

УДК 681.5

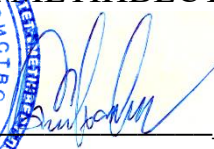
№ держреєстрації 0122U200985

Товариство з обмеженою відповідальністю
«ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
69008, м. Запоріжжя вул. Південне шосе 80

ЗАТВЕРДЖУЮ

проректор з науково-дослідної роботи
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»




Володимир КУХАР
«29» червня 2023 року

ЗВІТ
ПРО НАУКОВО-ДОСЛІДНУ РОБОТУ
«Використання результатів досліджень та аналізу технологічних даних в
інтелектуальних системах управління»
(остаточний)

Науковий керівник: професор,
канд. техн. наук














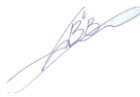
Олександр СІМКІН
«28» червня 2023 року

2023

Рукопис закінчено «26» червня 2023 року

Результати роботи розглянуто Науково-технічною радою ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», протокол № 10 від «29» червня 2023 року

СПИСОК АВТОРІВ

Керівник НДР, канд. техн. наук, професор		Олександр СІМКІН (вступ, розділи 1, 3)
Відповідальний виконавець, канд. техн. наук, доцент		Олексій КОЙФМАН (вступ, розділ 1, 2, 3)
Виконавець, канд. техн. наук, доцент		Вікторія МІРОШНИЧЕНКО (розділ 3)
Виконавець, канд. техн. наук, доцент		Олексій РАЗЖИВІН (розділ 4)
Виконавець		Марко ВІНКОВСЬКИЙ (розділ 2.2)
Виконавець		Андрій ЗАВАРЗІН (розділ 2.1)
Виконавець		Дмитро ЗОЛОТАРЬОВ (розділ 1)
Виконавець		Володимир КОРОТИШ (розділ 1)
Виконавець		Євгеній ЛАКТИОНОВ (розділ 4.1)
Виконавець		Юрій ОМЕЛЬНИЦЬКИЙ (розділ 4.2)
Виконавець		Володимир ПРАСОЛ (розділ 4.2)
Виконавець		Володимир СТЕЦЬКИЙ (розділ 3)

РЕФЕРАТ

ЗВІТ про НДР: 93 с., 45 джерел.

Ключові слова: АСУТП, завдання, нагрівальна піч, повітрянагрівач, база даних, математична модель, дослідження, інтелектуальна система управління.

Об'єкт дослідження – автоматизовані системи управління технологічними процесами (нагріву слябів, гарячого дуття, доведення сталі).

Мета роботи – теоретичне обґрунтування та розробка пропозицій щодо використання результатів досліджень та аналізу технологічних баз даних для налагодження та модернізації автоматизованих систем управління.

Предмет дослідження: налаштування алгоритмів управління та корегування математичних моделей в інтелектуальних системах управління.

Результати та їх новизна:

- для теорії

- теоретичні основи та обґрунтування можливості використання експериментальних даних для налаштування програмного забезпечення АСУТП нагріву слябів;

- теоретичні основи та обґрунтування можливості використання великих об'ємів технологічної інформації для оцінки стану технологічних агрегатів (наприкладі доменного повітрянагрівача);

- обґрунтування необхідності внесення вхідних впливів за завданням в замкнуту систему автоматичного регулювання у двоступінчастій формі;

- побудова алгоритму корекції та оцінки інформативності бази знань технологічного процесу плавки металу в агрегаті «Піч-Ківш» на основі нейромережових технологій.

- для практики:

- розробка алгоритмічного та програмного забезпечення для використання експериментальних даних;

- розробка алгоритмічного та програмного забезпечення для використання поточних та архівних баз даних технологічної інформації;

- запобігання надлишковим витратам енергії та ресурсів забезпеченням перехідного процесу з допустимими динамічними показниками якості.

- структура технічних засобів, інформаційне та програмне забезпечення для інтеграції АСК тепловим режимом агрегату «Піч-Ківш» в існуючі розподілені системи керування плавкою на основі програмувальних логічних контролерів і промислових мережних технологій.

Інформація щодо впровадження – для впровадження необхідні додаткові дослідження об'єктів.

Зв'язок з іншими роботами: робота частково зв'язана з попередніми НДР виконавців роботи, виконаних в інших вишах.

Рекомендації щодо використання – результати може бути використані при розробці типових систем автоматизації та програмного забезпечення лабораторних робіт та курсових робіт, а також випускних робіт здобувачів-магістрів.

Сфера застосування: Гірничо-металургійні підприємства України та за кордоном, навчальний процес, науково-дослідна робота.

Економічна та соціально-економічна ефективність роботи: зменшення собівартості та підвищення якості продукції чорної металургії, якісна підготовка здобувачів вищої освіти.

Значимість роботи: полягає у створенні інтелектуальних системах управління технологічними об'єктами різного ступеня складності з використанням математичних методів та баз даних.

Висновки, пропозиції щодо розвитку об'єкта дослідження й доцільності продовження досліджень: рекомендується продовжити дослідження з використанням інформації з діючих технологічних об'єктів.

Умови одержання ЗВІТУ: одержання дозволу від ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА».

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1	
ВИКОРИСТАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ПРОГОНІВ СЛЯБІВ ДЛЯ НАЛАШТУВАННЯ АСУТП МЕТОДИЧНИХ ПЕЧЕЙ	8
РОЗДІЛ 2	
ВИКОРИСТАННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ДАНИХ ДЛЯ ОЦІНКИ СТАНУ АГРЕГАТУ (НА ПРИКЛАДІ ДОМЕННОГО ПОВІТРОНАГРІВАЧА)	20
2.1 Режими роботи блоку повітрянагрівачі	20
2.2 Система автоматизованого керування БПН	21
2.3 База даних системи автоматизованого управління	21
2.4 Розробка алгоритму та опису програми	23
2.5 Дослідження зміни температури купола в режимі «перемикання»	27
2.6 Дослідження режиму «перемикання» для кількох різних блоків ПН	30
2.7 Вплив «перемикання» на температуру гарячого дуття	31
РОЗДІЛ 3	
ВИКОРИСТАННЯ ДВОСТУПІНЧАСТОГО ВХІДНОГО ВПЛИВУ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ДИНАМІЧНОЇ ТОЧНОСТІ ПЕРЕХІДНОГО ПРОЦЕСУ ЗА ЗАВДАННЯМ	33
РОЗДІЛ 4	
ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТЕМПЕРАТУРНИМ РЕЖИМОМ ПЛАВКИ В КОМПЛЕКСАХ «ПІЧ-КІВШ»	42
4.1 Актуальність наукового дослідження	42

4.2	Технологічний процес плавки металу в дугових сталеплавильних печах	43
4.3	Енергетичні параметри плавки металу в електротермічних сталеплавильних печах	49
4.4	Розробка математичної моделі температурного режиму плавки рідкого металу	54
4.5	Розробка структури системи автоматизації процесу керування тепловим режимом плавки	63
4.6	Синтез регулятора та алгоритму управління на основі бази даних технологічного процесу плавки	67
4.7	Розробка та дослідження САУ тепловим режимом плавки рідкого металу	76
	ВИСНОВКИ	83
	ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	86
	ДОВІДКА ПРО ВИКОРИСТАННЯ	93

ВСТУП

Огляд наукових публікацій останніх десятиліть, пов'язаних з автоматизацією металургійного виробництва, показує, що одним із основних напрямів розвитку систем управління є використання інтелектуального аналізу даних з метою виявлення нових залежностей між технологічними параметрами та створення нових алгоритмів управління технологічними процесами.

В більшості замкнених АСУТП управління реалізується за допомогою зміни завдань в системі регулювання основних технологічних параметрів. Автори висунули гіпотезу, що при діленні вхідної дії можливо покращити динамічну точність та зменшити динамічну помилку.

Наприклад, у програмному забезпеченні більшості АСУТП нагрівальними пристроями в прокатному виробництві не реалізована оцінка якості нагріву заготовки та точності роботи математичних моделей.

У доменному виробництві більшість блоків доменних повітрянагрівачів обладнані системами автоматичного контролю, в яких значення технологічних параметрів записуються в поточну базу даних, а потім в архів, що дозволяє досліджувати стан блоку протягом тривалого часу роботи, в тому числі стан перевірки при зміні режимів його роботи. При управлінні нагріванням насадки повітрянагрівача не враховується її тепловий стан в залежності від різної тривалості перемикачів і втрат тепла в навколишнє середовище.

Актуальною задачею автоматизації виплавки сталі в електротермічних печах є управління тепловим режимом плавки рідкого металу з використанням математичних методів, алгоритмів, інформаційного та програмного забезпечення. Реалізація прогнозування зміни температури та хімічного складу металу дозволяє ефективно вирішувати задачі безпосереднього управління, а також все коло супутніх завдань, призначених для підвищення ефективності роботи металургійного агрегату, цеху та підприємства в цілому.

РОЗДІЛ 1

ВИКОРИСТАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ПРОГОНІВ СЛЯБІВ ДЛЯ НАЛАШТУВАННЯ АСУТП МЕТОДИЧНИХ ПЕЧЕЙ

Метою даної роботи є визначення параметрів прокатки, які найбільше точно відображають характер нагріву слябів у печах для виявлення зворотного зв'язку з моделлю та можливості коригування коефіцієнтів налаштування моделі нагріву під час експлуатації печі.

Для досягнення мети було виконано таке:

1. Були зібрані дані за кілька місяців роботи прокатного стану, такі як база даних з АСУТП ділянки печей, які включає основні параметри по нагріванню металу і АСУТП ділянки прокатних клітей – база даних по загальній прокатці і по проходах в чорновій кліті.

База даних по нагріванню включає такі параметри (для кожного виданого сляба): довжина, ширина, товщина, марка сталі, температура поверхні на видачі з печі, температура середньомасова на видачі з печі, перепад температур між центром і поверхнею, час нагрівання, час нагрівання у активних зонах.

База даних із загальної прокатки включає такі параметри: товщина підкату задана, товщина підкату фактична, ширина підкату задана, ширина підкату фактична, довжина розкату, товщина підкату, температура закінчення прокату в чорновій кліті задана, температура закінчення прокату в чорновій кліті фактична, температура на байпасі фактична температура початку прокату в чистовій кліті задана температура початку прокату в чистовій кліті фактична час прокату в чорновій кліті.

База даних проходів в чорновій кліті включає набір параметрів по кожному проходу: товщина, ширина, довжина розкочування, температура поверхні, зусилля, розчин валків, обтиснення, час проходу, час циклу, час паузи.

В АСУТП товстолистового стану ці бази даних були об'єднані в одну, а потім ця загальна база даних була імпортована в Microsoft Office Excel.

2. Отримана база даних була розбита на дві: нагрівання та загальна прокатка, нагрівання та прокатка в чорновій кліті. Для кожного параметра були виключені помилкові (що виходять за межі допустимих значень) та неповні дані. У результаті було отримано дві бази даних кілька сотень тисяч записів.

3. Для основних параметрів нагріву та основних параметрів прокатки було оцінено їх взаємну кореляцію. Для цього була написана програма, в якій є можливість, для всіх вище перелічених параметрів, які включає отримані бази даних, розрахувати коефіцієнт їх взаємної кореляції. У програмі також передбачено вибір печі, в якій здійснюється нагрівання, вибір груп нагріву за марками сталі, а також кожної марки сталі окремо. Блок-схеми алгоритмів розрахунку та вибору параметрів наведено на рис. 1.1, 1.2, 1.3.

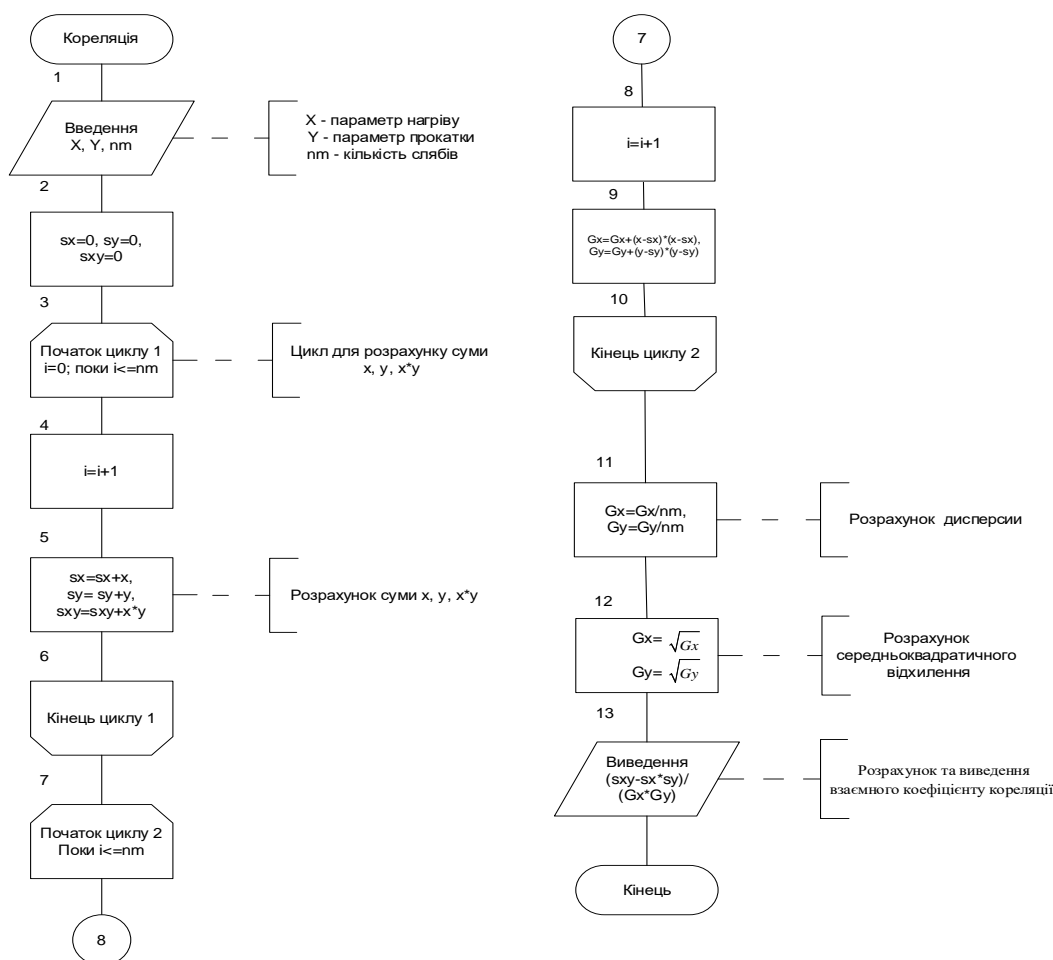


Рисунок 1.1 – Блок-схема розрахунку взаємної кореляції

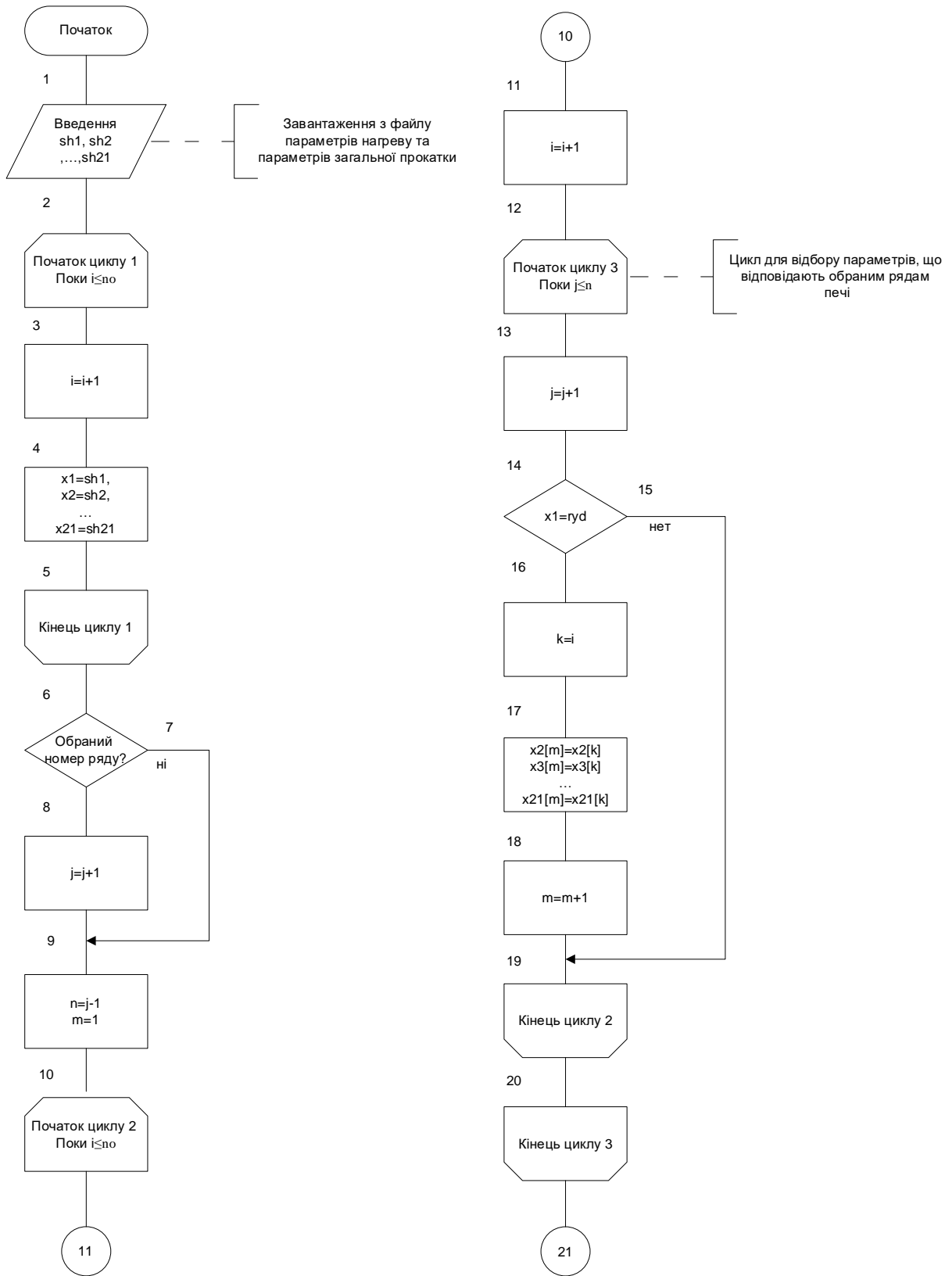


Рисунок 1.2 – Блок-схема вибору параметрів визначення взаємної кореляції між параметрами нагріву і параметрами загальної прокатки. Лист 1

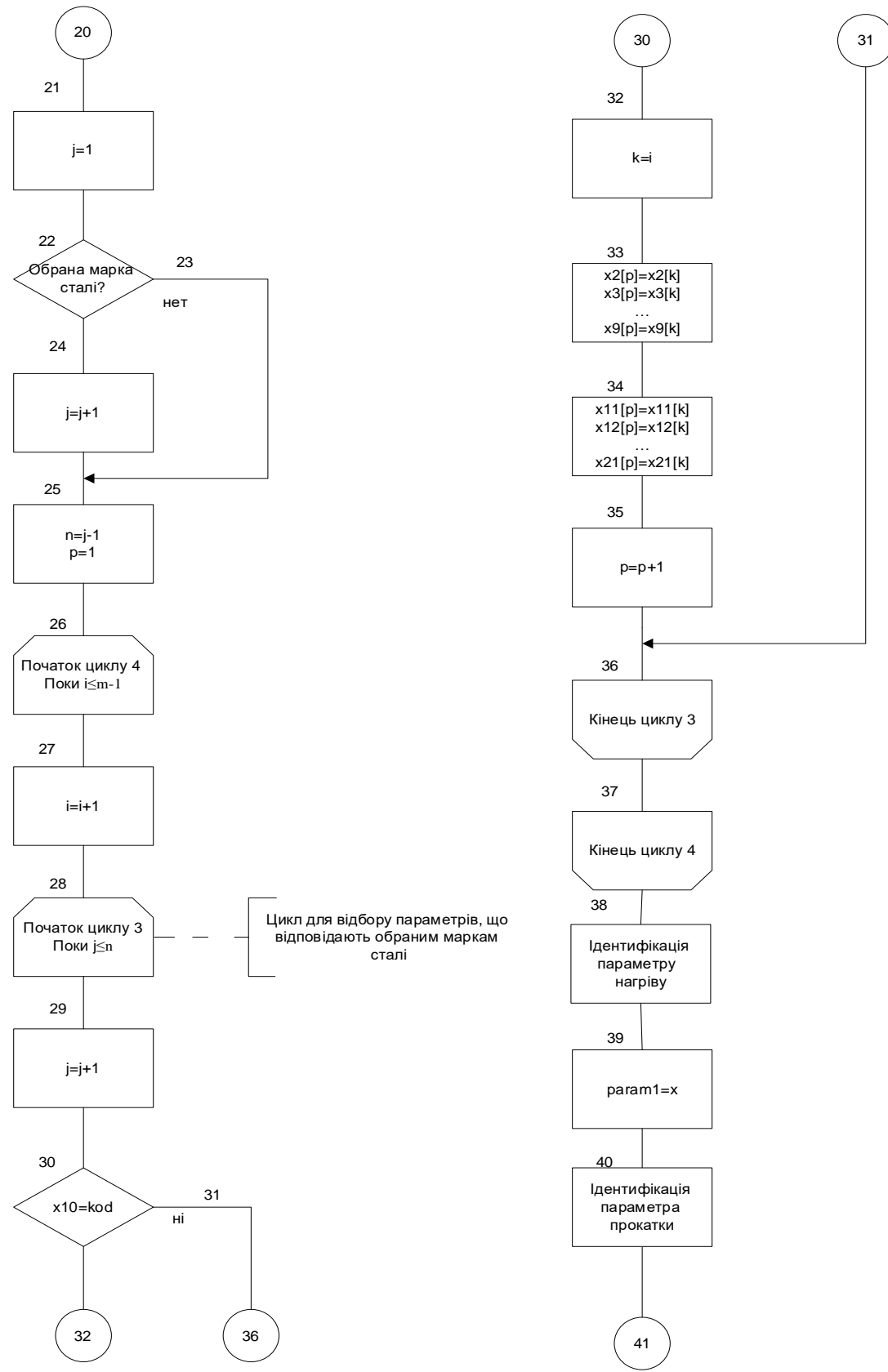


Рисунок 1.2 – Блок-схема вибору параметрів визначення взаємної кореляції між параметрами нагріву і параметрами загальної прокатки. Лист 2

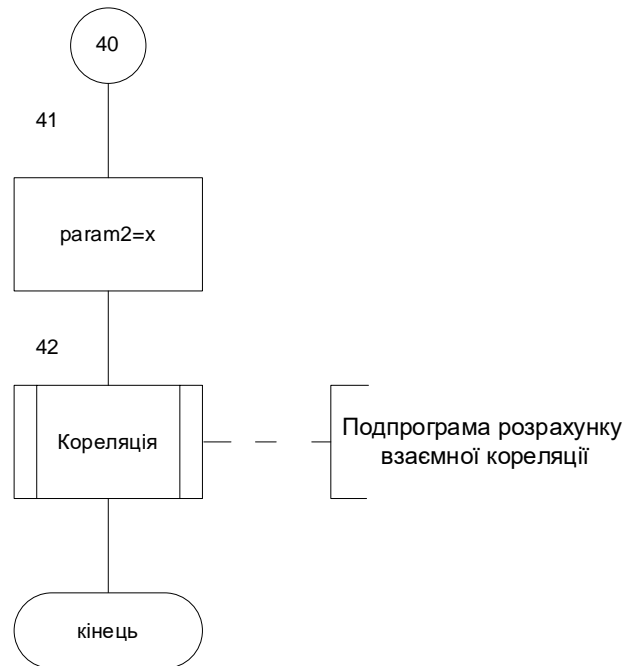


Рисунок 1.2 – Блок-схема вибору параметрів визначення взаємної кореляції між параметрами нагріву і параметрами загальної прокатки. Лист 3

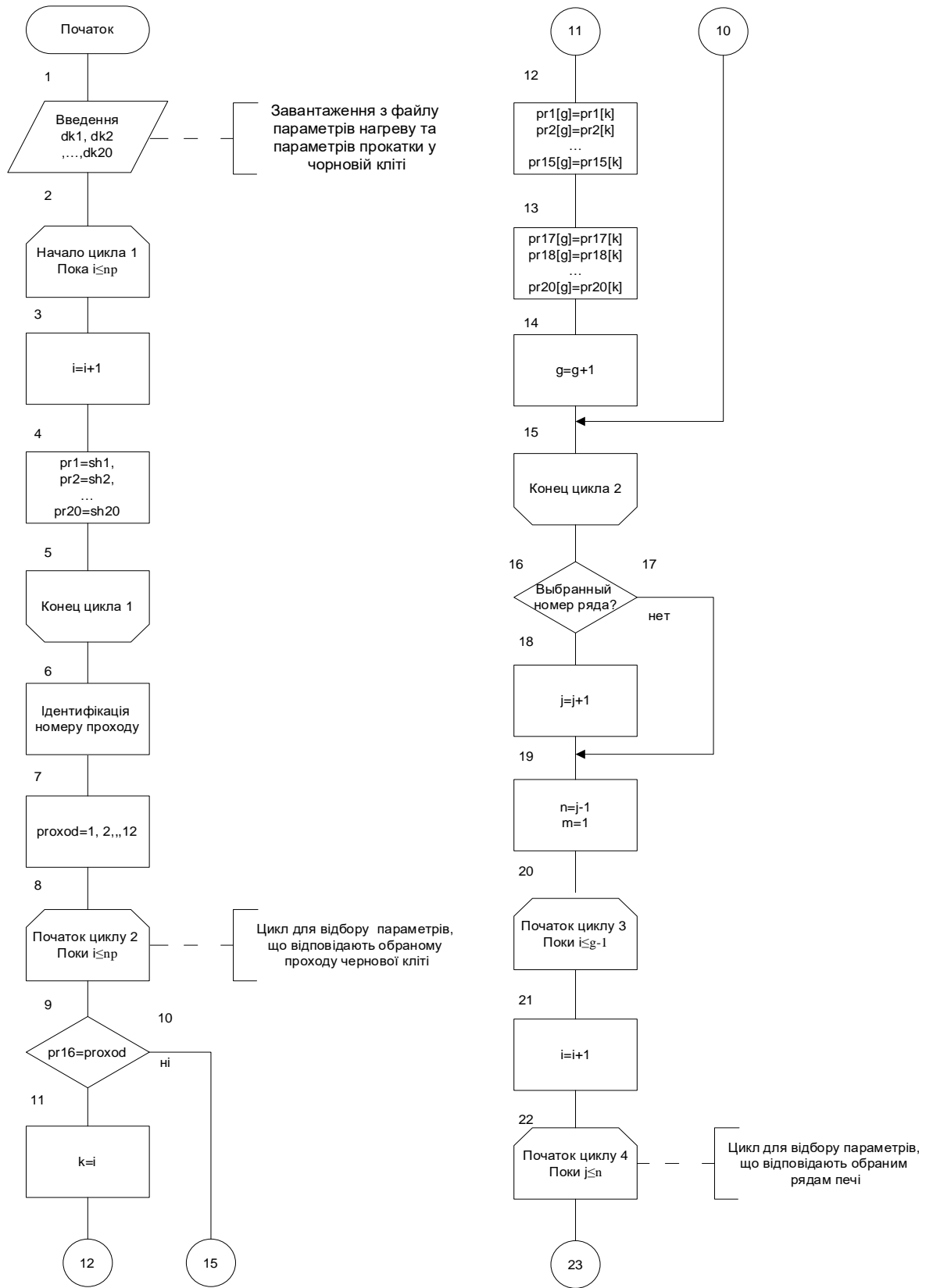


Рисунок 1.3 – Блок-схема вибору параметрів визначення взаємної кореляції між параметрами нагріву і параметрами прокатки в чорновій кліті. Лист 1

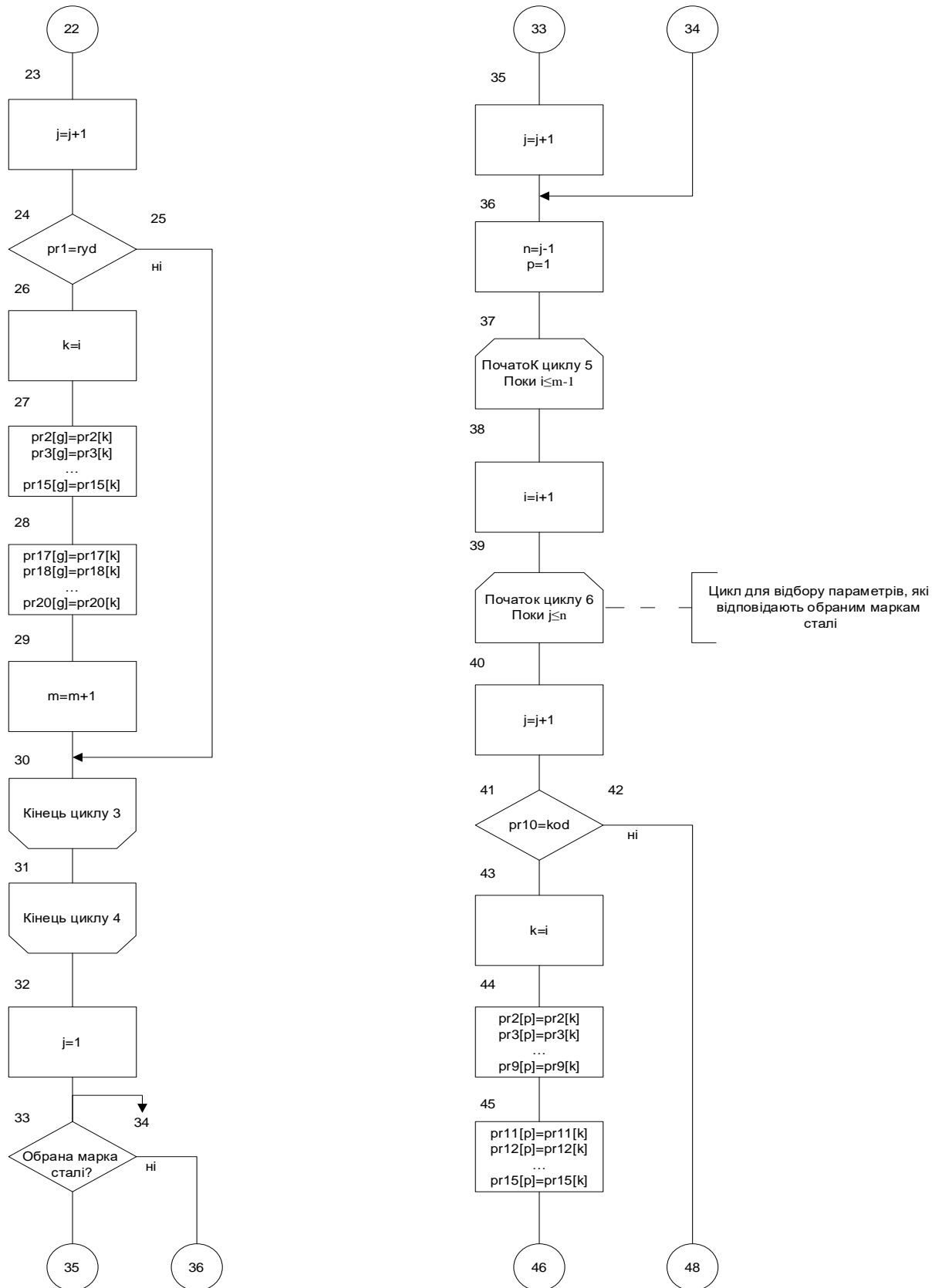


Рисунок 1.3 – Блок-схема вибору параметрів визначення взаємної кореляції між параметрами нагріву і параметрами прокатки в чорновій кліті. Лист 2

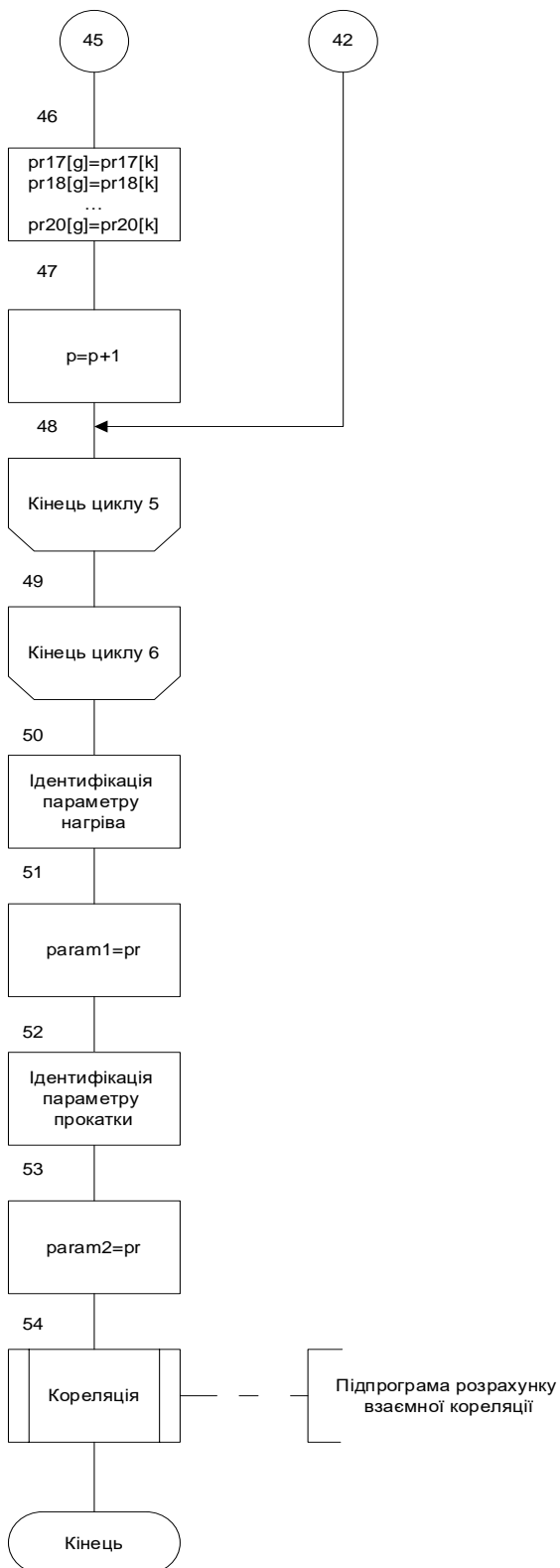


Рисунок 1.3 – Блок-схема вибору параметрів визначення взаємної кореляції між параметрами нагріву і параметрами прокатки в чорновій кліті.

4. Було виявлено зв'язок між основними розрахунковими параметрами моделі, що характеризують температурний стан слябу на видачі з печі (температура поверхні слябу на виході з печі та середньомасова температура) та двома групами параметрів: загальної прокатки та по проходах у чорновій кліті.

Для вирішення завдання враховували:

- параметри загальної прокатки: довжина підкату, товщина підкату, температура закінчення прокату у чорновій кліті, температура на байпасі, температура початку прокату в чистовій кліті;

- параметри проходів: температура поверхні, зусилля, обтискання.

При цьому виявлено, що параметри загальної прокатки мають несуттєвий зв'язок із параметрами нагріву. Між цими параметрами коефіцієнт взаємної кореляції становить не більше $|0.4|$, що не дає можливості їх використовувати для корекції роботи моделі нагрівання (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 - Значення коефіцієнтів взаємної кореляції між параметрами нагріву та параметрами загальної прокатки

Параметри прокатки \ Параметри нагрівання	Температура поверхні на видачі з печі	Температура середньомасова на видачі з печі
Довжина підкату	0,37	0,36
Товщина підкату	-0,23	-0,22
Температура закінчення прокату в чорновій кліті	0,052	0,049
Температура на байпасі	0,28	0,27
Температура початку прокату в чистовій кліті	0,26	0,25

А значення таких параметрів проходів по ходу прокатки, як температура поверхні і обтискання, досить сильно залежать від середньомасової температури слябу на видачі з печі - коефіцієнт кореляції 0,4-0,7 в залежності від номера проходу (табл. 1.2..1.4).

Таблиця 1.2 – Значення коефіцієнтів взаємної кореляції між параметрами нагрівання та температури поверхні у 5 проході чорнової кліті

Параметри нагрівання Номер печі	Температура поверхні на видачі з печі	Температура середньомасова на видачі з печі
Пекти 1	0,557	0,567
Пекти 2	0,572	0,578
Пекти 3	0,517	0,530
Пекти 4	0,578	0,586
Загальна	0,536	0,545

Таблиця 1.3 – Значення коефіцієнтів взаємної кореляції між параметрами нагріву та температурою поверхні у 6 проході чорнової кліті

Параметри нагрівання Номер печі	Температура поверхні на видачі з печі	Температура середньомасова на видачі з печі
Піч 1	0,647	0,654
Піч 2	0,640	0,652
Піч 3	0,597	0,608
Піч 4	0,669	0,674
Загальна	0,632	0,641

Таблиця 1.4 – Значення коефіцієнтів взаємної кореляції між параметрами нагрівання та температурою поверхні у 7 проході чорнової кліті

Параметри нагрівання Номер печі	Температура поверхні на видачі з печі	Температура середньомасова на видачі з печі
Піч 1	0,574	0,583
Піч 2	0,582	0,590
Піч 3	0,531	0,543
Піч 4	0,611	0,619
Загальна	0,563	0,572

Максимальний коефіцієнт взаємної кореляції був отриманий для середньомасової температури слябу при виході з печі та температури поверхні у 6 проході.

Таким чином, знайдено такий параметр прокатки, який можна використовувати для зворотного зв'язку для корекції математичної моделі оцінки теплового стану слябів, що діє в рамках АСУТП нагрівання слябів нагрівальних печах товстолистового цеху.

Але, крім середньомасової температури, на температуру поверхні може впливати ще ряд параметрів, наприклад, таких як час транспортування слябу від печі до чорнової кліті, час нагрівання металу в активних зонах і кінцева товщина слябу. Для визначення ступеня впливу цих параметрів на температуру поверхні був проведений дисперсійний аналіз, результати якого наведені в табл. 1.5.

Таблиця 1.5 - Результати дисперсійного аналізу

Критерій Параметр	Сума квадратів	Ступені свободи	Середній квадрат	F-відношення
Час нагріву в активних зонах	301191	1	296,089	$2,2 \cdot 10^{-16}$
Час транспортування	52497	1	51,608	$7,174 \cdot 10^{-13}$
Товщина підкату	16815	1	16,530	$4,820 \cdot 10^{-05}$
Температура середньомасова	7118568	1	6997,972	$2,2 \cdot 10^{-16}$

За результатами дисперсійного аналізу можна дійти невтішного висновку, що це параметри істотно впливають на температуру поверхні, проте температура середньомасова на два порядки перевищує вплив інших величин і недоцільно застосовувати їх налаштування моделі.

Налаштування математичної моделі здійснюється за допомогою коригування коефіцієнтів моделі під час роботи печі, які є коефіцієнтами переходу від показань зонної терморпарі до температури над слябом. Таким чином, визначивши, що математична модель неправильно відображає параметри температурного поля сляба, необхідно лише змінити настроювальні коефіцієнти моделі. Наприклад, якщо середньомасова температура на видачі з печі буде завищена, коефіцієнти налаштування моделі потрібно зменшити.

РОЗДІЛ 2

ВИКОРИСТАННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ДАНИХ ДЛЯ ОЦІНКИ СТАНУ АГРЕГАТУ (НА ПРИКЛАДІ ДОМЕННОГО ПОВІТРОНАГРІВАЧА)

2.1 Режими роботи блоку повітрянагрівачі

Режим роботи повітрянагрівачів (ПН) визначається наступною сукупністю параметрів: витрата палива, витрата повітря, температура купола, максимальна температура диму у піднасадковому просторі, витрата дуття, часовий режим, тобто тривалість періоду дуття («дуття») та період опалення («нагрів»), тривалість періоду відділення, коли гази не рухаються через ПН, а також «перемикання» з режиму на режим [1].

Основні схеми роботи блоку повітрянагрівачів: послідовний, попарно-паралельний, змішаний, паралельний.

Режими роботи блоку повітрянагрівачів (БПН) визначаються діаграмою параметрів, в якій визначені часові характеристики режимів «нагрів» і «дуття», тривалість переведення ПН з режиму в режим. При цьому відхилення одного з параметрів діаграми часових параметрів від встановлених призводить до зміни режимів роботи всіх ПН та коливань значення температури дуття [2, 3].

Отже, завданням управління БПН є реалізація прийнятої діаграми параметрів з мінімальною витратою доменного газу, висококалорійної добавки та повітря для горіння таким чином, щоб була досягнута максимально можлива температура гарячого дуття.

Основні обурюючі впливи на роботу ПН:

– теплотворна здатність доменного газу – змінюється протягом доби на 20-30%, що безпосередньо впливає на час розігріву насадки;

- неправильне співвідношення паливо-повітря внаслідок неточного регулювання потоку повітря або повної його відсутності;
- час перемикання ПН з режиму на режим - дуже часто перемикання ПН з режиму на режим здійснюється оператором дистанційно на пульті управління, що впливає на тривалість перемикання.

2.2 Система автоматизованого керування БПН

Більшість БПН обладнані системами автоматичного управління (АСУ) температурою купола, співвідношення палива і повітря, стабілізації температури гарячого дуття, при цьому перемикання режимів здійснюється операторами дистанційно за допомогою відповідних перемикачів на пульті управління.

Значення основних параметрів технологічного процесу записуються в основну базу даних, а потім переносяться в архів, що дозволяє досліджувати стан ПН при зміні режимів їх роботи та стан БПН у цілому. Для побудови графіків зміни основних технологічних параметрів (трендів) значення беруть переважно з архівної бази даних.

2.3 База даних системи автоматизованого управління

У системі автоматизації досліджуваного БПН запис значень технологічних параметрів здійснюється у файлах бази даних двох типів у форматі *.dbf.

У файлі першого типу (рис. 2.1) кожні 10 секунд за всю добу записується 175 значень технологічних параметрів чотирьох повітрянагрівачів блоку. Один файл містить понад 1,5 мільйона записів. Дані зберігаються досить незручним способом - у стовпець.

Файл другого типу, так звана «широка» база (рис. 2.2), вже має кілька десятків стовпців даних, що значно спрощує роботу, але час запису даних тепер

становить 20 секунд. У цьому випадку температура гарячого дуття записується в окремий файл «широкої» бази даних з інтервалом 10 секунд.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Date	Time	Tag	Inc Value	Status	Marker	Internal		
2	12.10.2019	00:00:20	0	5,326	B				
3	12.10.2019	00:00:20	1	1,000	B				
4	12.10.2019	00:00:20	2	10,327	B				
5	12.10.2019	00:00:20	3	72429,563	B				
6	12.10.2019	00:00:20	4	0,141	B				
7	12.10.2019	00:00:20	5	6,563	B				

Рисунок 2.1 - База даних загального типу

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y
1	Date	Time	Mill	M	GSS\DDG	S	GSS\RDG	S	GSS\TDG	S	BVN\DSG	S	B	S	B	S	B	S	7	S	BVN\DSG	S	B	S	BVN\DP
2	01.09.2020	00:00:23	75	B	8,914	68636,805	0,000	3,414	1	0	0	56,506	3,300	0	10,										
3	01.09.2020	00:00:35	434	9,001	69071,422	0,000	3,431	1	0	0	56,519	3,300	0	7,											
4	01.09.2020	00:00:55	434	8,846	68445,164	0,000	3,380	1	0	0	56,600	3,300	0	3,											
5	01.09.2020	00:01:15	465	8,752	67937,992	0,000	3,358	1	0	0	56,400	3,300	0	1,											
6	01.09.2020	00:01:35	621	8,753	68309,508	0,000	3,367	1	0	0	56,587	3,300	0	3,											
7	01.09.2020	00:01:55	653	9,082	69976,766	0,000	3,462	1	0	0	56,444	3,300	0	13,											

Рисунок 2.2 - База даних "широкого" типу

У базі першого типу є певні змінні, що відповідають режимам «нагріву» і «дуття», тому легко визначити, в якому з трьох режимів знаходиться БПН.

Однак у «широкій» базі є лише одна змінна, що характеризує режим «дуття», що ускладнює визначення режиму «нагрів» та режиму «перемикання». При цьому нічого не записується в цю змінну для однієї з печей гарячого дуття блоку.

Було розроблено алгоритм, який дозволяє за значеннями інших технологічних параметрів точно визначити, в якому режимі знаходяться ПН.

Були використані такі параметри:

- витрата газу на горіння;
- тиск повітря для горіння;
- параметр режиму «на дуття».

2.4 Розробка алгоритму та опису програми

Складність обробки даних проявляється у викликах, що виникають при роботі з базами даних різних типів через їх неповноту: контрольно-вимірювальної апаратури, встановленої на доменних печах, не всі значення параметрів представлені за однаковий проміжок часу, а частина параметрів записується з періодом, що не збігається з інтервалом запису у іншу базу. Для обробки такого величезного і складного обсягу інформації необхідно розробити прикладний додаток для відкриття баз даних двох типів, вилучення з них необхідних даних, екстраполяції значень параметрів з однієї бази даних для синхронізації часових інтервалів із записами іншої бази даних. Результатом має бути масив даних для аналізу параметрів і режимів роботи БПН.

У базі першого типу є відповідні змінні $VN\backslash N$ і $VN\backslash D$ для визначення режиму «нагрів» і режиму «дугтя», тому розділити базу даних на три режими роботи не склало труднощів. Попередня статистична обробка бази даних показала коректність запису значень технологічних параметрів у базу. На рис. 2.3 представлена блок-схема аналізу бази першого типу.

Однак у базі даних другого типу є одна змінна, що описує режим «дугтя» $VN\backslash D$, при цьому відкритий клапан гарячого дугтя відповідає значенню $VN\backslash D=1$, а закритий клапан відповідає $VN\backslash D=0$.

На основі циклограми перемикання клапанів, якщо значення параметрів правильно записані в базу даних, періоди можна визначити наступним чином:

Режим «дугтя»: $VN\backslash D=1$ - клапан дугтя відкритий, дугтя подається на підігрів до насадки; $VN\backslash RSG=0$, паливний газ не подається на спалювання до пальнику дугтя, витрата газу 0; $VN\backslash PVOZ=0$, тиск повітря для горіння 0, витрата повітря 0.

Режим «нагрів»: $VN\backslash D=0$ вентиль дугтя закритий, дугтя не подається на підігрів до насадки; $VN\backslash RSG>0$, паливний газ подається на спалювання до

пальнику дуття, витрата газу більше 0; $VN\backslash PVOZ > 0$, повітря подається на горіння, витрата повітря більше 0.

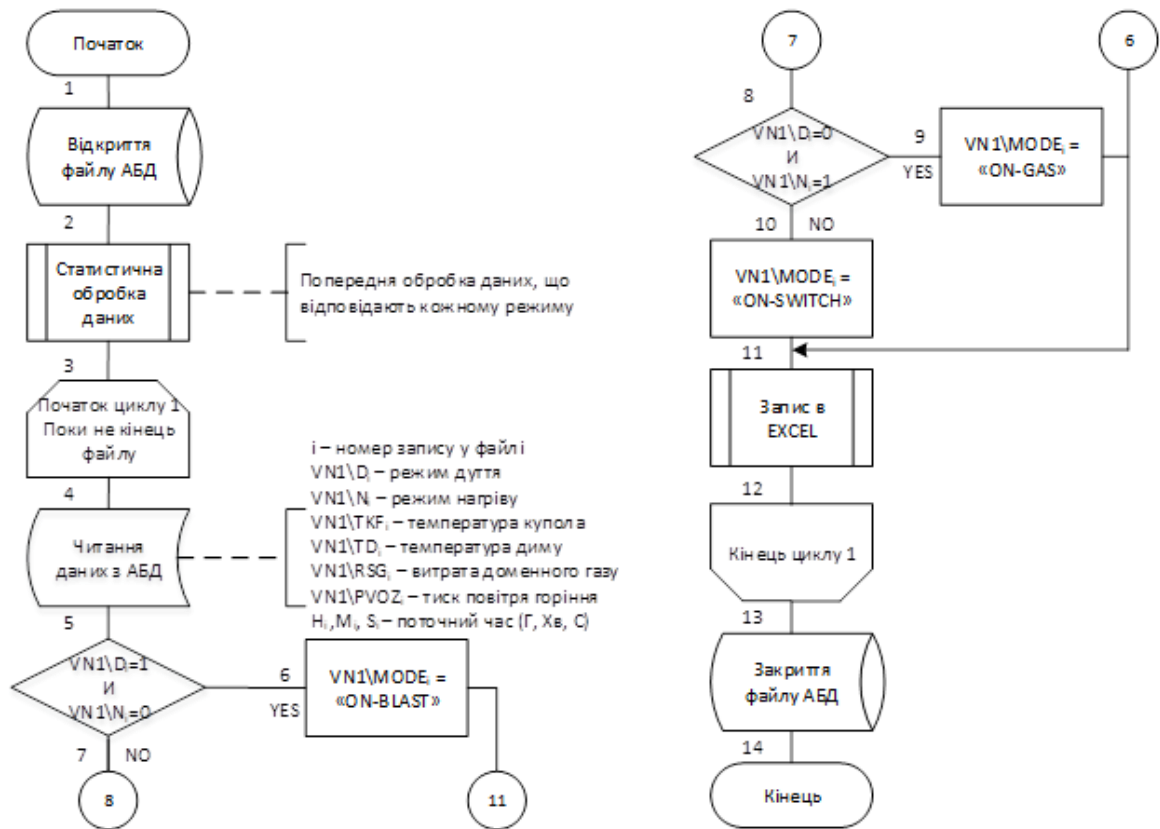


Рисунок 2.3 - Структурна схема аналізу бази першого типу

Режим «перемикання» ПН з режиму в режим: $VN\backslash D=0$ при перемиканні вентиль дуття повинен бути закритий; $VN\backslash RSG=0$, паливний газ не подається на спалювання в пальнику дуття, витрата газу 0; $VN\backslash PVOZ \geq 0$, на початку переходу з режиму «нагрів» на режим «дуття» на вентиляцію дуття подається повітря, витрата повітря більше або дорівнює 0.

При складанні алгоритму розбиття бази даних на режими попередній аналіз виявив некоректні записи значень параметрів, які зведені в табл. 2.1.

Згідно з алгоритмами (рис. 2.3, 2.4), включеними в програму, інформація з бази даних розбивається на файли формату *.xlsx, кожен з яких містить

інформацію про режими роботи БПН: «нагрів», «дугтя» або «перемикання». В якості досліджуваних параметрів, що характеризують тепловий стан ПН, було обрано значення температури купола і газу в насадці, а також температуру дугтя.

Відкривши вікно програми (рис. 2.5), користувачеві необхідно за допомогою перемикача вибрати тип баз даних для обробки, а також, якщо необхідно, ввести номери тегів (крім «широкої» бази даних) і вибрати крок (інтервал), через який відобразатимуться дані.

Таблиця 2.1 - Аналіз «широкої» бази даних

Параметр	Режим	ПН1	ПН2	ПН3	ПН4
		Поточне значення			
VN\D	«Дугтя»				
	«Перемикання»	0	1	1	1
	«Нагрів»	0	0	0	0
VN\RSG	«Дугтя»				
	«Перемикання»	<u>0<ПЗ<8000</u>	<u>0< ПЗ <8800</u>	<u>0< ПЗ < 6000</u>	0
	«Нагрів»	>0 МІН=13030 СРЗ=30666 МАКС=4153 5	>0 МІН =8968 СРЗ=18732 МАКС=2805 9	>0 МІН =11791 СРЗ =34905 МАКС=3795 1	>0 МІН =13919 СРЗ =43752 МАКС=5255 2
VN\PVO Z	«Дугтя»				
	«Перемикання»	<u>0<ПЗ<0,106</u>	0	0	<u>0<ПЗ<0,049</u>
	«Нагрів»	>0 МІН =1211 СРЗ =3841 МАКС=6078	>0 МІН =2422 СРЗ =3432 МАКС=4672	>0 МІН =0,572 СРЗ =1333 МАКС=2138	>0 МІН =0,985 СРЗ =2205 МАКС=2506

На рис. 2.4 показана блок-схема аналізу бази другого типу.

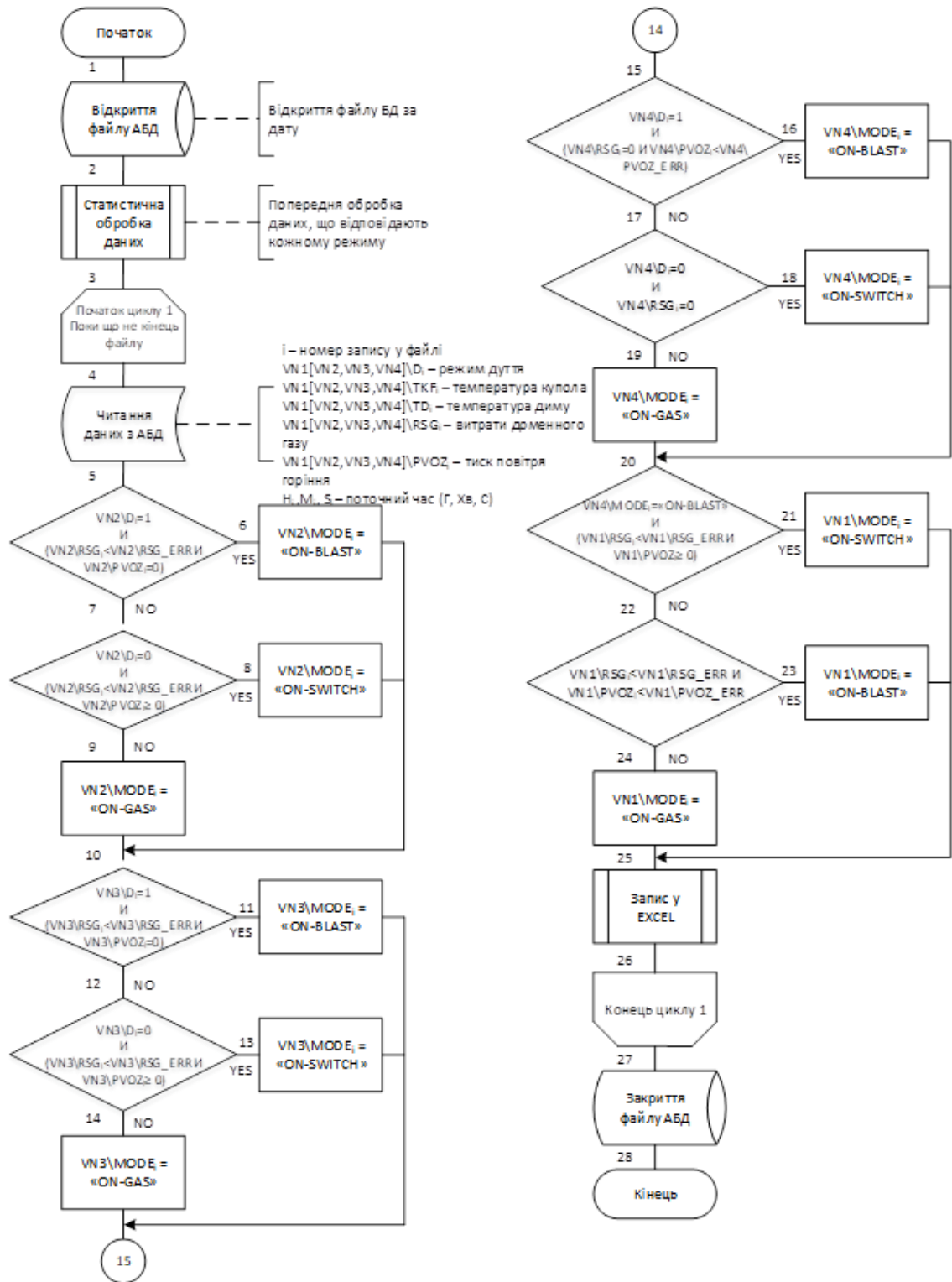


Рисунок 2.4 – Блок-схема аналізу бази другого типу

Hot blast stove 1 | Hot blast stove 2 | Hot blast stove 3 | Hot blast stove 4

VN1\D	17	VN2\D	50	VN3\D	84	VN4\D	118
VN1\N	22	VN2\N	55	VN3\N	89	VN4\N	123
VN1\TKF	47	VN2\TKF	81	VN3\TKF	115	VN4\TKF	149
VN1\TD	40	VN2\TD	73	VN3\TD	107	VN4\TD	141
VN1\RSG	27	VN2\RSG	60	VN3\RSG	94	VN4\RSG	128
VN1\PVOZ	39	VN2\PVOZ	72	VN3\PVOZ	106	VN4\PVOZ	140
VN1\SCO	36	VN2\SCO	69	VN3\SCO	103	VN4\SCO	137
VN1\SO2	38	VN2\SO2	71	VN3\SO2	105	VN4\SO2	139

BF3 DLG 20 + DLG 10
 BF3 DLG 5
 Type of DB
 BF 2
 BF 3
 Step 0

Output to Excel

Рисунок 2.5 - Головне вікно програми

Після роботи програма для верифікації виводить дані по кожному ПН у відповідних вкладках у вікні (рис. 2.6) і повідомляє про успішне створення файлів Excel з результатами розрахунків для кожного ПН.

Date	Time	VN\D_TAG	VN\D_VALUE	VN\N_TAG	VN\N_VALUE	Mode	TKF_TAG	T
26.06.2020 0:00...	00:00:21	92	0	122	1	0	6	13
26.06.2020 0:00...	00:00:27	92	0	122	1	0	6	13
26.06.2020 0:00...	00:00:37	92	0	122	1	0	6	13
26.06.2020 0:00...	00:00:47	92	0	122	1	0	6	13
26.06.2020 0:00...	00:00:57	92	0	122	1	0	6	13

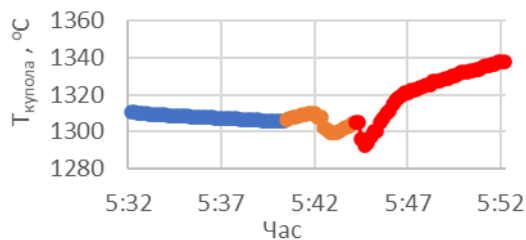
Рисунок 2.6 - Виведення даних для перевірки по вкладках у підвікнах програми

2.5 Дослідження зміни температури купола в режимі «перемикання»

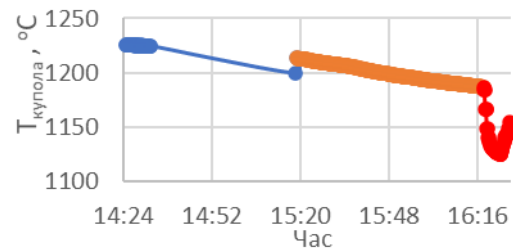
У ході аналізу бази даних за тривалий період експлуатації БПН за допомогою розробленого програмного забезпечення, крім типових перемикань

(рис. 2.7 а, б, 2.8 а, б), які відповідають правильній послідовності дій оператора при перемиканні режимів роботи також виявлено нетипові перемикання (рис. 2.7 в, г, 2.8 в, г).

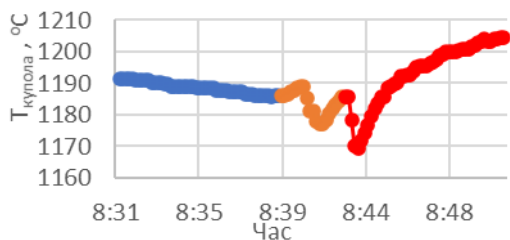
Графік зміни температури купола для кожного перемикання (рис. 2.7, 2.8) складається з трьох частин: додатково до періоду перемикання додається 50 значень попереднього та наступного режимів.



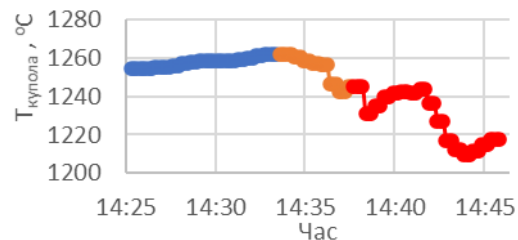
а)



в)



б)



г)

—●— - режим «дуття». —●— - режим «перемикання». —●— - режим «дуття».

Рисунок 2.7 - Перемикання дуття з режиму дуття на режим нагріву

Подібний характер мають типові перемикання з режиму «нагрів» на режим «дуття» (рис. 2.7 а, б), при тривалості від 8 до 10 хв. температура купола знижується на 15-25 °C;

Типове перемикання з режиму «дуття» на режим «нагрів» (рис. 8 а, б) має однаковий характер для всіх печей дуття, перемикання займає близько 5 хвилин, при цьому температура купола падає на 15- 20°C.

У режимі «перемикання» може спостерігатися зниження температури від 30 до 40 °С, а іноді і до 50 °С, що необхідно враховувати при автоматичному регулюванні подальшого режиму роботи доменної печі.

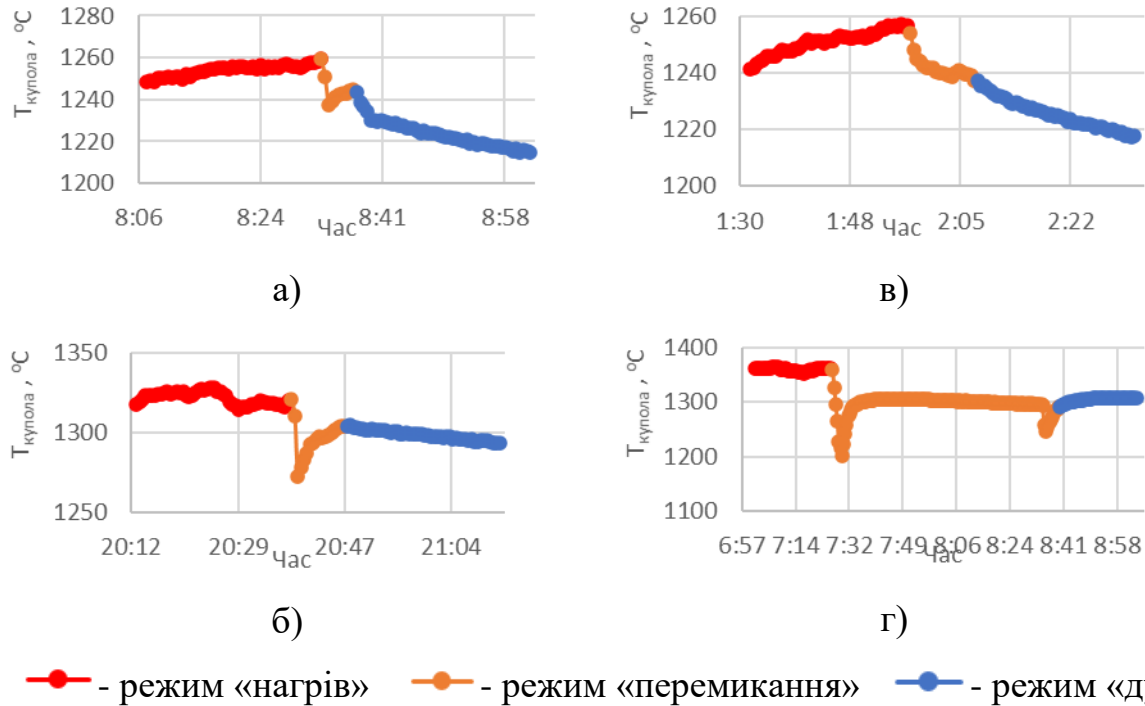


Рисунок 2.8 - Перемикання печі гарячого дуття з режиму нагріву в режим дуття

Подібний характер мають типові перемикання з режиму «нагрів» на режим «дуття» (рис. 2.7 а, б), при тривалості від 8 до 10 хв. температура купола знижується на 15-25 °С;

Типове перемикання з режиму «дуття» на режим «нагрів» (рис. 8 а, б) має однаковий характер для всіх печей дуття, перемикання займає близько 5 хвилин, при цьому температура купола падає на 15- 20°С.

У режимі «перемикання» може спостерігатися зниження температури в межах 30-40 °С, а іноді і до 50 °С, що необхідно враховувати при автоматичному регулюванні подальшого режиму роботи доменної печі.

2.6 Дослідження режиму «перемикання» для кількох різних блоків ПН

За допомогою розробленої програми було досліджено базу даних за тривалий період роботи БНП для отримання та подальшого аналізу усереднених графіків зміни температури купола ПН двох блоків різних доменних печей у режимах «перемикання» (рис. 2.9).

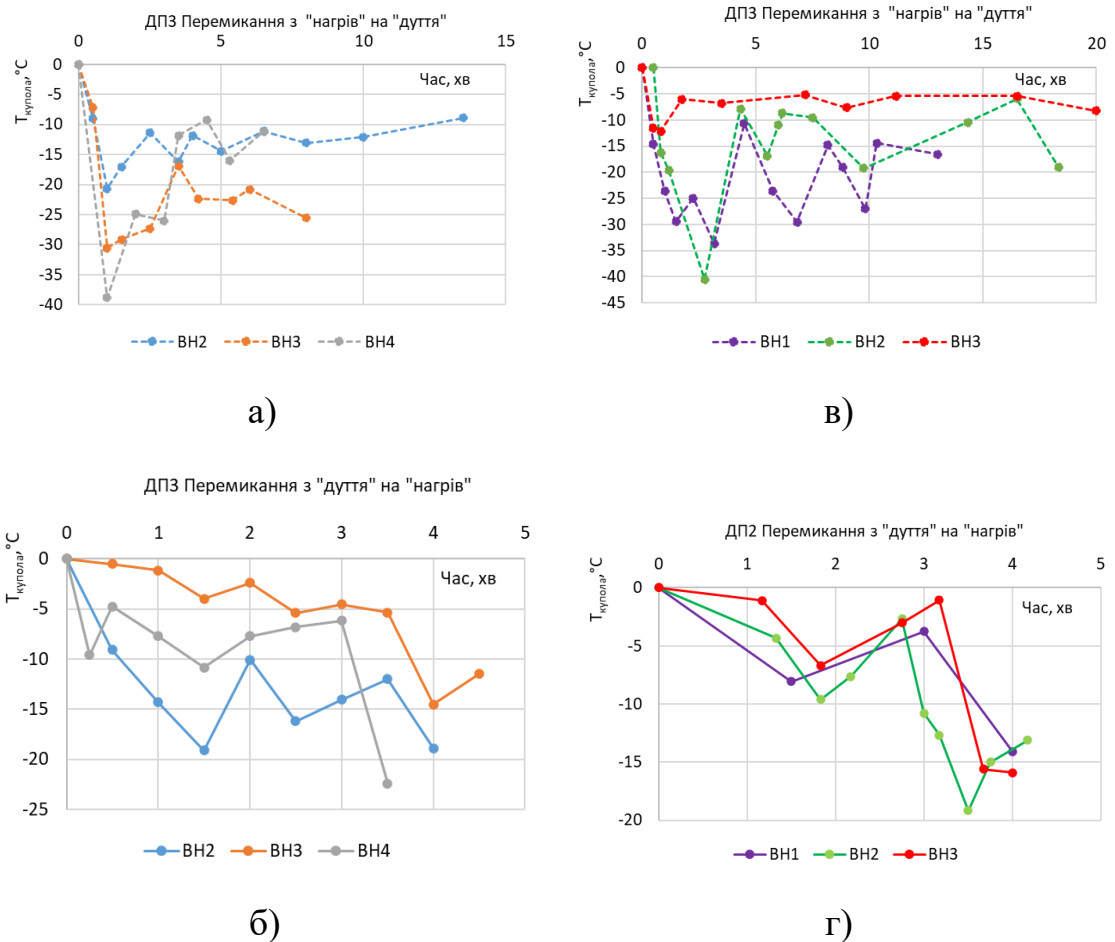


Рисунок 2.1 - Графіки середніх зміни температури купола в режимі «перемикання»

Зміна температури купола в режимі «перемикання» з режиму «дуття» на «нагрів» має однаковий характер, а тривалість режиму «перемикання» відповідає діаграмі параметрів роботи блоків, прийнятих для досліджуваного періоду (рис. 2.9 б, г).

Тривалість режиму «перемикання» з режиму «нагрів» на «дуття» для ПН4 і ПН3 доменної печі № 3 відповідає діаграмі параметрів, а для ПН2 вдвічі більше, ніж у діаграмі параметрів.

Тривалість переходу режиму «перемикання» з режиму «нагрів» до режиму «дуття» для всіх доменних печей доменної печі № 2 значно більша, що вказано в таблиці параметрів.

Отримані результати необхідно врахувати при складанні нової скоригованої діаграми параметрів для оптимізації роботи блоку гарячого дуття.

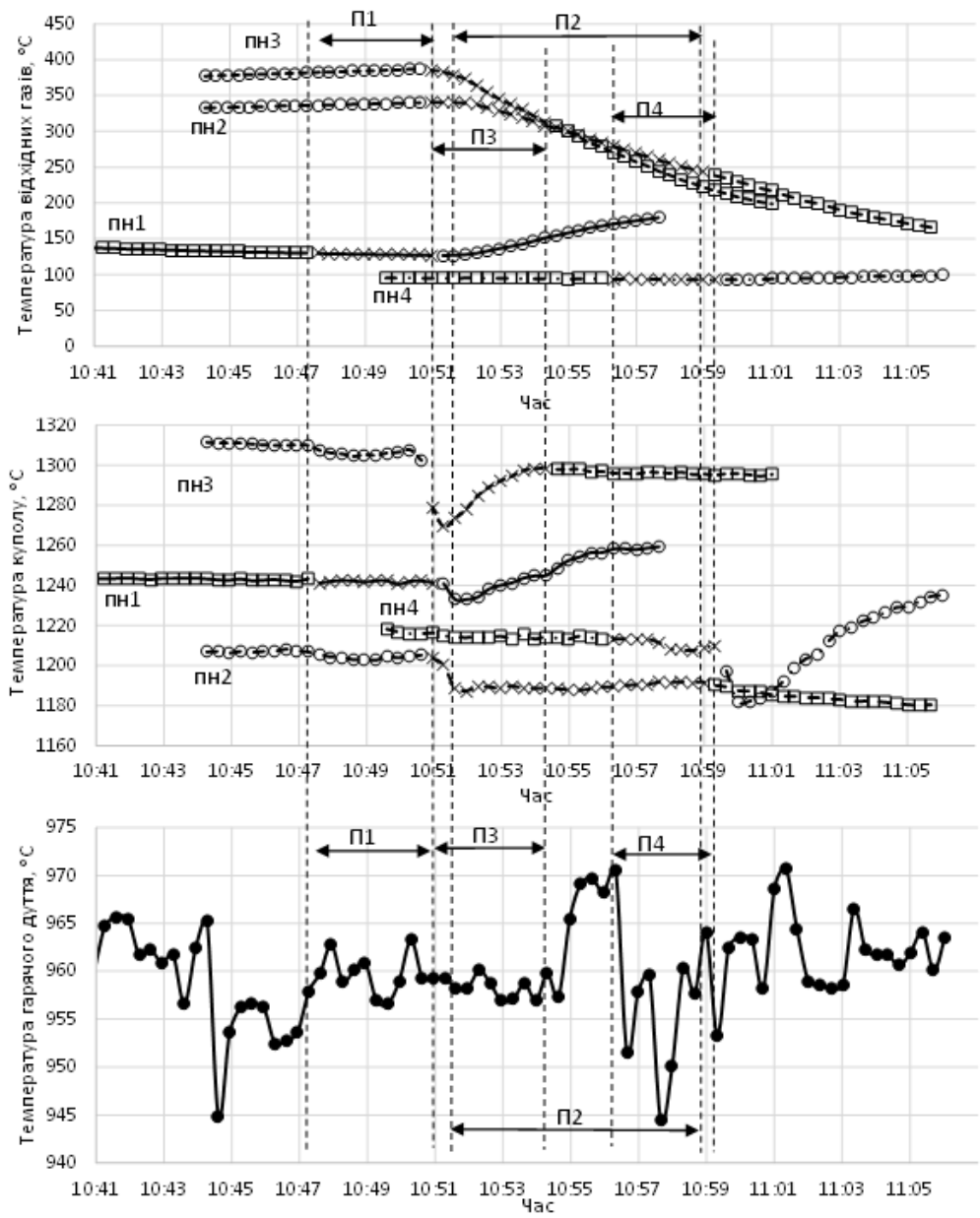
2.7 Вплив «перемикання» на температуру гарячого дуття

Особливий інтерес представляє комплексний аналіз режимів «ввімкнення» блоку, що працює в паралельному режимі, та їх вплив на температуру гарячого дуття (рис. 10).

До «перемикання» БПН знаходився в режимі паралельної роботи: ПН1 і ПН4 працювали в режимі «нагрів», ПН2 і ПН3 - в режимі «дуття».

Розглянемо послідовність режиму «перемикання»: ПН1 першим перейшов на режим «нагрів» - перепадів температури дуття не спостерігалось; потім ПН2 і ПН3 стали переходити в режим «дуття» - відбувається різкий стрибок температури дуття приблизно на 15°C протягом 2 хвилин; ПН4 останнім перейшов на режим «нагрів» - в цьому випадку спостерігається різке зниження температури дуття на 25°C ; після закінчення режиму «переключення» температура гарячого дуття стабілізується.

Стабілізація температури дуття під час «перемикання» є одним із найважливіших завдань сьогодення, оскільки коливання температури дуття негативно впливають на хід доменної плавки, тому інформація про характер коливань у температура гарячого дуття повинна передаватися в систему автоматичного керування [4].



«Нагрів»: ○— - ПН1; -◇--- ПН2;□----- ПН3; -○- - ПН4

«Дуття»: ×— - ПН1; -□--- ПН2;◇----- ПН3; -◇- - ПН4

«Перемикання»: □— - ПН1; -×--- ПН2;◇----- ПН3; -×- - ПН4

П1 - перемикання ПН1 з "нагрів" на "на дуття", П2 - перемикання ПН2 з "нагрів" на "дуття", П3 - перемикання ПН3 з «нагрів» на «дуття», П4 - перемикання ПН4 з «дуття» на «нагрів»

Рисунок 2.10 - Вплив «перемикання» печей ПН на температуру гарячого дуття

РОЗДІЛ 3

ВИКОРИСТАННЯ ДВОСТУПІНЧАСТОГО ВХІДНОГО ВПЛИВУ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ДИНАМІЧНОЇ ТОЧНОСТІ ПЕРЕХІДНОГО ПРОЦЕСУ ЗА ЗАВДАННЯМ

Одним із важливих показників якості роботи систем управління є динамічна точність. Вона показує, як добре система справляється з керуванням при різких змінах режимів роботи, і якої максимальної помилки вона допускає.

Питання підвищення точності мають важливе значення та розглядаються як у роботах з теорії автоматичного управління, так і суміжних галузях. У роботі [5] побудовано математичні моделі традиційних систем фазового автопідстроювання (ФАП) та фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ) з принципом управління з відхилення, виконано аналіз динамічних характеристик цих систем, визначено динамічні, середньоквадратичні помилки та показники якості перехідних процесів. Показано можливість підвищення показників якості систем традиційних ФАП та ФАПЧ шляхом введення розімкнених компенсаційних зв'язків щодо впливу (побудови комбінованих систем) та диференціальних зв'язків. У роботі [6] показано, що кореляційна система вирівнювання тимчасових запізнювань сигналів є слідкувальною системою з принципом управління з відхилення, задаючим впливом якої є різницю тимчасових запізнювань сигналів, а керованої величиною – керований час затримки одного з сигналів. Діяльність [7] розглядається підвищення динамічної точності цифрових стежать систем. Діяльність зроблено висновок, що радикальним засобом підвищення динамічної точності є усунення швидкісної помилки і прискорення. Показано, що можливе значне підвищення динамічної точності цифрової системи, що стежить без істотної зміни її самої. Для цього вплив, що задає, необхідно обробити за допомогою спеціальної програми. Діяльність зроблено висновок, що радикальним засобом підвищення динамічної точності є усунення швидкісної помилки і прискорення. Показано, що можливе

значне підвищення динамічної точності цифрової системи, що стежить без істотної зміни її самої. Для цього вплив, що задає, необхідно обробити за допомогою спеціальної програми. Діяльність зроблено висновок, що радикальним засобом підвищення динамічної точності є усунення швидкісної помилки і прискорення. Показано, що можливе значне підвищення динамічної точності цифрової системи, що стежить без істотної зміни її самої. Для цього вплив, що задає, необхідно обробити за допомогою спеціальної програми.

У системах управління, у яких регульований параметр у ході роботи повинен змінюватися ступінчасто, мають місце перехідні за завданням. Для цього на вхід регулятора подають задане значення параметра, що регулюється, яке змінюється у формі стрибка. В результаті перехідного процесу регульований параметр плавно змінюється і приходить до нового заданого значення. Це відбувається не миттєво, а займає певний час. Графік типового коливального перехідного процесу за завданням при нульових початкових умовах показаний (рис. 3.1). Регульована величина у ньому представлена умовних безрозмірних одиницях. Насправді такий процес можливий, наприклад, у системі управління температурою в нагрівальних пристроях.

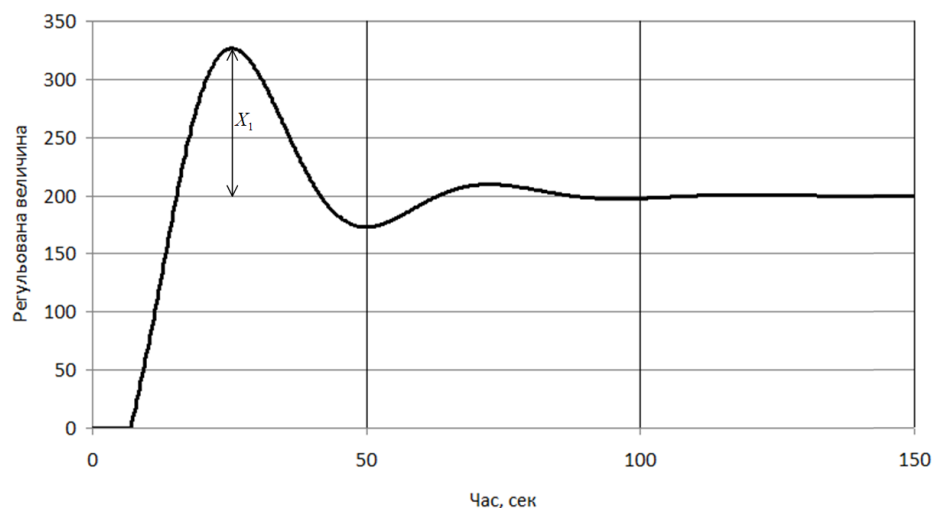


Рисунок 3.1 – Типовий коливальний перехідний процес за завданням

Оскільки процес, показаний рис. 3.1 коливальний, він складається з низки коливань регульованої величини навколо середньої лінії, що дорівнює кінцевому заданому значенню. Перше відхилення найбільше, називатимемо його динамічною помилкою X_1 . Його можна розрахувати за такою формулою:

$$X_1 = X_{\max} - X_{\text{зад}} \quad (3.1)$$

де X_{\max} – максимальне значення регульованої величини (перший максимум коливань),

$X_{\text{зад}}$ – кінцеве задане значення регульованої величини.

Динамічна помилка є небажаною та сильно погіршує точність регулювання, тому необхідно її зменшити. Величина помилки залежить від параметрів об'єкта керування та параметрів регулятора, але вони є умовно постійними і в процесі роботи не змінюються. Також вона прямо пропорційно залежить від величини стрибкоподібного вхідного заданого значення. У роботі ставиться і вирішується завдання зменшення динамічної помилки. Пропонується замінити одноразовий стрибкоподібний вхідний вплив двома послідовними впливами меншої величини, зрушеними в часі щодо один одного (рис. 3.2). Очевидно, що кожен такий вплив буде викликати меншу динамічну помилку і очікується, що точність підвищиться.

Для дослідження розглянемо типову класичну лінійну систему управління, що складається із статичного об'єкта управління першого порядку та пропорційно-інтегрального (ПІ) регулятора. Передатна функція статичного об'єкта управління відома і має вигляд:

$$W_{\text{об}}(p) = \frac{K_{\text{об}}}{T_{\text{об}}p+1} e^{-p\tau_{\text{об}}} \quad (3.2)$$

де $K_{\text{об}}$ – коефіцієнт передачі об'єкта управління,

$T_{об}$ – постійна часу об'єкта управління,

$\tau_{об}$ – час запізнення об'єкта керування.

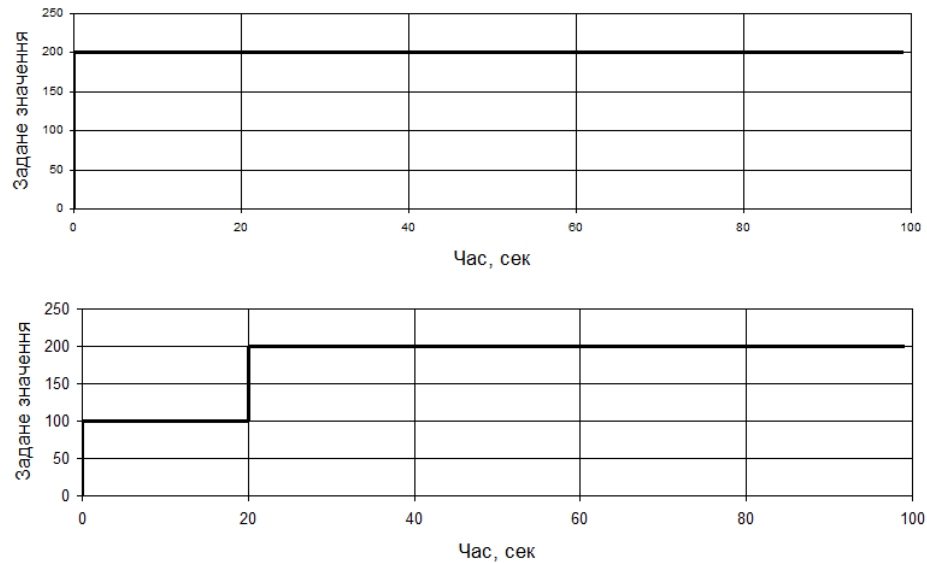


Рисунок 3.2 – Одна та двоступінчаста вхідна дія

Передатна функція (ПІ) регулятора відома і має вигляд:

$$W_{\text{рег}}(p) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i p} \right) \quad (3.3)$$

де K_p – коефіцієнт передачі регулятора,

T_i – час інтегрування (подвоєння) регулятора.

Оскільки до складу об'єкта управління входить ланка чистого запізнення, то аналітичне дослідження системи управління дуже складно. Тому представимо систему управління у вигляді моделі із двох диференціальних рівнянь у різницевої формі. Моделювання роботи системи виконуватимемо, вирішуючи систему рівнянь чисельно за допомогою методу Ейлера.

Для об'єкта управління відповідне рівняння має вигляд:

$$x_i = x_{i-1} + \frac{\Delta\tau}{T_{об}} (K_{об} u_{(\tau-\tau_{об})} - x_{i-1}) \quad (3.4)$$

де x_i – значення регульованої величини в даний час,

x_{i-1} – значення регульованої величини в попередній момент часу,

$\Delta\tau$ – крок часу моделювання,

$u_{(\tau-\tau_{об})}$ – керуюча дія регулятора, з урахуванням відставання на час запізнення.

Керуюча дія ПІ-регулятора складається з двох складових. Для пропорційної складової рівняння має вигляд:

$$u_{Pi} = K_p (x_{задi} - x_i) \quad (3.5)$$

де u_{Pi} – пропорційна складова керуючого впливу в даний час,

$x_{задi}$ – задане значення регульованої величини в поточний момент часу.

Інтегральна складова знаходиться методом прямокутників:

$$y_{i_i} = y_{i_{i-1}} + \frac{K_p}{T_i} \Delta\tau (x_{задi} - x_i) \quad (3.6)$$

де y_{i_i} – інтегральна складова керуючого впливу в даний момент часу,

$y_{i_{i-1}}$ – інтегральна складова керуючого впливу в попередній момент часу.

Графік, показаний на рис 3.1, отриманий в результаті розрахунків за цією моделлю при одноступінчастому входному впливі. Використовуємо його як вихідний варіант порівняння з наступними експериментами. Для нього найбільше відхилення від заданого значення становить $X_1 = 326,59 - 200 = 126,59$.

Виконаємо експеримент з моделювання роботи системи управління з двоступінчастим вхідним стрибкоподібним впливом. Виберемо спочатку час між стрибками $\Delta\tau_{\text{зад}}$ рівним приблизно чверті періоду коливань. Цей момент приблизно відповідає першому максимуму коливань, коли подальше зростання в результаті першого стрибка вхідного впливу припиняється. Результати моделювання показані рис. 3.3. Для даного графіка найбільше відхилення становить $X_1 = 260,27 - 200 = 60,27$. Як бачимо, динамічна помилка зменшилася більш ніж удвічі, отже двоступінчасте вхідний вплив справді дозволяє зменшити динамічну помилку.

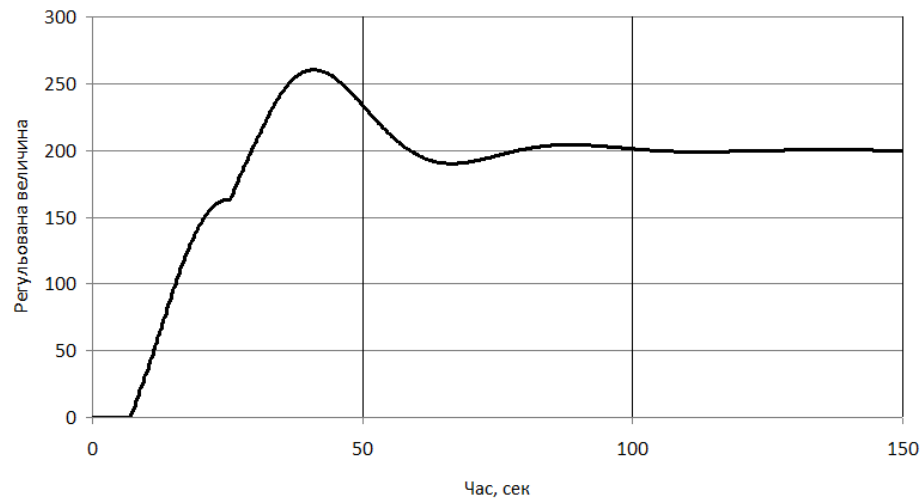


Рисунок 3.3 – Перехідний процес при двоступінчастій вхідній дії

Цікавить визначити найкращий момент часу подачі другого стрибка вхідного впливу. Щоб це зробити скористаємося тим, що наша лінійна система управління має властивість суперпозиції. Реакцію системи на складну двоступінчасту вхідну дію можна як суму реакцій на два простих одноступінчастих впливу. На рис. 3.4 показано два перехідні процеси. Кожен є реакцією системи управління на окрему щабель вхідного впливу. Процеси виходять зрушеними у часі такий самий час, як і щаблі вхідного впливу. Підсумовування цих перехідних процесів і дає перехідний процес рис. 3.3.

Динамічна помилка для будь-якого з перехідних процесів на рис. 3.4 становить $X_1 = 163,30 - 100 = 63,30$ і дорівнює половині динамічної помилки перехідного процесу рис. 3.1.

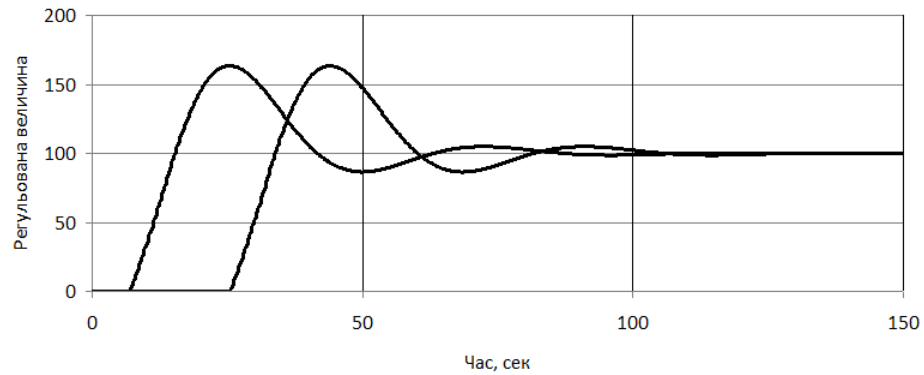


Рисунок 3.4 – Складові перехідного процесу, що відповідають двом ступеням вхідного впливу

Аналіз форми і розташування графіків рис. 3.4 призводить до висновку, що зсув між ступенями повинен мати таку величину, щоб перший мінімум першого перехідного процесу збігався в часі з першим максимумом другого перехідного процесу. Тоді вони найбільше компенсують один одного. На рис 3.5 показано таке взаємне розташування графіків.

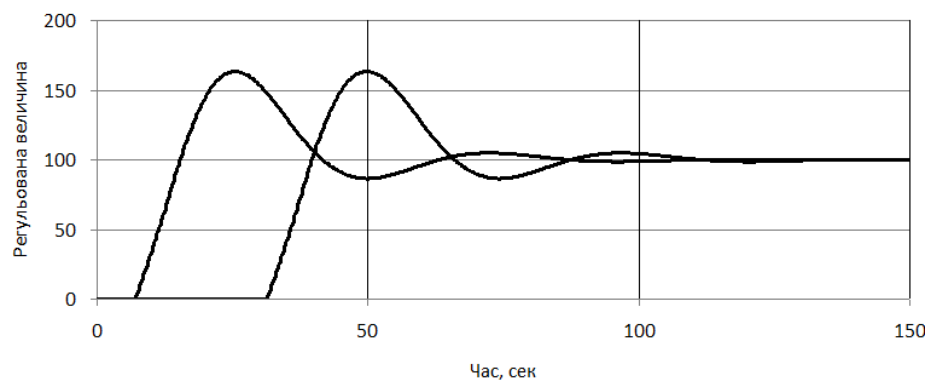


Рисунок 3.5 – Найкраще взаємне розташування складових перехідного процесу

Результат моделювання роботи системи управління з двоступінчастим вхідним впливом, щаблі якого зрушені на запропонований час, показано на рис. 3.6. Динамічна помилка для цього перехідного процесу становить $X_1 = 249,81 - 200 = 49,81$. Вона зменшилася більш ніж 2,5 разу проти перехідним процесом для одноступеневого вхідного впливу. Додаткові експерименти показали, що зменшення або збільшення часу між ступенями вхідного впливу призводить до збільшення динамічної помилки. Таким чином, отримано мінімальне екстремальне значення динамічної помилки.

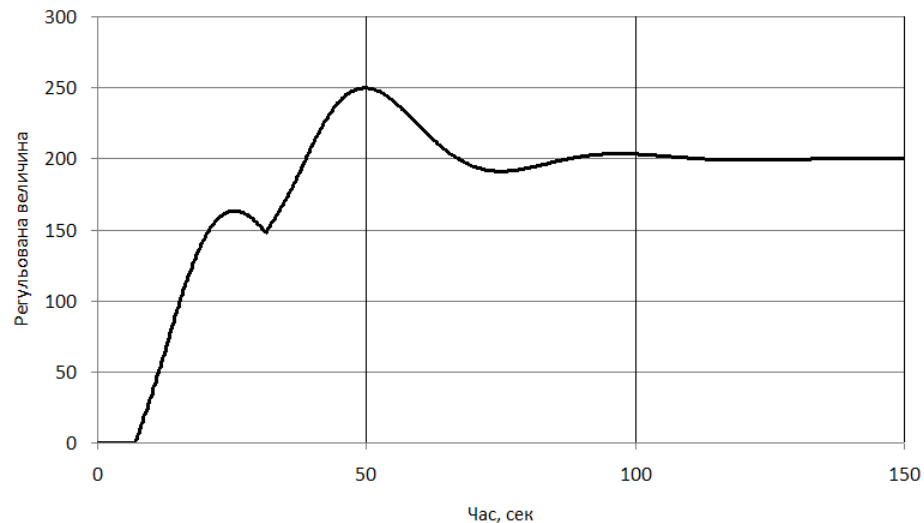


Рисунок 3.6 – Перехідний процес для двоступінчастої вхідної дії з найкращим зрушенням сходів між собою у часі

У лінійній системі форма, співвідношення амплітуд коливань і часові параметри перехідних процесів залежить від величини вхідного впливу, а визначаються лише внутрішніми властивостями об'єкта управління і регулятора. Тобто всі перехідні процеси за завданням будуть подібні між собою. Це дозволяє один раз визначити проміжок часу, на який повинні бути зсунуті щаблі вхідного впливу та використовувати їх для будь-яких процесів регулювання за завданням даної системи управління. Для цього необхідно провести експеримент для будь-

якого одноступінчастого вхідного впливу та отримати перехідний процес рис. 3.7. Потім визначити моменти часу для першого максимуму τ_1 і для першого мінімуму τ_2 . Найкращий проміжок часу для зсуву ступенів вхідного впливу в часі визначити за формулою:

$$\Delta\tau_{\text{зад}} = \tau_2 - \tau_1 \quad (3.7)$$

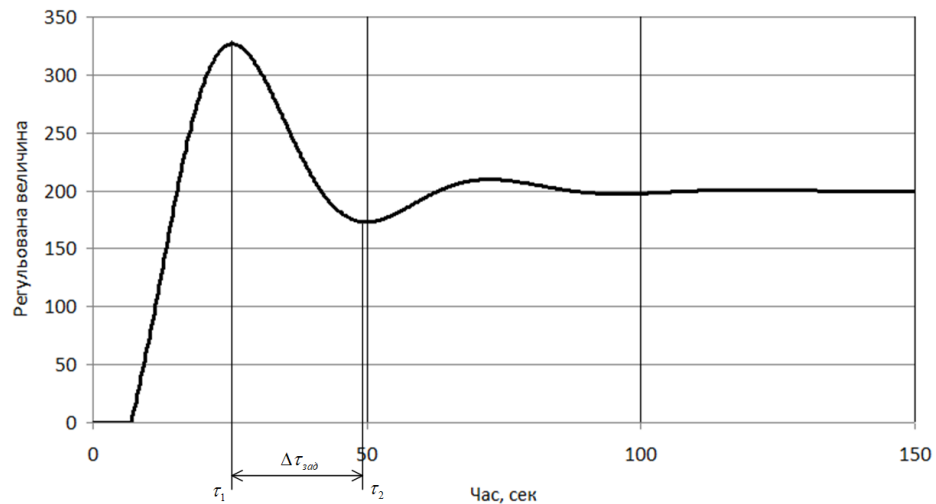


Рисунок 3.7 – Визначення часу зсуву між ступенями вхідної дії

Таким чином, в результаті проведених досліджень підтвердилася гіпотеза, що двоступінчаста вхідна дія дозволяє покращити динамічну точність та зменшити динамічну помилку. Це значне поліпшення і перевищує 2,5 рази. Також визначено найкращий інтервал часу між ступенями вхідного впливу та запропоновано метод його визначення.

РОЗДІЛ 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТЕМПЕРАТУРНИМ РЕЖИМОМ ПЛАВКИ В КОМПЛЕКСАХ «ПІЧ-КІВШ»

4.1 Актуальність наукового дослідження

В даний час метал є основним конструктивним матеріалом для машинобудівного, суднобудівного та інших металоємних виробництв. В Україні зосереджено значну кількість металургійних підприємств, на яких якісніші сталі виплавляються в електротермічних печах. Якість сталі, що виплавляється, визначається її хімічним складом і підтримкою температурного режиму плавки в окислювальний і відновлювальний період з точністю ± 10 °С. На практиці операції контролю температури рідкого металу здійснюються періодично в ручному або напівавтоматичному режимі з інтервалами 15...20 хв. Періоди неспостережуваності процесу (між процедурами вимірювань) викликають ризик перегріву металу, що може позначитися на якості сталі і призвести до зайвої витрати споживаної енергії. Електричні і теплові втрати при перегріві металу несуть змінний характер і досягають 20 ... 45% від величини підведеної потужності [21, 22].

До теперішнього часу механізми управління з урахуванням теплових втрат не вироблені, оскільки мають місце невизначеності взаємозв'язків технологічних параметрів, насамперед маси розплаву, необхідної кількості електроенергії та графіка температурного режиму плавки. До того ж унікальність обладнання та процесів не дозволяють провести цілеспрямовані експериментальні дослідження картини цих взаємозв'язків. У цих умовах для зазначених об'єктів стає очевидною необхідність розробки математичних моделей взаємозв'язку теплових та енергетичних параметрів, з метою оптимізації процесу плавки у

відновлювальний період та створення автоматизованої системи управління тепловим режимом плавки, що забезпечує стабільність якості виплавленої сталі при мінімальних енерговитратах. У зв'язку з цим розробка механізмів скорочення теплових втрат, а також алгоритмів оптимального управління тепловим режимом плавки в електротермічних печах періодичної дії у відновлювальний період плавки є актуальним науково-технічним завданням.

У даному розділі розглянута методика вирішення такого завдання в наступній послідовності:

- проведено дослідження особливостей технологічного процесу плавки металу у комплексах «ПЧ-КІВШ», встановлено параметри процесу управління тепловим режимом плавки.

- розроблено математичну модель та алгоритм управління теплового режиму плавкою в технологічних комплексах «ПЧ-КІВШ» з оцінкою теплових втрат і температури рідкого металу в періоди між вимірами температури розплаву.

- розглянуто методику створення автоматизованої системи управління тепловим режимом плавки технологічних комплексів «ПЧ-КІВШ» із застосуванням інформаційної бази даних та методу адаптивного управління на основі нейромережевих технологій.

4.2 Технологічний процес плавки металу в дугових сталеплавильних печах

Сучасні електротермічні печі (ЕТП) є автоматизованими агрегатами, які характеризуються високою продуктивністю та ефективним використанням встановленої енергетичної потужності.

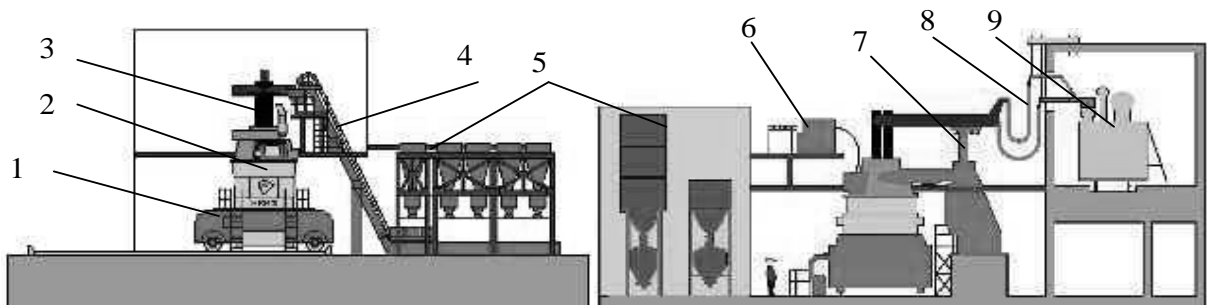
Для виплавки якісних сталей у металургійному виробництві широко застосовуються електротермічні печі прямої дії, з яких найбільшого поширення

набули дугові сталеплавильні печі (ДСП) та комплекси «ПЧ-КІВШ».

Основними елементами конструкції ДСП є:

- а) металевий корпус у вигляді циліндричного кожуха, який футерований усередині високовогнетривких матеріалів;
- б) охолоджуваний знімний звід печі з вогнетривкою кладкою, виконаною в кільці;
- в) колиска з механізмом нахилу печі для випуску розплаву;
- г) механізми переміщення електродів;
- д) індуктор для електромагнітного перемішування рідкої ванни;
- е) графітові електроди з електродотримачами;
- ж) пічний трансформатор та перемикач ступенів напруги під навантаженням.

Забезпечення заданих фізико-хімічних властивостей сталі виділяється в окрему фазу та реалізується або у ДСП, або у технологічних комплексах «ПЧ-КІВШ» (рис. 4.1).



1 – сталевоз; 2 – дугова піч; 3 – графітові електроди та електродотримач; 4 – скіповий підйомник тракту «сипучих»; 5 – тракт «сипких»; 6 – трайбанарат; 7 – система газовідведення та охолодження склепіння та кожуха печі; 8 – коротка мережа; 9 – пічний трансформатор та перемикач ступенів напруги

Рисунок 4.1 - Схематичний вид технологічного комплексу «ПЧ-КІВШ»

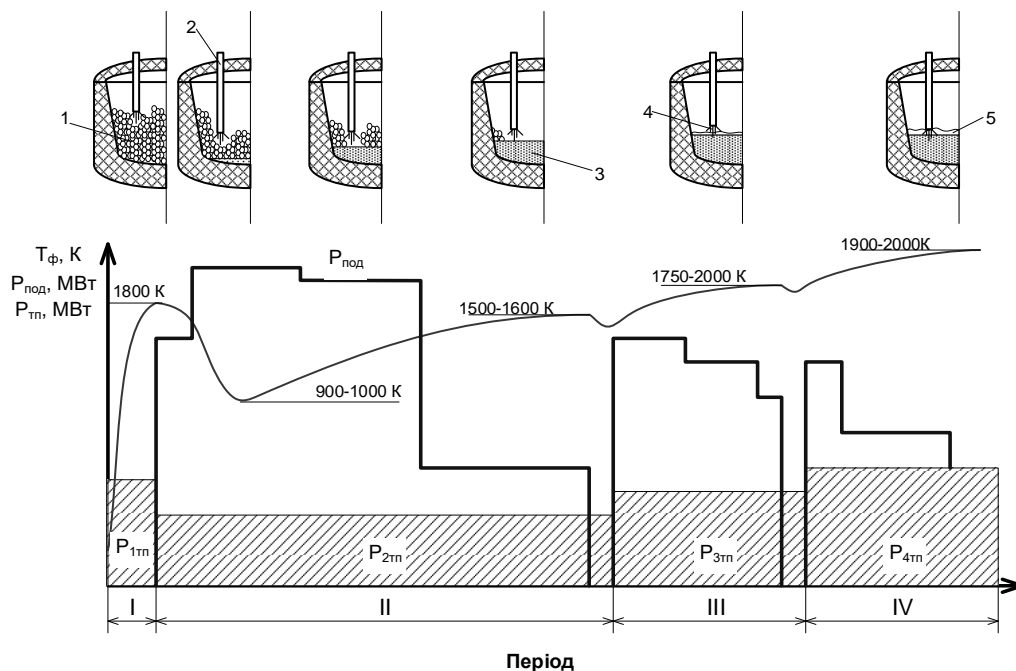
Технологічний комплекс «ПЧ-КІВШ» забезпечує дуговий підігрів рідкого металу в окислювальні та відновлювальні періоди плавки. Ці комплекси

відрізняються від ДСП додатковим технологічним обладнанням.

Електротермічні процеси, що відбуваються в ДСП та комплексах «ПЧ-КІВШ», у порівнянні з іншими термічними процесами мають такі особливості:

- а) висока концентрація енергії у великих обсягах;
- б) можливість створення високої температури нагріву металу, що не досягається іншим шляхом;
- в) більш висока точність регулювання температури у більших обсягах.

Процес обробки металу в ДСП можна розділити на два періоди: енергетичний, під час якого відбувається розплавлення твердої шихти, та технологічний, в якому здійснюються окислювальні та відновлювальні реакції. У свою чергу, енергетичний період включає періоди підготовки печі і плавлення шихти. Кожен із цих періодів характеризується особливими умовами теплових процесів. (рис. 4.2).



I – підготовка печі; II – плавлення шихти; III – окисний період;

IV – відновлювальний період; 1 – шихта; 2 – електрод;

3 – рідкий метал; 4 – електрична дуга; 5 – шлак

Рисунок 4.2 - Зміна умов теплової роботи печі у різні періоди плавки

На початку енергетичного періоду через холодний стан металу та печі електричні дуги мають малу довжину (кілька міліметрів), горять неспокійно, перекидаються з однієї ділянки металу на іншу, а електрична потужність, що вимірюється тисячами кіловат, виділяється в невеликому обсязі під електродами. [17, 19, 23].

У шихті утворюються «колодязі», у які опускаються електроди. Обвал стін цих «криниць» викликає часті поштовхи і короткі замикання, внаслідок чого виникають різкі коливання потужності. Частота цих коливань досягає 10...20 за хвилину [10, 23]. Кожне замикання призводить до різкого зменшення чи припинення корисної потужності дуги. Так триває доти, поки «колодязі» не досягнуть подини, а електроди – своєї нижньої точки, після чого відбувається розплавлення навколишньої шихти.

У період плавки замість необхідних постійних у часі величин струму і потужності виникають безперервні поштовхи наростання навантаження і потужності, що перевищують по амплітуді задані значення. Такі сплески призводять до зниження потужності та затягування процесу розплавлення, зниження продуктивності печі, збільшення витрати електроенергії та електродів.

Період закінчення плавлення є нетривалим і характеризується тим, що частина шихти вже розплавилася, залишилися лише невеликі залишки шихти на укусах, а електричні дуги горять відкрито, випромінюючи значну кількість енергії на футерування стін та склепіння печі.

При цьому теплова сприйнятливність рідкого металу дуже низька, а рідкий шлак, що покриває метал, віддає значну кількість енергії на футерування печі. Після розплавлення довжини дуг збільшуються, а короткі замикання і обриви дуг стають рідкісними [19, 22-24].

У період окислення споживана потужність йде в основному на заповнення частини теплових втрат, які становлять 20...35% від потужності, що підводиться, а також на підігрів металу і підтримання фізико-хімічних процесів. Введення

руди чи газоподібного кисню для окислення вуглецю, фосфору та інших елементів викликає енергійне кипіння металу. Зміна рівня металу та шлаку може призвести до імпульсних змін струмів печі до $\pm(20...30)$ % від номінальної величини. Довжина дуги у період досягає кількох десятків міліметрів [17, 19].

У відновлювальний період плавки або рафінування вся маса металу розплавлена, відбувається видалення сірки та кисню, а також додавання легуючих елементів. Цей процес, крім моментів наведення шлаку, характеризується дуже спокійним електричним режимом. Дуги мають значну довжину, метал покритий товстим шаром шлаку, споживана потужність знижується до 30...40 %, а напруга – рівня 0,6 від номінального значення [16].

Відновлювальний період в енергетичному аспекті поділяють наступні етапи: підігрів після скачування шлаку; наведення шлаку; розплавлення та розчинення феросплавів; витримка металу.

Швидкість (інтенсивність) процесу нагрівання металу визначається співвідношенням між його обсягом та потужністю перетворювача електричної енергії. Об'єм шихти, що завантажується в піч, визначається технологічними міркуваннями, змінюючись від плавки до плавки. У зв'язку з цим в окисних та відновлювальних періодах плавки, коли потрібно забезпечити регулювання температури відповідно до графіка плавки металу, трапляються випадки перерегулювання, які виявляються у погіршенні фізико-хімічних властивостей металу та збільшенні витрати електроенергії.

Необхідна електрична потужність кожного етапу визначається такими співвідношеннями [16, 23]:

– при підігріві металу після скачування шлаку:

$$S_{nod} = \frac{P_{mn} \tau_{nod} + M_o Q_{nod}}{\cos \varphi \eta_3 \tau_{nod}}, \text{ MVA}; \quad (4.1)$$

– у процесі утворення шлаку:

$$S_{ш} = \frac{P_{mn} \tau_{ш} + \kappa M_0 H_{ш}}{\cos \varphi \eta_3 \tau_{ш}}, \text{ МВА}; \quad (4.2)$$

– при розплавленні та розчиненні феросплавів:

–

$$S_{л} = \frac{P_{mn} \tau_{л} + M_{л} Q_{л}}{\cos \varphi \eta_3 \tau_{л}}, \text{ МВА}; \quad (4.3)$$

– у період витримки металу, коли енергія йде лише на покриття теплових втрат печі:

$$S_{\epsilon} = \frac{P_{mn}}{\cos \varphi \eta_3}, \text{ МВА}, \quad (4.4)$$

де $Q_{л}$, $Q_{ш}$ – кількість тепла, необхідного для розплавлення феросплавів та підігріву металу, $\text{МДж}/\text{т}$; наприклад, для підігріву 1 тонни сталі на $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ необхідно у середньому витратити $84\text{ МДж}/\text{т}$; $M_{л}$, M_0 – маси легуючих елементів (феросплаву) та металу, т ; $\tau_{ш}$, $\tau_{л}$, τ_{ϵ} – тривалості напівперіодів, с ; $H_{ш}$ – ентальпія розплавленого шлаку при його вищій температурі, що становить, в середньому, $2\ 100 \dots 2\ 700\text{ МДж}/\text{т}$; P_{mn} – потужність теплових втрат, кВт .

Дані за потужностями теплових втрат, наведені в таблиці 4.1, свідчать про те, що в процесі плавки теплові втрати можуть змінюватись у широкому діапазоні, досягаючи значних величин.

Таблиця 4.1 - Теплові втрати ДСП ємністю 60 тон

Період плавки	Теплові витрати P_{mn} , кВт	
	По даним Єфроймовича Ю. Є.	По даним Пирожникова В. Є.
Плавлення шихти	1 600	1 429
Окислювальний період	2 000	1 822
Відновлювальний період	1 900	1 734

В результаті досліджень, виконаних Пирожниковим В. Є. та Єфроймовичем Ю. Є. [23], встановлено, що при регулюванні швидкості нагрівання та температури металу як параметри управління доцільно використовувати напругу на низькій стороні пічного трансформатора і силу струму на дузі або опір дуги (довжину дуги).

4.3 Енергетичні параметри плавки металу в електротермічних сталеплавильних печах

Після розплавлення металу процеси управління ДСП та технологічним комплексом «ПЧ-КІВШ» стають ідентичними, оскільки забезпечують вирішення однакових завдань – рафінування металу, його легування та перемішування, а також усереднення температури розплаву. Виникаючі у своїй температурні втрати компенсуються електродуговим підігрівом [17, 24].

У відновлювальному періоді електрична дуга забезпечує розплавлення шлаку, що наводиться, і підтримання необхідної температури сталі. У процесі перемішування та продування рідкого металу інертним газом (аргоном) з наведенням на його поверхню шлакоутворюючих відбувається перенесення тепла та вирівнювання температури, підтримання та прискорення металургійних реакцій, відділення неметалевих включень, розкислення сталі та видалення сірки,

тобто формування фізико-хімічних властивостей сталі.

Технологічний процес обробки металу у відновлювальний період описується директивним температурним графіком плавки [10, 22-24], наведеним на рис. 4.3.

Даний графік формується технологом-металургом і є жорсткою вимогою до технологічного процесу, тому що при відхиленнях температури металу від заданої температури відбувається погіршення фізико-хімічних властивостей готового продукту, а при перегріванні рідкого металу до зайвих витрат електроенергії.

Наведений на рис. 4.3 директивний температурний графік плавки описує повний цикл обробки сталі марки 20 (обсяг металу в ківші 77,2 тони) із заданими величинами температури на кожному його етапі.

Так як хімічний склад сталі безпосередньо залежить від точного дотримання директивного температурного режиму плавки [22-24], найбільший інтерес представляє автоматизоване управління за прямим параметром - температурі рідкого металу. Проте для реалізації такої системи потрібен постійний контроль температури металу. Однак, контроль температури металу здійснюється у ручному режимі періодично з інтервалами часу 15...20 хвилин. За результатом вимірювання визначається фактична швидкість нагрівання металу, на підставі якої оператор змінює напругу на виході пічного трансформатора. Така технологія управління створює проблему не спостережуваного процесу стану об'єкта управління. Вирішення цієї проблеми доцільно шукати у площині теоретичних досліджень, спрямованих на визначення поточних значень теплових втрат, інтенсивності нагріву металу, а також необхідної електричної потужності на дусі.

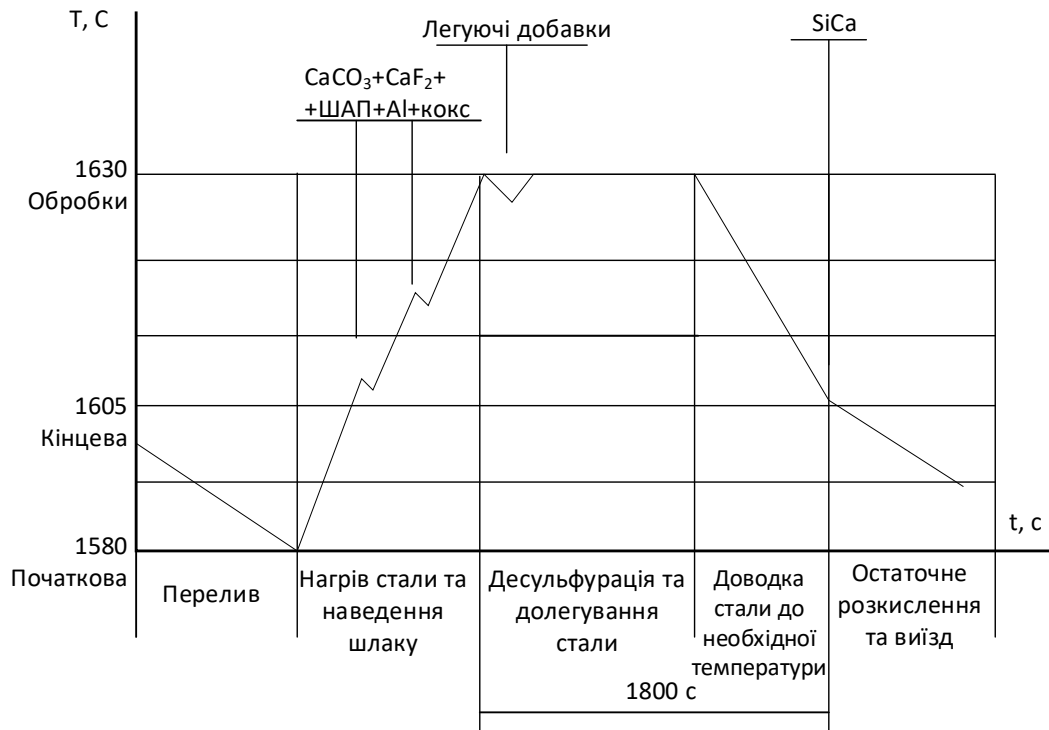


Рисунок 4.3 - Директивний графік температурного режиму плавки сталі марки 20 при розливанні на повітрі з УЗК

Дослідження електротермічних режимів печей проводилися на фізичних та математичних моделях. Едемський В. М та Наумов Є. А. [22] представили ДСП моделлю з двома безінерційними нелінійними блоками типу «зона нечутливості», що моделюють залежність напруги та струму фази від довжини дуги. Інші автори, наприклад [22], інтерпретують ЕТП безінерційною ланкою та ланкою запізнення з передатною функцією. Час від моменту включення приводу до початку переміщення електрода визначалося зазорами в передачі та еластичністю ланок виконавчого механізму.

У роботах [16, 17, 19] рекомендується вибирати електричний режим печі в інтервалі сили струму від , що відповідає найменшій питомій витраті електричної енергії на одну тонну сталі, що виплавляється, до , відповідної найбільшій питомій продуктивності печі. Авторами запропоновані наступні залежності

визначення цих струмів:

$$I' = \sqrt{\frac{U_{\phi}^2 P_{mn} \cdot 10^3}{3U_{\phi}^2 r + 2x^2 P_{mn} \cdot 10^3}}; \quad (4.5)$$

$$I_1 = \frac{U_{\phi}}{\sqrt{(z+r)^2 + x^2}}, \quad (4.6)$$

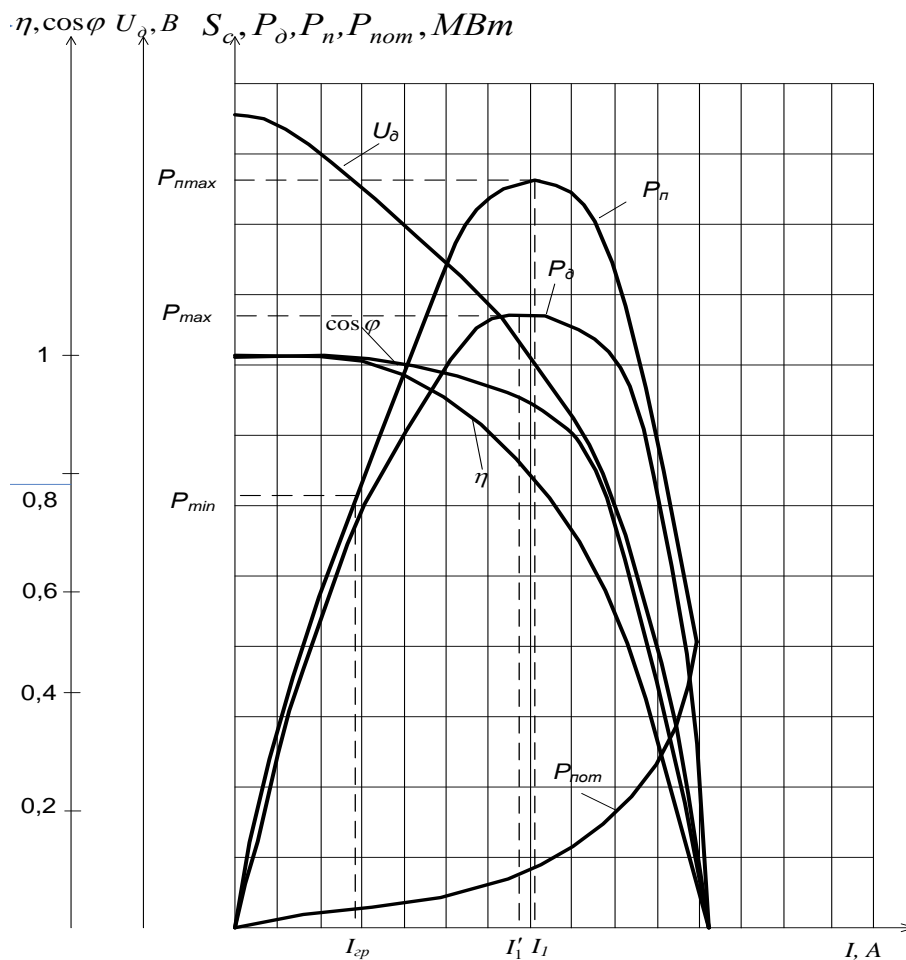
де P_{mn} – потужність теплових втрат, $MВт$; U_{ϕ} – фазна напруга, $В$; r та x – активний та реактивний опір короткої мережі відповідно, $Ом$; z – повний опір короткої мережі, $Ом$.

У роботах [13, 15-17, 27] за критерій оптимальності пропонується вибрати найменшу питому витрату електричної енергії W на одну тону сталі, що виплавляється, що відповідає умові $\frac{dW}{dP_a} = 0$ при силі струму I' . Однак ця умова справедлива лише в період розплавлення шихти на вищих щаблях напруги і не прийнятно для інших періодів плавки.

Для забезпечення необхідної точності температури металу ± 10 °С необхідно мати можливість варіювати швидкість нагрівання ванни шляхом керування потужністю $P_{пол}$ з точністю не менше ± 200 кВт. Плавне регулювання потужності $P_{пол}$ може здійснюватися лише за рахунок зміни струму I . Статичні характеристики електричного режиму при зміні струму електропечі, отримані на роботах [24; 27], наведені на рис. 4.4.

На кожному ступені напруги максимальної підведеної потужності від пічного трансформатора P_n відповідає максимальне значення струму $I_{max} = I_1$. Величина $\cos \phi$ та електричний ККД пічної установки η_{ϕ} при струмі I_1 зберігають відносно високі значення – не менше 0,7...0,8. При струмі $I > I_1$ підведена

потужність P_n зменшується, а сумарна потужність електричних та теплових втрат пічної установки P_{nom} збільшується. Мінімальна допустима величина струму повинна бути не нижчою від значення струму граничних умов стійкого горіння дуг I_{cp} . При $I < I_1$ підведена потужність P_n та потужність витрат P_{nom} зменшуються, а $\cos\varphi$ та η збільшуються. З погляду собівартості такий режим є допустимим. Варіювання струмів дуг від I_1 до граничних умов стійкого горіння дуг I_{cp} дозволяє отримати значення потужності, що підводиться від пічного трансформатора P_n в діапазоні від мінімальної P_{min} до номінальної $P_{ном}$ (рис. 4.4).



S_c – повна споживана потужність мережі; Q_c – реактивна споживана потужність мережі; P_{nom} – потужність витрат; U_d – напруга на дузі;

P_n – підведена потужність; P_c – активна споживана потужність мережі

Рисунок 4.4 - Статичні характеристики електричного режиму дугової печі

Гранична сила струму стійкого горіння дуг I_{zp} визначається виразом [20]

$$I_{zp} = \sqrt{I_0^2 + I_0 \frac{U_\phi}{x}}, \quad (4.7)$$

де I_0 – сила струму холостого ходу пічного трансформатора, A ; x – індуктивний опір пічного трансформатора, Om .

Слід врахувати, що відомі методи та засоби контролю електричних параметрів дозволяють оптимізувати за критерієм енерговитрат тільки в періоди розплавлення твердої шихти. Відомостей щодо оптимізації електротермічних процесів в окисних та відновлювальних періодах плавки металів не виявлено.

4.4 Розробка математичної моделі температурного режиму плавки рідкого металу

Відповідно до технологічних умов плавки для отримання високоякісного кінцевого продукту, заданий температурний режим повинен підтримуватися з точністю ± 10 °C. Цю вимогу необхідно враховувати при побудові математичної моделі температури рідкого металу.

При аналізі інтегральних показників енергетичних процесів у дуговій сталеплавильній печі облік їхнього просторового розподілу може бути зроблений шляхом вирішення диференціальних рівнянь у приватних похідних. Таке рішення дозволяє описати теплові процеси, розподілені у часі та просторі [13, 19; 21, 22].

Опишемо процес теплообміну в печі системою диференціальних рівнянь теплопровідності у приватних похідних:

$$\frac{\partial T_{ш}}{\partial t} = a_1 \left(\frac{\partial^2 T_{ш}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_{ш}}{\partial r} \right) + \delta(r - r_1) Q^*, \quad (4.8)$$

$$\frac{\partial T_{м}}{\partial t} = a_2 \left(\frac{\partial^2 T_{м}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_{м}}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_{м}}{\partial x^2} \right) + \delta(x) [F(r, t)]. \quad (4.9)$$

де $\delta(r - r_1)$, $\delta(x)$ – дельта-функції за відповідними координатами розповсюдження тепла від електричної дуги; $Q^* = \lambda_3 \frac{P_d}{\pi r_3^2}$ – модельна потужність джерела теплової енергії (електричної дуги); $F(r, t) = \delta(r - r_1) Q^* + Q_1 [T_{ш}^*(r, t)]$ – параметр, що характеризує потужність джерела тепла, що передається розплаву; $a_2 = 1/c_m M_m$, $a_1 = 1/c_{ш} M_{ш}$ – теплові передавальні коефіцієнти металу та шлаку відповідно; C_m , $C_{ш}$ – питома теплоємність металу та шлаку відповідно; M_m , $M_{ш}$ – маса металу та футерування відповідно.

При вирішенні системи рівнянь прийнято припущення про циліндричну форму печі та рівномірний розподіл потужності у фазах короткої мережі. Рівняння (4.8) визначає теплопровідність у шлаку за наявності внутрішнього джерела тепла. Внутрішнім джерелом тепла є потужність Q^* випромінювана електричною дугою, що горить безпосередньо в шлаку. Рівняння (4.9) визначає теплопровідність (зміна температури) у розплаві в процесі нагрівання до температури витримки. Нагрівання розплаву відбувається шляхом безпосереднього нагрівання від електричних дуг та конвекційного теплообміну на поверхні «шлак – розплав» і описується потужністю джерела тепла, що входить безпосередньо до рівняння $F(r, t)$. На краях розплаву відбувається конвекційний теплообмін з водоохолоджуванним футеруванням, температура якої вимірюється вбудованими термопарами.

Запишемо початкові умови для рівнянь (4.8) и (4.9):

$$T_{uu}(r,0) = T_{.m}(x,r,0) = T_0, \quad (4.10)$$

де T_0 – початкова температура розплаву та шлаку.

При розв'язанні рівнянь (4.8) введемо припущення, що шлак є теплоізолюваним по поверхні «шлак – розплав», тепловіддача проходить тільки по поверхні радіусом R , а теплообмін між шлаком та розплавом врахуємо при вирішенні рівняння (4.9).

Граничні умови рівняння (4.8) та (4.9):

$$T_{uu}(0,t) < \infty; \quad \frac{\partial T_{uu}}{\partial r} = -\alpha_1 T_{uu}|_{r=R}. \quad (4.11)$$

Граничні умови рівняння (4.9):

$$T_{.m}(0,x,t) < \infty; \quad \frac{\partial T_{.m}}{\partial x} = -\alpha_3 T_{.m}|_{x=l};$$

$$\frac{\partial T_{.m}}{\partial r} = -\alpha_2 T_{.m}|_{r=R}; \quad \frac{\partial T_{.m}}{\partial x} = \frac{\partial T_{uu}}{\partial x}|_{x=0}. \quad (4.12)$$

Розглянемо рішення рівняння (4.8) та (4.9) з початковими (4.10) та граничними (4.11) умовами (4.12).

Знайдений розподіл температурного поля у шлаку описується виразом

$$T_{uu}(r,t) = \sum_{n=1}^{\infty} 2T_0 \frac{\mu_n^2 J_1(\mu_n)}{[\mu_n^2 + (\alpha_1 R)^2] J_0^2(\mu_n)} e^{-\left(\frac{\alpha_1 \mu_n}{R}\right)^2 t} +$$

$$+ \frac{2Q^* r_1}{a_1^2} \frac{J_0\left(\frac{\mu_n}{R} r_1\right)}{[\mu_n^2 + (\alpha_1 R)^2] J_0^2(\mu_n)} (1 - e^{-\left(\frac{\alpha_1 \mu_n}{R}\right)^2 t}) J_0\left(\frac{\mu_n}{R} r\right). \quad (4.13)$$

Рішення рівняння (4.9) температурного поля у розплаві має таке рішення:

$$T_m(x, r, t) = \sum_{k=1}^{\infty} \left(\sum_{i=1}^{\infty} Q_{ki}(t) J_0 \left(\frac{\chi_i}{R} r \right) \right) \cos \frac{p_k}{h} x. \quad (4.14)$$

де

$$Q_{ki}(t) = 4T_0 \frac{\alpha_3 h \sin p_k}{p_k [\alpha_3 h + \sin^2 p_k]} \cdot \frac{\chi_i J_1(\chi_i)}{[\chi_i^2 + (\alpha_2 R)^2 J_0^2(\chi_i)]} e^{-a_{ki} t} + \frac{2\alpha_3}{\alpha_3 h + \sin^2 p_k} e^{-a_{ki} t} \int_0^t p_i(\tau) e^{a_{ki} \tau} d\tau; \quad (4.15)$$

$$p_i(t) = \frac{2\chi_i^2}{[\chi_i^2 + (\alpha_2 R)^2 J_0^2(\chi_i)]} \int_0^R r F(r, t) J_0 \left(\frac{\chi_i}{R} r \right) dr. \quad (4.16)$$

Отримані динамічні моделі (4.13) та (4.14) є нелінійними та відображають специфічну реакцію багатьох електротермічних установок. Специфічна реакція проявляється у наявності двох складових, одна з яких відповідає щодо швидкої реакції поверхневих шарів (шлаку), а друга – повільнішого розподілу тепла в рідкому металі. Модель дозволяє досліджувати зміну температури розплаву в залежності від величини потужності на дузі, маси металу M_m та маси шлаку $M_{ш}$ в печі. Вхідними параметрами моделі є питомі теплоємності шлаку і розплаву, а також потужність, що підводиться, вихідним параметром – температура.

Розроблена математична модель печі не визначає повною мірою розподіл температурних полів та зміну швидкості нагрівання рідкого металу. Це з тим, що у моделі не враховано вплив обурювальних впливів на теплові параметри плавки. Обурювальні на процес плавки в ДСП однак впливають на температурний режим печі через теплові втрати. Тому теплові втрати можна віднести до впливів, що обурюють.

Щодо втрат в електричній частині пічної установки можна навести такі міркування. Зовнішні збурення на електричну частину прямо пропорційні потужності, що виділяється на електричній дузі [22]. З цього випливає, що будь-які обурення, що впливають на величину потужності, що підводиться, змінюють температурний режим плавки і можуть бути віднесені до теплових втрат.

Процес зміни потужності теплових втрат у дуговій електропечі не піддається безпосередньому контролю та відрізняється залежністю від різноманітних факторів, що діють. Тому оцінку величини теплових втрат необхідно проводити через контрольовані параметри, які на них найбільший вплив.

В результаті проведення експериментів та пасивних спостережень було встановлено, що значний вплив на зміну величини теплових втрат надають геометричні параметри сталеплавильного ківшу, маса металу в ківші та величина потужності, що підводиться у піч від електричної дуги.

Для оцінки величини теплових втрат використовуємо класичну схему адаптивної системи управління об'єктом із паралельно включеною моделлю [8, 22]. Застосування цієї схеми переважно тому, що сигнали керування $x_{вх} = F(t, r)$ об'єкта та моделі однакові, а вихідні сигнали $x_{вих} = T_m(t, r, x)$ мають єдину розмірність. Завдяки цьому різницю вихідних параметрів об'єкта та параметрів моделі можна розглядати як оцінку величини обурення.

Оцінка величини потужності теплових втрат дозволяє вирішити такі важливі завдання:

а) визначити значення потужності, підведеної до рідкого металу, що необхідно для побудови автоматизованої системи керування тепловим режимом плавлення комплексу «ПЧ-КІВШ»;

б) заносити та коригувати за необхідністю значення потужності теплових втрат у базі даних;

в) підвищити точність моделювання електротермічного режиму на всій

кампанії плавки.

Шукатимемо розв'язання задачі оцінки потужності теплових втрат у загальному вигляді. Рішення рівняння теплопровідності розплаву (4.14) об'ємом (V) знайдемо для точки, де температура $T_{\text{ср}}$ усереднена:

$$T_{\text{ср}}(t) = \frac{\iiint_V T_m(x, r, t) dV}{\iiint_V dV}. \quad (4.17)$$

У циліндричній системі координат $dV = r dr dx d\varphi$, а $\iiint_V dV = \pi R^2 h$.

Тоді:

$$\begin{aligned} T_{\text{ср}}(t) &= \frac{\iiint_V T_2(x, r, t) r dr dx d\varphi}{\pi R^2 h} = \frac{1}{\pi R^2 h} \int_0^{2\pi} d\varphi \iint_{n_{pV}} T_m(x, r, t) r dr dx = \\ &= \frac{2\pi}{\pi R^2 h} \int_0^h dx \int_0^r T_m(x, r, t) r dr. \end{aligned} \quad (4.18)$$

Враховуючи (4.7) і використовуючи рівність

$$\int_0^R r J_0(r) dr = r J_1(r) \Big|_0^R = R J_1(R), \quad (4.19)$$

Знайдемо сигнал нев'язки з точністю до малих другого порядку:

$$Q_{11}^M(t) - Q_{11}(t) = \frac{2\alpha_3}{\alpha_3 h + \sin^2 p_1} \left\{ \frac{2r_1}{a_2^2} \frac{\chi_1^2 J_0\left(\frac{\chi_1}{R} r_1\right)}{\left[\chi_1^2 + p_1^2 \left(\frac{R}{h}\right)^2\right] \left[\chi_1^2 + (\alpha_2 R)^2\right] J_0^2(\chi_1)} (1 - e^{-a_1 t}) + \right.$$

$$\left. \begin{aligned} & + \frac{2\chi_1^2}{R^2[\chi_1^2 + (\alpha_2 R)^2]} J_0^2(\chi_1) d_{11} \times \\ & \times \left[\frac{A_1 - B_1}{a_{11} - b_{11}} (e^{-b_1 t} - e^{-a_{11} \tau}) + \frac{B_1}{a_{11}} (1 - e^{-a_{11} t}) \right] \end{aligned} \right\} (Q^* - Q), \quad (4.20)$$

де $Q = \frac{\lambda_i}{\pi r_e^2} (P_\delta - P_{mn})$ – потужність джерела теплової енергії; $Q^* = \frac{\lambda_i}{\pi r_e^2} P_\delta$ – модельна потужність джерела теплової енергії (електричної дуги)

Зробивши згортку, і позначивши

$$K_1 = \frac{2\alpha_3}{\alpha_3 h + \sin^2 p_1} \frac{\lambda_i}{\pi r_3^2} \quad (4.21)$$

$$K_2 = \frac{2r_1}{a_2^2} \frac{\chi_1^2 J_0\left(\frac{\chi_1}{R} r_1\right)}{\left[\chi_1^2 + p_1^2 \left(\frac{R}{h}\right)^2\right] \left[\chi_1^2 + (\alpha_2 R)^2\right] J_0^2(\chi_1)}; \quad (4.22)$$

$$K_3 = \frac{2\chi_1^2}{R^2[\chi_1^2 + (\alpha_2 R)^2]} J_0^2(\chi_1) d_{11}. \quad (4.23)$$

Остаточно отримаємо:

$$\begin{aligned} T_{мсп}^{nom}(t) &= T_{мсп}^м(t) - T_{мсп}^{узм}(t) = \\ &= \left(K_1 K_2 (1 - e^{-a_{11} t}) + K_1 K_3 \left[\frac{A_1 - B_1}{a_{11} - b_{11}} (e^{-b_1 t} - e^{-a_{11} \tau}) + \frac{B_1}{a_{11}} (1 - e^{-a_{11} t}) \right] \right) P_{mn}, \quad (4.24) \end{aligned}$$

Відкіля:

$$P_{mn} = \frac{T_{mcp}^M(t) - T_{mcp}^{изм}(t)}{\left(K_1 K_2 (1 - e^{-a_{11}t}) + K_1 K_3 \left[\frac{A_1 - B_1}{a_{11} - b_{11}} (e^{-b_1 t} - e^{-a_{11} \tau}) + \frac{B_1}{a_{11}} (1 - e^{-a_{11} t}) \right] \right)}. \quad (4.25)$$

З урахуванням рівняння (4.25) для визначення теплових втрат, модель потрібно включити за схемою, зображеною на рис. 4.6.



Рисунок 4.6 - Структурна схема додавання моделі для оцінки теплових втрат

В математичній моделі вхідним параметром для даної моделі є потужність дуги P_d , вихідним параметром – температура розплаву T_m . Величина потужності теплових втрат P_{mn} утворюється шляхом обробки даних про різницю температур розплаву на фізичному об'єкті та моделі. Отримані в результаті математичного моделювання значення теплових втрат заносяться до інформаційної бази даних технологічного процесу плавки.

Запис та вилучення даних здійснюються за їх основними індексами. Їхній вибір обґрунтований аналізом результатів спостережень за факторами, що впливають на процес плавки. За результатами спостережень встановлено, що основними факторами, що впливають на зміну теплових втрат, є геометричні

розміри сталеплавильного ковша, швидкість нагрівання та маса рідкого розплаву. З метою усунення впливу геометричних параметрів ківшів на зміну (відгук) теплових втрат таблиці бази даних доцільно складати для кожного типорозміру ковша. Межі зміни факторів визначаються обмеженнями фізичних та технологічних параметрів плавки для певного типорозміру ковша.

Заповнення бази експлуатаційними значеннями теплових втрат та їх корекція в процесі математичного моделювання теплового режиму плавки здійснюється за таким алгоритмом:

а) у початковий момент часу база даних заповнена експертом (досвідченим сталеваром) або символом @, які позначають відсутність значень теплових втрат;

б) на математичній моделі температурного процесу печі задаються вхідні параметри плавки: маса металу M_m , маса добавок $M_{доб}$ та номер ступеня пічного трансформатора;

в) на виході моделі одержуємо значення швидкості нагрівання металу при нульових значеннях теплових втрат;

г) після вимірювання температури металу здійснюється розрахунок фактичної швидкості нагрівання;

д) визначається різниця між фактичною температурою нагріву та температурою нагріву, обчисленою за моделлю;

е) за різницею температур розплаву проводиться обчислення теплових втрат відповідно до рівняння (4.25).

Так як початкові відомості в базі даних можуть містити помилки, система повинна забезпечити їх виявлення та корекцію відповідно до викладеної вище методики.

Результатами математичного моделювання та проведених теоретичних досліджень процесу теплообміну в замкнутому просторі печі є поверхні зміни температури в процесі нагрівання розплаву. У процесі моделювання прийнято такі параметри: $M_m = 72$ тони, $M_{ш} = 2$ тони, $C_m = 0,263$ Дж/°С·кг [21-25].

Результати моделювання наведено на рис. 4.7.

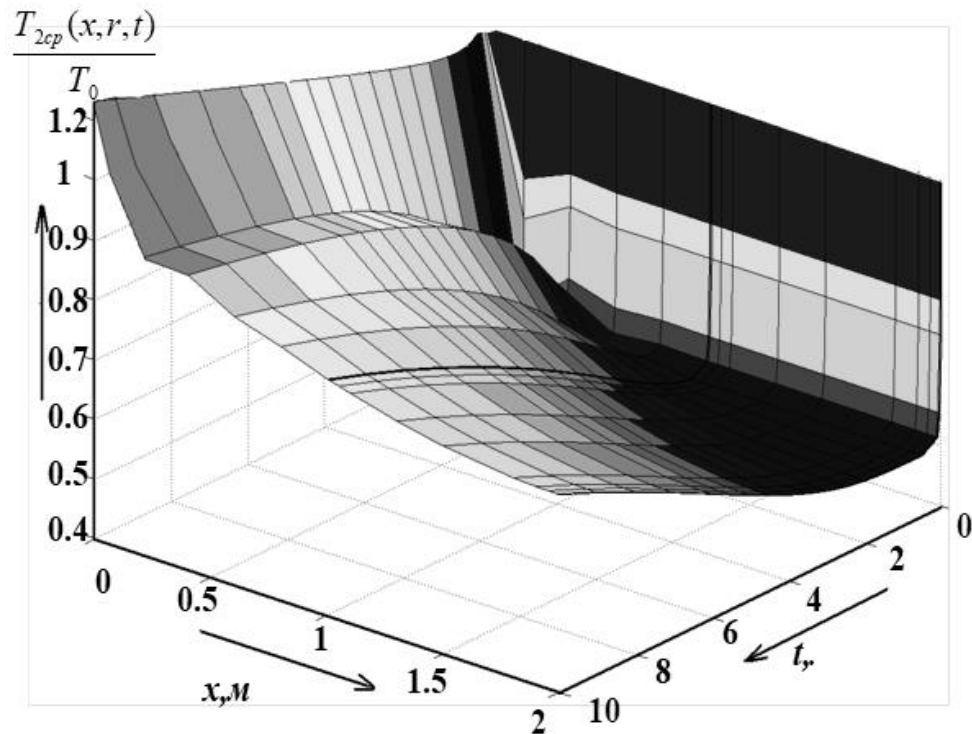


Рисунок 4.7 - Розподіл температури розплаву по глибині ковша при $R = 0$

4.5 Розробка структури системи автоматизації процесу керування тепловим режимом плавки

Існуючі автоматизовані системи управління «ПІЧ-КІВШ» є складною структурою тісно пов'язаних між собою підсистем управління, контролю та діагностики електричних параметрів плавки. Метою функціонування підсистем є регулювання електричного режиму плавки з підтриманням заданого значення потужності, що підводиться у піч від електричної дуги.

Недоліком існуючих систем автоматизації є неможливість постійного автоматизованого контролю температурного режиму плавки та коригування швидкості нагрівання металу шляхом перемикування ступенів напруги на пічному

трансформаторі відповідно до директивного графіка плавки (див. рис. 4.4). Контроль швидкості нагріву та температури рідкого металу здійснюється шляхом періодичного занурення термометра при вимкнутій електричній дузі.

Проміжок часу між вимірюваннями температури металу складає 15...20 хвилин. За цей час при відхиленні швидкості нагрівання металу, наприклад, 1 °C/хв температура металу може змінитися на 15...20 °C. Відхилення теплового режиму плавки більш ніж на $\pm 10^{\circ}\text{C}$ призводять до зміни заданих хіміко-фізичних властивостей та погіршення якості сталі, а також можливості підведення до металу зайвої теплової енергії від електричних дуг, що призводить до перевитрати електроенергії.

Наведені міркування дозволяють зробити висновок про необхідність розробки автоматизованої системи управління тепловим режимом плавки (АСУ ТРП), завдання якої має входити підтримання стабільної температури металу протягом всього відновлювального періоду, дотримання директивного температурного графіка плавки, оцінка зміни температури рідкого металу і її регулювання в періоди неспостережуваності (між технологічними вимірюваннями температури). Вирішення задачі синтезу АСУ ТРП доцільно проводити з використанням математичної моделі електротермічного процесу плавки (див. п. 4.3). Використання даної моделі дозволить передбачити реакцію об'єкта управління на впливи, що обурюють, і визначити зміну важливих технологічних параметрів плавки: температури і швидкості нагріву рідкого металу, а також величини теплових втрат, необхідних для корекції керуючого впливу.

Розробка системи управління тепловим режимом плавки технологічного комплексу «ПЧ-КІВШ» передбачає адаптивне управління технологічним процесом з метою компенсації впливів (теплових втрат), що обурюють, варіації параметрів об'єкта (маси розплаву), а також завдання параметрів плавки відповідно до директивного графіка. Синтез системи автоматизації доцільно

проводити із застосуванням математичної моделі об'єкта. Однак слід врахувати, що модель об'єкта є спрощеною, оскільки в ній не враховано вплив ряду випадкових факторів теплового режиму плавлення:

- а) технологічних теплових втрат, спричинених відкриттям оглядового вікна;
- б) продування ванни рідкого металу інертним газом (аргоном);
- в) хімічних перетворень у процесі плавки;
- г) апаратних затримок.

Забезпечення відповідності створюваних АСУ вимогам, включаючи їх адаптивні властивості при випадкових збуреннях, передбачає розробку та використання нетривіальних законів управління. Перспективні шляхи вирішення цієї проблеми пов'язані з комплексним застосуванням сучасних інтелектуальних технологій для створення нового покоління систем автоматизації складними динамічними об'єктами.

Практичне застосування інтелектуальної технології нейромережевого регулювання дозволить розробити регулятор, що має високі адаптивні властивості та велику функціональну гнучкість [8, 9, 18, 25]. Високу ефективність роботи регулятора передбачається досягти шляхом використання алгоритму оцінки впливів, що обурюють, і обґрунтованого вибору інформації з бази знань. Для вирішення завдання адаптації математичної моделі до особливостей технологічного процесу плавки металу у відновлювальний період та ефективного управління процесом за заданим директивним графіком плавки доцільно застосування нейронного регулятора.

При побудові нейрорегулятора можливе застосування відомих методів синтезу нейронних мереж (НМ). В даний час є кілька підходів для побудови нейроконтролерів на базі багат шарової нейронної мережі прямого та зворотного поширення. Усі вони є послідовну чи паралельну схему нейроуправління [8, 14]. Для АСУ ТРП, що проектується, з використанням моделі електротермічного

процесу плавки найбільш підходящою є послідовна схема включення нейрорегулятора. Ця схема стала традиційною при побудові систем управління з урахуванням нейронних мереж і полягає в попередньому навчанні. Навчання проводиться на множини співвідношень вхід-вихід об'єкта, отриманих при проведенні експерименту на об'єкті та його моделі.

Завданням використання нейронного регулятора є видача скоригованого вхідного керуючого сигналу (номера ступеня пічного трансформатора), отриманого з бази даних (знань). Це завдання вирішується шляхом навчання НМ на прикладах з навчальної множини. Критерієм навчання є середньоквадратична помилка навчання E .

Сформульовано вимоги щодо функціонування нейрорегулятора температурного режиму:

а) нейрорегулятор повинен задавати номер ступеня напруги пічного трансформатора, на якій забезпечується підтримання заданої температури та швидкості нагрівання розплаву відповідно до директивного температурного графіка плавки;

б) нейрорегулятор повинен сформувати сигнал корекції керуючого впливу з урахуванням величини теплових втрат на всій кампанії плавки.

У свою чергу, завданнями функціонування програмного регулятора є:

а) формування директивного температурного графіка плавки (див. рис. 4.3), а також програмне регулювання та підтримання температури рідкого металу з точністю ± 10 °С;

б) оптимізацію енергетичного режиму відновлювального періоду плавки при нагріванні розплаву

Таким чином, для синтезованої АСУ ТРП пропонується ввести послідовне включення програмного та нейронного регулятора (див. рис. 4.8).

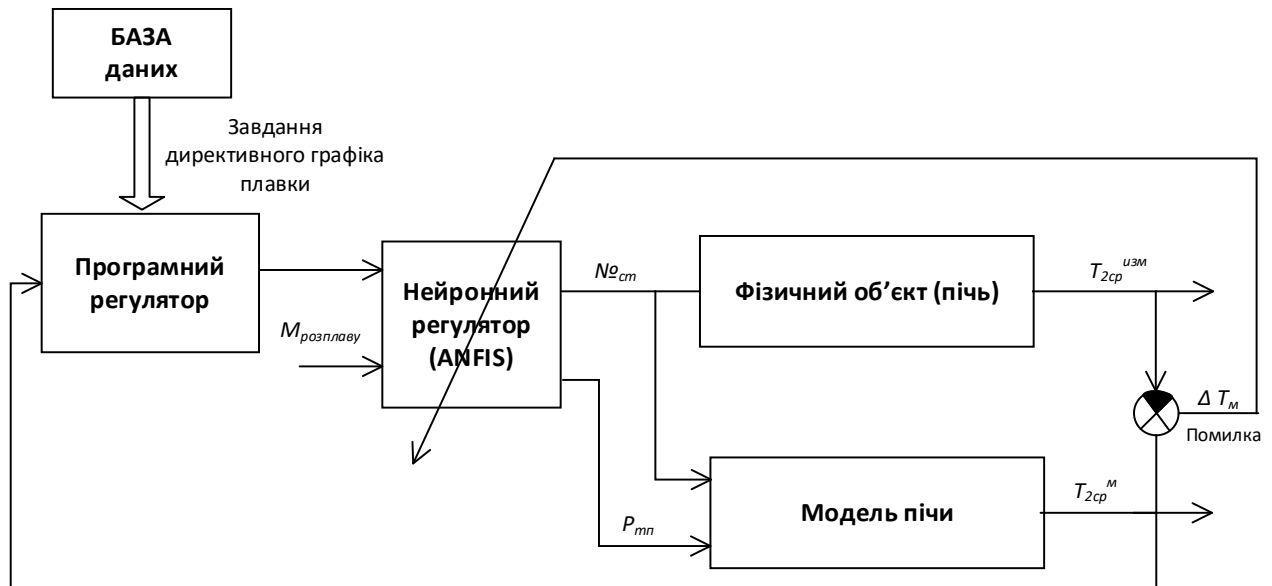


Рисунок 4.8 – Послідовна схема включення програмного регулятора, нейрорегулятора та моделі теплового режиму плавки

4.6 Синтез регулятора та алгоритму управління на основі бази даних технологічного процесу плавки

Для вирішення завдання регулювання температурного режиму плавки з використанням чисельної бази знань технологічного процесу необхідна розробка певних правил обробки даних і видача необхідного керуючого впливу. Виходячи з цього, при керуванні тепловим режимом плавки потрібно синтезувати такий регулятор, який дозволяв би об'єднати чисельну інформацію, представлену у формі навчальних даних, з лінгвістичною інформацією, що має вигляд бази правил, створених на основі чисельних даних. Лінгвістичні знання про перебіг технологічного процесу плавки формуються директивним графіком (див. рис. 4.3), який може бути представлений у формі нечітких правил.

У загальному випадку мета управління полягає в тому, що на основі аналізу поточного стану об'єкта управління потрібно визначити значення керуючих

змінних, що забезпечують компенсацію впливів, що обурюють, і точність підтримки температури розплаву ± 10 °С. З урахуванням викладеного синтезу регулятора температурного режиму доцільно проводити з використанням методу нечіткого нейроуправління на основі гібридної багатошарової мережі з прямим поширенням [8, 12; 25].

Синтез проводиться у наступній послідовності.

У першому етапі сформуємо основу правил для нечіткої системи. Це завдання зводиться до складання таких нечітких правил, які б дозволяли за значеннями вхідних сигналів швидкості нагрівання. $x_1(i)$ та маси розплаву $x_2(i)$ отримати вихідні сигнали $d(i)$ на включення необхідного номера ступеня пічного трансформатора та значення величини потужності теплових втрат. Для цього необхідно витягти безліч навчальних пар з бази знань у наступному вигляді [18; 25]:

$$[x_1(i), x_2(i), d(i)], \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (4.26)$$

Графічне уявлення пар бази знань зображено на рис. 4.9.

На другому етапі простори вхідних та вихідних сигналів поділяються у табличній базі даних наступним чином:

$$\begin{aligned} x_1^- &= \min(x_1), x_1^+ = \max(x_1); \\ x_2^- &= \min(x_2), x_2^+ = \max(x_2); \\ d^- &= \min(d), d^+ = \max(d). \end{aligned} \quad (4.27)$$

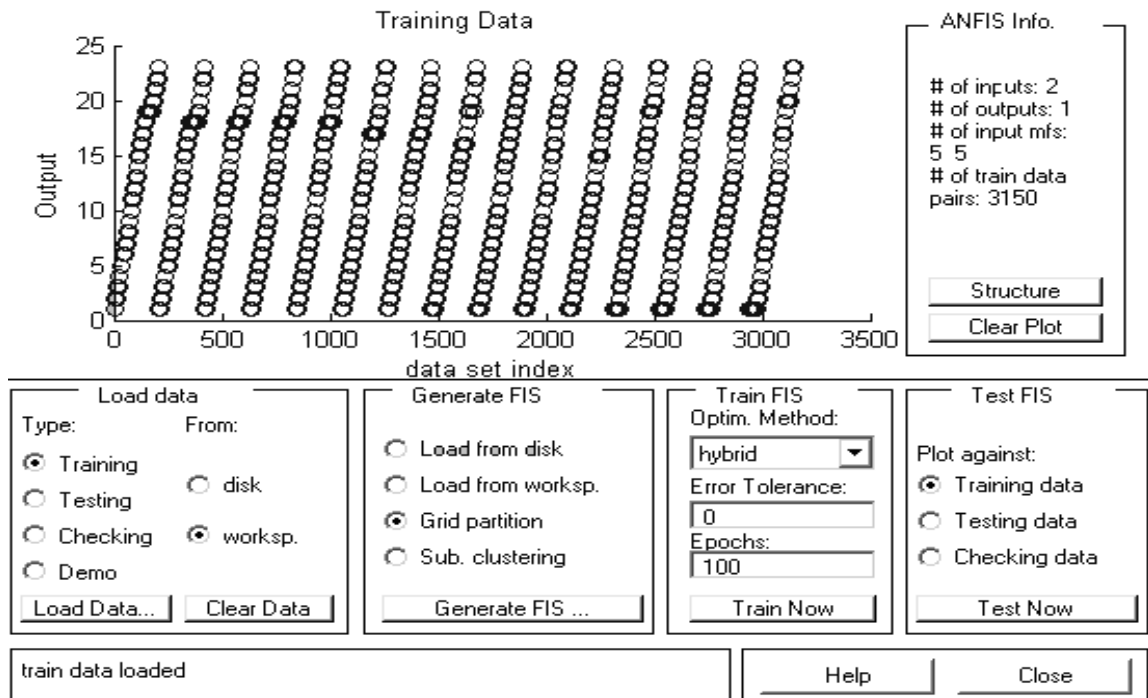


Рисунок 4.9 – Графічне представлення пар бази знань

Кожен певний інтервал лінгвістичних змінних розділимо на $(2N + 1) = 5$ областей ($N = 2$). Далі в кожній області зробимо фузифікацію параметрів:

$$\begin{aligned}
 X_1 &= \{NB, NS, Z, PS, PB\}; \\
 X_2 &= \{NB, NS, Z, PS, PB\}; \\
 D &= \{NB, NS, Z, PS, PB\},
 \end{aligned}
 \tag{4.28}$$

де NB – дуже мала величина;

NS – мала величина;

Z – середня величина;

PS – велика величина;

PB – дуже велика величина.

Знання для коректного функціонування модуля нечіткого управління надаються у вигляді нечіткого правила, що має форму [7]:

$$R^k: \text{IF } (x_1 \text{ is } A_1^k) \text{ AND } (x_2 \text{ is } A_2^k) \text{ THEN } (D \text{ is } B^k). \quad (4.29)$$

Стосовно синтезованого модуля нечіткого нейроуправління з використанням програми MatLab FuzzyLogicToolbox база нечітких правил має вигляд:

- $R^1: \text{IF } (x_1 \text{ is } in1mf1 \text{ NB}) \text{ AND } (x_2 \text{ is } in2mf1 \text{ NB}) \text{ THEN } (D \text{ is } out1mf1);$
 $R^2: \text{IF } (x_1 \text{ is } in1mf1 \text{ NB}) \text{ AND } (x_2 \text{ is } in2mf2 \text{ NS}) \text{ THEN } (D \text{ is } out1mf2);$
 $R^3: \text{IF } (x_1 \text{ is } in1mf1 \text{ NB}) \text{ AND } (x_2 \text{ is } in2mf3 \text{ Z}) \text{ THEN } (D \text{ is } out1mf3);$
 $R^4: \text{IF } (x_1 \text{ is } in1mf1 \text{ NB}) \text{ AND } (x_2 \text{ is } in2mf4 \text{ PS}) \text{ THEN } (D \text{ is } out1mf4);$
 $R^5: \text{IF } (x_1 \text{ is } in1mf1 \text{ NB}) \text{ AND } (x_2 \text{ is } in2mf5 \text{ PB}) \text{ THEN } (D \text{ is } out1mf5);$
 $R^6: \text{IF } (x_1 \text{ is } in1mf2 \text{ NS}) \text{ AND } (x_2 \text{ is } in2mf1 \text{ NB}) \text{ THEN } (D \text{ is } out1mf6);$
 $R^7: \text{IF } (x_1 \text{ is } in1mf2 \text{ NS}) \text{ AND } (x_2 \text{ is } in2mf2 \text{ NS}) \text{ THEN } (D \text{ is } out1mf7);$
 $R^8: \text{IF } (x_1 \text{ is } in1mf2 \text{ NS}) \text{ AND } (x_2 \text{ is } in2mf3 \text{ Z}) \text{ THEN } (D \text{ is } out1mf8);$
 $R^9: \text{IF } (x_1 \text{ is } in1mf2 \text{ NS}) \text{ AND } (x_2 \text{ is } in2mf4 \text{ PS}) \text{ THEN } (D \text{ is } out1mf9);$
 $R^{10}: \text{IF } (x_1 \text{ is } in1mf2 \text{ NS}) \text{ AND } (x_2 \text{ is } in2mf5 \text{ PB}) \text{ THEN } (D \text{ is } out1mf10);$
 $R^{11}: \text{IF } (x_1 \text{ is } in1mf3 \text{ Z}) \text{ AND } (x_2 \text{ is } in2mf1 \text{ NB}) \text{ THEN } (D \text{ is } out1mf11);$
 $R^{12}: \text{IF } (x_1 \text{ is } in1mf3 \text{ Z}) \text{ AND } (x_2 \text{ is } in2mf2 \text{ NS}) \text{ THEN } (D \text{ is } out1mf12);$
 $R^{13}: \text{IF } (x_1 \text{ is } in1mf3 \text{ Z}) \text{ AND } (x_2 \text{ is } in2mf3 \text{ Z}) \text{ THEN } (D \text{ is } out1mf13);$
 $R^{14}: \text{IF } (x_1 \text{ is } in1mf3 \text{ Z}) \text{ AND } (x_2 \text{ is } in2mf4 \text{ PS}) \text{ THEN } (D \text{ is } out1mf14);$
 $R^{15}: \text{IF } (x_1 \text{ is } in1mf3 \text{ Z}) \text{ AND } (x_2 \text{ is } in2mf5 \text{ PB}) \text{ THEN } (D \text{ is } out1mf15);$
 $R^{16}: \text{IF } (x_1 \text{ is } in1mf4 \text{ PS}) \text{ AND } (x_2 \text{ is } in2mf1 \text{ NB}) \text{ THEN } (D \text{ is } out1mf16);$
 $R^{17}: \text{IF } (x_1 \text{ is } in1mf4 \text{ PS}) \text{ AND } (x_2 \text{ is } in2mf2 \text{ NS}) \text{ THEN } (D \text{ is } out1mf17);$
 $R^{18}: \text{IF } (x_1 \text{ is } in1mf4 \text{ PS}) \text{ AND } (x_2 \text{ is } in2mf3 \text{ Z}) \text{ THEN } (D \text{ is } out1mf18);$
 $R^{19}: \text{IF } (x_1 \text{ is } in1mf4 \text{ PS}) \text{ AND } (x_2 \text{ is } in2mf4 \text{ PS}) \text{ THEN } (D \text{ is } out1mf19);$
 $R^{20}: \text{IF } (x_1 \text{ is } in1mf4 \text{ PS}) \text{ AND } (x_2 \text{ is } in2mf5 \text{ PB}) \text{ THEN } (D \text{ is } out1mf20);$
 $R^{21}: \text{IF } (x_1 \text{ is } in1mf5 \text{ PB}) \text{ AND } (x_2 \text{ is } in2mf1 \text{ NB}) \text{ THEN } (D \text{ is } out1mf21);$
 $R^{22}: \text{IF } (x_1 \text{ is } in1mf5 \text{ PB}) \text{ AND } (x_2 \text{ is } in2mf2 \text{ NS}) \text{ THEN } (D \text{ is } out1mf22);$
 $R^{23}: \text{IF } (x_1 \text{ is } in1mf5 \text{ PB}) \text{ AND } (x_2 \text{ is } in2mf3 \text{ Z}) \text{ THEN } (D \text{ is } out1mf23);$

R^{24} : IF (x_1 is in1mf5 PB) AND (x_2 is in2mf4 PS) THEN(D is out1mf24);

R^{25} : IF (x_1 is in1mf5 PB) AND (x_2 is in2mf5 PB) THEN(D is out1mf25).

Уявімо отримані знання у вигляді бази правил нечітких множин з функцією приналежності декартового твору:

$$\mu_{A^k}(x) = \mu_{A_1^k \times \dots \times A_n^k}(x) = \mu_{A_1^k}(x_1) \dots \mu_{A_n^k}(x_n). \quad (4.30)$$

На третьому етапі проводиться опис блоку виведення на функції приналежності нечіткої множини B^k :

$$\mu_{B^k}(y) = \sup_{x_1, \dots, x_n \in x} \{ \mu_{B^k}(y) \prod_{i=1}^n \mu_{A_i^k}(x_i) \}. \quad (4.31)$$

На четвертому етапі описується блок фузифікації. Застосуємо операцію типу синглетон [12, 14]:

$$A(x) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } x = \bar{x} \\ 0, & \text{якщо } x \neq \bar{x} \end{cases} \quad (4.32)$$

Зауважимо, що супремум у формулі (4.31) досягається лише у випадку, коли $x = \bar{x}$, т. е. для $\mu_{A_i^k}(\bar{x}) = 1$. При цьому вираз набуває вигляду:

$$\mu_{B^k}(y) = \{ \mu_{B^k}(y) \prod_{i=1}^n \mu_{A_i^k}(\bar{x}_i) \}. \quad (4.33)$$

На етапі описується блок дефузифікації. Тут застосовується метод дефузифікації center average defuzzification, відповідно до якого:

$$\bar{y} = \frac{\sum_{k=1}^N \bar{y}^k \mu_{B^k}(\bar{y}^k)}{\sum_{k=1}^N \mu_{B^k}(\bar{y}^k)}. \quad (4.34)$$

У наведеній формулі \bar{y}^k – це центр (center) нечіткої множини B^k , тобто точка, в якій $\mu_{B^k}(y)$ досягає максимального значення

$$\mu_{B^k}(\bar{y}^k) = \max_y \{\mu_{B^k}(y)\}. \quad (4.35)$$

При підстановці виразу (4.33) в формулу (4.34) отримуємо рівність

$$\bar{y} = \frac{\sum_{k=1}^N \bar{y}^k \left(\mu_{B^k}(\bar{y}^k) \prod_{i=1}^n \mu_{A_i^k}(\bar{x}_i) \right)}{\sum_{k=1}^N \left(\mu_{B^k}(\bar{y}^k) \prod_{i=1}^n \mu_{A_i^k}(\bar{x}_i) \right)}. \quad (4.36)$$

Якщо врахувати, що максимальне значення, яке $\mu_{B^k}(y)$ може отримати в точці \bar{y}^k , дорівнює 1, т. е. $\mu_{B^k}(\bar{y}^k) = 1$, то формула (4.36) приймає вигляд:

$$\bar{y} = \frac{\sum_{k=1}^N \bar{y}^k \left(\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^k}(\bar{x}_i) \right)}{\sum_{k=1}^N \left(\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^k}(\bar{x}_i) \right)}. \quad (4.37)$$

Процес проектування модуля нечіткого управління завершується визначенням форми подання нечітких множин A_i^k , $i = 1, \dots, n; k = 1, \dots, N$. Як форма нечітких множин застосована функція Гауса:

$$\mu_{A_i^k}(x_1) = \exp \left[- \left(\frac{x_1 - \bar{x}_i^k}{\sigma_i^k} \right)^2 \right], \quad (4.38)$$

де \bar{x}_i^k та σ_i^k – параметри, що мають фізичну інтерпретацію; \bar{x}_i^k – центр; σ_i^k – ширина гаусової кривій.

Фузифікація та форми представлення функцій належності нечітких множин вхідних даних зображені на рис. 4.10.

Математичне опис проектованого модуля нечіткого управління може бути отримано шляхом об'єднання методу дефузифікації (4.36), функції приналежності (4.30) та блоку фузифікації з операцією типу синглетон (4.33) і з гаусової функцією приналежності (4.32). Тоді модуль нечіткого управління набуває остаточного вигляду:

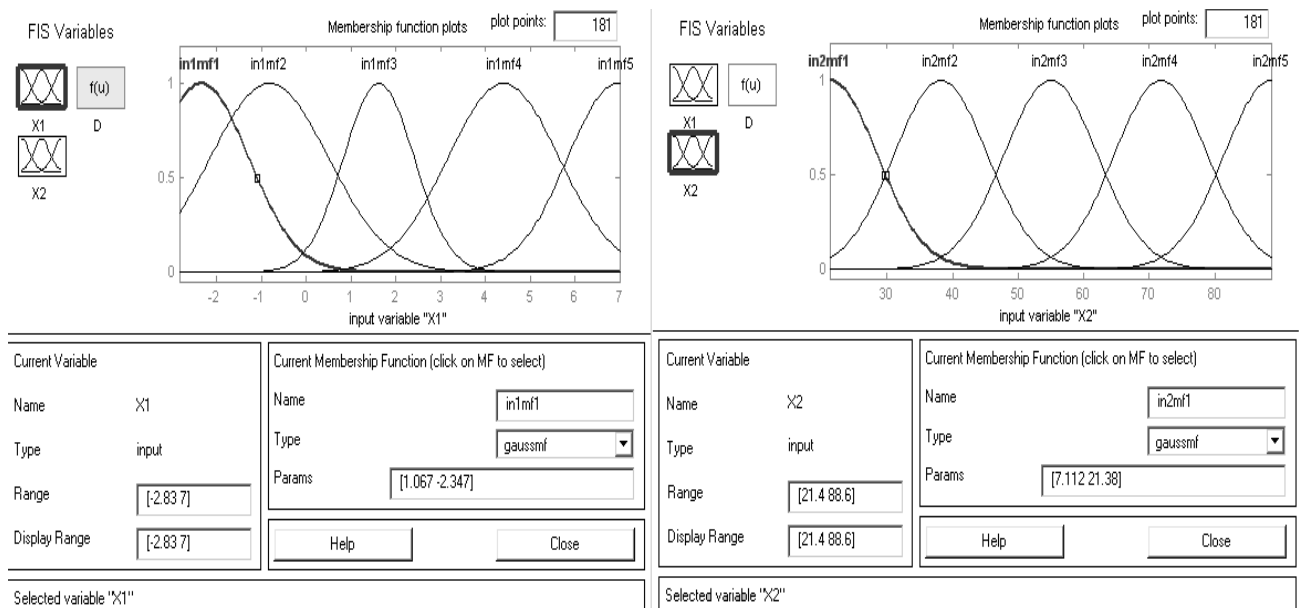


Рисунок 4.10 – Поділ просторів вхідних змінних на області та відповідні їм функції приналежності

$$\bar{y} = \frac{\sum_{k=1}^N y^{-k} \left(\prod_{i=1}^n \exp \left[- \left(\frac{x_i - \bar{x}_i^k}{\sigma_i^k} \right)^2 \right] \right)}{\sum_{k=1}^N \left(\prod_{i=1}^n \exp \left[- \left(\frac{x_i - \bar{x}_i^k}{\sigma_i^k} \right)^2 \right] \right)}. \quad (4.39)$$

З використанням математичного опису модуля нечіткого керування (4.39) та програми Anfis MatLab FuzzyLogicToolbox можна розробити структурну схему реалізації модуля нечіткого керування, яка зображена на рис. 4.11 [12; 14; 25].

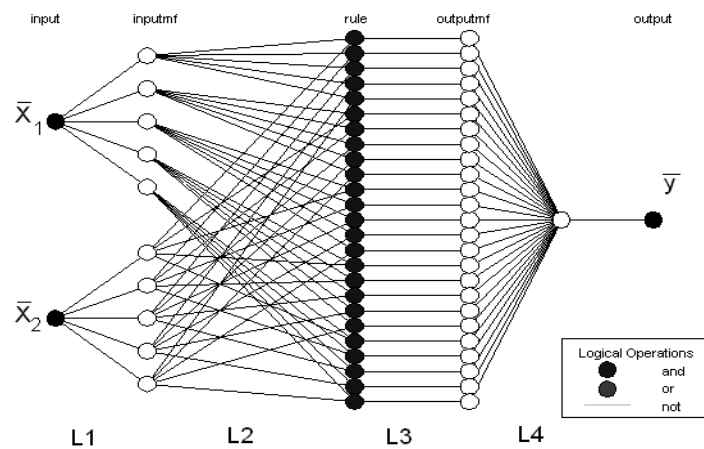


Рисунок 4.11 – Структурна схема модуля нечіткого управління (Fuzzy)

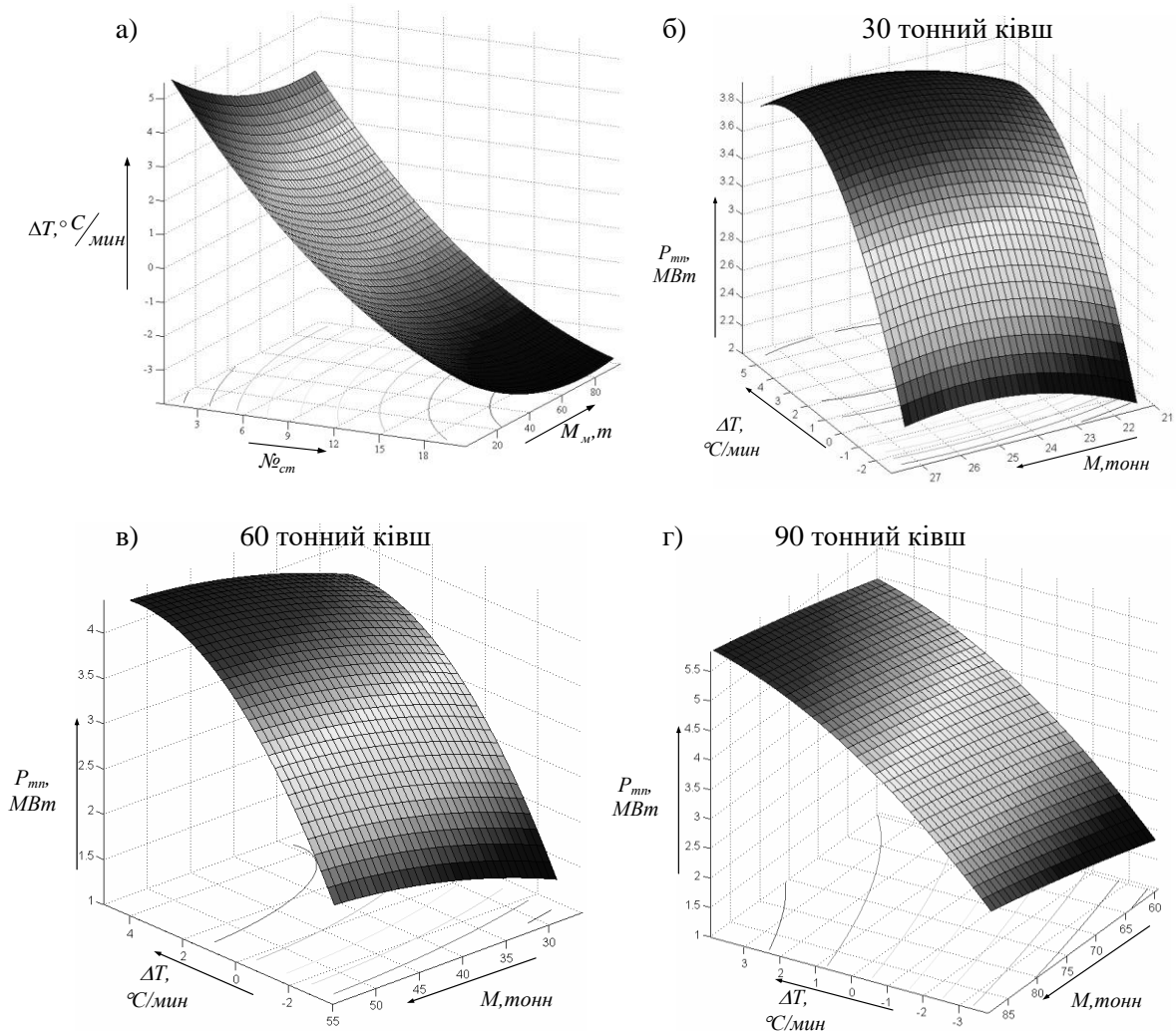
Наведена структура нечіткої нейронної мережі (див. рис. 4.16) є багат шаровою мережею. У зв'язку з цим доцільно для навчання цієї мережі застосувати алгоритм зворотного розповсюдження помилки. Для цього може бути використана навчальна вибірка у вигляді пар (\bar{x}, d) , де $\bar{x} = [\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_n]$ – це вхідний вектор, а d – еталонний сигнал. Завдання полягає в такій модифікації (корекції) параметрів модуля нечіткого управління, описаного виразом (4.39), щоб міра похибки, що задається виразом [5,7]

$$e = \frac{1}{2} [\bar{y}(\bar{x}) - d]^2 \rightarrow \min. \quad (4.40)$$

Метою моделювання та результатами є визначення здатності модуля до навчання при зміні технологічних параметрів плавки (мас та швидкості нагрівання розплаву).

Результатами моделювання є:

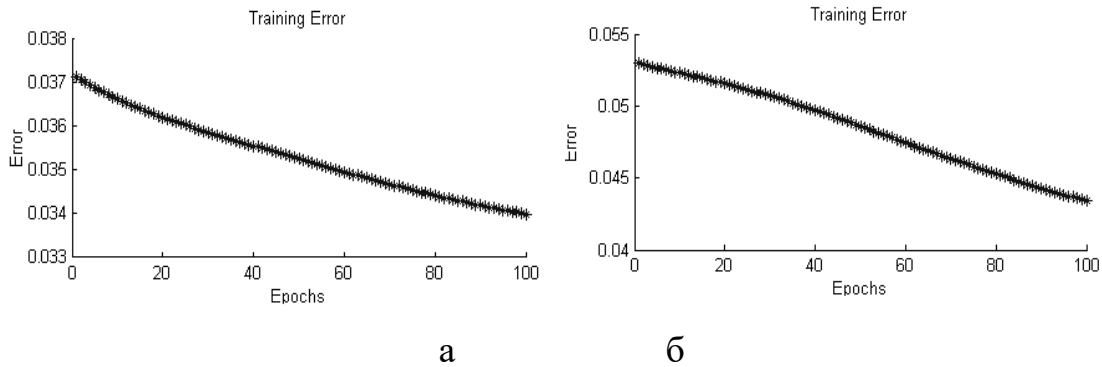
а) поверхні зміни керуючого сигналу на включення номера ступеня напруги пічного трансформатора та оцінки потужності теплових втрат залежно від маси та швидкості нагрівання розплаву (рис. 4.12);



а) керуючого сигналу на включення номера ступеня напруги пічного трансформатора; б), в) та г) оцінки потужності теплових втрат залежно від маси та швидкості нагрівання розплаву

Рисунок 4.12 – Поверхні відгуку

б) графіки сигналів помилки на виході модуля нечіткого управління по відношенню до еталонного сигналу (рис. 4.13).



а) завдання швидкості нагрівання розплаву; б) оцінки величини потужності теплових втрат

Рисунок 4.13 – Помилка навчання модуля нечіткого управління:

4.7 Розробка та дослідження САУ тепловим режимом плавки рідкого металу

Математична модель теплового режиму плавки представлена системою рівнянь теплопровідності (4.8)...(4.9) з початковими та граничними умовами (4.10)...(4.12). У даних рівняннях керуючий параметр знаходиться в самому рівнянні та визначається як потужність джерела нагрівання $F^M(r, t)$:

$$F^M(r, t) = \delta(r - r_1)Q^* + Q_1^*(r, t) = \left[\delta(r - r_1)Q^* + \sum_{n=1}^{\infty} Q_n(t) \right] J_0\left(\frac{\mu_n}{R} r\right), \quad (4.41)$$

де $Q^* = \lambda_3 \frac{P_\partial - P_{mn}}{\pi r_3^2}$ – потужність джерела теплової енергії, що підведена

до розплаву.

Рішенням системи рівнянь (4.8)...(4.12) із усередненням температури за обсягом є залежність (4.18), де величина підведеної теплової потужності визначається за виразом (4.25).

Відповідно до технологічного процесу, що описується директивним графіком плавки, відновлювальний період можна умовно розділити на два етапи:

$$1 \text{ етап – нагрівання розплаву від початкового стану } \frac{\partial T_{\text{мсп}}(0, x)}{\partial t} = 0 \text{ при } t = 0 \text{ до } T_{\text{мсп}}(x, \tau) = T_{\text{мз}}, \frac{\partial T_{\text{мсп}}(\tau, x)}{\partial t} = 0 \text{ при } t = \tau.$$

На цьому етапі нагрівання розплаву доцільно виробляти максимально можливої для певної марки сталі швидкості, що дозволить скоротити тривалість даного етапу і підвищити ефективність відновлювального періоду плавки.

Завдання вирішується шляхом мінімізації функціоналу:

$$J_1 = \int_0^{\tau} dt \rightarrow \min, \text{ при } \frac{\partial T_{\text{мсп}}(t, x)}{\partial t} = \text{const}; \quad (4.42)$$

2 етап – витримка розплаву за температури $T_{\text{мсп}}(t, x) = T_{\text{мз}}$ протягом заданого технологічного часу. На даному етапі ставиться завдання підвищення якості рідкого металу шляхом підтримання температури витримки з точністю $\pm 10^\circ\text{C}$. З метою стабілізації температури витримки потрібно знайти допустиме управління $F^0(t) = F^m(r, t)$ та відповідне йому рішення $T_{\text{мсп}}(t_i)$ за залежністю (4.18), щоб забезпечити умову

$$J_2 = \gamma_1 \int_0^{\tau_k} [T_{\text{мз}} - T_{\text{мсп}}(t)]^2 dt \rightarrow \min, \text{ при } F = F^0(t) \text{ и } T_{\text{мсп}}^0(t) = T_{\text{мз}}, \quad (4.43)$$

де τ_k – фіксований момент часу, рівний періоду витримки розплаву; $T_{\text{мз}}$ – задане значення температури витримки розплаву.

З урахуванням особливостей технологічного процесу відновлювального періоду плавки, періодичного контролю температури розплаву та прийнятих критеріїв оптимальності розроблено алгоритм оптимального керування.

Алгоритм оптимального управління реалізований за допомогою програмного регулятора *thermos*, який функціонально є задатчиком директивного графіка плавки і алгоритмічно реалізований оптимальний регулятор. Виходом регулятора є швидкість нагрівання розплаву, що задається відповідно до директивного графіка плавки (див. рис. 4.3). Як зворотний зв'язок у періоди між вимірами температури розплаву використовується отримана на моделі усереднена за обсягом ківша температура. Оптимізація процесу плавки рідкого металу проводиться у разі функціоналу (4.41)...(4.43). Послідовність виконання алгоритмічних операцій наступна:

- а) Отримання вхідних даних формування директивного графіка плавки.
- б) Оптимальне нагрівання розплаву до температури витримки за функціоналом (4.43). Завдання та програмна корекція максимальної швидкості нагрівання розплаву з урахуванням обмежень (4.8)...(4.12).
- в) Досягнення температури витримки металу.
- г) Перехід у режим підтримки стаціонарного температурного режиму розплаву функціоналом (4.43). Утримання температури витримки з точністю $\pm 10^{\circ}\text{C}$ шляхом компенсації теплових втрат. Необхідне регулювання здійснюється перемиканням ступенів напруги пічного трансформатора. Закінчення часу витримки.
- д) Охолодження розплаву до температури випуску проводиться з продувкою аргоном на щаблі пічного трансформатора.
- е) Досягнення температури випуску. Кінець обробки розплаву в комплексі «ПЧ-КІВШ».

Моделювання динамічних процесів у системі керування тепловим режимом плавки проводиться на синтезованій АСУ ТРП. Структурна схема математичної

моделі АСУ ТРП у термінах пакета Matlab Simulink наведена на рис. 4.14.

Оцінку точності прогнозування температурного режиму плавки в період нагрівання розплаву до температури витримки доцільно здійснювати шляхом порівняння результатів моделювання з результатами вимірювання температури рідкого металу в різні проміжки часу з інтервалом 5...20 хвилин.

Результати вимірювання температури металу по всій кампанії однієї з плавок, а також змодельованої температури металу наведено в табл. 4.2.

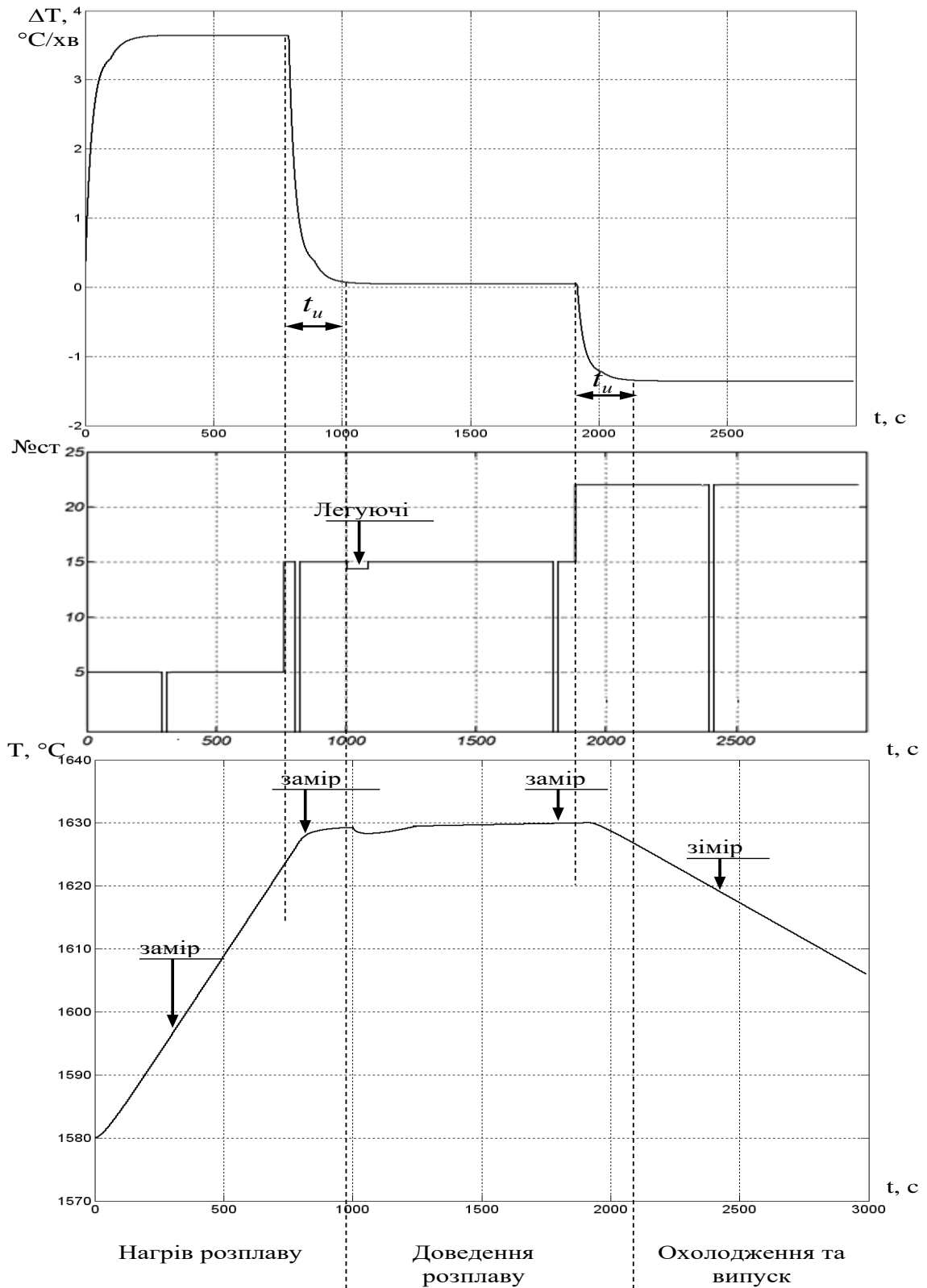
Таблиця 4.2 - Порівняльні дані щодо температури металу

Час хв	Номер ступені	Виміряна температура а металу, °C	Змодельован а температура металу, °C	Швидкість нагріву на моделі, °C/хв	Похибка за температурою металу, °C	Оцінка часу прогнозу, хв
0	-	1580	-	-	-	
5	5	1594	1597	3,4	+3	16
15	15	1626	1628	0,3	-2	50
30	15	1627	1630	0,01	-3	50
40	22	1614	1617	-0,93	+3	50
$\text{Середнє значення прогнозування } t_{\text{прог}} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{t_{\text{нагр}i} \cdot \Delta T_{\text{дон}}}{\Delta t_{\text{нагр}i}}}{n}$						41,5

Графіки перехідних процесів по всіх каналах управління представлені на рис. 4.15.

Аналіз результатів моделювання показав покращення показників якості перехідних процесів за керованими параметрами. Застосування системи управління з нейрокорекцією керуючих впливів дозволяє досягти підвищення точності управління.

Наведені в таблиці 4.2 результати показують задовільний збіг теоретичних та експериментальних даних. Деякі розбіжності температури металу пояснюються тим, що при моделюванні не враховувалося наведення шлаку і відкриття оглядового вікна.



а) швидкості нагрівання розплаву; б) номери ступеня пічного трансформатора;
в) температури розплаву

Рисунок 4.15 – Графіки зміни параметрів, отримані на моделі АСУ ТРП

Результати моделювання процесу управління тепловим режимом плавки у технологічному комплексі «ПЧ-КІВШ» показали таке:

а) розрахункова похибка температури металу з урахуванням похибки вимірювань $\pm 7^{\circ}\text{C}$, що менше допустимої похибки $\pm 10^{\circ}\text{C}$;

б) видача керуючих сигналів на перемикання ступенів на пічному трансформаторі відбувається з урахуванням інерційності печі.

На підставі результатів моделювання можна зробити висновок, що АСУ ТРП технологічним комплексом «ПЧ-КІВШ» самонавчається і адаптується до теплових процесів, що протікають у печі.

Розроблена математична модель АСУ ТРП працює паралельно з процесом плавки у самій печі, завдяки чому забезпечується:

а) поповнення таблиць бази даних АСУ для зберігання теплових втрат та швидкостей нагріву на ступенях напруги пічного трансформатора;

б) управління процесом плавки за температурою та швидкістю нагріву рідкого металу шляхом зміни величини підведеної потужності в піч.

Значення маси металу, а також маси добавок, що вводяться в процесі плавки, знімаються з вимірювальних перетворювачів ваги. Величини напруги та сили струму періодично зчитуються з вимірювальних трансформаторів напруги та поясів Рогівського, встановлених на короткій мережі.

Результатами роботи моделі є:

а) формування керуючих сигналів на перемикання ступенів напруги пічного трансформатора з метою забезпечення регулювання швидкості нагрівання металу шляхом зміни величини потужності, що підводиться;

б) розрахунок величини потужності електричної дуги за напругою та силою струму на низькій стороні пічного трансформатора;

в) оцінка потужності теплових втрат залежно від потужності, що підводиться, маси рідкого металу і маси добавок.

ВИСНОВКИ

Знайдено такий параметр прокатки, який можна використовувати для зворотного зв'язку для корекції математичної моделі оцінки теплового стану слябів, що діє в рамках АСУТП нагрівання слябів нагрівальних печах товстолистового цеху.

Налаштування математичної моделі здійснюється за допомогою коригування коефіцієнтів моделі під час роботи печі, які є коефіцієнтами переходу від показань зонної термомпарі до температури над слябом. Таким чином, визначивши, що математична модель неправильно відображає параметри температурного поля сляба, необхідно лише змінити настроювальні коефіцієнти моделі. Наприклад, якщо середньомасова температура на видачі з печі буде завищена, коефіцієнти налаштування моделі потрібно зменшити.

Інтелектуальний аналіз бази даних, що містить поточну та архівну інформацію про технологічний процес доменного нагріву, необхідно використовувати в системах автоматичного керування. Використання отриманих результатів аналізу режиму «перемикання» ПН дозволить своєчасно вносити корективи в схему параметрів БПН, уточнювати вихідні значення моделювання роботи печі гарячого дуття.

Авторами розроблено алгоритм інтелектуального аналізу технологічної інформації, який дозволяє оцінювати стан повітрянагрівача в періоди роботи в режимі «перемикання».

Таким чином, в результаті проведених досліджень підтвердилася гіпотеза, що двоступінчаста вхідна дія дозволяє покращити динамічну точність та зменшити динамічну помилку. Це значне поліпшення і перевищує 2,5 рази. Також визначено найкращий інтервал часу між ступенями вхідного впливу та запропоновано метод його визначення.

Наявність автоматизованих систем управління технологічними процесами (АСУ ТП) стає нормою у сучасному сталеплавильному виробництві. У той самий час, коло завдань, розв'язуваних цими системами, часто обмежений автоматизацією елементарних технологічних операцій, супроводом інформаційним процесів і статистичної обробкою даних. Побудова ефективних систем управління, звичайно, немислима без сучасних апаратних та програмних засобів, які відкривають ширші можливості.

Потреби сучасного виробництва ставлять завдання моделювання процесів виплавки та обробки сталі "в режимі реального часу".

Одним із актуальних завдань автоматизації виплавки сталі в електротермічних печах є підвищення якості металу та ефективності плавки шляхом автоматизації процесу управління тепловим режимом плавки рідкого металу з використанням математичних методів, алгоритмів, інформаційного та програмного забезпечення, прогнозування зміни температури та хімічного складу металу. Саме адекватний прогноз дозволяє ефективно вирішувати завдання безпосереднього управління, а також все коло супутніх завдань, призначених для підвищення ефективності роботи металургійного агрегату, цеху та підприємства загалом.

Найближчими роками слід очікувати інтенсивного розвитку інтелектуальних систем керування електротермічними печами, спрямованих на реалізацію найбільш продуктивної функції АСУ – оптимального керування. Відмінною особливістю таких систем має наявність моделі, яка повністю описує функціонування об'єкта управління. Першим кроком розгортання інтелектуальної системи на сталеплавильному підприємстві має бути створення системи ведення плавкою в автоматичному режимі. Ядром такої системи управління може бути система моделювання, здатна відстежувати та прогнозувати поточний стан фізико-хімічних процесів залежно від теплового режиму роботи сталеплавильного агрегату.

Основою для подальшого розвитку та побудови інтелектуальних автоматизованих систем управління, які вміють здійснювати прогноз не лише температури металу, а й його хімічного складу, є теоретичні дослідження, математичні моделі, алгоритми, програмне та інформаційне забезпечення, а також принципи інтеграції АСУ ТРП, запропоновані у цій роботі.

Результати роботи представлені в [10, 11, 28 - 45].

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Subir Biswas, Debasish Sarkar, Introduction to Refractories for Iron- and Steelmaking., Jamshedpur, Jharkhand, India, 2020. doi:10.1007/978-3-030-43807-4
2. M. Helle, H. Saxén, Simulation and Optimization of Hot Stoves in a Steel Plant, in: SCANMET V - 5th Int. Conf. Process Dev. Iron Steelmak., Luleå, Sweden, 2016, paper 15.
3. Motta, Ricardo Sebastião Nadur; Costa, Waldir Benedito da; Soares, Thiago Guimarães; Souza., Luíz Edival de. Blast Furnace Hot Stove Changeover by Thermal Control, In: 42º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas / 13º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro / 6th International Congress on the Science and Technology of Ironmaking, Rio de Janeiro, 2012, pp. 80-90. doi:10.5151/2594-357X-21537
4. Yuncai Liu, The Operation of Contemporary Blast Furnaces, Beijing, China, 2021. doi:10.1007/978-981-15-7074-2
5. Кривуца В. Г. Підвищення динамічної точності та швидкодії систем традиційного фазового автопідстроювання та систем фазового автопідстроювання частоти / В. Г. Кривуца та ін. – К.: Ін-т Електродинаміки НАН України, 2013. – 227 с.
6. Кривуца В. Г. Підвищення динамічної точності та швидкодії кореляційних систем / В. Г. Кривуца, Г.Ф. Зайцев, В.Л. Булгач - К.: Ін-т Електродинаміки НАН України, 2012. - 187 с.
7. Підвищення динамічної точності цифрових систем стежать АСУТП за допомогою комбінованого управління. Ч. I. Низький темп обчислення неузгодженості / А.І. Єрмоленко, А.І. Коршунов // вісті вищих навчальних закладів. Приладобудування. - 2018. - Том 61, № 4. - С. 309-316.
8. Burakov M. V., Konovalov A. S. Peculiarities of genetic algorithm usage when synthesizing neural and fuzzy regulators // Kluwer Int. Ser. Eng. and Comput. Sci. 2002.

N 664. P. 39–48.

9. Gilat, A. (2016). MATLAB (6th ed.). Wiley. Retrieved from <https://www.perlego.com/book/3866166/matlab-an-introduction-with-applications-pdf> (Original work published 2016).

10. Oleksii Razzhivin, Oleg Subotin, Oleg Markov, (2022) Automated Melt Temperature Control System In Induction Furnace // 4th IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES). Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Ukraine 20 – 22 October, 2022. – pp. 535-538.

11. Oleg Subotin, Oleg Markov, Oleksii Razzhivin (2022). Study of the Dynamics of Solidification of a Continuously Cast Ingot on the Improved Mathematical Model of the Process of Soft Compression // 4th IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES). Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Ukraine 20 – 22 October, 2022. – pp. 481-485.

12. Phil Kim. MATLAB Deep Learning^ With Machine Learning, Neural Networks and Artificial Intelligence/ Seoul, South Korea (Republic of), 2017. – 149 p.

13. Rama Rao, K.S. Optimal design of a furnace transformer by intelligent evolutionary methods / K. S. Rama Rao, Mohd Noh Karsiti // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – Volume 43, Issue 1, December 2012, Pages 1056–1062.

14. Rutkowska D. Sieci neuronowe, algorytmy genetyczne I systemy rozmyte / D/ Rutkowska , M. Pilinski, L. Rutkowska . – Warszawa. : Wydawnicywo Naukowe PWN, 1997. – 452 s.

15. Yager R., Filev D. Essentials of Fuzzy Modeling and Control. USA: John Wiley & Sons. 1984. 387 p..

16. Лозинський, А. О. Оптимізація режимів компенсації реактивної потужності ДСП з використанням методу генетичного алгоритму / А. О. Лозинський, Я. С. Паранчук // Теоретична електротехніка. – 2002. – Вип. 56. – С.

81-86..

17. Люта А. В. Удосконалення систем управління приводом переміщення електродів дугових сталеплавильних печей: монографія / А. В. Люта. – Краматорськ : ДДМА, 2020. – 147 с.

18. Методи сучасної теорії управління: підручник / А.П. Ладанюк, Н.М. Луцька, В.Д. Кишенько, Л.О. Власенко, В.В. Івашук. – Київ: Видавництво Ліра-К, 2019. – 368 с.

19. Паранчук, Я. С. Моделювання та дослідження режимів електричної системи регулювання струмів дуг дугової сталеплавильної печі / Я. С. Паранчук // Вісник НУ «Львівська політехніка». – 2000. – №403. – С.126-133.

20. Пачколін Ю.Е. Розробка та дослідження електросталеплавильного комплексу з індукційно-дуговим перетворенням електроенергії : Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.09.03. — Л., 2007. — 19 с. — укр..

21. Разживін О.В. Математичне моделювання температури шлаку відновного періоду плавки в ДСП / Вісник Донбаської державної машинобудівної академії: тематичний збірник наукових праць. – Краматорськ : ДДМА, № 2(10Е) – 2012. – С. 114-118

22. Разживін О.В. Математичне моделювання та оцінка величини теплових втрат відновлювального періоду плавки в дуговій сталеплавильній печі / Вісник Донбаської державної машинобудівної академії: тематичний збірник наукових праць. – Краматорськ : ДДМА, № 1(9Е) – 2012. – С. 136-142

23. Разживін О.В. Математичний опис перерозподілу потужності на електричній дузі // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії: тематичний збірник наукових праць. – Краматорськ : ДДМА, №2(31) – 2013, С. 87-90

24. Разживін О.В. Математическое моделирование тепловых параметров восстановительного периода плавки в ДСП / А.В. Разживин, А.Н. Обухов // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії: тематичний збірник наукових

праць. – Краматорськ : ДДМА, 2011. – №1(22). – С. 225-231

25. Разживін О.В. Синтез фазі-регулятора температурного режиму плавки в електротермічних печах на основі бази даних технологічного процесу / О.В. Разживін, А.М. Обухов // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії: тематичний збірник наукових праць. – Краматорськ : ДДМА, № 1(7Е) – 2011. – С. 172-178

26. Тімошенко С.М. Чисельне моделювання енергоефективних рішень дугової сталеплавильної печі ливарного класу / С.М. Тімошенко, Е.М. Немцев // Наукові праці ДонНТУ. Серія: «Електротехніка і енергетика». -2020. – Вип. №2(23). -С. 77-86.

27. Труфанов І.Д. Системи оптимізації режимів роботи потужних дугових сталеплавильних печей на основі інтегрального критерію енергозбереження : Автореф. дис... д-ра техн. наук: 05.09.03. — Л., 2001. — 38 с. — укр..

28. Автоматизація технологічних процесів і виробництв у чорній металургії: [навчальний посібник] / В.П. Кравченко, О.О. Койфман, О.І. Сімкін - Запоріжжя: ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», 2023. ISBN 978-966-289-735-7

29. Разживін, О., Люта, А., Марков, О., Картамишев, Д., Мирошниченко, В., Ільїнський, М. Моделювання та удосконалення сенсорної мережі системи обліку споживання енергетичних ресурсів у мікрорайоні. Технічні науки та технології. 2023, 1 (31), 138–145.

30. Коротиш В. Ю., Сімкін О. І. Модернізація системи управління відділенням стабілізації тиску коксового газу. Сучасні інформаційні технології, засоби автоматизації та електропривод : матеріали VII Всеукр. науково-практ. конф., м. Краматорськ, 20–22 квіт. 2023 р. / ред. О. Ф. Тарасов. Краматорськ, 2023. С. 126–128.

31. Сімкін О. І., Золотарьов Д.Г., Коротиш В. Ю. Вибір параметрів прокатки для оцінки роботи АСУТП нагріву слябів у методичних печах. Автоматизація та

біомедичні і комп'ютерні технології : зб. тез Всеукр. наук-техн. інтернет-конференції, Маріуполь/Дніпро, 20 березня 2023 р. (ДВНЗ «ПДТУ»). Маріуполь/Дніпро, 2023. С. 25-27.

32. Вінковський М. С., Койфман О. О. Використання IoT в забезпеченні безпеки роботи котла КВГМ-100. Сучасні інформаційні технології, засоби автоматизації та електропривод : матеріали VII Всеукр. науково-практ. конф., м. Краматорськ, 20–22 квіт. 2023 р. / ред. О. Ф. Тарасов. Краматорськ, 2023. С. 69–71.

33. Койфман О. О., Мірошніченко В. І., Стецький В. В., Заварзін А. Г. Prospects for the Development of a Cyber-Physical Control System for Hot Blast Stoves Block. Автоматизація та біомедичні і комп'ютерні технології : зб. тез Всеукр. наук-техн. інтернет-конференції, Маріуполь/Дніпро, 20 березня 2023 р. (ДВНЗ «ПДТУ»). Маріуполь/Дніпро, 2023. С. 17-20.

34. Вінковський М., Койфман О. Використання цифрових датчиків для побудови малої системи автоматизації. Технічна творчість : Збірник наукових праць. Хмельницький: ХНУ. 2022, №5, С. 44-46.

35. Коваленко В. А., Разживін О. В. Застосування методу ударних імпульсів для вібродіагностики електромеханічних вузлів. Інформатика, управління та штучний інтелект : тези десятої міжнар. науково-техн. конф., м. Харків, 10–12 трав. 2023 р. Харків, 2023. С. 38.

36. Розробка інтелектуальної інформаційної системи обліку споживання електричної енергії / О. В. Разживін та ін. Інформатика, управління та штучний інтелект : Тези десятої міжнар. науково-техн. конф., м. Харків, 10–12 трав. 2023 р. Харків, 2023. С. 79.

37. Прасол В.А. Цифрова підстанція контролю та обліку енергосистеми низької сторони підстанції ГПП 154/6 кВ. Сучасні інформаційні технології, засоби автоматизації та електропривод : матеріали VII Всеукр. науково-практ. конф., м. Краматорськ, 20–22 квіт. 2023 р. / ред. О. Ф. Тарасов. Краматорськ, 2023. С. 89–92.

38. Омельницький Ю.А. Автоматизована система керування електричною

частиною 6 КВ понижуючої підстанції 154/6 КВ на базі пристроїв REF615. Сучасні інформаційні технології, засоби автоматизації та електропривод : матеріали VII Всеукр. науково-практ. конф., м. Краматорськ, 20–22 квіт. 2023 р. / ред. О. Ф. Тарасов. Краматорськ, 2023. С. 200–201.

39. Омельницький Ю.А. Автоматизована система керування електричною частиною 6 Кв понижуючої підстанції 154/6 Кв на базі пристроїв REF615. Стан, досягнення та перспективи інформаційних систем і технологій : Матеріали XXIII Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених, аспірантів та студентів. Одеса, 20-21 квітня 2023 р. - Одеса, Видавництво ОНТУ, 2023 р.

40. Золотарьов Д.Г. Автоматизована система збору параметрів роботи та діагностики технічного стану механізмів коксової батареї. Сучасні інформаційні технології, засоби автоматизації та електропривод : матеріали VII Всеукр. науково-практ. конф., м. Краматорськ, 20–22 квіт. 2023 р. / ред. О. Ф. Тарасов. Краматорськ, 2023. С. 124–126.

41. Лактіонов Є.О. Способи керування частотним перетворювачем. Сучасні інформаційні технології, засоби автоматизації та електропривод : матеріали VII Всеукр. науково-практ. конф., м. Краматорськ, 20–22 квіт. 2023 р. / ред. О. Ф. Тарасов. Краматорськ, 2023. С. 233–237.

42. Лактіонов Є.О. Способи діагностики ступеня зношування підшипників приводних систем. Технічна творчість : Збірник наукових праць. Хмельницький: ХНУ. 2022, №5, С. 32-33.

43. Шимко А.В., Бундза О.З., Мартинюк В.Л. Пошкодження бульб картоплі під час транспортування .Інноваційні технології в АПК: збірник тез доповідей ІХ Міжнародної науково-практичної конференції, 7-8 червня 2023 р., м. Луцьк [Електронний ресурс] – Луцьк: ЛНТУ, 2023. – с 200 - 203.

44. Голотюк М., Налобіна О., Бундза О. Впровадження мехатроніки в технології точного землеробства. Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції «Синергія освіти, науки, виробництва в умовах глобальних викликів

сьогодення», 29 березня 2023, Луцьк. – Луцький національний технічний університет, 2023. с. 117-119.

45. Бундза О.З., Ткачук О.І, Мельник А.В. АГРЕГАТ ДЛЯ ГЛИБОКОГО РИХЛЕННЯ ҐРУНТУ. Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції «Синергія освіти, науки, виробництва в умовах глобальних викликів сьогодення», 29 березня 2023, Луцьк. – Луцький національний технічний університет, 2023. с. 111-113.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор — проректор з
навчальної роботи
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»



Наталія РЕКОВА
«01» червня 2023 року

ДОВІДКА ПРО ВИКОРИСТАННЯ

Результати виконання науково-дослідної роботи «Використання результатів досліджень та аналізу технологічних даних в інтелектуальних системах управління» (№ держреєстрації 0122U200985), що містять:

- алгоритми та їх програмна реалізація з використанням результатів експериментальних досліджень та баз технологічної інформації в налагодженні систем керування (на прикладі методичної печі);
- алгоритм обробки технологічних баз даних за тривалий період задля визначення та обґрунтування нових зв'язків між технологічними параметрами (на прикладі блока доменних повітрянагрівачів);
- використання вхідного впливу для системи автоматичного керування у вигляді двоступінчастої зміни заданого значення керованого технологічного параметру;
- особливості технологічного процесу плавки металу в комплексах «Піч-Ківш», встановлення параметрів процесу керування тепловим режимом плавки, створення автоматизованої системи керування тепловим режимом плавки технологічних комплексів «Піч-Ківш».

використовуються на кафедрі автоматизації, електро- та робототехнічних систем ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА» в рамках викладання дисциплін професійного ядра «Методи в програмуванні АСУ ТП», «Теорія автоматичного регулювання»; «АСУ ТП в гірничо-металургійному виробництві» та «Інтелектуальні системи управління» тощо за спеціальністю 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» та в рамках викладання освітніх компонентів (модулів) освітньо-професійної програми «Автоматизація та диджиталізація виробничих процесів» післядипломної освіти (підвищення кваліфікації).

В.о. завідуючого кафедрою
автоматизації, електро- та
робототехнічних систем,
канд. техн. наук, доц.

Олексій КОЙФМАН