 3, № 2, 2023, С. 95–107.

Копії публікацій