

Д. О. Дьомін

**ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ
ЕЛЕКТРОДУГОВОЮ ПЛАВКОЮ
В ДУПЛЕКС-ПРОЦЕСАХ**

Монографія

Харків, 2026

УДК 621.74:681.5:519.24
Д 92

Рецензенти:

О. В. Акімов, доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»;

Ю. В. Доценко, кандидат технічних наук, доцент, Український державний університет науки і технологій.

Автор: Дьомін Дмитро Олександрович, доктор технічних наук, професор

Д 92 Оптимальне керування електродуговою плавкою в дуплекс-процесах: монографія / Д. О. Дьомін. – Харків : ТОВ «ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ЦЕНТР ГРУП», 2026. – 160 с.

DOI: 10.62067/978-617-8242-10-7

ISBN 978-617-8242-10-7 (PDF)

В монографії представлено концептуальні рішення та результати багаторічних промислових досліджень технології виплавки чавуну для виливків машинобудування на основі використання електродугової печі. Розглянуто два дуплекс-процеси плавки: «вагранка – електродугова піч» та «електродугова піч – електродугова піч». Останній процес передбачав суміщення в одній печі процесів плавки та термочасової обробки розплаву.

Запропоновано процедури пошуку оптимального керування процесом плавки та термочасової обробки за компромісним критерієм, що включає вимогу мінімізації енерговитрат, мінімізацію простою ливарного конвеєра через нестачу розплаву, що видається з печі, та максимізацію якості чавуну за хімічним складом.

Представлено процедури синтезу оптимального за швидкодією керування процесами насичення розплаву вуглецем, нагріву ванни та оптимального регулятора температурного режиму електродугової печі, що працює як елемент системи масового обслуговування «електродугова піч – ливарний конвеєр». Розглянуто варіанти керування роботою електродугової печі, що представляється машиною-автоматом плавильно-заливальної технологічної системи.

Монографія може представляти інтерес для науковців, дослідників, інженерів ливарного виробництва, а також може бути корисною для здобувачів наукових ступенів.

Іл. 45. Табл. 25. Бібліогр.: 29 назв.

ISBN 978-617-8242-10-7 (PDF)

УДК 621.74:681.5:519.24

Ця книга містить інформацію, отриману з достовірних і високоповажних джерел. Було докладено розумних зусиль для публікації достовірних даних та інформації, але автор і видавець не можуть взяти на себе відповідальність за достовірність усіх матеріалів або за наслідки їхнього використання. Автори та видавці намагалися відстежити власників авторських прав на всі матеріали, відтворені в цій публікації, і приносять вибачення власникам авторських прав, якщо дозвіл на публікацію в такому вигляді не був отриманий. Якщо якийсь матеріал не був визнаний захищеним авторським правом, будь ласка, напишіть нам і повідомте про це, щоб ми могли виправити це в будь-якому майбутньому перевиданні. Видавець, автори та редактори можуть з упевненістю стверджувати, що поради та інформація, наведені в цій книзі, є правдивими і точними на дату публікації. Ані видавець, ані автори, ані редактори не дають жодних гарантій, явних чи неявних, щодо матеріалів, які містяться в цій книзі, або за будь-які помилки чи упущення, які могли бути допущені.

Повідомлення про торгові марки: Назви продуктів або компаній можуть бути торговельними марками або зареєстрованими торговельними марками і використовуються лише для ідентифікації та пояснення без наміру порушити права на них.

Copyright © 2026 Д. О. Дьомін

Видання розміщено у відкритому доступі під ліцензією Creative Commons CC BY

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА	1
ВСТУП	2
РОЗДІЛ 1. Синтез оптимального керування технологічними режимами електродугової печі	4
1.1. Типові режими та схеми регулювання електричних режимів електродугових печей.....	4
1.2. Принципи пошуку оптимального керування міксерним режимом роботи електродугової печі	15
1.3. Особливості керування роботою електродугової печі в режимі міксера в складі плавильно-заливальної системи....	22
РОЗДІЛ 2. Результати промислових досліджень показників функціонування дуплекс-процесу «вагранка – електродугова піч»	48
2.1. Схема дуплекс-процесу «вагранка – електродугова піч-міксер».....	48
2.2. Показники плавки в вагранці в дуплекс-процесі «вагранка – електродугова піч-міксер»	52
2.3. Показники термочасової обробки в електродуговій печі-міксері в дуплекс-процесі «вагранка – електродугова піч-міксер».....	59
РОЗДІЛ 3. Результати промислових досліджень показників функціонування дуплекс-процесу «електродугова піч – електродугова піч-міксер»	67
3.1. Показники плавки в електродуговій печі	67
3.2. Конструювання функціоналу для пошуку оптимального керування термочасовою обробкою в електродуговій печі-міксері та принцип формування оптимальної технологічної схеми процесу	71
3.3. Експериментально-промислові дослідження та побудова технологічних схем на етапі термочасової обробки	98

РОЗДІЛ 4. Синтез оптимального керування електродуговою піччю як елементом системи масового обслуговування «електродугова піч – конвеєр».....	117
4.1. Загальна процедура синтезу оптимальної технологічної схеми плавки для задачі керування процесом видачі розплаву на конвеєр	117
4.2. Оцінка суттєвості дії керуючого впливу на формування хімічного складу чавуну	131
4.3. Керування електродуговою піччю як машиною-автоматом	137
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	146

СПИСОК ТАБЛИЦЬ

1.1	Контрольовані параметри та технічні засоби автоматизації плавки в електродуговій печі	14
2.1	Технічна характеристика вагранок	52
2.2	Хімічний склад чавуну ваграночної плавки	58
2.3	Діапазони хімічного складу чавуну ваграночної плавки та ймовірності попадання значень вмісту в ці діапазони	59
2.4	Технічна характеристика електродугової печі-міксера ДЧМ-10	59
2.5	Кількість та спосіб введення присадок для зниження вмісту елементів у чавуні	63
2.6	Кількість та спосіб введення присадок для підвищення вмісту елементів у чавуні	63
2.7	Хімічний склад чавуну, що видається електродуговою піччю-міксером на ділянку заливки	65
2.8	Діапазони хімічного складу чавуну, що видається електродуговою піччю-міксером на ділянку заливки, та ймовірності попадання значень вмісту в ці діапазони	66
3.1	Хімічний склад чавуну електродугової плавки	69
3.2	Діапазони хімічного складу чавуну електродугової плавки та ймовірності попадання значень вмісту в ці діапазони	71
3.3	Основні фізико-хімічні процеси в розплаві	86
3.4	Вихідні дані для розрахунку миттєвих швидкостей процесу	94
3.5	Подання результатів розрахунку миттєвих швидкостей	94
3.6	Часовий графік базового процесу електродугової плавки	99
3.7	Результати моделювання при $\tau = 15$ хв	103
3.8	Результати моделювання при $\tau = 45-60$ хв	104
3.9	Результати розрахунку долі браку з невідповідності регламентованим механічним властивостям чавуну	105
4.1	Вихідні дані для синтезу оптимальних технологічних схем плавки	117
4.2	План експерименту	119

4.3	Розрахунок вихідної змінної для середньої точки плану	120
4.4	Розрахунок оцінок коефіцієнтів математичної моделі	121
4.5	Розрахунок оцінки дисперсії неадекватності моделі	122
4.6	Результати статистичного аналізу точності	123
4.7	Результати дисперсійного аналізу	135

СПИСОК РИСУНКІВ

1.1	Типова схема конструкції електродугової печі	5
1.2	Робоча діаграма електродугової печі	6
1.3	Схема заливальної ділянки системи «електродугова піч – ливарний конвеєр»: I – електропічний трансформатор; II – електропіч; III – заливальна ділянка системи «піч – ливарний конвеєр»; IV – двопозиційний заливальний автомат; 1 – привод повороту печі; 2 – механізми вертикального переміщення електродів; 3 – привод рушія електродотримачів; 4 – привод затвора бункера з шихтовими матеріалами; 5 – привод рушія робочої двері; 6 – гідроциліндри нахилу печі; 7 – механізм переключення ступенів напруги трансформатора; 8 – привод повороту заливального двопозиційного автомата; 9 – привод повороту заливального ковша	7
1.4	Етапи плавки в електродуговій печі, по яких формується керування процесом: <i>a</i> – початковий етап плавки, довжина дуги формується в проміжку l_1 , потужність, що підводиться, P_1 ; <i>b</i> – етап плавки, коли в шихті прорізані колодязі і дуга закрита з усіх боків шихтою, довжина дуги формується в проміжку l_2 , потужність, що підводиться, P_{II} максимальна; <i>v</i> – етап плавки, коли вся шихта розплавлена і дуга знов відкрита, довжина дуги формується в проміжку l_3 , потужність, що підводиться, P_{III} мінімальна, <i>g</i> – графік потужності	8
1.5	Схема автоматичного регулювання електричного режиму для однієї фази	9
1.6	Функціональна схема однієї фази регулятора потужності на тиристорах	10
1.7	Схема автоматизації плавки в електродуговій печі	12
1.8	Схема автоматизації продувки ванни	13
1.9	Внутрішній профіль ванни електродугової печі та реакційна поверхня «розплав – шлак»	16
1.10	Фазові траєкторії та лінії переключення	19

1.11	Технологічна схема плавильно-заливальної системи: I – плавильна ділянка; II – плавильно-заливальна ділянка; 1 – первинний плавильний агрегат (вагранка, електродугова піч); 2 – електропіч-міксер; 3 – двопозиційний заливальний автомат; 4 – ливарний конвеєр; 5 – залита ливарна форма; 6 – ливарна форма, що заливається на позиції заливання; 7 – зібрана під заливання форма	23
1.12	Принципова схема формування циклограми роботи печі та керуючих впливів	24
1.13	Блок-схема вагодозуючого пристрою печі	27
1.14	Релейно-контактна схема керування приводом повороту електродугової печі	28
1.15	Гістограма розподілу температури на поверхні дзеркала розплаву	31
1.16	2D-профіль ванни дугової електропечі	32
1.17	Залежність маси розплаву печі від глибини ванни для дугової електропечі ємністю 10 т	34
1.18	Приклад температурного профілю електродугової печі-міксера ємністю 10 т	36
1.19	Вид траєкторії при позитивному (1) та негативному (2) знаках керування	39
1.20	Графік зміни параметрів у процесі регулювання у часі	42
2.1	Схема дуплекс-процесу "вагранка – електродугова піч-міксер": 1 – роздавальна система завантаження шихти; 2 – скіповий підйомник; 3 – вагранка; 4 – міксер; 5 – роздавальний ківш; 6 – розливні ковші; 7 – ливарний конвеєр; 8 – ділянка заливання; 9 – ливарні форми, готові під заливання; 10 – залиті форми	48
2.2	Наповнення міксера порціями розплаву, що видається з вагранки у моменти часу j ($j = 1, \dots, L$): $a - j = 1 \rightarrow h = h_1$; $b - j = 2 \rightarrow h = h_2$; $v - j = L \rightarrow h = h_L$	50
2.3	Схема процесу управління технологічною системою "вагранка – електродугова піч-міксер"	51
3.1	Схема СМО «електродугова піч-міксер – ливарний конвеєр»: a – план ділянки цеху: 1 – електропіч; 2 – ливарний конвеєр; b – граф станів системи	77

3.2	Геометрична інтерпретація задачі пошуку оптимального числа каналів СМО «електродугова піч-міксер – ливарний конвеєр»: 1 – крива, що характеризує витрати, пов'язані з простоями на ділянці заливки; 2 – крива, що характеризує витрати, пов'язані з перевитратою електроенергії; 3 – крива сумарних витрат	83
3.3	Формування оптимальної технологічної схеми роботи електродугової печі-міксера	84
3.4	Схема процесу функціонування системи	87
3.5	Адаптивний алгоритм розрахунку параметрів кінетичних рівнянь	90
3.6	Технологічна схема дуплекс процесу «електродугова піч – електродугова піч-міксер» для виплавки чавуну СЧ200 – 250 ДСТУ 8833:2019 в базовому процесі. Середній інтервал часу між випусками розплаву: у моменти часу 1–3 – 55 хвилин, у моменти часу 3–9 – 25 хвилин, у моменти часу 9–28 – 7 хвилин, у моменти часу 33–51 – 14 хвилин	101
3.7	Оптимальна технологічна схема процесу	102
3.8	Принцип вибору ступеня напруги трансформатора	107
4.1	Межі довірчих інтервалів та розташування експериментальних точок	123
4.2	Поверхня відгуку, що описує залежність $m^* = f(\lambda, \mu^{-1})$	124
4.3	Залежність оптимальної маси розплаву в печі від часу його витримки для різних значень інтенсивності заявок на розплав	124
4.4	Схема, що ілюструє метод гребеневого аналізу	126
4.5	Залежність $r = r(\lambda)$	127
4.6	Залежність $m^* = m^*(\lambda)$	128
4.7	Залежність $m^* = r^*(\lambda)$	129
4.8	Процедура формування оптимальної технологічної схеми плавки	130
4.9	Поведінка вмісту хімічного елементу в чавуну внаслідок його відновлення в розплаві (на прикладі вуглецю): 1 – верхній допустимий вміст вуглецю; 2 – нижній допустимий вміст вуглецю; 3 – крива насичення розплаву вуглецем (теоретичний випадок); 4 – крива зниження ступеня насичення; 5 – «сумарна» крива зміни вмісту вуглецю	131

- 4.10 Принцип керування за кінцевим станом процесом термочасової обробки розплаву в електродуговій печі: u – керування; 1 – крива зниження ступеня насичення розплаву хімічним елементом внаслідок керуючого впливу u ; 2 – «сумарна» крива зміни вмісту хімічного елемента після застосування керуючого впливу u 132
- 4.11 Приклад блок-схеми системи керування: БКЛУ – блок контролю логічних умов; БКСК – блок контролю стану кінцевих перемикачів; БКВП – блок контролю вихідного положення; x_i – сигнали, що знімаються з кінцевих перемикачів (вихідні сигнали приводу, вхідні сигнали для системи керування); Tr_i – тригери; I, АБО – логічні елементи; Y_i – сигнали з елементів пам'яті; Z_i – сигнали з релейного пристрою для налагоджувального управління; U_i – керуючі сигнали з системи керування на привод 138
- 4.12 Циклограма роботи електродугової печі, що функціонує у складі ливарного конвеєра та розглядається як машина-автомат, з керуванням хімічним складом за допомогою занурення електродів 142
- 4.13 Циклограма роботи електродугової печі, що функціонує у складі ливарного конвеєра та розглядається як машина-автомат, з керуванням хімічним складом за допомогою нагрівання ванни 144
- 4.14 Циклограма роботи електродугової печі, що функціонує у складі ливарного конвеєра та розглядається як машина-автомат, з керуванням хімічним складом за допомогою введення феросплавів 145

ПЕРЕДМОВА

Монографія призначена насамперед для науковців, дослідників, які займаються рішенням проблем отримання якісного чавунного литва машинобудівного призначення, та інженерів ливарного виробництва.

Монографія містить концептуальні рішення щодо технологічних процесів виготовлення чавуну в разі, якщо електродугова піч використовується не лише для плавки, але й в якості мікзера. При цьому головний акцент робиться на визначенні таких режимів роботи електродугової печі, які забезпечують оптимальне компромісне рішення, узгоджуючи три потенційно конфліктні критерії – ККД печі в режимі роботи мікзера, можливість забезпечення конвеєра необхідною кількістю розплаву, заданий стабільний хімічний склад.

Значний інтерес ця монографія може представляти також через наявність математичних моделей, що описують процеси в плавильно-заливальної системі, та можуть бути використані для пошуку оптимального керування дуплекс-процесами плавки, в яких базовою є електродугова піч. Це може стати в нагоді послідовникам, які займаються проблемами управління якістю чавуну, та слугувати базою для подальшого математичного моделювання та розробки процесів та систем керування плавкою чавуну.

Названі особливості монографії – поєднання концептуальних рішень, готових результатів обробки промислових даних з отриманням адекватних математичних моделей та принципів пошуку оптимального керування плавкою – дозволяють вважати її за корисне джерело інформації для використання як для промислових задач, так і для подальших досліджень. Останні можуть бути спрямовані на визначення рішень, що забезпечують якісне отримання чавуну для виливків машинобудівного призначення за мінімізації ресурсо- та енерговитрат на плавку.

ВСТУП

Сучасні погляди на виготовлення чавуну для виливків машинобудування базуються на цілком обґрунтованих аргументах стосовно пріоритетності використання індукційних печей. Можливість отримання стабільного за хімічним складом та властивостями чавуну, керованість процесу плавки, мінімальні втрати металу на угар, екологічна безпека – усе це є перевагами індукційної плавки. Однак усі ці можливості забезпечуються лише за наявності якісної шихти. Звичайно, можна виплавляти синтетичний чавун и гарантувати високу та стабільну якість, але потреба у великій кількості чавуну, наявність великої кількості металобрухту та різнорідної шихти з неконтрольованою або обмежено контрольованою якістю, великогабаритної шихти зумовлюють необхідність використання інших печей. Металургійні властивості таких печей мають бути значно ширше, ніж індукційних печей, обмежені можливості яких стосовно проведення в необхідному обсязі фізико-хімічних процесів, добре відомі.

Серед таких печей можуть бути вагранки та електродугові печі. Незважаючи на негативне ставлення до вагранок, яке поспідовно складалося протягом останній десятиріччя в українському середовищі, ці печі знаходять широке застосування в багатьох країнах світу. Це обумовлене тим, що сучасні розробки в галузі промислової електроніки, систем та технічних засобів автоматизації, систем очистки та утилізації, дозволяють звести до мінімуму недоліки ваграночної плавки. Це відкриває можливості для отримання великих об'ємів чавуну прийнятної якості за мінімальної шкоди навколишньому середовищу. Електродугові печі переважно використовуються для отримання сталі, але з точки зору вирішення проблеми, що полягає у складності отримання якісного чавуну за використання неякісної шихти, використання їх для виготовлення чавуну є доцільним та цілком обґрунтованим. До того ж, добре відомо, що електродугові печі можуть працювати з великогабаритної шихтою, а їх металургійні можливості надто ширші, ніж у інших печей. Усе це дозволяє стверджувати, що переваги

індукційних печей можуть бути забезпечені в повному обсязі за умови, що індукційна піч працює не з твердою шихтою, а з розплавом, який видається з першої печі – вагранки чи електродугової печі. Але за відсутності індукційних печей, які можуть забезпечити вимоги по продуктивності, єдиною можливістю залишається використання електродугових печей, які грають роль міксерів, тобто мають забезпечувати стабілізацію хімічного складу та задану температуру розплаву.

РОЗДІЛ 1

СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ РЕЖИМАМИ ЕЛЕКТРОДУГОВОЇ ПЕЧІ

1.1. Типові режими та схеми регулювання електричних режимів електродугових печей

Характеристики електродугових печей (рис. 1.1) є основою для керування роботою печі. Серед таких характеристик – електричні величини, які розраховуються за наступними формулами:

$$P_a = P_{\partial} + P_{ев}, \quad (1.1)$$

$$U_{\partial} = \frac{10^3 P_{\partial}}{3I}, \quad (1.2)$$

$$\eta = \frac{P_{\partial}}{P_a} 100\%, \quad (1.3)$$

$$\cos\varphi = \frac{P_a}{P_m}. \quad (1.4)$$

В формулах (1.1)–(1.4) прийняті наступні позначення:

P_a – активна потужність печі;

P_{∂} – активна потужність електричних дуг;

$P_{ев}$ – потужність електричних втрат;

U_{∂} – напруга електричної дуги;

I – сила струму;

$\cos\varphi$ – коефіцієнт потужності печі;

P_m – потужність печі теоретична.

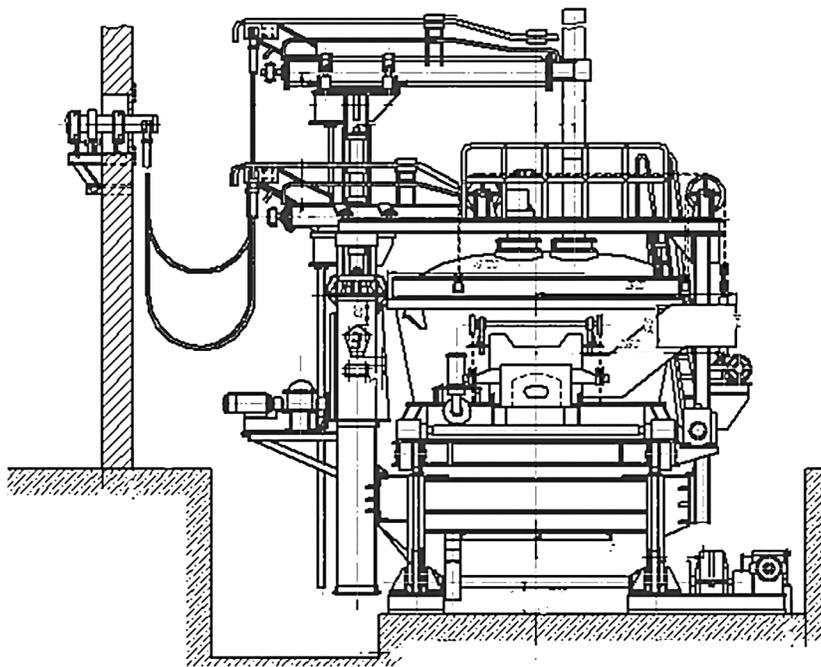


Рис. 1.1 – Типова схема конструкції електродугової печі

На рис. 1.2 показана відома типова робоча діаграма електродугової печі.

Керування плавкою здійснюється двома шляхами:

- вибором ступеня напруги пічного трансформатора – таким чином здійснюється підвід потужності до печі, що працює в складі плавильно-заливальної ділянки цеху (рис. 1.3);
- регулюванням довжини електричної дуги між торцем електроду та металевою шихтою чи поверхнею ванни після розплавлення шихти та формування розплаву.

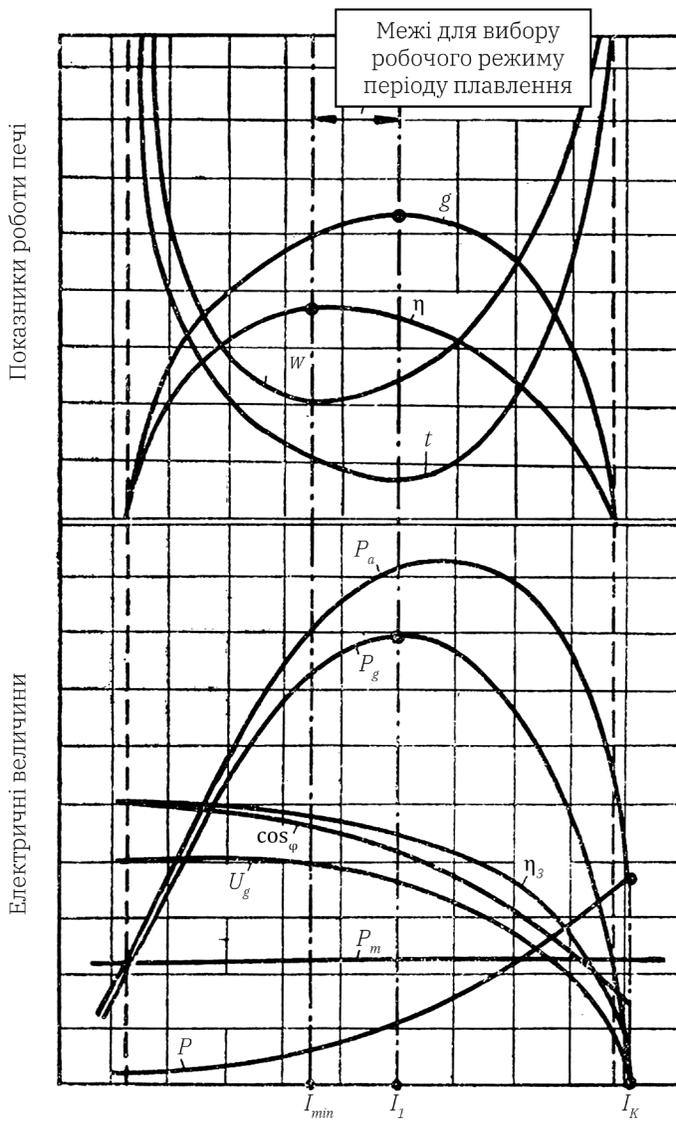
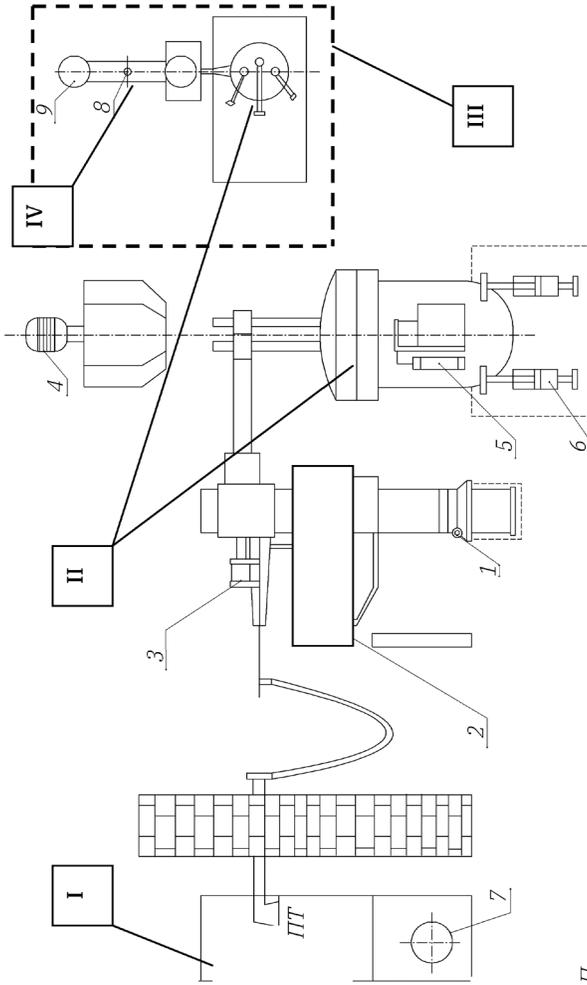


Рис. 1.2 – Робоча діаграма електродугової печі



П

Рис. 1.3 – Схема заливальної ділянки системи «електродугова піч – ливарний конвеєр»:
I – електропічний трансформатор; II – електропіч; III – заливальна ділянка системи
«піч – ливарний конвеєр»; IV – двопозиційний заливальний автомат; 1 – привод
повороту печі; 2 – механізми вертикального переміщення електродів; 3 – привод рушія
електродотримачів; 4 – привод затвора бункера з шихтовими матеріалами; 5 – привод рушія
робочої двері; 6 – гідропіліндри нахилу печі; 7 – механізм переключення ступенів напруги
трансформатора; 8 – привод повороту заливального двопозиційного автомата; 9 – привод
повороту заливального ковша

Загальний принцип формування директивного графіку плавки, який є відображенням часової діаграми підведення потужності шляхом зміни ступеня напруги трансформатора та дає уявлення про положення електроду відносно шихти та ванни, представлений на рис. 1.4 [1].

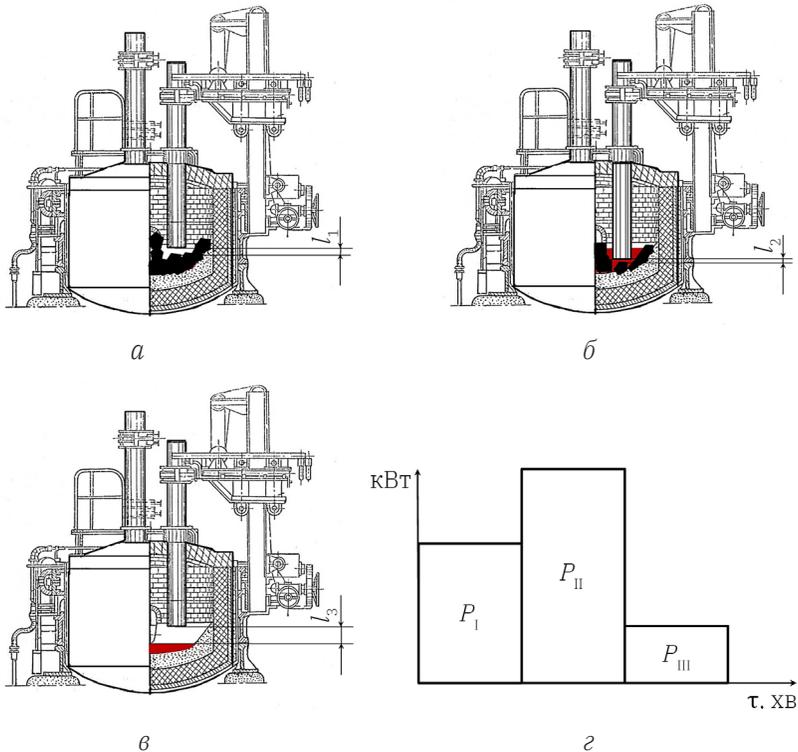


Рис. 1.4 – Етапи плавки в електродуговій печі, по яких формується керування процесом: *а* – початковий етап плавки, довжина дуги формується в проміжку l_1 , потужність, що підводиться, P_1 ; *б* – етап плавки, коли в шихті прорізані колодязі і дуга закрита з усіх боків шихтою, довжина дуги формується в проміжку l_2 , потужність, що підводиться, P_{II} максимальна; *в* – етап плавки, коли вся шихта розплавлена і дуга знов відкрита, довжина дуги формується в проміжку l_3 , потужність, що підводиться, P_{III} мінімальна, *г* – графік потужності

На іншу обмотку дроселя подається напруга U_3 , пропорційна заданій силі струму. Після випрямлення і порівняння на резисторах R_1 і R_2 різниця напруги надходить на вхід пристрою регулювання чутливості PC , де встановлюються величини зони нечутливості і швидкодії системи. Далі сигнал надходить в блок управління $БУ$, де він посилюється підсилювачами $У_1$ і $УМ$ та розділяється залежно від знаку розбалансу на два канали керування.

Блок ФСУ призначений для керування трифазним нульовим реверсивним тиристорним перетворювачем і складається з шести однотипних плат Φ , об'єднаних по три катодних (Φ_1, Φ_2, Φ_3) і анодних (Φ_4, Φ_5, Φ_6) групи.

Блок тиристорів BT являє собою підсилювач потужності і містить шість керованих вентилів VS (дві групи – анодний і катодний) і два датчика струму B_1 і B_2 . До виходу тиристорного перетворювача підключається тахометричний міст, що складається з резисторів R_3 – R_4 і дроселя L . Напруга, пропорційна частоті обертання двигуна, подається у вузол струмового обмеження TO і через регульовані резистори R_6 і R_7 – на вихід підсилювача $У_1$, що реалізує зворотний зв'язок по частоті обертання двигуна.

На рис. 1.7 наведена схема автоматизації плавки в електродуговій печі, а на рис. 1.8 схема автоматизації продувки ванни. Параметри, що контролюються в технологічному процесі, та технічні засоби автоматизації наведені в табл. 1.1.

На рис. 1.7 прийняті наступні позначення:

E – параметри електричного режиму (струм, напруга, потужність, кількість витраченої енергії);

T_ϕ – температура футеровки;

G – положення електродів;

T_m – температура металу;

O – параметри системи водяного охолодження;

Q – склад відхідних газів;

F_{pm} – витрата рафінуючих матеріалів.

В роботі [2] наголошується, що метою керування процесом електроплавки, поряд з отриманням металу заданої якості, з енергетичної точки зору, є висока енергоефективність усіх основних та допоміжних технологічних процесів. Це пов'язано з тим, що електрофізичні, фізико-хімічні, теплоенергетичні процеси в плавильному просторі

печі переважно залежать від динаміки роботи електропічного агрегату, особливо від $\cos\varphi$ «короткої мережі», який в електропічних агрегатах дуже низький. Серед основних факторів, що впливають на експлуатаційний $\cos\varphi$, в роботі [2] виділено: електричну потужність, напругу струму живлення (довжина дуги), склад шихти, кількість і склад присадок, карбюризаторів, витрата кисню, електромагнітне перемішування ванни розплаву, розкислювачі. Тому модель керування процесами плавки повинна описувати динаміку функціонування короткої мережі, тобто включати параметри, що відображають теплоенергетичні процеси перетворення енергетичних потоків в технологічну теплоту плавлення при обліку електроенергії.

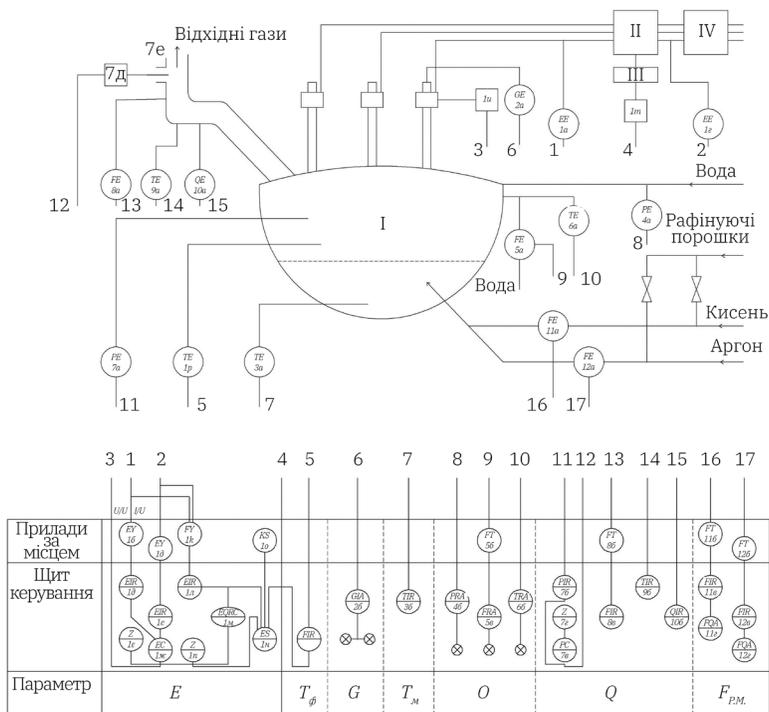


Рис. 1.7 – Схема автоматизації плавки в електродуговій печі

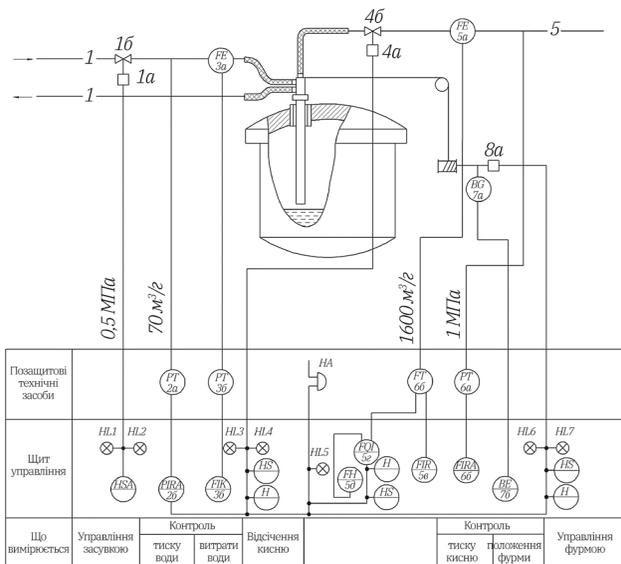


Рис. 1.8 – Схема автоматизації продувки ванни

З використанням описаних підходів до отримання моделей керування в роботі [3] представлено динамічну модель енергоінформаційних потоків електротеплового та електротехнічного режимів електродугових печей постійного та змінного струму. Така модель враховує у своїй структурі енергоінформаційні зв'язки між технологічним забезпеченням (S1-зв'язки) та технологічними процесами (S2-зв'язки). Оцінка S1-зв'язків визначає ступінь впливу стратегії та напрямки розвитку електromеталургії, а S2-зв'язків – значущість їх реалізації. Між ними можуть існувати і S3-зв'язки, як зв'язки інтеграції, що акумулюють ефективність галузі в цілому. Як зазначено в роботі [3], названі зв'язки визначаються за послідовної перевірки критеріїв допустимості (КД), тобто вимог, яким має задовольняти коефіцієнт (параметр, фактор) ефективності. Причому КД, що визначають структуру, повинні мати алгоритми простої (лінеаризованої) зміни чисельних характеристик зустрічних енергопотоків, які можуть бути використані при описі квазісиметричних, а певною мірою явно несиметричних, зв'язків по одному енергоносію (продукту).

Таблиця 1.1 – Контрольовані параметри та технічні засоби автоматизації плавки в електродуговій печі

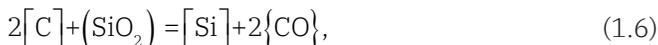
Параметри, що контролюються	Засоби автоматизації	Межі вимірювання
Температура футеровки	Радіаційний пірометр	1100–1900°C
Температура метала	Термопара занурення або термопара безперервного виміру	1500–1750°C
Тиск в робочому просторі	Діфманометр	До 50 Па
Склад газової фази в робочому просторі (CO ₂ , CO, O ₂)	Автоматичний газоаналізатор	До 10% CO ₂ , 15% CO, 10% O ₂
Витрата кисню для продувки ванни	Діафрагма в трубопроводі, діфманометри	В залежності від розміру печі
Параметри електропостачання (напруга, струм фаз, активна потужність, кількість електроенергії)	Електровимірювальні прилади	Також

У роботі [4] наголошується, що актуальним для керування електродуговою плавкою є автоматичне регулювання параметрів електричної дуги, основним параметром якої може бути її потужність, що безпосередньо впливає на інтенсивність нагрівання рідкого металу. У зв'язку з цим необхідно мати математичну модель, яка дає можливість ідентифікувати напругу і потужність на дузі для оптимізації процесу плавлення металу за витратою електроенергії. Така необхідність продиктована існуючою складністю, пов'язаною з вимірюванням та експлуатаційним контролем напруги дуги по ходу плавки [5]. В роботі [5] зазначено, що в потужних електродугових печах діюче значення напруги дуги майже завжди стає при

незмінній довжині дуги, тобто не залежить від діючого значення сили струму. Тому для опису дуги в електродуговій печі може бути використане диференціальне рівняння, що зв'язує струм і падіння напруги на дузі [6].

1.2. Принципи пошуку оптимального керування міксерним режимом роботи електродугової печі

Хімічний склад чавуну, отриманий відразу після розплавлення шихти, може бути обраний як початковий стан процесу. Внаслідок протікання окислювально-відновних процесів на межах розділу фаз «розплав – шлак» (рис. 1.9) [7], хімічний склад починає змінюватись. При виплавці чавунів марок СЧ200–СЧ300 ДСТУ 8833:2019, що застосовуються переважно для виливків машинобудування, особливо важливим є регулювання вмісту вуглецю та кремнію в чавуні. Значний угар вуглецю в електродуговому процесі найчастіше призводить до того, що розплав перед видачою на конвеєр доводиться насичувати вуглецем. З іншого боку, вуглець у чавуні може брати участь у реакції



де $[C]$, $[\text{Si}]$ – вміст вуглецю та кремнію в розплаві; (SiO_2) – вміст кремнезему в шлаку; $\{\text{CO}\}$ – вміст окису вуглецю в атмосфері печі.

Напрямок перебігу та швидкість цієї реакції залежить від відношення $[\text{Si}]/[C]^2$ і температури, тому при інтенсивному науглерожуванні розплаву кількість кремнію в ньому може зростати. Таким чином, має місце кореляція вмісту в чавуні вуглецю та кремнію.

Завдання керування процесом може бути сформульоване як задача швидкодії: визначити оптимальне керування u_{opt} , що переводить процес за мінімальний час з початкового ста-

ну $x_i(t^{(0)}) = x_i(0) = x_i^{(0)}$ в кінцевий, що знаходиться на поверхні

$f^{(k)}(x_1, x_2, \dots, x_k) = 0$. Ця поверхня є аналітичним описом, що зв'язує вміст елементів хімічного складу в чавуні з необхідним рівнем

властивостей, і може бути встановлена на основі математичних моделей «склад – властивість».

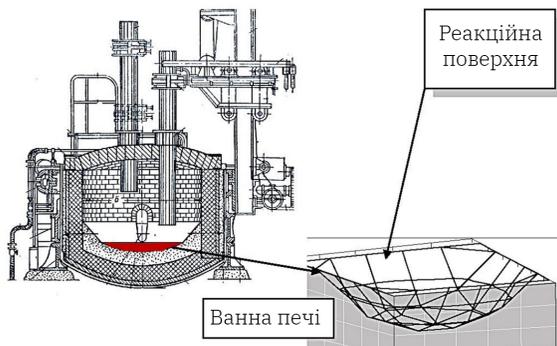


Рис. 1.9 – Внутрішній профіль ванни електродугової печі та реакційна поверхня «розплав – шлак»

Для вирішення поставленого завдання можна використовувати принцип максимуму Понтрягіна [7]. Маючи залежність вмісту кремнію від вмісту вуглецю і рівняння швидкості окислювально-відновних процесів, у яких беруть участь ці елементи, може бути визначене оптимальне керування процесом насичення розплаву вуглецем. Математичний опис процесу в такому разі має вигляд

$$\frac{dx_1}{dt} = K(a_0 + a_1 x_2), \quad \frac{dx_2}{dt} = bu, \quad (1.7)$$

де x_1 – вміст кремнію в розплаві чавуну; x_2 – вміст вуглецю в розплаві чавуну; a_0, a_1 – коефіцієнти залежності вмісту кремнію від вмісту вуглецю в розплаві; u – керування; b – в загальному деяка константа; K – константа швидкості хімічного процесу, що протікає на поверхні розділу фаз «розплав – шлак» між розплавом та шлаком.

Кінцевий стан описується рівнянням

$$f^{(k)}(x_1, x_2) = x_1 - \xi x_2 = 0, \quad (1.8)$$

де ξ – коефіцієнт, що характеризує необхідне співвідношення вмісту вуглецю та кремнію в чавуні, обумовлене конкретними вимогами до його якості.

На величину керуючого впливу накладені обмеження

$$-U \leq u \leq U. \quad (1.9)$$

Керування процесом насичення розплаву вуглецем здійснюється зануренням графітових електродів у розплав при знятій напрузі, при цьому ступінь насичення розплаву вуглецем пропорційна глибині занурення електродів.

Гамільтоніан має вигляд

$$H = \lambda_1 \varphi_1 + \lambda_2 \varphi_2 = \lambda_1 K (a_0 + a_1 x_2) + \lambda_2 b u. \quad (1.10)$$

Система диференціальних рівнянь для функцій λ_1 та λ_2 має вигляд

$$\frac{\partial \lambda_1}{\partial t} = -\frac{\partial H}{\partial x_1} \equiv 0, \quad \frac{\partial \lambda_2}{\partial t} = -\frac{\partial H}{\partial x_2} = -\lambda_1 K a_1. \quad (1.11)$$

Граничні умови для функцій λ_1 та λ_2 на кінці траєкторії мають вигляд

$$\lambda_1(t^{(k)}) = q \frac{\partial f^{(k)}}{\partial x_1} = q, \quad \lambda_2(t^{(k)}) = -q \xi, \quad (1.12)$$

де q – деяке постійне число.

Після інтегрування системи рівнянь (1.11) можна визначити значення функцій $\lambda_1(t)$ та $\lambda_2(t)$

$$\lambda_1(t) = C_1, \quad \lambda_2(t) = -K a_1 C_1 t + C_2. \quad (1.13)$$

Вважаючи, що момент часу $t^{(k)}$ відповідає попаданню процесу в кінцевий стан, і він відомий, з граничних умов (1.12) можуть бути визначені постійні інтегрування C_1 та C_2

$$C_1 = q, C_2 = q \left(Ka_1 t^{(k)} - \xi \right). \quad (1.14)$$

З рівнянь (1.14) можуть бути знайдені значення функцій $\lambda_1(t)$ та $\lambda_2(t)$

$$\lambda_1(t) = q, \lambda_2(t) = q \left(Ka_1 t^{(k)} - \xi - Ka_1 t \right). \quad (1.15)$$

З рівняння (1.10) випливає, що

$$u_{onm}(t) = U \operatorname{sgn} \lambda_2(t), \quad (1.16)$$

де $\operatorname{sgn} \lambda_2(t)$ – функція знаку для $\lambda_2(t)$.

Так як функція $\lambda_2(t)$ є лінійною і, отже, може лише один раз змінювати свій знак при зміні t , може бути зроблений висновок про те, що оптимальне керування для досліджуваного процесу, що описується системою (1.7) за наявності обмежень виду (1.9), є кусково-постійною функцією від t , що має не більш ніж одну точку перемикавання з одного граничного значення в нерівностях (1.9) в інше.

Рівняння (1.7) можуть бути проінтегровані:

$$\begin{aligned} x_1(t) &= (Ka_0 + Ka_1 C_3)t + Ka_1 bu \frac{t^2}{2} + C_4; \\ x_2(t) &= but + C_3. \end{aligned} \quad (1.17)$$

Постійні інтегрування можна знайти з початкових умов

$$C_3 = x_2^{(0)}, C_4 = x_1^{(0)}. \quad (1.18)$$

Момент переключення керування $t^{(s)}$ може бути визначений з виразу (1.15) підстановкою $\lambda_2(t^{(s)}) = 0$

$$t^{(s)} = t^{(k)} - \frac{\xi}{Ka_1}. \quad (1.19)$$

З (1.19) випливає, що перемикання керування буде лише тоді, коли з цього стану системи не можна потрапити на лінію кінцевих значень, що задається прямою (1.8), за час

$$t^{(k)} \leq \frac{\xi}{Ka_1}. \quad (1.20)$$

Рівняння лінії перемикання може бути знайдено з рівняння (1.8) шляхом підстановки до нього (1.17)

$$x_1^{(s)} = -\frac{a_0}{a_1} \xi + \frac{1}{2} \frac{b\xi^2}{Ka_1} u. \quad (1.21)$$

Фазові траєкторії та лінії переключення при цьому мають вигляд, що приведений на рис. 1.10.

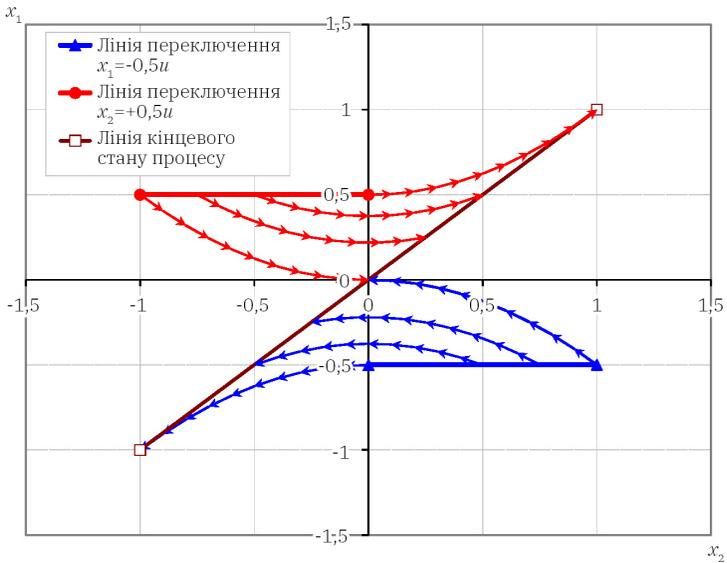


Рис. 1.10 – Фазові траєкторії та лінії переключення

Оптимальне керування за допомогою насичення розплаву вуглецем дозволяє регулювати вміст основних елементів хімічного складу. Якщо переведення системи з початкового стану в кінцевий неможливий за час, що визначається умовою (1.20), вирішення проблеми забезпечення ливарного конвеєра якісним розплавом може бути знайдено в такий спосіб. Відомо, що зміна температури розплаву змінює хід та швидкості окисно-відновних реакцій. Зв'язок температури та швидкості хімічного процесу визначається рівнянням Арреніуса

$$K = Ae^{-\frac{E_a}{RT}}, \quad (1.22)$$

де A – передекспоненційний множник, який визначається експериментально; E_a – енергія активації фізико-хімічного процесу; T – температура розплаву.

Зміна температури, наприклад, швидке її збільшення, здійснюється перемиканням ступенів напруги трансформатора на великих печах або перемиканням обмотки трансформатора з «зірки» на «трикутник» на печах невеликої ємності. У загальному випадку математичний опис процесу нагрівання ванни за рахунок зміни ступеня напруги має вигляд

$$\frac{dT}{dt} = u, \quad (1.23)$$

де T – температура розплаву в печі; u – керування.

Задача, як і в розглянутому вище керуванні процесом насичення розплаву вуглецем, полягає в тому, щоб визначити оптимальне керування $u(t)$, що переводить процес за мінімальний час із заданого початкового стану $T^{(0)}$ в кінцевий $T^{(k)}$, якщо діапазон можливих значень керуючого впливу обмежений нерівністю (1.9).

Гамільтоніан має вигляд

$$H = \lambda\varphi = \lambda u. \quad (1.24)$$

Диференціальне рівняння для функції λ має вигляд

$$\frac{\partial \lambda}{\partial t} = -\frac{\partial H}{\partial T} = 0. \quad (1.25)$$

Рішення даного рівняння має вигляд

$$\lambda(t) = C_1 = \text{const}. \quad (1.26)$$

З урахуванням цього, гамільтоніан набуває вигляду

$$H = C_1 u. \quad (1.27)$$

Оптимальне керування не залежить від t та визначається знаком сталої інтегрування C_1 : якщо $C_1 > 0$, то оптимальним керуванням буде $u_{opt} = U$, якщо $C_1 < 0$, оптимальним керуванням буде $u_{opt} = -U$, тобто оптимальне керування має вигляд

$$u_{opt}(t) = U \operatorname{sgn} C_1. \quad (1.28)$$

Підстановка виразу (1.28) в (1.23), приводить до наступного рівняння

$$\frac{dT}{dt} = U \operatorname{sgn} C_1. \quad (1.29)$$

Зважаючи на те, що права частина диференціального рівняння (1.29) не залежить від часу, воно може бути проінтегроване

$$T = U \operatorname{sgn} C_1 t + C_2. \quad (1.30)$$

Сталі інтегрування знаходяться з початкової умови

$$C_2 = T^{(0)}. \quad (1.31)$$

З умови для кінцевої точки $T^{(k)}$ при $t = t^{(0)} = 0$ випливає, що $T^{(k)} = U \operatorname{sgn} C_1 t^{(k)} + T^{(0)}$, відповідно

$$C_1 = \operatorname{sgn}\left(T^{(k)} - T^{(0)}\right). \quad (1.32)$$

Отже, час, що витрачається на перехід з початкового стану в кінцевий при оптимальному керуванні, може бути визначений таким чином

$$\frac{|T^{(k)} - T^{(0)}|}{Ut^{(k)}} = 1. \quad (1.33)$$

Оптимальне керування може бути отримане підстановкою (1.32) в (1.28)

$$u_{opt} = U \operatorname{sgn}\left(T^{(k)} - T^{(0)}\right). \quad (1.34)$$

Оптимальна траєкторія процесу в цьому випадку має вигляд

$$x = \left[U \operatorname{sgn}\left(T^{(k)} - T^{(0)}\right) \right] t + T^{(0)}. \quad (1.35)$$

Для розрахунку оптимального керування необхідно знати початковий та кінцевий стани $T^{(0)}$ та $T^{(k)}$, де $T^{(0)}$ – значення температури в початковий момент часу, що відповідає моменту відбору першої проби на хімічний аналіз; $T^{(k)}$ – таке значення температури, що забезпечує необхідну швидкість хімічного процесу доведення вмісту i -го хімічного елемента до заданого.

1.3. Особливості керування роботою електродугової печі в режимі міксеру в складі плавильно-заливальної системи

Схема, що представляє зв'язок елементів технологічної системи, в якій центральне місце займає електродугова піч-міксер, показана на рис. 1.11.

Плавильна ділянка I може складатися власне з електродугової печі як єдиного агрегату, в якому здійснюється і плавка, і термочасна обробка розплаву – накопичення розплаву та витримка при заданій температурі, стабілізація хімічного складу сплаву, підігрів розплаву; або первинного плавильного агрегату, в якому здійснюється розплавлення шихти, та вторинного агрегату – електродугової печі-міксера, в якій здійснюється термочасова обробка.

Плавильно-заливальна ділянка II (рис. 1.11) включає електродугову піч-міксер, двопозиційний заливальний автомат і заливальну ділянку ливарного конвеєра. На рис. 1.11 стрілками показано напрям руху конвеєра зі встановленими на нього зібраними під заливку формами, і напрям обертання стійки заливального автомата з встановленими на консолях ковшами, один з яких (що знаходиться праворуч) заповнений розплавом, а другий (що знаходиться зліва) порожній і готовий під прийом розплаву з електродугової печі.

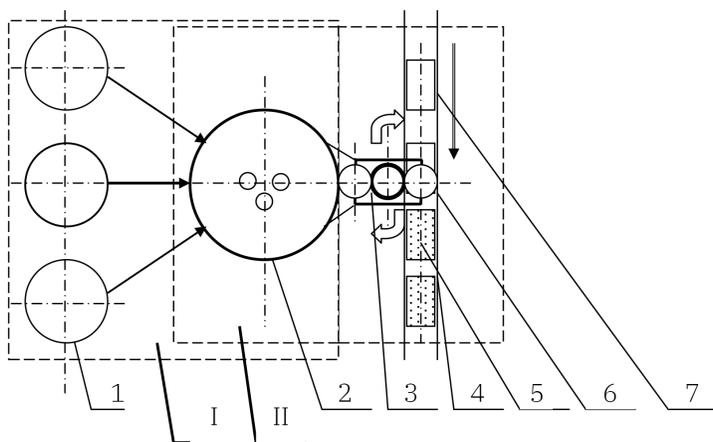


Рис. 1.11 – Технологічна схема плавильно-заливальної системи:
I – плавильна ділянка; II – плавильно-заливальна ділянка;
1 – первинний плавильний агрегат (вагранка, електродугова піч);
2 – електродугова піч-міксер; 3 – двопозиційний заливальний автомат;
4 – ливарний конвеєр; 5 – залита ливарна форма; 6 – ливарна форма, що заливається на позиції заливання; 7 – зібрана під заливання форма

Принципова схема формування циклограми роботи печі та керуючих впливів у процесі плавки та робота виконавчих механізмів показана на рис. 1.12, в якому прийняті такі позначення: ВМ1 – виконавчий механізм перемикання ступеня напруги трансформатора, ВМ2 – виконавчий механізм нахилу печі, ВМ3 – виконавчий механізм переміщення електродів, ВМ4 – виконавчий механізм відкривання робочого вікна, ВМ5 – виконавчий механізм введення феросплавів.

Задаючи на початку процесу загальну потребу у розплаві за зміну, реалізацією алгоритму, викладеного у роботі [8], будувється оптимальна технологічна схема плавки [9]. Однією з основних завдань системи керування піччю, що працює у складі ливарного конвеєра, відповідно до побудованої технологічної схеми плавки, є контроль маси розплаву, що видається на конвеєр. Даний контроль може здійснюватися за допомогою вагодозуючого пристрою, включеного до складу системи керування приводом нахилу-реверсу печі.

Блок-схема вагодозуючого пристрою представлена на рис. 1.13. Схема складається з блоку живлення, трьох силовимірювальних тензодатчиків, пристрою автоматичної установки системи «на нуль» (АУН) та ваговимірювального пристрою (ВП), який через релеїний блок керує приводом печі. Тензодатчики виконані у вигляді пружної балки з встановленими на неї 4 напівпровідниковими тензоелементами.

Останні з'єднані за мостовою схемою, напруга на яку подається від автономного джерела живлення. Вагодозуючий пристрій бере участь у процесі прямого ходу печі (злив розплаву з печі в ківш на ділянці заливки ливарного конвеєра), зупинка печі (процес зливу) і реверс печі. Датчики встановлені на робочому столі заливального автомата таким чином, щоб центр ваги зваженої частини дозатора постійно знаходиться в межах трикутника, вершинами якого є тензодатчики. Всі датчики з'єднані послідовно і, з огляду на лінійність їх статичної характеристики та однакову чутливість усіх датчиків, сумарний сигнал, пропорційний навантаженню, не залежить від переміщення центру тяжіння при заливці.

Вагодозуючий пристрій працює наступним чином (рис. 1.13 та 1.14).

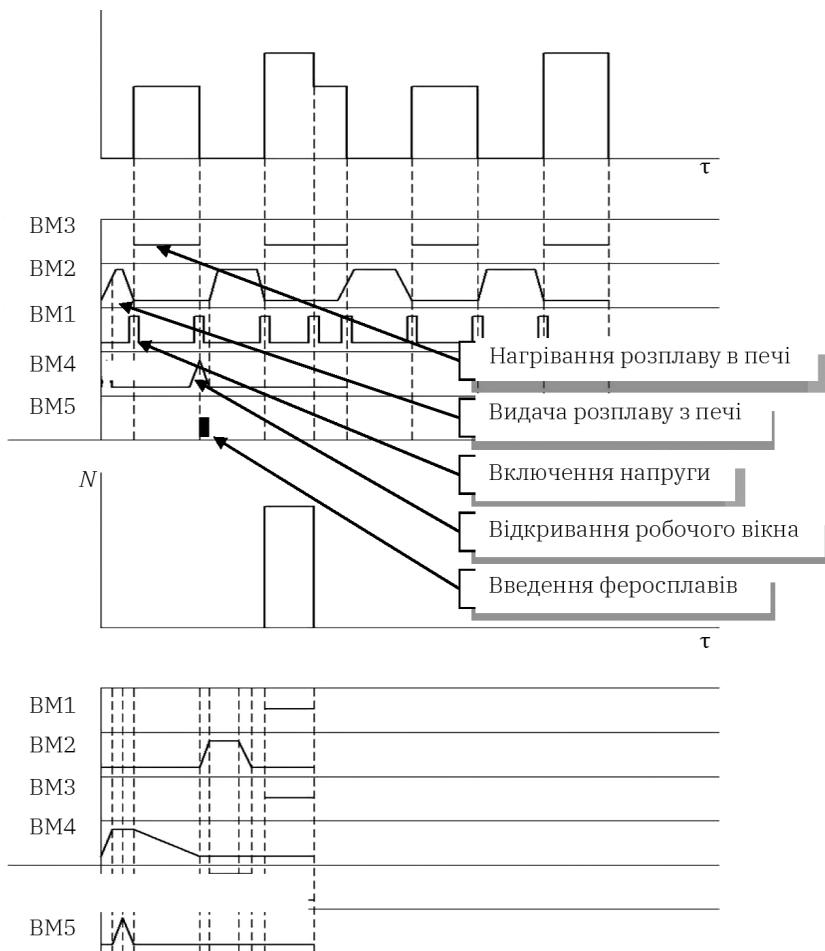


Рис. 1.12 – Принципова схема формування циклограми роботи печі та керуючих впливів

Як тільки ваговимірювальна платформа заливальної ділянки конвеєра зафіксує навантаження від зібраних форм із заданою металоємністю, відповідний сигнал керування подається на

гідророзподільник приводу нахилу печі. Відповідно до логічної умови, що вимагає відключення в цей момент часу печі, спрацьовує регулятор перемикачання напруги (РПН) та піч відключається. Гідропривід механізму нахилу печі виконує операцію нахилу і розплаву починає зливатися в ківш, встановлений на ваговимірвальній платформі заливального автомата. При видачі розплаву з печі і заповненні ковша, розташованого на позиції заливки автомата, датчики перетворюють масу розплаву в електричний сигнал, реєстрований пристроєм АУН. Внаслідок того, що пристрій АУН працює за компенсаційною схемою, у момент, коли він зареєструє нову вагу, струм у ланцюгу «датчики – АУН» дорівнюватиме нулю. При підключенні в цей ланцюг послідовно АУН ваговимірвального приладу ВП та відключення двигуна реохорда приладу АУН шкала приладу ВП залишатиметься на нульовій позначці доти, поки маса розплаву в ковші не почне збільшуватися, відповідно маса розплаву печі не почне зменшуватися. Зміна маси розплаву в печі при виливанні її у ківш, що перебуває в позиції заливки, реєструється лише приладом ВП, так як двигун реохорда АУН у цей час вимкнено. Після видачі певної дози розплаву прилад ВП подає сигнал на припинення заливки. Одночасно з цим замикаються контакти реле РП-5 і пристрій АУН знову виводить систему на нуль. Таким чином, при виливанні з печі кожної чергової порції розплаву вимірвальний пристрій робить відлік ваги розплаву, що виливається з печі, від нуля.

Живлення системи керування процесом дозування розплаву при видачі його з печі до ківша здійснюється від мережі змінного струму 220В. Частина системи живиться постійним струмом із напругою 24В. Постійний струм служить для живлення релейного блоку керування та приводу повороту печі. Вимикач ВК1 служить для подачі напруги на двигун приводу повороту печі, вимикач ВК2 – для підготовки пуску повороту та для зупинки приводу повороту печі, вимикач ВК3 – для підключення живлення приладів АУН та ВП, а вимикач ВК4 – для визначення загальної маси розплаву в печі та для виведення ваговимірвального пристрою на нуль.

Ваговимірвальний пристрій має два контакти – 1ВП та 2ВП, робота яких відповідає 3-х позиційній схемі регулювання. Контакт 1ВП подає сигнал на зупинку печі, у результаті витрата розплаву

поступово зменшується, а контакт 2ВП подає сигнал на відсікання струменя шляхом зворотного руху печі. Включення дозатора на видачу дози розплаву здійснюється короткочасним натисканням кнопки КЗ. При цьому включається та стає на саможивлення реле РП1. Спрацьовує замикаючий контакт РП1 ланцюга живлення робочого ходу двигуна, і блокується реле РП2, що керує зворотним ходом двигуна при відсіканні.

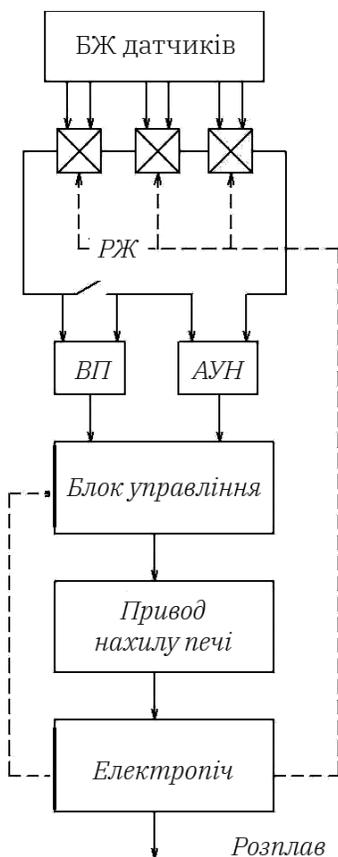


Рис. 1.13 – Блок-схема вагодозуючого пристрою печі

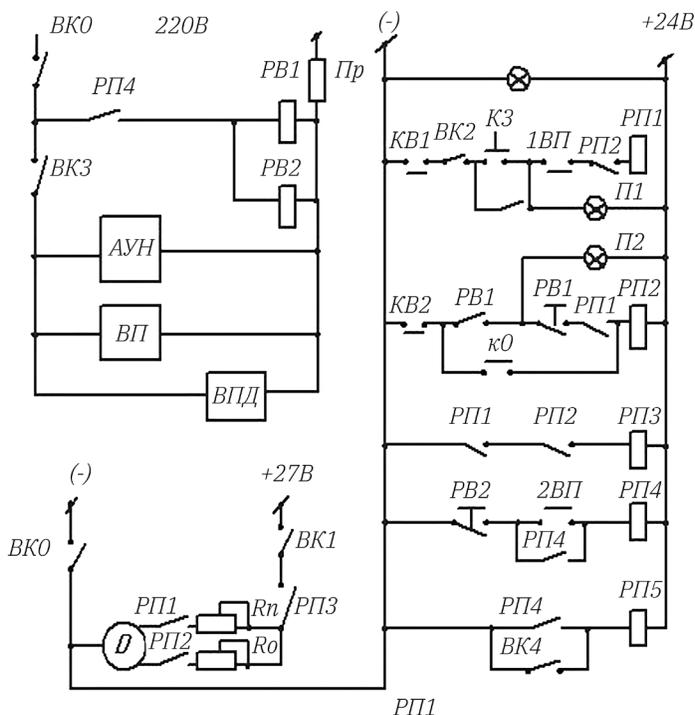


Рис. 1.14 – Релейно-контактна схема керування приводом повороту електродугової печі

Як тільки з печі виллється певна кількість розплаву, контакти вагодозуючого приладу 1ВП розімкнуться і двигун зупиниться. Видача розплаву з печі після зупинки двигуна відбуватиметься з швидкістю, що все зменшується. Коли з печі виллється ще деяка доза розплаву, розімкнуться контакти 2ВП ваговимірювального приладу, спрацює реле РП4, яке стане на саможивлення, увімкнуться реле часу РВ1 і РВ2, а також реле РП5. Реле РП5 виведе ваговимірювальний пристрій на нуль.

При включенні котушки реле РВ1 відразу ж замкнеться її контакт у ланцюзі реле РП2 (замикаючий контакт без витримки часу),

яке здійснює реверс двигуна приводу печі – відсічення. Після закінчення часу, достатнього для відсічення, інший контакт реле РВ1 (розмикаючий) – контакт з витримкою часу при розмиканні – спрацює та знеструмить РП2. Увімкниться реле РП3 – рух печі припиниться.

Як тільки вагодозуючий пристрій повернеться на нуль, розімкнеться контакт у ланцюзі реле РП4 (розмикаючий контакт з витримкою часу при розмиканні), що викликає вимкнення реле РП5 і котушок реле часу РВ1 і РВ2.

Описана система вирішує завдання керування процесом видачі необхідної порції розплаву з печі відповідно до оптимальної технологічної схеми термочасової обробки [8, 9]. Умови роботи вагодозуючого пристрою повинні бути узгоджені як з роботою плавильної печі, що розглядається як машина-автомат, так і з роботою ливарного конвеєра.

Причому це узгодження передбачає можливість підвищення якості сплаву та мінімальні енергетичні витрати на процес плавки, а також можливість переведення системи з початкового стану, що оцінюється параметрами $\left\{ F_i(0) = F_i \Big|_{t=\tau_s(u)} \right\}$, у заданий стан $\left\{ F_i^c \right\}$ при генерації конвеєром заявки на розплав в момент часу $\tau_s(u)$ в найкоротші терміни. Тут через $\left\{ F_i^c \right\}$ позначено множину заданих значень вмісту елементів хімічного складу чавуну.

Видача порції розплаву з печі і відповідне зменшення об'єму розплаву в печі і площі реакційної поверхні (рис. 1.9) призводить до того, що розплав, що залишився в печі, прогрівається швидше.

В результаті навіть при незмінному ступені напруги трансформатора швидкості окислювально-відновних реакцій збільшуються внаслідок швидшого нагрівання ванни. Таким чином, сам процес видачі розплаву печі є тим фактором, який змінює тепловий стан ванни.

Для розрахунку оптимального керування необхідно знати початковий та кінцевий стани значення температури в початковий момент часу, що відповідає моменту відбору першої проби на хімічний аналіз $T^{(0)}$, та таке значення температури, що забезпечує необхідну швидкість хімічного процесу доведення вмісту i -го хімічного

елемента до заданого значення ($T^{(k)}$). Відомі якісні оцінки перепаду температур свідчать, що перепад температури може становити $1^\circ/\text{см}$ вглиб ванни і по горизонту. Кількісна оцінка має на меті розрахунок температурного поля із заданою точністю.

Для реалізації процедури проведення грубої оцінки зв'язку між температурою ванни та її об'ємом необхідно зробити певні припущення. Вихідними даними для цього можуть бути результати вимірювання температури розплаву під час випуску його з печі в заданий час. Максимальна температура розплаву досягається у зоні дії дуг, тобто у зоні, обмеженій максимальним діаметром розпаду електродів. Теплоємність чавуну невисока, більшість тепла починає розсіюватися по внутрішньому простору печі, тому температура ванни починає падати вглиб і за радіусом горизонту.

Температура розплаву при випуску регламентована. Після випуску певної порції розплаву і в момент повернення печі у вихідне положення розплав, що залишився, охолоджується. Швидкість охолодження тим більше, чим менше об'єм розплаву печі. Для відновлення заданого температурного режиму піч вмикається на підігрів і розплав знову перегрівается до заданої температури. При наступному випуску розплаву його температура відповідає заданій, проте температура, що фіксується пірметром, відповідає температурі дзеркала металу, горизонт якого став нижчим. Між двома сусідніми вимірами існує тимчасовий зсув, протягом якого змінилася координата по висоті розплаву. Результат виміру, отриманий при цьому, може бути використаний для визначення фактичної температури розплаву на глибині

$$h_i = h_{i-1} - \Delta h, \quad (1.36)$$

де h_i – координата висоти дзеркала металу в момент випуску розплаву t_i ; h_{i-1} – координата висоти дзеркала металу у попередній момент часу випуску t_{i-1} ; Δh – перепад висоти дзеркала розплаву за час між сусідніми випусками розплаву.

Внутрішній профіль дугової печі відповідає зовнішньому профілю поверхні розплаву.

За наявності оптимальної технологічної схеми роботи електродугової печі в режимі міксеря, побудованої з урахуванням

критеріїв мінімізації енерговитрат і часу простоїв ливарного конвеєра, пов'язаних з відсутністю розплаву, що видається з печі, і максимізації якості розплаву за хімічним складом, для визначення фактичної температури розплаву у відповідні моменти часу має контролюватись температура. Математичне очікування температури розплаву у відповідні моменти часу розраховуються обробкою результатів паралельних вимірів на кожному горизонті дзеркала розплаву, положення якого залежить від маси розплаву в печі в даний момент часу.

На рис. 1.15 представлений один із можливих варіантів розподілу значень температури на поверхні дзеркала розплаву за даними вимірювань.

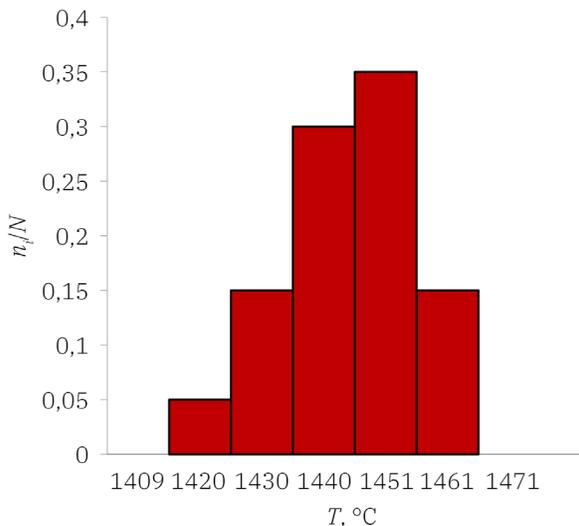


Рис. 1.15 – Гістограма розподілу температури на поверхні дзеркала розплаву

За результатами побудови гістограми та перевірки статистичної гіпотези щодо близькості закону розподілу температури до нормального робляться висновки та визначаються остаточно математичне очікування та середнє квадратичне відхилення значень

температури в даному процесі. Відповідно до цього визначається температурний режим термочасової обробки за різної маси розплаву в печі відповідно до технологічної схеми.

Профіль ванни дугової електропечі показано на рис. 1.16, а залежність маси розплаву печі від глибини ванни, для прикладу 10-тонної печі показано на рис. 1.17.

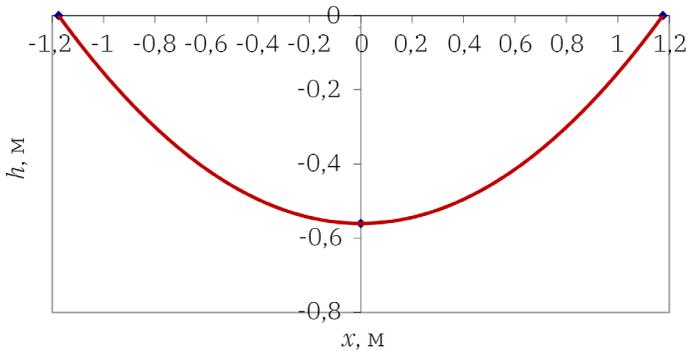


Рис. 1.16 – 2D-профіль ванни дугової електропечі

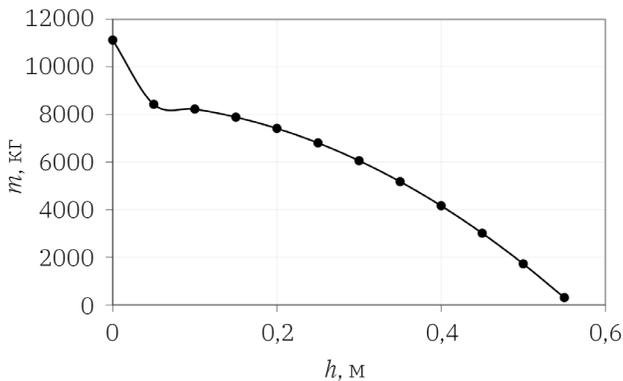


Рис. 1.17 – Залежність маси розплаву печі від глибини ванни для дугової електропечі ємністю 10 т

Приклад температурного профілю електродугової печі-міксе-ра ємністю 10 т, побудований за даними експериментально-промислових досліджень, показано на рис. 1.18.

Як було зазначено вище, температура розплаву в печі після випуску певної його порції в ківш починає швидко знижуватися, що пов'язано зі зменшенням об'єму ванни – швидкість охолодження тим більше, чим менше об'єм ванни і, отже, її глибина. Для відновлення заданого температурного режиму піч включається на підігрів і розплав знову перегрівається до заданої температури. Однак ККД електродугової печі в період перегріву та доведення до заданого значення не перевищує 25%, так як більша частина тепла дуг розсіюється по всьому внутрішньому простору печі. Оскільки до моменту надходження нової заявки на розплав, що генерується конвеєром, якість розплаву має відповідати заданому, що виражається умовою $\{F_i\} = \{F_i^s\}$, виникає необхідність синтезу оптимального регулятора температури, який би забезпечував переведення системи з фактичного початкового стану в кінцевий стан за мінімальний час. При цьому початковий стан оцінюється векторною функцією $F_i(t)$ у момент часу, що відповідає поверненню печі у вихідне положення після випуску розплаву, тобто в момент часу, коли об'єм ванни зменшився, а кінцевий стан оцінюється параметрами вектор-функції $\{F_i^s\}$. Зв'язок хімічного складу з температурою визначається рівнянням

$$F_i(t) = A_0 \exp \left(A_i e^{-\frac{E_i^a S}{R x_1(t)^m} t} \right), \quad (1.37)$$

де A_0 – параметр інтегрування кінетичного рівняння $F_i = \varphi(t)$, що будуватиметься на основі експериментально-промислових даних по визначенню вмісту кожного хімічного елементу в залежності від часу по ходу плавки або термочасової обробки; A_i – параметр рівняння Арреніуса; E_i^a – енергія активації хімічної реакції, у якій бере участь компонент F_i ; x_1 – температура ванни в печі; S – площа реакційної поверхні в системі, в якій протікають хімічні реакції за участю компонента F_i ; m – маса розплаву в печі (завантаження печі), кг.

Формалізація опису об'єкта керування – температурного режиму ванни в електродуговій печі, що працює в режимі міксера, може бути виконана з таких міркувань.

Відбір із печі деякої кількості розплаву призводить до збільшення кількості тепла Q_2 , що віддається ванною. Завданням керування є підтримання заданого значення температури T_0 при можливих змінах втрат тепла ванною Q_2 . Приход тепла в ванну Q_1 здійснюється від електричних дуг при включеному на вибрану ступень напруги трансформаторі. Регулювання здійснюється зміною величини Q_1 , що визначається напругою U ступені напруги трансформатора, що обрана в даний момент плавки, а переключення ступеня напруги здійснюється електроприводом. Для перемикання напруги можуть бути використані автоматичні регулятори напруги (АРН).

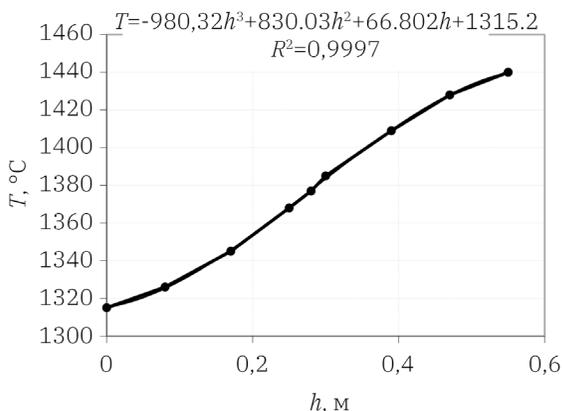


Рис. 1.18 – Приклад температурного профілю електродугової печі-міксера ємністю 10 т

Результатом розв'язання задачі пошуку оптимального керування є визначення закону зміни $U(t)$, при якому будь-яке відхилення температури ванни, що викликаються зміною її об'єму або витримкою при вимкненому трансформаторі, усувається за мінімальний час. Диференціальне рівняння, що описує зміну

температури ванни, викликане зміною її об'єму, з урахуванням описаної постановки задачі, може бути подане у вигляді

$$C_m \frac{dT}{dt} = Q_1 - Q_2, \quad (1.38)$$

де C_m – теплоємність ванни; Q_1 – тепло, що підводиться до ванни від електричних дуг; Q_2 – тепло, яке віддається ванною внаслідок зменшення її об'єму.

Якщо тепло, що підводиться до ванни від електричних дуг, пропорційне напрузі трансформатора, рівняння, що описує закон зміни величини Q_1 в залежності від напруги трансформатора, має вигляд

$$\frac{dQ_1}{dt} = kU, \quad (1.39)$$

де k – коефіцієнт, що враховує сукупний вплив характеристик трансформатора та приводу механізму перемикання ступенів напруги трансформатора.

Величина напруги U обмежена вимогами

$$-U_0 \leq U \leq U_0. \quad (1.40)$$

Змінні об'єкти керування у стаціонарному режимі пов'язані таким чином

$$T = T_0, \Delta Q_1 = \Delta Q_2. \quad (1.41)$$

За характеристику температурного режиму ванни можна прийняти величину відхилення температури ванни від заданого значення: $\Delta T = T - T_0$. Тоді для стаціонарного стану, тобто інтервалу часу витримки розплаву в печі масою m до видачі чергової його порції на конвеєр відповідно до технологічної схеми термочасової обробки, справедливе співвідношення

$$\Delta T = 0. \quad (1.42)$$

З урахуванням описаних вище міркувань, доцільно ввести нові змінні

$$x_1 = \Delta Q_1, x_2 = C_m \Delta T, q = \Delta Q_2, u = kU. \quad (1.43)$$

Тоді система рівнянь (1.38) може бути переписана у вигляді

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = u, \\ \frac{dx_2}{dt} = x_1 - q. \end{cases} \quad (1.44)$$

Обмеження на керування, при цьому, можуть бути записані у вигляді

$$-u_0 \leq u \leq u_0. \quad (1.45)$$

Для пошуку оптимального керування при такому описі об'єкта можна скористатися принципом максимуму Понтрягіна і завдання може бути сформульована наступним чином: для процесу, що описується системою рівнянь (1.44) за наявності обмежень на керування (1.45) знайти закон зміни $u(t)$ при використанні якого процес з довільного початкового стану

$$x_1(0) = x_1^{(0)}, x_2(0) = x_2^{(0)} \quad (1.46)$$

перейде в кінцевий стан

$$x_1(\tau_k) = q, x_2(\tau_k) = 0 \quad (1.47)$$

за мінімальний час τ_k .

Гамільтоніан має вигляд

$$H = \lambda_1 u + \lambda_2 (x_1 - q). \quad (1.48)$$

Оскільки керування u входить лінійно до рівняння (1.44), що описує процес, оптимальне керування буде кусково-постійною функцією $u(t)$, що приймає в інтервалах сталості граничні значення з обмежень (1.45). При цьому максимальне значення функції (1.48) досягається в тому випадку, якщо при виборі знаку керуючого впливу дотримується така умова:

$$u_{opt} = \begin{cases} u_0 & \text{якщо } \lambda_1 > 0, \\ -u_0 & \text{якщо } \lambda_1 < 0, \end{cases} \quad (1.49)$$

або

$$u_{opt}(t) = u_0 \operatorname{sgn} \lambda_1, \quad (1.50)$$

де

$$\operatorname{sgn} x = \begin{cases} +1 & \text{якщо } x > 0, \\ 0 & \text{якщо } x = 0, \\ -1 & \text{якщо } x < 0. \end{cases} \quad (1.51)$$

Система диференціальних рівнянь для функцій $\lambda_1(t)$ та $\lambda_2(t)$ має вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \lambda_1}{\partial t} &= -\frac{\partial H}{\partial x_1} = -\lambda_2, \\ \frac{\partial \lambda_2}{\partial t} &= -\frac{\partial H}{\partial x_2} = 0. \end{aligned} \quad (1.52)$$

Безпосереднім інтегруванням (1.52) отримуються функції:

$$\lambda_1(t) = -C_2 t + C_1, \lambda_2(t) = C_2. \quad (1.53)$$

Оскільки функція $\lambda_1(t)$ – це лінійна функція t і тому може змінювати свій знак не більше один раз при зміні t , оптимальне керування, що описується рівнянням (1.50), має не більше однієї точки

перемикання з одного граничного значення до іншого. В інтервалах сталості керування система (1.44) може бути проінтегрована:

$$\begin{aligned}x_1(t) &= ut + C_3, \\x_2(t) &= \frac{1}{2}ut^2 + C_3t + C_4.\end{aligned}\tag{1.54}$$

При переході процесу із заданого початкового стану (1.46) в кінцевий стан (1.47) при постійному керуванні одного знаку, визначенню підлягають як постійні інтегрування C_3 і C_4 , так і кінцевий момент часу τ_k . Умови (1.46) та (1.47) дають чотири співвідношення, яким повинні задовольняти три невідомі величини: C_3, C_4, τ_k . Тому оптимальне керування повинне містити точку перемикання з одного граничного стану до іншого.

Рівняння траєкторії процесу в координатах « x_1 - x_2 » має вигляд

$$x_2 = \frac{1}{2u}x_1^2 - \frac{1}{u}qx_1 + C,\tag{1.55}$$

що отриманий інтегруванням рівняння

$$\frac{dx_2}{dx_1} = \frac{1}{u}(x_1 - q).\tag{1.56}$$

Після перетворення (1.55) рівняння траєкторії набуває вигляду

$$x_2 = \frac{1}{2u}(x_1 - q)^2 + C - \frac{q^2}{2u},\tag{1.57}$$

де стала інтегрування C може бути знайдена з умови, що траєкторія, яка описується рівнянням (1.57), проходить через задану точку $(x_1^{(0)}, x_2^{(0)})$ фазової площини

$$C = x_2^{(0)} - \frac{1}{2u}(x_1^{(0)} - q)^2 + \frac{q^2}{2u}.\tag{1.58}$$

Підстановка (1.58) в (1.57) дає

$$x_2 = \frac{1}{2u}(x_1 - q)^2 + x_2^{(0)} - \frac{1}{2u}(x_1^{(0)} - q)^2, \quad (1.59)$$

де другий і третій доданки визначають сталу C_0 , що має важливе значення для визначення траєкторії, по якій можна потрапити в кінцевий стан

$$C_0 = x_2^{(0)} - \frac{1}{2u}(x_1^{(0)} - q)^2. \quad (1.60)$$

Рівняння (1.59) описує на фазовій площині траєкторію, що проходить через довільну точку з координатами $(x_1^{(0)}, x_2^{(0)})$, у тому числі і траєкторію, що проходить через кінцеву точку, координати якої задані умовами (1.47). Отже, рівняння траєкторії, якою можна потрапити в кінцевий стан, може бути отримано підстановкою (1.47) в (1.60)

$$x_2 = \frac{1}{2u}(x_1 - q)^2. \quad (1.61)$$

Таким чином, рівняння (1.61) описує сукупність точок фазової площини, з яких перехід у кінцевий стан (1.47) можливий під час використання сталого керування.

Якщо $u = u_0$, то рівняння (1.61) має вигляд

$$x_2 = \frac{1}{2u_0}(x_1 - q)^2, \quad (1.62)$$

якщо $u = -u_0$, то рівняння (1.61) має вигляд

$$x_2 = -\frac{1}{2u_0}(x_1 - q)^2. \quad (1.63)$$

Вид траєкторії при позитивному знаку керування та негативному знаку керування показаний на рис. 1.19.

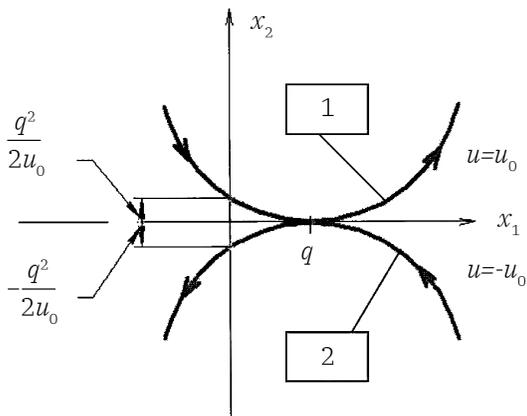


Рис. 1.19 – Вид траєкторії при позитивному (1) та негативному (2) знаках керування

Ліві та праві частини парабол (1) та (2) відповідно описують сукупність точок фазової площини, з яких можна перейти в кінцевий стан, не змінюючи знака керування. З будь-яких інших точок фазової площини переведення системи в кінцевий стан можливий тільки при використанні керуючого впливу, що має точку перемикання з одного граничного значення (1.45) в інше. Загальне рівняння цієї кривої має вигляд

$$x_2 = \frac{1}{2u_0} (x_1 - q)^2 \operatorname{sgn}(q - x_1). \quad (1.64)$$

Рівняння (1.64) описує криву, що є геометричним місцем точок перемикання оптимального керування. Отже, будь-яка траєкторія процесу, для якої лінією перемикання є ліва гілка параболу 1, в початковий момент повинна мати негативне значення керуючого впливу

$$x_2^{(0)} + \frac{1}{2u_0} (x_1^{(0)} - q)^2 > 0, \quad (1.65)$$

Як впливає з рівняння (1.64), умовою розташування точки (x_1, x_2) вище лінії перемикання є умова (1.66), а нижче лінії перемикання умова (1.67):

$$x_2 - \frac{1}{2u_0}(x_1 - q)^2 \operatorname{sgn}(q - x_1) > 0, \quad (1.66)$$

$$x_2 - \frac{1}{2u_0}(x_1 - q)^2 \operatorname{sgn}(q - x_1) < 0. \quad (1.67)$$

Отримані таким чином траєкторії спільно з лінією перемикання і є оптимальними шуканими траєкторіями, за якими процес з довільного початкового стану (1.46) переводиться в заданий кінцевий стан (1.47) за мінімальний час τ_k .

Оптимальне керування задається умовами (1.66) та (1.67) для будь-якої точки фазової поверхні. Таким чином, оптимальне керування в аналітичній формі має вигляд

$$u_{opt} = u_0 \operatorname{sgn} \left[\frac{1}{2u_0}(x_1 - q)^2 \operatorname{sgn}(q - x_1) - x_2 \right]. \quad (1.68)$$

Момент переключення τ_s та загальний час перехідного процесу τ_k можуть бути визначені спільним розв'язком рівнянь (1.54) та (1.64).

Рівняння для визначення моменту перемикання τ_s та загального часу перехідного процесу τ_k мають вигляд:

$$\tau_s = \frac{x_1^{(0)} - q}{u_0} \operatorname{sgn} \left[x_2^{(0)} - \frac{(x_1^{(0)} - q)^2}{2u_0} \operatorname{sgn}(q - x_1^{(0)}) \right] + \sqrt{\frac{1}{u_0} \left| x_2^{(0)} + \frac{1}{2}(x_1^{(0)} - q) \left[\frac{x_1^{(0)} - q}{u_0} \operatorname{sgn} \left[x_2^{(0)} - \frac{(x_1^{(0)} - q)^2}{2u_0} \operatorname{sgn}(q - x_1^{(0)}) \right] \right] \right|}, \quad (1.69)$$

$$\tau_k = \frac{x_1^{(0)} - q}{u_0} \operatorname{sgn} \left[x_2^{(0)} - \frac{(x_1^{(0)} - q)^2}{2u_0} \operatorname{sgn}(q - x_1^{(0)}) \right] +$$

$$+ 2 \sqrt{\frac{1}{u_0} \left| x_2^{(0)} + \frac{1}{2}(x_1^{(0)} - q) \left[\frac{x_1^{(0)} - q}{u_0} \operatorname{sgn} \left[x_2^{(0)} - \frac{(x_1^{(0)} - q)^2}{2u_0} \operatorname{sgn}(q - x_1^{(0)}) \right] \right] \right|}. \quad (1.70)$$

На рис. 1.20 показаний принциповий графік зміни параметрів у процесі регулювання у часі.

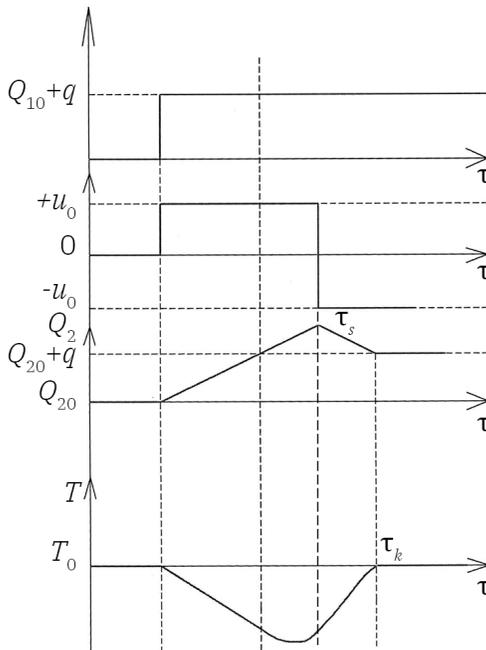


Рис. 1.20 – Графік зміни параметрів у процесі регулювання у часі

Таким чином, отримані рішення відповідають результатам рішення відомої процедури синтезу оптимального регулятора рівня рідини, універсалізація якої наведена в роботі [11].

Для застосування оптимального регулятора температури, процедура побудови якого описана вище, необхідно вимірювати наступні параметри процесу: температуру ванни T , величину тепла, що уходить Q_2 , та величину тепла, що сприймається ванною від електричних дуг Q_1 . Контроль цих параметрів та застосування описаного регулятора дозволяє отримувати оптимальні за швидкістю перехідні процеси в об'єкті регулювання.

Останнім є температурний режим електродугової печі, що працює в режимі міксеру, забезпечуючи заливальну ділянку плавлено-заливальної системи необхідною кількістю розплаву.

Регулювання температурного режиму в залежності від маси розплаву, що витримується в печі до чергового моменту видачі розплаву на заливальну ділянку ливарного конвеєра, має забезпечувати формування необхідного хімічного складу чавуну $F_i = \varphi(t)$. Це видно безпосередньо з рівняння (1.37). Хімічний склад формує мікроструктуру, за існуючої швидкості охолодження розплаву, та фізико-механічні властивості чавуну.

Для контролю ефективності регулювання має бути проведений технологічний аудит процесу в промислових умовах на працюючій печі. Він передбачає проведення хімічного аналізу по ходу плавки з фіксацією моменту відбору проби на хімічний аналіз та наступну статистичну обробку результатів хімічного аналізу по кожному елементу F_i . Для зручності вміст кожного хімічного елемента F_i надалі визначено через x_i . Відповідно, введені наступні позначення:

x_{ij} – випадкова величина, що відповідає вмісту i -го елемента хімічного складу в j -му експерименті, де під експериментом мається на увазі результат серійної плавки, тобто за умовчанням мається на увазі результат пасивного експерименту;

$x_{ij}^{(k)}$ – випадкова величина, що відповідає вмісту i -го елемента

хімічного складу в j -му експерименті в k -й момент часу;

τ – реальний час відбору проби на хімічний аналіз;

t – час відбору проби на хімічний аналіз;

$M(x_i^{(k)})$ – математичне очікування випадкової величини, що розраховується за формулою (1.71) для k -го моменту часу;

n – число паралельних експериментів, що відповідають числу результатів хімічного аналізу по i -му елементу в k -й момент часу;

N – кількість контрольованих елементів хімічного складу;

K – кількість моментів часу, для яких проводиться аналіз даних;

$S_i^{(k)2}$ – оцінка дисперсії, що розраховується за формулою (1.72);

$S_i^{(k)}$ – оцінка середньоквадратичного відхилення, що розраховується за формулою (1.73);

A – асиметрія кривої розподілу, що розраховується за формулою (1.74);

E – ексцес кривої розподілу, що розраховується за формулою (1.75);

$D(A)$ – дисперсія асиметрії, що розраховується за формулою (1.76);

$D(E)$ – дисперсія ексцесу, що розраховується за формулою (1.77);

x_{inorm} – нормоване значення випадкової величини x_i , що розраховується за формулою (1.78);

m – кількість незалежних вхідних змінних, що впливають на величину x_i ;

F – матриця плану експерименту розмірністю $n \times (m+1)$;

F^T – транспонована матриця плану експерименту;

$C = (F^T F)^{-1}$ – дисперсійна матриця;

X – матриця значень вихідних змінних у j -му експерименті для k -го моменту часу;

B – матриця оцінок коефіцієнтів рівняння регресії виду $x_i = \varphi(t)$, що розраховується за формулою (1.79):

$$M(x_i^{(k)}) = n^{-1} \sum_{j=1}^n x_{ij}^{(k)}, \quad i = 1, N, \quad k = 1, K, \quad (1.71)$$

$$S_i^{(k)2} = (n-1)^{-1} \sum_{j=1}^n \left(x_{ij}^{(k)} - M(x_i^{(k)}) \right)^2, \quad (1.72)$$

$$S_i^{(k)} = \left(S_i^{(k)2} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (1.73)$$

$$A = \frac{1}{nS_{ij}^{(k)3}} \sum_{j=1}^n \left(x_{ij}^{(k)} - M \left(x_i^{(k)} \right) \right)^3, \quad (1.74)$$

$$E = \frac{1}{nS_{ij}^{(k)4}} \sum_{j=1}^n \left(x_{ij}^{(k)} - M \left(x_i^{(k)} \right) \right)^4 - 3, \quad (1.75)$$

$$D(A) = \frac{6(n-1)}{(n+1)(n-3)}, \quad (1.76)$$

$$D(E) = \frac{24(n-2)(n-3)}{(n+1)^2(n+3)(n+5)}. \quad (1.77)$$

Підсумком використання формул (1.71)–(1.77) є отримання значень вибірових функцій для подальшого аналізу. Його першим етапом може бути регресійний аналіз, який проводиться за вибіркою нормованих значень вхідних змінних:

$$x_{inorm} = \frac{2x_i - (x_{imax} + x_{imin})}{x_{imax} - x_{imin}}, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad j = 1, 2, \dots, n,$$

$$x_{imax} = \max_j x_{ij}, \quad x_{imin} = \min_j x_{ij}. \quad (1.78)$$

$$B = (F^T F)^{-1} F^T X = CF^T X. \quad (1.79)$$

Процедура (1.78) забезпечує нормування значень вхідних змінних, що переводить їх абсолютні значення в безрозмірний діапазон $[-1; +1]$, а процедура (1.79) – розрахунок оцінок коефіцієнтів рівняння регресії виду $x_i = f(t)$. Це рівняння описує залежність вмісту в сплаві i -го елемента хімічного складу у часі протягом процесу плавки.

Підсумком використання процедур (1.78), (1.79), є отримання методом найменших квадратів (МНК) математичного опису зміни у часі вмісту i -го елемента хімічного складу чавуну.

Після цього виконуються такі кроки:

Крок 1. Статистичний аналіз точності

$$\left| \hat{b}_i - \bar{b}_i \right| < t_{кр} s_i, \quad (1.80)$$

де $\left| \hat{b}_i - \bar{b}_i \right|$ – довірчий інтервал для коефіцієнтів (1.79) рівняння регресії; $t_{кр}$ – критичне значення розподілу Стьюдента; s_i – середнє квадратичне відхилення оцінки коефіцієнта рівняння регресії b_i , що розраховується за формулою

$$s_0 = s\sqrt{c_{11}}, s_1 = s\sqrt{c_{22}}, \quad (1.81)$$

де c_{11}, c_{22} – елементи, що стоять на головній діагоналі дисперсійної матриці $C = (F^T F)^{-1}$, а s^2 розраховується за формулою

$$s^2 = \frac{S_E}{n\varphi_2}, \quad (1.82)$$

де прийняті такі позначення:

$$S_E = \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^n \left(x_{kj} - M(x^{(k)}) \right)^2, \quad (1.83)$$

$$\varphi_2 = K(n-1). \quad (1.84)$$

В (1.83), (1.84) використані такі позначення: S_E – сума квадратів, що характеризує похибки експериментів; φ_2 – число ступенів свободи.

Підсумком процедури (1.80) є побудова довірчих інтервалів для кожного коефіцієнта рівняння регресії, що подаються у вигляді

$$b_0 \pm t_{кр} s_0, b_1 \pm t_{кр} s_1. \quad (1.85)$$

Крок 2. Оцінка значимості коефіцієнтів b_i , що виконується відповідно до критерію

$$|b_i| \geq t_{кр} s_i. \quad (1.86)$$

Крок 3. Перевірка адекватності рівняння регресії, що виконується відповідно до критерію

$$F = \frac{S_D^2}{S_e^2} \leq F_{кр}. \quad (1.87)$$

В (1.87) використані такі позначення:

$F_{кр}$ – критичне значення F -розподілу зі ступенями свободи φ_1 та φ_2 ;
 S_e^2 – оцінка дисперсії похибок експерименту, що обчислюється за формулою

$$S_e^2 = \frac{S_E}{\varphi_2}; \quad (1.88)$$

S_D^2 – оцінка дисперсії неадекватності рівняння регресії, що обчислюється за формулою

$$S_D^2 = \frac{nS_R}{\varphi_1}, \quad (1.89)$$

де nS_R – сума квадратів, що характеризує неадекватність рівняння регресії

$$S_R = \sum_{k=1}^K \left(\hat{x}_k - M(x^{(k)}) \right)^2, \quad (1.90)$$

де \hat{x}_k – розрахункове значення змісту i -го елемента хімічного складу, отримане за рівнянням регресії; φ_1 – кількість ступенів свободи

$$\varphi_1 = K - (m + 1). \quad (1.91)$$

Формули (1.71)–(1.91) дозволяють отримати статистичні дані по хімічному складу чавуну в процесі плавки та побудувати відповідні кінетичні криві.

РОЗДІЛ 2 РЕЗУЛЬТАТИ ПРОМИСЛОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПОКАЗНИКІВ ФУНКЦІОНУВАННЯ ДУПЛЕКС-ПРОЦЕСУ «ВАГРАНКА – ЕЛЕКТРОДУГОВА ПІЧ»

2.1. Схема дуплекс-процесу «вагранка – електродугова піч-міксер»

Схема дуплекс-процесу «вагранка – електродугова піч-міксер» приведена на рис. 2.1 [12, 13].

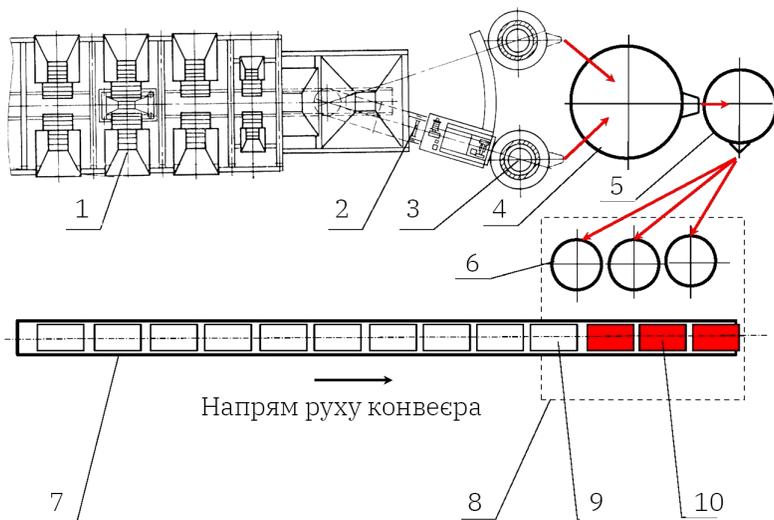


Рис. 2.1 – Схема дуплекс-процесу "вагранка – електродугова піч-міксер": 1 – роздавальна система завантаження шихти; 2 – скіповий підйомник; 3 – вагранка; 4 – міксер; 5 – роздавальний ківш; 6 – розливні ковші; 7 – ливарний конвеєр; 8 – ділянка заливання; 9 – ливарні форми, готові під заливання; 10 – залиті форми

Прийнята система управління процесами включає комплекс заходів з управління ваграночною плавкою та термочасової обробкою, що проводиться в електродуговій печі-міксері ємністю 10 т. Плавильна ділянка оснащена двома однаковими вагранками продуктивністю 5 т/год кожна, які працюють поперемінно з урахуванням регламенту проведення ремонтних робіт.

Для регулювання хімічного складу чавуну в міксер вводять феросплави у кількості, що залежить від результатів хімічного аналізу, отриманих з лабораторії, тобто залежно від стану системи. Цей вплив прийнято за керуючий, що призводить до реакції об'єкта у вигляді зміни в розплаві вмісту елемента хімічного складу, що регулюється.

Отже, керування здійснюється поза вагранкою – на рівні мікзера або роздавального ковша. Це дозволяє вважати, що ухвалення рішення про вибір керування базується на результатах хімічного аналізу розплаву, що видається з вагранки, а від якості управління вагранковим процесом залежить початковий стан об'єкта керування.

Температура є одним із основних технологічних чинників, які впливають на формування хімічного складу сплаву. Тому регулювання температурного режиму слід розглядати як частину процесу керування формуванням кінцевого хімічного складу розплаву, що видається із вагранки. Таким чином, можна говорити про те, що хоч би яким було управління ваграночним процесом, пріоритетною є вимога близькості хімічного складу до заданого технічними умовами. Оскільки виконання цієї умови є технологічно складним, вимога може бути ослаблена запровадженням поняття міри близькості фактичного хімічного складу, що видається з вагранки, необхідному.

Це ослаблення може бути обґрунтовано тим, що в електродуговій печі-міксері, в результаті керування процесом термочасової обробки, проводиться вирівнювання (стабілізація) хімічного складу, оскільки в ньому акумулюється розплав, виданий з вагранки кількома порціями (рис. 2.2). Для доведення температури розплаву до заданого значення та підтримки температурного режиму здійснюється керування потужністю печі шляхом перемикання ступенів напруги трансформатора.

Схема процесу управління технологічною системою «вагранка – електродугова піч-міксер», орієнтована на виконання описаної вище вимоги близькості хімічного складу, що видається з вагранки, заданому хімічному складу, наведено на рис. 2.3.

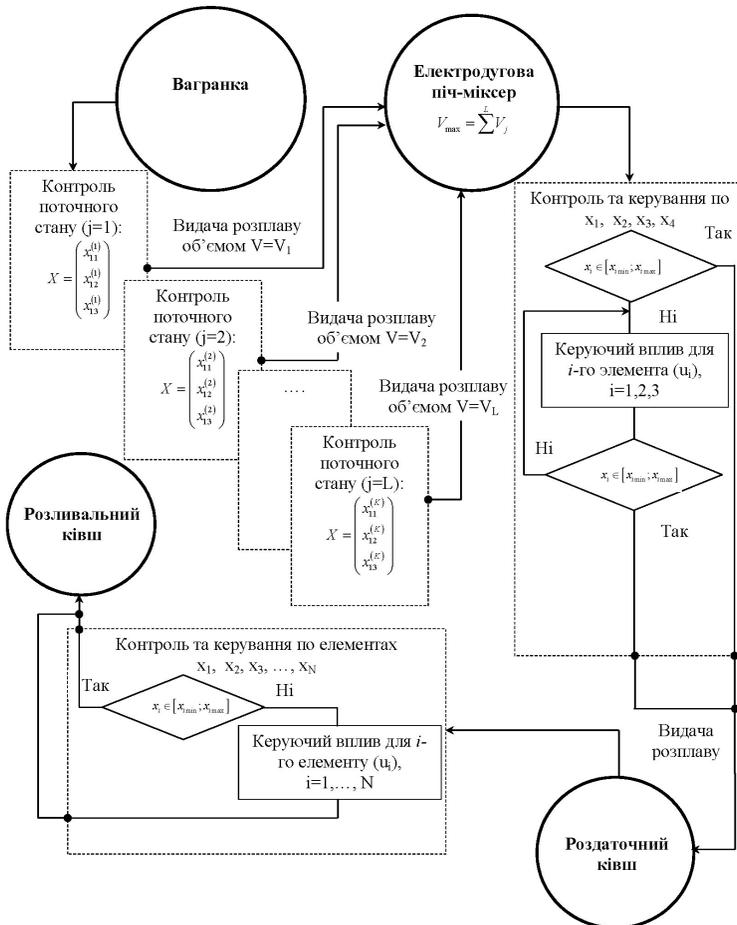


Рис. 2.3 – Схема процесу управління технологічною системою «вагранка – електродугова піч-міксер»

З рис. 2.3 випливає, що оцінка стану системи «вагранка – електродугова піч-міксер» повинна виконуватися в режимі серійних плавок шляхом збору первинних даних про поточний хімічний аналіз сплаву. Статистична обробка таких даних має відбуватися відповідно до (1.71)–(1.77).

2.2. Показники плавки в вагранці в дуплекс-процесі «вагранка – електродугова піч-міксер»

Технічна характеристика вагранок, на яких проводились експериментально-промислові дослідження, наведена у табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Технічна характеристика вагранок

№ п/п	Найменування	Розмірність	Характеристика
1	2	3	4
1	Продуктивність	т/год	5
2	Спосіб завантаження	–	скіповий підйомник
3	Діаметр в світлі	мм	900
4	Площа перетину	мм ²	0.636
5	Корисна висота (від осі нижнього ряду фурм до рівня вікна завалки)	мм	4234
6	Число фурм I ряду	–	6
7	Число фурм II ряду	–	6
8	Число фурм III ряду	–	6
9	Розмір фурми I ряду	мм×мм	200×125
10	Розмір фурми II ряду	мм×мм	70×50
11	Розмір фурми III ряду	мм×мм	70×50

Продовження Таблиці 2.1

1	2	3	4
12	Діаметр копильника	мм	820
13	Робоча ємність копильника	м3	0.283
14	Висота від поду до шлакової льотки копильника	мм	450
15	Висота від поду до осі фурм I ряду	мм	400
16	Діаметр шлакової льотки	мм	50
17	Діаметр металеві льотки	мм	25
18	Кількість металевих льоток	–	2
19	Перетин перехідного вікна	мм×мм	120×90
20	Маса завантажуваної металевої калоші	кг	500
21	Маса холостої колоші	кг	900–930
22	Висота холостої калоші над верхньою кромкою III ряду фурм	мм	550–600
23	Тиск повітря у фурменній коробці	мм вод. ст.	600–650
24	Діаметр діафрагми на вентиляторі	мм	220

Типовий технологічний процес плавки, що реалізовувався, наведено нижче.

Плавка здійснюється після підготовки вагранки до роботи та розпалювання холостої калоші. Процес розпалювання проводиться протягом 2–3 годин. Висота холостої калоші заміряється мірним прутом. Після розгоряння коксу проводиться продування холостої калоші протягом 2–3 хв, попередньо заклавши робоче вікно. Після продування перевіряється рівень холостої калоші і у разі, якщо він нижче заданого, що становить 1250 мм, додається кокс.

Завантаження коксу здійснюється скіповим підйомником. На холосту колошу завалюється вапняк у кількості 12 кг, з метою ошлакування перших порцій коксової золи. Потім проводиться пошарове завантаження матеріалів у наступній послідовності: металева колоша (500 кг), коксова колоша (53–58 кг), флюс (16–17 кг). Флюс завантажується в бункер вагового візка безпосередньо на паливну колошу, яка вважається робочою. Щоб уникнути зіткнення вапняку з футеровкою вагранки, його завантажують у центральну частину бункера.

Компоненти металевої шихти завантажуються в наступному порядку:

- чавун у чушках;
- брухт чавунний;
- відходи власного виробництва;
- брухт сталевий.

Феросиліцій завантажується на верх металевої калоші.

Описана процедура завантаження вважається регламентованою та відповідною до нормального режиму роботи вагранки.

Після завантаження шихти до рівня вікна завалки і необхідної витримки її для природного прогріву перших металевих колош протягом 15–20 хв вагранка готова до плавки. Для початку плавки виконуються такі операції:

- відкриваються одна або дві фурмові глядалки, щоб уникнути вибуху при включенні дуття;
- включається дуття, подача його регулюється шиберами на повітропроводі (тиск має становити 580–630 мм вод. ст.);
- у разі перших порцій металу в копильнику металева лютка зашпаровується формувальним складом.

У процесі плавки чавун з вагранки безперервно надходить у копильник, з якого метал видається в роздавальні ковші ємністю 2000 кг.

Після кожного випуску чавуну із копильника металева летка закривається глиняною пробкою. Приблизно через 15–20 хв після пуску дуття шлакова летка для спуску шлаку закривається і відкривається в процесі плавки в міру необхідності. Попередньо включається подача води на жолоб, яким шлак і вода направляються в приймальну яму. При контакті шлаку з водою відбувається його грануляція. Гранульований шлак із приймальної ями періодично видаляється грейфером. При кожному відкриванні шлакової льотки дуття тимчасово вимикається.

Розплавлений шлак, спускаючись по стінках шахти, зустрічає біля фурм холодне повітря, охолоджується, густіє і осідає на шматках коксу біля фурм. Таким чином відбувається намерзання шлаку, що призводить до зменшення живого перерізу фурм, якими повітря потрапляє в шахту вагранки. Витрата повітря може зменшитися на 30–40%, що призводить до зниження продуктивності вагранки і температури чавуну.

Зашлаковані фурми чистяться через оглядові вікна за допомогою лому, короткими ударами проштовхуючи зашлакований кокс і нарости всередину вагранки. Для більш швидкого усунення зашлакування через вікна завалки засипається плавиковий шпат в центр шахти в кількості до 5–6 кг.

Управління процесом ваграночної плавки здійснюється з метою забезпечення заданих показників процесу – змінних станів, якими є температура та хімічний склад чавуну. У процесі управління вирішуються такі завдання:

- усунення зависання шихти;
- недопущення холодного ходу вагранки;
- недопущення вимушених зупинок;
- недопущення місцевого розігріву кожуха;
- недопущення прориву чавуну через під.

Усунення зависання шихти.

Зависання ліквідується ломом, вводячи його у шихту через завалочне вікно. Якщо зависання швидко усунути не вдається, припиняється подача дуття. Велике зависання шихти призводить до

вигоряння холостої колоші, тому після усунення зависання у вагранку завантажується додаткова паливна калоша (коксове пересипання) в обсязі до 2–3 робочих коксових колош.

Холодний хід вагранки.

Головною причиною холодного ходу вагранки є занижена висота холостої колоші та її неякісний розпал перед завалкою шихти. Для усунення холодного ходу у вагранку завантажується робоча коксова калоша (коксове пересипання) об'ємом 2–3 робочих коксових колош.

Вимушені зупинки.

Причинами таких зупинок може бути зупинка конвеєра ливарного або аварія обладнання. В цьому випадку для припинення роботи вагранки припиняється подача дуття, випускається весь чавун і шлак, фурми закриваються, льотки зашпаровуються свіжою формувальною сумішшю, щоб запобігти підсмоктування повітря і зупинити горіння коксу.

Місцевий розігрів кожуха.

Місцеве розігрівання кожуха візуально визначається через місцеве його почервоніння. Розігрів відбувається внаслідок вигоряння або руйнування футеровки в зоні високих температур, що призводять до того, що розпечені гази або безпосередньо чавун і шлак стикаються з металевим кожухом. Щоб уникнути пропалу кожуха на розігріте місце спрямовують струмінь води до тих пір, поки місце розігріву не потемніє. Після цього робота вагранки продовжується, оскільки чавун, що проник до кожуха, твердне і стає захистом від подальшого пошкодження.

Прорив чавуну через под.

Проникнення чавуну в стик подини з футеровкою виникає внаслідок слабкого набивання або набивання сухою формувальною землею. У такому разі на перегріте місце, що визначається візуально за його почервонінням, спрямовують струмінь води.

Якщо прорив чавуну відбувається через днище, дуття припиняється і випускається чавун. У отвір, що утворився внаслідок прориву, вдавлюється глина і зовні наноситься додатковий шар глини, що підтримується металевою плиткою і підпіркою.

Час закінчення плавки визначається залежно від потреби в рідкому металі та кількості невивпавленого металу, що знаходиться у вагранці.

Після завантаження останньої колоші кількість повітря, що подається, підтримується постійним, для чого шибер на повітропроводі поступово закривається.

Про повне проплавлення шихти свідчить припинення стікання крапель чавуну біля фурм. Якщо це відбувається, то дуття зупиняють, шибер закривається повністю, а фурмові глядалки відкриваються, щоб уникнути вибуху. З копильника випускається весь метал і відкриваються дверцята копильника, випускається шлак.

У процесі ваграночної плавки контролю підлягають такі технологічні параметри:

- тиск повітря;
- температура рідкого металу;
- хімічний склад і механічні властивості чавуну, що виплавляється.

Параметри та засоби вимірювання тиску повітря.

Повітря, що подається у вагранку вентилятором, повинно бути під тиском вище атмосферного, щоб подолати опір стовпа шихтових матеріалів. Надлишковий тиск має бути 600–650 мм вод. ст. Для вимірювання тиску дуття в коробці фурменній служить U-подібний рідинний манометр.

Контроль температури рідкого металу.

Вимірювання температури рідкого металу проводиться на жолобі вагранки та при заливанні у формі оптичним пірометром випромінювання. Температура чавуну на жолобі вагранки має становити $\geq 1340^{\circ}\text{C}$.

Контроль хімічний склад чавуну, що виплавляється.

Контроль здійснюється експрес-лабораторією. Заливка першої проби на повний хімічний аналіз проводиться при 3–4-му випуску металу з копильника. Наступні спроби відбираються через кожні 2 години роботи. Відбір проб на контроль вмісту Si проводиться через кожні 30 хв.

Контроль механічних властивості чавуну, що виплавляється.

Контроль проводиться центральною заводською лабораторією з проб на повний хімічний аналіз.

В табл. 2.2 наведені дані хімічного аналізу ваграночної плавки по основних елементах: C, Si, Mn, S, P

Таблиця 2.2 – Хімічний склад чавуну ваграночної плавки

№ з/п плавки	Хімічний склад, %				
	C	Si	Mn	S	P
1	3.75	2.37	0.76	0.057	0.06
2	3.66	1.67	0.77	0.084	0.082
3	3.71	2.47	0.69	0.064	0.09
4	3.51	2.33	0.72	0.061	0.082
5	3.67	2.21	1.51	0.055	0.08
6	3.42	2.14	0.93	0.06	0.092
7	3.57	2.29	0.7	0.08	0.11
8	3.33	2.46	0.75	0.072	0.097
9	3.42	2.14	0.93	0.06	0.092
10	3.45	2.88	1.15	0.08	0.11
11	3.4	2.7	0.86	0.068	0.102
12	3.36	2.37	0.87	0.082	0.085
$M(x_i^{(k)})$	3.521	2.336	0.887	0.069	0.09
$S_i^{(k)}$	0.1461	0.3019	0.2359	0.0106	0.014

На основі розрахунків $M(x_i^{(k)})$ та $S_i^{(k)}$ можуть бути визначені з ймовірністю p_i діапазони вмісту i -го хімічного елементу в розплаві, якій видається з вагранки в електродугову піч-міксер (табл. 2.3). В промислових дослідженнях використовувалась піч ДЧМ-10.

Таблиця 2.3 – Діапазони хімічного складу чавуну ваграночної плавки та ймовірності попадання значень вмісту в ці діапазони

Ймовір- ність	Хімічний склад, %				
	C	Si	Mn	S	P
	3.38–3.81	2.03–2.94	0.7–1.18	0.048–0.09	0.076–0.118
p_i	0.83	0.92	0.92	1	0.92

З табл. 2.2 випливає, що розплав, який видається з вагранки, не є стабільним по хімічному складу. Відповідно до цих даних мають обиратися режими нагріву та доведення хімічного складу до заданого в електродуговій печі-міксері.

2.3. Показники термочасової обробки в електродуговій печі-міксері в дуплекс-процесі «вагранка – електродугова піч-міксер»

Рідкий чавун з вагранки подається до ДЧМ-10 (рис. 2.2 та 2.3), в якому здійснюється термочасова обробка розплаву, що має на меті доведення температури чавуну до заданої (1370–1400°C) та доведення хімічного складу до заданого, у відповідності до технічних умов.

Технічна характеристика електропечі-міксера ДЧМ-10 наведена у табл. 2.4.

Таблиця 2.4 – Технічна характеристика електродугової печі-міксера ДЧМ-10

№ п/п	Найменування	Розмір- ність	Характе- ристика	Примітки
1	2	3	4	5
1	Ємність печі	т	10	по рідко- му чавуну
2	Потужність трансформатора	кВА	2250	–

Продовження Таблиці 2.4

1	2	3	4	5
3	Напруга низької сторони трансформатора	В	150 125 105	з відхиленнями $\pm 5\%$
4	Максимальний струм печі	А	10400	–
5	Число фаз	–	3	–
6	Частота струму	с^{-1}	50	–
7	Діаметр електрода	мм	350	–
8	Діаметр розпаду електродів	мм	900	–
9	Хід електрода	мм	1200	–
10	Швидкість переміщення електродів	м/мин	1.65	–
11	Діаметр ванни на рівні порогу	мм	2350	–
12	Глибина ванни до порога	мм	560	–
13	Розміри робочого вікна	мм×мм	780×460	ширина× висота
14	Час нахилу печі на 40°	с	56	мінімальне
15	Питома витрата електроенергії на підігрів чавуну	кВт·ч/т	105	при підігріві від 1400 до 1550°C
16	Витрата охолоджувальної води	$\text{м}^3/\text{ч}$	15	–
17	Футеровка	–	–	кисла
18	Загальна вага металоконструкції печі	т	23.6	–

Підготовка міксера до роботи включає наступні операції:

1. Огляд електродів та візуальна оцінка відповідності їх довжини заданої. Довжина електродів має бути не менше 2.4 м. Короткі електроди нарощуються перед початком плавки. Нарощування електродів здійснюється на електрод, закріплений в електродотримачі печі. Перед встановленням у піч електроди витримуються в цеху в сухому місці щонайменше 10 діб. Нарощування виконується в наступний спосіб:

– в ніпельне гніздо нарощуваного електрода ввертається графітовий ніпель;

– у ніпельне гніздо нового електрода ввертається металевий ніпель;

– новий електрод підводиться мостовим краном до електрода, що нарощується;

– новий електрод опускається і навертається на графітовий ніпель до кінця, зазор між електродами не допускається;

– електрод розкріплюється в електродотримачі та мостовим краном опускається на необхідну глибину;

– електрод закріплюється в електродотримачі;

– видаляється металевий ніпель.

2. Очищення жолобів міксера від наростів металу та шлаку та підправлення їх футеровки.

3. Очищення та заправлення порогів та завантажувального вікна. Ущільнення заправної маси здійснюється починаючи з внутрішньої сторони порога.

4. Перед включенням напруги перевіряється стан економайзерів та водопровідних комунікацій шляхом подачі води до системи. При цьому економайзери та водопровідна комунікація не повинні давати течі, а вода зі зливальних труб має нормально надходити у приймальну лійку.

5. Перевіряється справність заземлення корпусу міксера зовнішнім оглядом заземлювальних шин на відсутність розривів (заземлювальні шини пофарбовані в чорний колір).

6. Якщо міксер перебуває після капітального ремонту, здійснюється його розігрів. Для цього на подіну навпроти електродів укладається 2–3 обгорілих шматка графітизованих електродів і включається напруга. Внаслідок цього відбувається сушіння та

розігрів футеровки до температури 800–850°C. Залишки електродів після розігріву міксеру витягуються через завантажувальне вікно.

Передача ваграночного чавуну в міксер та його перегрів здійснюється в такий спосіб:

1. Порожній розігрітий барабанний ківш ємністю 2 т встановлюється мостовим краном на самохідний електровізок і переміщається до працюючої вагранки.

2. Ківш наповнюється чавуном, не доливаючи його на 1/7 об'єму.

3. Візок із ковшем, заповненим розплавом ваграночного чавуну, переміщається в зону роботи мостового крана, що обслуговує міксер.

4. Ківш знімається з візка мостовим краном, подається до міксеру та метал зливається в міксер через зливний жолоб завантажувального вікна.

5. Після зливу в міксер двох тон чавуну дзеркало металу покривається 1–2 лопатами сухого піску марки «КО2».

6. Після зливу в міксер 4–5 ковшів ваграночного чавуну проводиться перегрів металу до температури 1370–1400°C.

Коригування хімічного складу здійснюється шляхом введення присадок, залежно від елемента хімічного складу, що має відхилення від заданого вмісту, що випадають за межі поля допуску. Введення присадок є керуючим впливом, що має на меті перевести вміст елемента хімічного складу всередину поля допуску. Такі керуючі дії наведені у табл. 2.5 та 2.6.

Доведення рідкого чавуну до заданого хімічного складу по марганцю (0.6–0.8)% проводиться в ковші присадкою на дно ковша подрібненого до фракції 1–10 мм просушеного доменного 70% феромарганця.

Вміст у рідкому чавуні кремнію коригується присадкою в міксер доменного 25%-го феросиліцію.

При підвищеному вмісті сірки (0.12–0.16)% проводиться операція десульфурації. Для цього:

– на дно ковша дається прожарена (волога $\leq 0.5\%$) кальцинована сода у кількості 6–10 кг/т рідкого;

– після заповнення чавуном ковша на 1/3 на дзеркало металу дається подрібнений до фракції 1–15 мм висушений (волога $\leq 0.5\%$) вапняк у кількості 3–4 кг/т рідкого.

Таблиця 2.5 – Кількість та спосіб введення присадок
 для зниження вмісту елементів у чавуні

Найменування присадок	Кількість присадки, кг на 1 т рідкого чавуну, що вводяться в міксер ДЧМ-10					
	Si, %			Mn, %		Cr, %
	0.1	0.2	0.3	0.1	0.2	0.1
Лом сталевий	12	25	38	42	84	74
Чавун передільний	26	51	76	83	166	148
	При цьому вноситься Mn, %			При цьому вноситься Si, %		При цьому вноситься: Mn = 0.17% Si = 0.1%
	0.018	0.038	0.057	0.06	0.12	

Таблиця 2.6 – Кількість та спосіб введення присадок
 для підвищення вмісту елементів у чавуні

Найменування присадок	Кількість присадки, кг на 1 т рідкого чавуну, що вводяться в міксер ДЧМ-10					
	Si, %	Mn, %	Cr, %	C, %	Ti, %	Cu, %
	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Феросиліцій ФС-25	4.4	–	–	–	–	–
Феромарганець ФМн-70	–	1.3*	–	–	–	–
Ферохром	–	–	1.85	–	–	–
Чавун передільний	–	–	–	25	–	–
Чавун титаномі-дістий	–	–	–	–	13.3	36.3

Примітка: * – дається на дно ковша

Контроль температури розплаву, що випускається з електропечі, здійснюється пірометром спектрального відношення, встановленим у приміщенні пульта управління міксера. Температура металу повинна бути в діапазоні 1370–1400°C.

Для правильної організації перегріву ваграночного чавуну кожні дві тони рідкого чавуну, випущені з електропечі, поповнюються заливкою нових порцій ваграночного чавуну. Таким чином, у ванні міксера постійно тримається 9–10 тон металу.

Метал зливається в міксер і випуск металу здійснюється з міксера тільки при знятій напрузі та піднятих електродах.

За шлаком у печі здійснюється постійний контроль. Шлак має бути рідким і покривати все дзеркало металу у ванні. При утворенні в'язких шлаків вони скачуються і наводиться новий шлак присадкою сухого кварцового піску.

Дані про перебіг чавуну в міксері в кожній зміні заносяться в шихтовий журнал, зокрема фіксуються: хімічний склад, температура, механічні властивості, кількість перегрітого чавуну і витрата електроенергії.

Закінчення перегріву характеризується такими технологічними операціями:

1. Після зняття напруги шлак скачується з печі, а метал, що залишився, зливається в ківш.

2. Подина ретельно очищається від залишків шлаку та металу. За наявності зривів подини і неможливості очистити її звичайним шляхом від залишків рідкого металу, метал загущується сухим кварцовим піском і вигрібається скребком через вікно завалки.

3. Подина та укуси заправляються сумішшю кварцового піску з рідким склом (модуль 2.3–2.6, щільність 1480–1520 кг/м³) у співвідношенні за вагою 10:1. Після засипання суміш ущільнюється заправною лопатою.

4. При нарості подини вона «стравлюється» за допомогою подачі на нарости вапняку або плавикового шпату.

5. Звід, електродотримачі та струмопровідні частини обдуваються стисненим повітрям.

В табл. 2.7 наведені дані хімічного аналізу чавуну по основних елементах: C, Si, Mn, S, P, що видається електродуговою піччю-міксером на ділянку заливки.

Таблиця 2.7 – Хімічний склад чавуну, що видається
 електродуговою піччю-міксером на ділянку заливки

№ з/п плавки	Хімічний склад, %				
	C	Si	Mn	S	P
1	3.4	2.07	0.6	0.089	0.09
2	3.52	2.26	0.69	0.084	0.089
3	3.55	1.78	0.5	0.06	0.096
4	3.57	2.07	0.53	0.059	0.097
5	3.5	2.82	0.54	0.075	0.079
6	3.46	2.69	0.63	0.067	0.067
7	3.34	2.51	0.56	–	–
8	3.38	2.51	0.68	–	–
9	3.48	2.79	0.5	–	–
10	3.51	2.75	0.48	–	–
11	3.43	2.29	0.56	–	–
12	3.43	2.4	0.58	–	–
13	3.37	2.24	0.55	–	–
14	3.35	2.07	0.6	–	–
15	3.5	2.04	0.65	–	–
16	3.5	2.32	0.65	–	–
17	3.49	2.24	0.43	–	–
18	3.54	2.02	0.44	–	–
$M\left(x_i^{(k)}\right)$	3.462	2.326	0.565	0.086	0.072
$S_i^{(k)}$	0.0708	0.3005	0.0774	0.0114	0.0125

Діапазони вмісту елементів C, Si, Mn, S, P в чавуні, що видається електродуговою піччю-міксером на ділянку заливки, та ймовірності p_i попадання значень вмісту в ці діапазони, наведені в табл. 2.8.

Таблиця 2.8 – Діапазони хімічного складу чавуну, що видається електродуговою піччю-міксером на ділянку заливки, та ймовірності попадання значень вмісту в ці діапазони

Ймовір- ність	Хімічний склад, %				
	C	Si	Mn	S	P
	3.39–3.6	2.33–2.93	0.49–0.72	0.072– 0.0125	0.086– 0.0114
p_i	1	0.89	1	1	1

Порівняння даних по $S_i^{(k)}$, наведених в табл. 2.2 та 2.7, свідчить про те, що термочасова обробка розплаву в електродуговій печі-міксері стабілізує вміст вуглецю вдвічі, а вміст марганцю в 3 рази. При цьому стабільність вмісту кремнію не змінюється. Стабільність по сірці та фосфору не змінюється.

РОЗДІЛ 3

РЕЗУЛЬТАТИ ПРОМИСЛОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПОКАЗНИКІВ ФУНКЦІОНУВАННЯ ДУПЛЕКС-ПРОЦЕСУ «ЕЛЕКТРОДУГОВА ПІЧ – ЕЛЕКТРОДУГОВА ПІЧ-МІКСЕР»

3.1. Показники плавки в електродуговій печі

Узагальнено технологічний процес плавки в електродуговій печі включає операції завантаження, плавлення, випуск металу.

Завантаження.

Шихта включає в себе: чавун ливарний, чавун передільний, лом чавунний, лом сталевий, повернення власного ливарного виробництва, феросплави. Завантаження печі відбувається в наступній послідовності.

На под печі завантажуються кокс, потім чушки чавуну передільного та чавуну ливарного, лом сталевий. Маса кожного компоненту шихти на має перевищувати 30 кг.

Завалка шихти виконується в такий спосіб, щоб чушки та крупний лом знаходилися безпосередньо в зоні дії електричних дуг, а дрібний – на відкосах та поверх крупного лому. Укладка шихти має бути максимально щільною. При завалці трансформатор відключений від печі.

Плавлення.

Після розплавлення 80% шихти піч вимикається та відбувається підвалювання печі поверненням власного ливарного виробництва, сталевим та чавунним ломом. Операція повторюється 2–3 рази.

Піч вмикається та відбувається розплавлення усєї шихти, температура рідкого чавуну доводиться до 1400–1450°C. Загальна маса рідкого металу складає до 12 тон.

Піч вимикається та здійснюється відбір першої проби на хімічний аналіз в такий спосіб. В піску, насипаному на поріг завантажувального вікна, гаком робиться канавка. Нахиляючи піч в сторону завалювального вікна, наповнюється рідким металом з печі графітова ложка.

З неї відбувається заливка однієї проби-клин для визначення хімічного складу спектральним способом та скрапової проби для визначення вуглецю аналітичним способом. Для отримання скрапової проби необхідно на підігрітій чистий металевий лист, встановлений під нахилом, в поперек листа злити тонким струменем рідкий метал з графітової ложки. Отримані в такий спосіб зразки передаються в центральну заводську лабораторію (ЦЗЛ) для визначення хімічного складу чавуну. За результатами хімічного аналізу майстер плавильної ділянки розраховує та коригує хімічний склад присадками феросплавів, чушкового чавуну та лому сталевого (табл. 2.5 та 2.6), доводячи хімічний склад до необхідного відповідно до технічних умов.

В процесі плавки необхідно слідкувати за станом шлаку в печі. Шлак має бути рідким та покривати усе дзеркало металу у ванні. При утворенні в'язких шлаків вони скачуються та наводиться новий шлак присадкою сухого кварцового піску, боя шамоту та вапняка з розрахунку 10:2:1 відповідно. Загальна кількість шлаку не має перевищувати 10% від загальної металозавалки.

Випуск металу.

До моменту завершення плавки да початку заливки форм температура металу доводиться до 1450–1500°C. Контроль температури розплаву здійснюється пірометром спектрального відношення, що встановлений в приміщенні пульта керування ДЧМ-10 при випуску металу з печі.

Перед випуском металу з печі летка розчищається та роздавальний ківш наповнюється рідким металом на 7/8 висоти. З цього ковша повторно відбирається проба-клин на хімічний аналіз та 2 рази в зміну заливаються в піщані форми зразки для визначення механічних властивостей чавуну.

Остаточним хімічним складом чавуну є результати хімічного та спектрального аналізів проб, що взяті із зразків для механічних випробувань.

Випуск металу здійснюється при відключеній печі та піднятих електродах. Після випуску подина печі відчищається від залишків шлаку та металу. За наявності ушкоджень подини та неможливості очистити її від залишків рідкого металу останній загущується сухим кварцовим піском та вигрібається скребком через

завалювальне вікно. Після цього подина та відкоси печі заправляються сумішшю кварцового піску з рідким склом модулем 2.3–2.6, питомою щільністю 1480–1520 кг/м³ у співвідношенні за вагою 10:1. Після засипки суміш ущільнюється ручним інструментом. Звод, електродотримачі та струмопровідні частини печі обдуваються стисненим повітрям.

В табл. 3.1 наведені дані хімічного аналізу чавуну електродугової плавки по основних елементах: С, Si, Mn, S, P.

Таблиця 3.1 – Хімічний склад чавуну електродугової плавки

№ з/п плавки	Хімічний склад, %				
	С	Si	Mn	S	P
1	2	3	4	5	6
1	3.23	1.7	0.3	0.034	0.064
2	3.23	1.7	0.41	0.062	0.058
3	3.24	1.86	0.42	0.051	0.071
4	3.28	1.93	0.43	0.045	0.063
5	3.29	1.94	0.46	0.048	0.072
6	3.29	1.96	0.48	0.037	0.05
7	3.29	2.0	0.5	0.03	0.084
8	3.29	2.03	0.51	0.026	0.066
9	3.31	2.07	0.51	0.031	0.081
10	3.31	2.09	0.54	0.04	0.056
11	3.32	2.12	0.55	0.017	0.056
12	3.34	2.19	0.55	0.048	0.039
13	3.34	2.24	0.56	0.035	0.053
14	3.34	2.24	0.57	0.032	0.07

Продовження Таблиці 3.1

1	2	3	4	5	6
15	3.34	2.24	0.58	0.022	0.072
16	3.35	2.27	0.65	0.079	0.048
17	3.36	2.36	0.66	0.029	0.063
18	3.36	2.41	0.67	0.032	0.067
19	3.36	2.43	0.67	0.029	0.058
20	3.38	2.45	0.67	0.036	0.065
21	3.38	2.5	0.71	0.031	0.065
22	3.39	2.5	0.74	0.032	0.06
23	3.39	2.57	0.74	0.018	0.078
24	3.4	2.57	0.75	0.034	0.081
25	3.4	2.59	0.77	0.031	0.084
26	3.45	2.66	0.81	0.026	0.067
27	3,45	2.7	0.82	0.025	0.084
28	3.5	2.76	0.82	0.028	0.063
29	3.51	2.81	0.92	0.032	0.071
30	3.52	2.88	0.97	0.029	0.078
31	3.52	2.9	1.07	0.027	0.07
$M\left(x_i^{(k)}\right)$	3.36	2.31	0.64	0.035	0.066
$S_i^{(k)}$	0.081	0.338	0.174	0.0126	0.0112

Діапазони вмісту елементів С, Si, Mn, S, P в чавуні електродугової плавки та ймовірності p_i попадання значень вмісту в ці діапазони наведені в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Діапазони хімічного складу чавуну електродугової плавки та ймовірності попадання значень вмісту в ці діапазони

Ймовір- ність	Хімічний склад, %				
	C	Si	Mn	S	P
	3.28–3.52	1.97–2.99	0.47–0.97	0.022– 0.06	0.06– 0.089
p_i	0.97	1	1	0.94	0.97

Порівняння даних по $S_i^{(k)}$, наведених в табл. 2.6 та 3.1, свідчить про те, що електродугова плавка забезпечує майже таку саму стабільність по вмісту вуглецю та кремнію, як і термочасова обробка розплаву в електродуговій піч-міксері. Але позитивний висновок не можна зробити відносно стабільності по марганцю – вона зменшена в 2.2 рази. Стабільність по сірці та фосфору в обох процесах майже однакова.

3.2. Конструювання функціоналу для пошуку оптимального керування термочасовою обробкою в електродуговій печі-міксері та принцип формування оптимальної технологічної схеми процесу

У дуплекс-процесі «електродугова піч – електродугова піч-міксер», так само, як і в дуплекс-процесі «вагранка – електродугова піч», до моменту закінчення першого етапу – плавки і, отже, до моменту початку другого етапу – етапу термочасової обробки, має бути забезпечена вимога близькості хімічного складу до заданого. Однак якщо електродугова піч працює в режимі міксера, то вимогу до пошуку оптимального керування процесом необхідно доповнити, ввівши додаткові вимоги, що формуються з боку заливальної ділянки ливарного конвеєра. Останній вимагає видачу розплаву в деякі моменти часу, в результаті чого об'єм розплаву в електродуговій печі-міксері зменшується, при цьому

зменшується глибина ванни, площа дзеркала металу (площа розділу фаз метал-шлак) (рис. 1.9 та 1.17) і збільшується швидкість охолодження ванни при знятій напрузі трансформатора. Інакше кажучи, змінюються значення змінних у рівнянні (1.37).

Завданням керування при цьому може бути регулювання рівня розплаву в електродуговій печі-міксері і температури розплаву. З іншого боку, задоволення потреби конвеєра в розплаві безпосередньо пов'язані з якістю самого розплаву, тобто має місце конкуренція в цілях керування – вимоги продуктивності печі можуть бути конфліктними по відношенню до вимог отримання високої якості сплаву. Виникаюча проблема може бути описана наступним чином: при витримці розплаву деякої маси в електродуговій печі-міксері при певній температурі розплаву протікають окислювально-відновні реакції, в результаті яких хімічний склад розплаву змінюється в часі. При цьому на момент видачі певної порції розплаву на конвеєр, через перебіг цих реакцій, величина відхилення за вмістом елементів може бути будь-якою. Необхідність поєднання різних цілей керування плавильно-заливною системою на етапі термочасової обробки вимагає доповнення підходів до пошуку оптимального керування – формування аналітичного опису об'єкта керування на етапі термочасової обробки, вибір початкового та кінцевого стану, вибір структури критерію якості керування (функціоналу керування). Описані вище обставини та практичні особливості промислового виробництва вимагають розпочинати вирішення проблеми пошуку оптимального керування на другій ділянці плавильно-заливальної системи саме з конструювання функціоналу керування.

Існуючі уявлення про формування функціоналу для визначення оптимального керування технологічними процесами припускають необхідність вибору з двох альтернативних міркувань – максимізації продуктивності устаткування чи мінімізації витрат за його функціонуванні. При розгляді як об'єкту керування процесу термочасової обробки розплаву в електродуговій печі-міксері, що працює в якості елемента плавильно-заливальної системи, виникає питання, які ж з міркувань на вибір функціоналу можуть вважатися пріоритетними. З одного боку, продуктивність електродугової печі-міксера має бути узгоджена з продуктивністю ливарного конвеєра. Якщо потреба у розплаві не забезпечується, виникають простой

та відповідні збитки через брак металу. З іншого боку, наявність у печі «зайвої» кількості розплаву призводить до витрат, пов'язаних з перевитратою електроенергії, бо ККД електродугової печі в період перегріву та доведення за хімічним складом не перевищує 25%. Таким чином, в процесі керування термочасовою обробкою в електродуговій печі-міксері необхідно вміти визначати моменти часу видачі розплаву з печі на ливарний конвеєр і кількість розплаву, що видається. Причому відповідні параметри повинні бути такими, щоб забезпечувалися і вимоги до продуктивності формувально-заливальної ділянки цеху, і вимоги до мінімізації енерговитрат на термочасову обробку. Понад те, названі параметри повинні враховувати головний критерій якості керування – необхідна якість чавуну, що формується переважно його хімічним складом.

Фактично йдеться про пошук виду функціоналу, який дозволяв би знайти якийсь компроміс між названими конкуруючими вимогами до якості керування. Дуплекс процес «електродугова піч – електродугова піч-міксер», що працює в складі плавильно-заливальної ділянки та розглядається як об'єкт керування, може бути представлений еволюційною системою, для опису якої можна використовувати різні способи. Серед них: звичайні диференціальні рівняння, наприклад рівняння швидкостей хімічних реакцій, що протікають у розплаві в процесі його витримки в електродуговій печі-міксері до видачі на конвеєр, рівняння теплопровідності та гідродинаміки в системі «розплав – футерівка – шлак – атмосфера печі» і ймовірнісні поняття та методи – для оцінки ймовірності браку сплаву при вибраному способі керування і т.і. Електродугова піч-міксер і реалізований в ній процес термочасової обробки в загальному випадку можна розглядати як стохастичну систему, поведінка якої описується рівнянням, що включає в себе у загальному вигляді випадкову складову збурень $\sigma(\tau, x(\tau), u) d\xi(\tau)$, що вносяться в технологічний процес

$$dx(\tau) = a(\tau, x(\tau), u) d\tau + \sigma(\tau, x(\tau), u) d\xi(\tau), \tau \geq 0, \quad (3.1)$$

де $x(\tau)$ – фазовий вектор; u – керування, що реалізується в n -мірному факторному просторі. Вектор-функція $a(\tau, x(\tau), u)$ та матриця σ вважаються заданими.

Можливість вибору структури функціоналу може бути розглянута виходячи з належності досліджуваної системи до однієї з класичних задач [15]:

- задача Лагранжа;
- задача Майєра;
- задача Больца.

Якщо систему, що розглядається, звести до задачі Лагранжа, цільовий функціонал може бути визначений у вигляді математичного очікування

$$J(u) = M \left[\int_0^T \varphi_1(\tau, x(\tau), u) d\tau \right]. \quad (3.2)$$

За функцію $\varphi_1(\tau, x(\tau), u)$ може бути обрана функція, що зв'язує енергетичні показники роботи електродугової печі та фактичну її продуктивність у заданий момент часу. При цьому необхідно врахувати, що інтервал часу, в якому функціонує система, не заданий. Реалізація програмного керування здійснюється системою керування шляхом відключення напруги на печі та подачі команди на виконавчі механізми, що здійснюють поворот печі та випуск розплаву певної порції. Виконавчими механізмами є гідроциліндри, сигнали керування подаються на електромагніти гідророзподільників. Зміна маси розплаву, яка відбувається за короткий проміжок часу, що відповідає зливу порції розплаву, може розцінюватися як миттєвий вхідний вплив на систему. При цьому вихідними параметрами об'єкту керування є теплоенергетичні характеристики печі, її експлуатаційні показники та якісні характеристики сплаву. У будь-якому разі названі показники – суть динамічні характеристики.

Отже, обираючи як цільовий функціонал критерій якості керування виду (3.2), необхідно отримати функціональну залежність $\varphi_1(\tau, x(\tau), u)$ та визначити часовий інтервал функціонування системи.

Якщо систему, що розглядається, звести до задачі Майєра, цільовий функціонал може бути представлений у вигляді

$$J(u) = M \left[\varphi(T, x(T)) \right], \quad (3.3)$$

де $M[\varphi(T, x(T))]$ – математичне очікування функції $F(T, x(T))$, що описує фазовий вектор.

При такому виборі функціоналу необхідно, по-перше, визначити оптимальну величину T , по-друге, встановити, який вектор доцільно використовувати в контексті поставленого завдання. Якщо для функціонала (3.2) фазовим вектором є вектор з компонентами – суть енергетичними та експлуатаційними характеристиками, то для функціонала (3.3) як фазовий вектор може бути обраний вектор з компонентами, що формують якість сплаву. Такими компонентами є концентрації елементів хімічного складу у чавуні. Отже, вибираючи як цільовий функціонал критерій якості керування виду (3.3), необхідно отримати залежність $\varphi(T, x(T))$ та визначити часовий інтервал функціонування системи.

Якщо систему, що розглядається, звести до задачі Больца, цільовий функціонал може бути представлений у вигляді

$$J(u) = M \left[\varphi(T, x(T)) + \int_0^T \varphi_1(\tau, x(\tau), u) d\tau \right]. \quad (3.4)$$

Функціонал виду (3.4) потребує знання функцій $\varphi(T, x(T))$ и $\varphi_1(\tau, x(\tau), u)$, а також інтервал часу, на якому функціонує система. Мінімізація функціоналу (3.4) передбачає мінімізацію сумарного критерію, що враховує енергетичні та експлуатаційні витрати, а також витрати від отримання неякісної продукції, тобто браку чавуну.

Якщо дві перші складові характеризують експлуатаційну ефективність об'єкту керування, то остання характеризує якісну ефективність процесу термочасової обробки. Так як природа об'єкту керування носить ймовірнісний характер, необхідно отримати кількісний критерій, що характеризує ймовірність того, що система досягне заданої цільової множини. Останнім може бути хімічний склад чавуну $F = \{F_i\}$, оптимальний з погляду обраного критерію – фізико-механічних чи спеціальних властивостей чавуну та його мікроструктури.

За такої постановки відповідний цільовий функціонал виходить із функціоналу (3.4) шляхом підстановки $\varphi_1(\tau, x(\tau), u) = 0$ та $\varphi(T, x(T)) = 1$ при $x(T) \in \Omega$, та $\varphi(x(T)) = 0$ при $x(T) \in R_n \setminus \Omega$ за умови, що величина T знайдена, де Ω – задана цільова множина з n -мірного евклідового простору R_n . Отже, у цьому випадку функціонал (3.4) дорівнює ймовірності досягнення системою (3.1) в кінцевий момент часу T заданої цільової множини Ω .

Вважаючи, що ефективність процесу плавки оцінюється якістю одержуваного сплаву, а останній є функцією хімічного складу, можна вважати нормальним таке функціонування системи, при якому її координати належать множині Ω на всьому інтервалі руху. Тому функціонал може бути записаний у вигляді

$$P\{y_i(T) \in \Omega, 0 \leq \tau \leq T\} \rightarrow \max. \quad (3.5)$$

Застосування функціоналу (3.5), як і функціоналів (3.2)–(3.4), вимагає попереднього визначення моменту закінчення руху, що є, по суті, випадковою величиною, яка залежить від конкретної траєкторії.

Позначивши момент часу першого досягнення системою (3.1) цільової множини Ω через $\tau_y(u)$ при керуванні u та початковій умові $y(0) = y$, задача зводиться до мінімізації по u функціоналу $M \tau_y(u)$, тобто до задачі стохастичної швидкодії. У цьому випадку потрібна мінімізація функціоналу вигляду

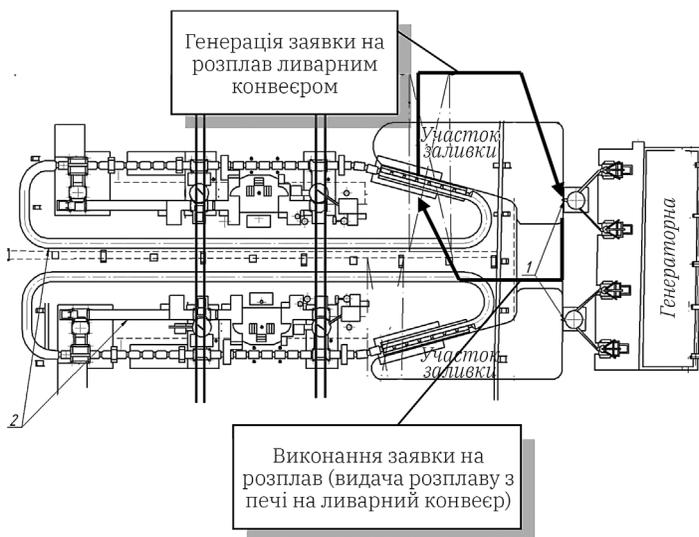
$$J = M \int_0^{\tau_y} \varphi_1(\tau, y(\tau), u) d\tau. \quad (3.6)$$

Безпосереднє застосування будь-якого з перерахованих функціоналів визначення оптимального керування передбачає знання аналітичного опису функцій $\varphi(T, y(T))$, $\varphi_1(\tau, y(\tau), u)$ та методу визначення оптимальної величини $\tau_y(u)$. У задачі керування термочасовою обробкою розплаву в електродуговій печі-міксері ці складові не задані, а складність об'єднання в одному цільовому функціоналі

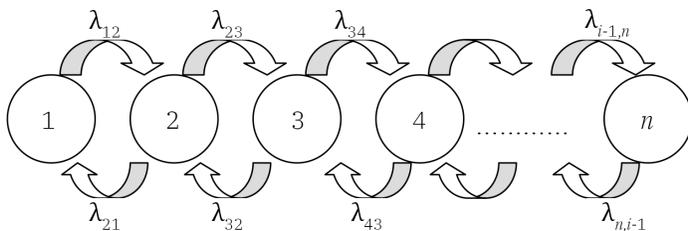
експлуатаційної та якісної складових об'єкту керування робить складним аналітичний опис функціоналу, прийнятний для пошуку оптимального керування електродуговою піччю-міксером, що працює у складі ливарного конвеєра. Для вирішення названих проблем необхідний диференційований підхід: на першому етапі необхідно визначити принцип формування цільового функціоналу за експлуатаційними критеріями, на другому етапі – отримати структуру цільового функціоналу, на третьому етапі – розробити процедуру визначення керування, що залежить від оптимальної технологічної схеми процесу. При цьому технологічна схема процесу є графічною моделлю керованого процесу і включає наступні параметри: час витримки розплаву в печі, масу розплаву в печі в даний інтервал часу (об'єм ванни), кількість розплаву, що видається на ливарний конвеєр в даний момент часу.

Кінцевим результатом реалізації такого підходу є розрахунок оптимальної маси розплаву, що має витримуватись в електродуговій печі-міксері протягом інтервалу $[0, \tau_p]$, визначення моментів часу подачі сигналу на відключення напруги (перемикання ступеня напруги трансформатора) та виконавчі механізми повороту печі. Для цього електродугова піч-міксер може бути представлена елементом системи масового обслуговування (СМО) «електродугова піч-міксер – ливарний конвеєр» у вигляді багатоканального вузла обслуговування зі змінним числом каналів для обслуговування заявок на розплав, що генеруються ливарним конвеєром (рис. 3.1).

Ливарний конвеєр генерує потік заявок на розплав із деякою інтенсивністю λ_{ji} . Електродугова піч-міксер видає на конвеєр розплав із деякою інтенсивністю λ_{ij} . Якщо в заданий момент часу надходження заявки вона не може бути виконана, тобто електродугова піч-міксер не видає розплав, ливарна форма вважається не залитою і цей факт кваліфікується як відмова в обслуговуванні. Заливка здійснюється тільки тієї наступної форми, до надходження якої на ділянку заливки розплав може бути випущений з печі. Отже, систему «електродугова піч-міксер – ливарний конвеєр» можна розглядати як СМО з відмовами. Функціонування системи «електродугова піч-міксер – ливарний конвеєр» формально може бути представлена пуасонівським потоком заявок, що генерується ділянкою заливки і характеризується середнім числом заявок, що надходять в одиницю часу.



a



б

Рис. 3.1 – Схема СМО «електродугова піч-міксер – ливарний конвеєр»: *a* – план ділянки цеху: 1 – електропіч; 2 – ливарний конвеєр; *б* – граф станів системи

Якщо уявити електродугову піч-міксер багатоканальним вузлом обслуговування, то каналами вузла слід обрати ту величину ємності печі, яка відповідає фактичній потребі заливальної

ділянки в рідкому металі в одиницю часу, або об'єму ливарного ковша. Відмінною особливістю такого багатоканального вузла є кількість каналів, що змінюється в часі внаслідок випуску розплаву або додавання нових його порцій. Отже, при такому розгляді оптимізація структури СМО полягає не просто у визначенні оптимального числа каналів, але у визначенні оптимального числа каналів у кожний момент часу в процесі термочасової обробки розплаву в електродуговій печі-міксері.

До структури функціоналу, що мінімізується, входять:

- простої на ділянці заливки;
- інтенсивність потоку заявок на розплав, що генерується конвеєром;
- ймовірність відмови в обслуговуванні заявки внаслідок відсутності необхідної кількості розплаву в печі або неможливості його видачі на конвеєр через недостатню якість;
- середня кількість використовуваних каналів, тобто кількість розплаву в печі в заданий момент часу;
- витрати, пов'язані з перевитратою електроенергії.

Вихідними даними для конструювання функціоналу є час виконання заявок та інтенсивність потоку заявок на розплав. Час виконання заявки на розплав включає час виконання всіх необхідних операцій управління з доведення розплаву до заданого хімічного складу і температури для видачі розплаву з печі на конвеєр, а інтенсивність потоку заявок відповідає фактичній продуктивності комплексу ливарного обладнання для виготовлення ливарних форм під заливку.

Для визначення фактичних показників, виходячи з яких може бути виконано моделювання роботи системи, обов'язковою умовою є проведення експлуатаційних досліджень. Для цього допустимо проведення як короткочасних, так і довгострокових досліджень. Мета обох типів досліджень – визначення фактичних показників роботи системи «електродугова піч-міксер – ливарний конвеєр». Дослідження має проводитися в такий спосіб. При формуванні заявки на розплав, що генерується конвеєром, фіксується час надходження заявки. Усі моменти часу заявок утворюють пуасонівський потік заявок. Середня кількість таких подій в одиницю часу є інтенсивністю потоку.

Для розрахунку інтенсивності потоку заявок на розплав може бути використаний будь-який з наведених нижче способів:

– розрахунком, використовуючи МНК, – визначення оцінок коефіцієнтів залежності

$$\ln \frac{1}{[1 - F_c(\tau_{ij})]} = f(\tau), \quad (3.7)$$

де $F_j(\tau_{ij})$ – накопичена частість заявок на розплав, що розраховується за формулою

$$F_j(\tau_{ij}) = \frac{(j - 0.5)}{N}; \quad (3.8)$$

j – кількість інтервалів часу, менших чи рівних τ_{ij} ; N – число заявок;

– за формулою

$$\lambda(\tau) = \frac{\Delta N(\Delta\tau)}{N(\tau)\Delta\tau}, \quad (3.9)$$

де $\Delta N(\Delta\tau)$ – кількість заявок, що надійшли в систему за час $\Delta\tau$; $\Delta\tau$ – інтервал часу, що розглядається. Слід зауважити, що точність розрахунку збільшується із зменшенням величини інтервалу часу $\Delta\tau$.

– за даними короткострокових чи довгострокових спостережень. У цьому варіанті фіксують, яка кількість заявок була зареєстрована протягом однієї години (n) і яка кількість годин відповідає такій кількості заявок (f_n). Середня інтенсивність потоку заявок визначається за формулою

$$\lambda = \frac{1}{N} \sum n f_n. \quad (3.10)$$

Під фактичною продуктивністю слід розуміти кількість тон сплаву, що виплавляється за певний проміжок часу. Величина цього показника розраховується на підставі проведення

хронометражних спостережень за роботою плавильного обладнання та статистичної обробки отриманих даних

$$\bar{Q} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Q_i n_i, \quad (3.11)$$

де N – тривалість вибраного проміжку часу; Q_i – реєстрована маса розплаву, що випускається з печі; n_i – число годин, протягом якого зареєстрована дана маса розплаву, що випускається.

Розрахунок дисперсії фактичної годинної продуктивності виконується за формулою

$$D^2(Q) = \frac{1}{N-1} \left(Q_i^2 n_i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Q_i n_i)^2 \right). \quad (3.12)$$

Розрахунок середнього квадратичного відхилення фактичної годинної продуктивності виконується за формулою

$$D(Q) = \sqrt{D^2(Q)}. \quad (3.13)$$

Довірчий інтервал для фактичної годинної продуктивності має вигляд

$$I = (\bar{Q} - \varepsilon D(Q) / \sqrt{N}; \bar{Q} + \varepsilon D(Q) / \sqrt{N}). \quad (3.14)$$

Оптимальна маса розплаву в печі відповідає мінімуму функціоналу, що відображає економічний критерій ефективності функціонування СМО з відмовами [16].

$$W(n) = S_1 \lambda P_{отк}(n) + S_2 [n - m_k(n)], \quad (3.15)$$

де S_1 і S_2 – функції штрафу; λ – інтенсивність потоку заявок, що генеруються ливарним конвеєром; n – число каналів СМО; $P_{отк}(n)$ – ймовірність відмови в обслуговуванні заявки, яка залежить від числа каналів СМО; $m_k(n)$ – середня кількість зайнятих каналів; $S_1 \lambda P_{отк}(n)$ – функція, що описує ймовірні витрати через простій конвеєра через відсутність металу; $S_2 [n - m_k(n)]$ – функція, що описує енергетичні витрати під час роботи печі.

Задаючи як один канал обслуговування елементарний об'єм печі і вважаючи, що інтенсивність λ відповідає миттєвій продуктивності, функціонал (3.15) може бути записаний у вигляді

$$Z(m(\tau)) = S_1 Q_k P(m(\tau)) + S_2 \left[m(\tau) - \frac{Q_k - Q_k P(m(\tau))}{Q} \right], \quad (3.16)$$

де $Z(m(\tau))$ – сумарні витрати в момент часу τ , пов'язані з простоями через відсутність металу, наприклад в разі низького його якості, спричиненої недостатньою завершеністю фізико-хімічних процесів в розплаві, та наявності у печі «зайвого» металу; S_1 – собівартість 1 тони сплаву; S_2 – витрати, пов'язані з витримкою та перегріванням розплаву в печі; Q_k – інтенсивність потоку заявок на розплав, що генерується конвеєром; $P(m(\tau))$ – ймовірність простою конвеєра, тобто ймовірність того, що форми на конвеєрі не будуть залиті внаслідок відсутності розплаву; $m(\tau)$ – кількість зайнятих каналів, що відображає ККД печі в даний проміжок часу.

Мінімізація функціоналу (3.16) виконується за параметром $m(\tau)$, її мета – визначення оптимального завантаження печі в заданому проміжку часу.

Геометрична інтерпретація цього критерію наведена на рис. 3.2. По суті, вона є принциповою схемою мінімізації витрат шляхом розрахунку оптимального числа каналів СМО [17].

Ймовірність простою конвеєра визначається за формулою

$$P(n) = \frac{Q_k}{Q(n!)} \left[1 + \sum_m \frac{Q_k^m}{Q^m} \frac{1}{m!} \right]^{-1}. \quad (3.17)$$

Середня кількість зайнятих каналів розраховується за формулою

$$m_k(n) = \frac{Q_k - Q_k P(n)}{Q} = \frac{Q_k (1 - P(n))}{Q}. \quad (3.18)$$

Метою застосування функціоналу (3.16) є визначення оптимального завантаження печі (об'єму ванни) протягом усього

процесу плавки. Зміна маси розплаву печі є технологічною схемою роботи електродугової печі-міксера.

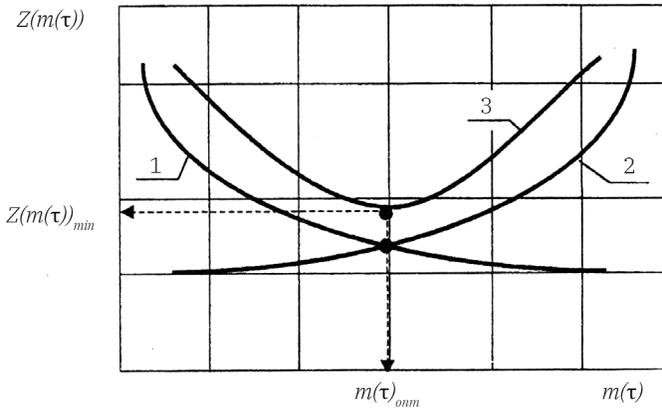


Рис. 3.2 – Геометрична інтерпретація задачі пошуку оптимального числа каналів СМО «електродугова піч-міксер – ливарний конвеєр»:

1 – крива, що характеризує витрати, пов'язані з простоями на ділянці заливки; 2 – крива, що характеризує витрати, пов'язані з перевитратою електроенергії; 3 – крива сумарних витрат

Сутність методу побудови технологічної схеми полягає в тому, що за результатами моделювання функціонування СМО «електродугова піч-міксер – ливарний конвеєр» будуються криві 1 і 2 (рис. 3.2) у кожен момент часу і розраховуються мінімуми функціоналу (3.16), що відповідає значенню $Z(m(\tau))$ у точці перетину кривих 1 та 2. Отримані таким чином результати відповідають оптимальній кількості каналів обслуговування в заданому інтервалі часу. Принципово така схема, що є оптимальною технологічною схемою процесу, показана на рис. 3.3.

По осі ординат відкладено значення об'єму рідкого металу, що знаходиться в печі в заданий проміжок часу. Східними стрілками показаний випуск розплаву в ківш, висхідними – підвалку шахти. Зрушуючи схему по осях абсцис і ординат, можуть бути змодельовані різні технологічні схеми, для кожної з яких будуються криві енерговитрат і витрат від простоїв через відсутність розплаву.

Функціонал (3.16) не враховує «якісну» складову функціоналу – у ній відсутня критерій, що характеризує якість готової продукції – металу. Якщо якість сплаву характеризується кількома параметрами, необхідно шукати компроміс, адже найчастіше той самий набір вхідних змінних по-різному впливає на різні значення показників якості сплаву. Тому додатково необхідно врахувати у структурі функціоналу якісну складову та визначити можливості застосовуваного керування процесом для задоволення заданих вимог до якості сплаву.

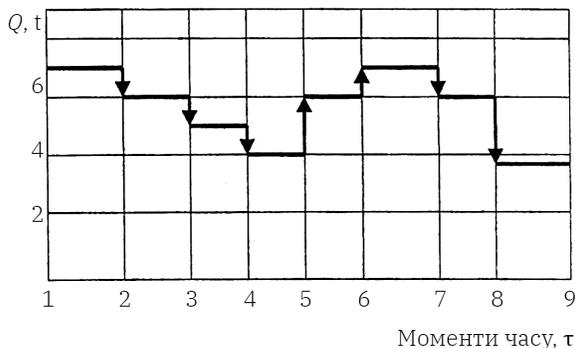


Рис. 3.3 – Формування оптимальної технологічної схеми роботи електродугової печі-міксера

Тому, зважаючи на необхідність забезпечення заданої якості сплаву, що оцінюється хімічним складом та механічними властивостями чавуну, та враховуючи вплив ємності печі на стабілізацію хімічного складу, функціонал (3.16) з урахуванням складової, що характеризує якість сплаву, набуває вигляду

$$Z(m(\tau)) = S_1 Q_k P(m(\tau)) + S_2 \left[m(\tau) - \frac{Q_k - Q_k P(m(\tau))}{Q} \right] + S_3 P(m(\tau)), \quad (3.19)$$

де S_3 – витрати через неякісний сплав; $P_B(m(\tau))$ – ймовірність браку чавуну, що залежить від кількості зайнятих каналів в даний час, що розраховується за формулою

$$B = 1 - \left[\Phi \left(\frac{C_{\max} - \bar{C}}{S_c} \right) - \Phi \left(\frac{C_{\min} - \bar{C}}{S_c} \right) \right], \quad (3.20)$$

де B – доля браку; C – узагальнене позначення елемента хімічного складу; C_{\max} – верхня межа поля допуску на вміст елемента хімічного складу сплаву; C_{\min} – нижня межа поля допуску на вміст елемента хімічного складу сплаву; S_c – середнє квадратичне відхилення вмісту елемента хімічного складу; \bar{C} – математичне очікування вмісту елемента хімічного складу сплаву.

Функціонал (3.19) поєднує в своїй структурі вимоги кількісного та якісного характеру. Вимоги кількісного характеру – задоволення заданої продуктивності за мінімальних енергетичних витрат, вимоги якісного характеру – задоволення обраним критерієм якості сплаву. Це має бути обов'язково враховано в алгоритмах керування піччю на етапі термочасової обробки, зокрема при керуванні процесами видачі розплаву за фактом генерації чергової заявки конвеєром. При цьому розрахунок моменту часу витримки розплаву до видачі чергової порції на конвеєр, що відповідає моменту $\tau_c(u)$, виявляється одним з невідомих параметрів. Невизначеність, що виникає при його оцінюванні, пов'язана з невизначеністю вхідних змінних $F_i(\tau)$, що описуються рівнянням (1.37), внаслідок протікання у ванні складних фізико-хімічних процесів, зміни маси розплаву та площі реакційної поверхні в система «розплав – шлак – футеровка». Основними фізико-хімічними процесами є окислювально-відновні реакції, які мають бути описані кінетичними рівняннями та представлені відповідними кривими. У табл. 3.3 наведено деякі основні фізико-хімічні процеси в електродуговій печі [18].

Як видно з табл. 3.3, кожен елемент хімічного складу в чавуні бере участь у послідовних і паралельних реакціях, при цьому виміряти концентрацію по ходу процесу в будь-який момент часу не представляється можливим із зрозумілих причин. Тому необхідний спосіб формального опису процесу кінетичним рівнянням в умовах апіорної невизначеності. Один із можливих способів описаний у роботі [19]. Його суть полягає в наступному. Нехай є реакційна система, в якій вихідний продукт масою m містить

$n\%$ оксиду VO , що відновлюється. Для цього в систему вводиться відновник A , внаслідок чого на контактній поверхні площею S відбувається реакція взаємодії виду



де (VO) – концентрація оксиду у вихідному продукті, % мас.; $[\text{V}]$ – концентрація готового продукту, % мас.

Таблиця 3.3 – Основні фізико-хімічні процеси в розплаві

Призначення	Реакція	Коефіцієнти (1)		Футеровка
		a_0	a_1	
Видалення з ванни P	$2[\text{P}] + 5(\text{FeO}) + 4(\text{CaO}) = 4\text{CaO} \cdot \text{P}_2\text{O}_5 + 5[\text{Fe}]$	–	–	основна
Видалення з ванни S	$[\text{FeS}] + (\text{CaO}) + \text{C} = [\text{Fe}] + (\text{CaS}) + \{\text{CO}\}$ $3[\text{FeS}] + 2(\text{CaO}) + \text{CaC}_2 = 3[\text{Fe}] + 3(\text{CaS}) + 2\{\text{CO}\}$	– –	– –	основна
Розкислення ванни Mn	$[\text{Mn}] + (\text{FeO}) = (\text{MnO}) + [\text{Fe}]$	–2.95	6440	кисла
Окислення Si	$2(\text{FeO}) + [\text{Si}] = (\text{SiO}_2) + 2[\text{Fe}]$	11.1	–19057	кисла
Відновлення Si	$(\text{SiO}_2) + 2[\text{Mn}] = 2(\text{MnO}) + [\text{Si}]$ $(\text{SiO}_2) + 2[\text{C}] = [\text{Si}] + 2\{\text{CO}\}$	4.757 17.62	–3177 –32000	кисла кисла
Окислення та відновлення Cr	$[\text{Cr}] + (\text{FeO}) = (\text{CrO}) + [\text{Fe}]$ $(\text{CrO}) + [\text{C}] = [\text{Cr}] + \{\text{CO}\}$	– –	– –	кисла кисла

Якщо прийняти за початковий стан системи s_0 стан, що характеризується початковою масою вихідного продукту з початковою концентрацією оксиду, то в результаті протікання цього процесу

відбувається зменшення маси вихідного продукту внаслідок відновлення і виділення готового продукту В з вихідного продукту. Таким чином, система переходить у стан s_1 .

Надалі можливі чотири альтернативні варіанти розвитку процесу, кожен із яких може бути охарактеризований відповідним станом:

s_1 – в систему не вводиться нова порція вихідного продукту та з неї не відводиться готовий продукт;

s_2 – із системи відводиться готовий продукт, але нова порція вихідного продукту не вводиться в систему;

s_3 – із системи не відводиться готовий продукт, але в систему вводиться нова порція вихідного продукту;

s_4 – із системи відводиться готовий продукт і вводиться нова порція вихідного продукту.

Схематично реалізація даних процесів відповідно до таких чотирьох станів представлена на рис. 3.4.

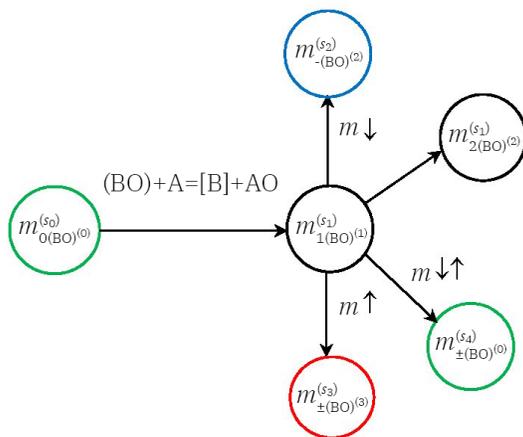


Рис. 3.4 – Схема процесу функціонування системи

На рис. 3.4 прийнято такі позначення:

$m_{0(BO)}^{(s_0)}$ – маса вихідного продукту з початковим вмістом оксиду $(BO)^{(0)}$, % по масі, відповідна початковому стану s_0 ;

$m_{1(\text{VO})^{(1)}}^{(s_1)}$ – маса вихідного продукту із вмістом оксиду (VO)⁽¹⁾, % по масі, як результат перебігу реакції (3.21), відповідна стану s_1 ,
 $m_{1(\text{VO})^{(1)}}^{(s_1)} = m_{0(\text{VO})^{(0)}}^{(s_0)} - \Delta m^-$, де Δm^- – зменшення маси вихідного продукту внаслідок протікання реакції (3.21), що призводить до зміни концентрації оксиду;

$m_{2(\text{VO})^{(2)}}^{(s_1)}$ – маса вихідного продукту із вмістом оксиду (VO)⁽²⁾, % по масі, як результат перебігу реакції (3.21), що відповідає стану s_1 ,
 $m_{2(\text{VO})^{(2)}}^{(s_1)} = m_{1(\text{VO})^{(1)}}^{(s_1)} - \Delta m^-$;

$m_{-(\text{VO})^{(2)}}^{(s_2)}$ – маса вихідного продукту із вмістом оксиду (VO)⁽²⁾, % по масі, як результат протікання реакції (3.21) та видачі із системи порції продукту, що відповідає стану s_2 , $m_{-(\text{VO})^{(2)}}^{(s_2)} = m_{1(\text{VO})^{(1)}}^{(s_1)} - m_B$, де m_B – маса готового продукту B , що видається із системи;

$m_{+(\text{VO})^{(3)}}^{(s_3)}$ – маса вихідного продукту із вмістом оксиду (VO)⁽³⁾, % по масі, як результат перебігу реакції (3.21) та введення в систему нової порції вихідного продукту, що відповідає стану s_3 ,
 $m_{+(\text{VO})^{(3)}}^{(s_3)} = m_{1(\text{VO})^{(1)}}^{(s_1)} + \Delta m^+$, де Δm^+ – збільшення маси вихідного продукту, що вводиться до системи;

$m_{\pm(\text{VO})^{(4)}}^{(s_4)}$ – маса вихідного продукту із вмістом оксиду (VO)⁽⁴⁾, % по масі, як результат перебігу реакції (3.21), видачі із системи готового продукту та компенсації вихідного продукту введенням у систему нової його порції, що відповідає стану s_4 , $m_{\pm(\text{VO})^{(4)}}^{(s_4)} = m_{1(\text{VO})^{(1)}}^{(s_1)} - m_B + \Delta m^+$. Якщо в результаті компенсації концентрація оксиду вихідного продукту повертається до вихідного значення, то $m_{\pm(\text{VO})^{(4)}}^{(s_4)} = m_{\pm(\text{VO})^{(0)}}^{(s_0)}$.

$m \downarrow$ – умовне позначення події, що полягає у видачі із системи готового продукту масою m_B ;

$m \uparrow$ – умовне позначення події, що полягає у введенні в систему

нової порції вихідного продукту масою Δm^+ ;

$m \downarrow \uparrow$ – умовне позначення події, що полягає у видачі із системи готового продукту масою m_B , та компенсації вихідного продукту введенням у систему нової його порції масою Δm^+ .

Для зручності сприйняття введені такі кольорові зображення: зелений колір – для опису стану s_0 , синій колір – для опису стану s_2 , червоний колір – для опису стану s_3 .

Стан s_4 фактично відображає той факт, що процес певним чином регулюється, причому має місце інваріантність щодо способу регулювання. Іншими словами, процес може керуватися ззовні або шляхом використання технічних пристроїв – регуляторів, або шляхом протікання інших фізико-хімічних процесів, що здійснюють керуючий вплив на систему, яка розглядається. Саме цим обумовлений вибір для відображення кольору стану s_4 зеленого кольору, що свідчить про те, що регулювання процесу здійснюється з метою забезпечення сталості початкового стану системи. Однак слід зазначити, що регулювання може здійснюватися не тільки з метою підтримки сталості початкового стану, а й підтримки будь-якого іншого необхідного стану залежно від обраної мети та бажаної поведінки системи.

Для опису процесу у загальному вигляді може бути використане кінетичне рівняння

$$v = -\frac{dC}{d\tau} = \frac{kS}{m} C^\eta, \quad (3.22)$$

де v – швидкість процесу відновлення, %/од. часу; $C = \frac{(BO)}{100}$ – концентрація BO у вихідному продукті; τ – час; η – порядок реакції по оксиду; k – константа швидкості процесу; S – площа реакційної поверхні; m – маса системи.

Для визначення параметрів кінетичного рівняння (3.22) використовуються:

– ітераційна процедура адаптивного математичного моделювання, основою якої може бути адаптивний алгоритм, представлений на рис. 3.5;

– перетворення декартових координат шляхом паралельного зміщення осей у координатах τ - C та C - v ;

– МНК для побудови рівнянь регресії.

На рис. 3.5 прийняті такі позначення:

F_N – матриця плану експерименту;

Y – матриця вихідної змінної;

δ – мала позитивна величина;

α – час, на який здійснюється прогноз $y(\tau)$;

h – заданий крок;

r – величина, що приймає значення 0, 1, 2, 3,

Невідомими в рівнянні (3.22) є параметри k та η , але в умовах апріорної невизначеності невідомими є також параметри S , m .

Якщо з часом відбувається зміна маси вихідного продукту та концентрації оксиду в продукті не тільки в процесі протікання реакції (3.21), а й унаслідок відведення із системи готового продукту та введення нової порції вихідного продукту, то змінюватиметься у часі і швидкість процесу відновлення

$$v(\tau) = -\frac{dC(\tau)}{d\tau}. \quad (3.23)$$

Це означає, що результат визначення константи швидкості та порядку реакції шляхом лінеаризації рівняння (3.22) логарифмуванням буде неадекватним.

Причиною цього є параметри рівняння, що змінюються в часі, в тому числі стрибкоподібно в моменти видачі порції продукту відновлення і введення нової порції вихідного продукту. Тобто апріорна невизначеність, що виникає на етапі обробки даних, пов'язана з необхідністю оцінювання параметрів кінетичного рівняння лише за доступними даними про концентрації оксиду, не дає можливості використання традиційного підходу для визначення параметрів кінетичного рівняння.

Для зняття цієї апріорної невизначеності може бути запропонована адаптивна технологія, що складається з п'яти етапів:

– етап 1: розрахунок та якісний аналіз миттєвих швидкостей процесу з метою ідентифікації стану s_i та визначення тих експериментальних точок, які відносяться до цього i -у стану;

– етап 2: паралельне зсув осей в декартових координатах τ – C з метою приведення даних до стану s_0 ;

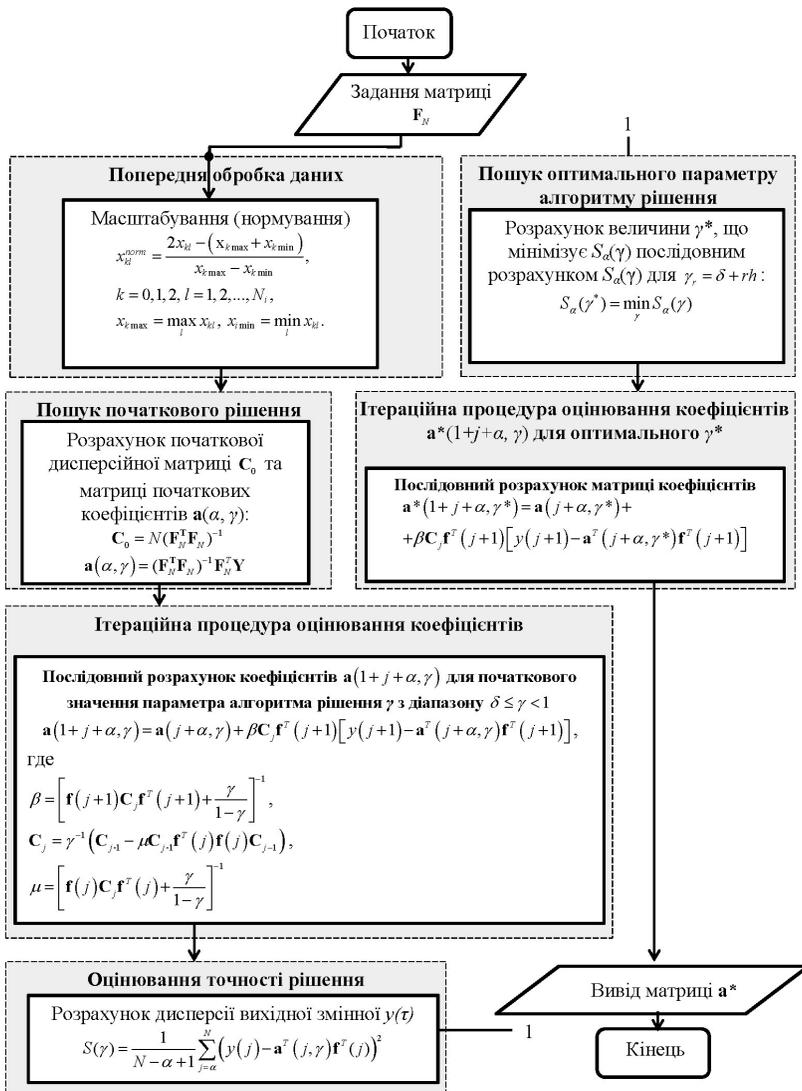


Рис. 3.5 – Адаптивний алгоритм розрахунку параметрів кінетичних рівнянь

- етап 3: реалізація етапу 1 для наведених даних до стану s_0 ;
- етап 4: апроксимація експериментальних даних, наведених до стану s_0 , з метою побудови кінетичних рівнянь $v = \varphi(C)$ для станів s_2 та s_3 ;
- етап 5: паралельне зсув осей в декартових координатах $C-v$ з метою приведення кінетичних рівнянь $v = \varphi(C)$ до виду, аналогічного за структурою рівнянню (3.22), та апроксимація отриманих даних методом найменших квадратів.

Оскільки операції перетворення координат є основою перетворення опису об'єкта якогось канонічного виду, має сенс запровадити поняття «канонічне перетворення кінетичного рівняння». Таке визначення має такий зміст: маючи якийсь адекватний опис кінетичного рівняння в системі координат, в якій отримано такий опис, тобто старій системі координат, проводиться перетворення, що дозволяє представити рівняння в новій системі координат таким чином, щоб його структура відповідала якомусь канонічному вигляду. Таким канонічним виглядом може бути, наприклад, (3.22), що відбиває основний постулат хімічної кінетики.

Виходячи з цього, етапи 2, 4, 5 фактично можна вважати канонічним перетворенням кінетичного рівняння, що приводить його до канонічного виду в розумінні відповідності основному постулату хімічної кінетики.

Етап 1.

Встановивши у кожний момент часу швидкість процесу відновлення оксиду (далі для простоти названо швидкістю процесу), можна виявити експериментальні точки в координатах $\tau-C$, які відносяться до різних станів s_i ($i = 1, 2, 3$).

Рішення рівняння (3.23) має вигляд

$$\int dC(\tau) = -\int v(\tau) d\tau, \quad (3.24)$$

або за початкової умови $C|_{\tau=\tau_0=0} = C_0$

$$C(\tau) = -v(\tau)\tau + C_0, \quad (3.25)$$

Якщо ввести в розгляд поняття миттєвої швидкості процесу, яка розуміється як швидкість процесу в момент часу τ , то рівняння (3.25) може бути подане у вигляді

$$C_j(\tau) = -v_j(\tau)\tau, \quad (3.26)$$

що дозволяє за отриманими результатами розрахунку миттєвих швидкостей $v_j(\tau)$ розрахувати концентрації оксиду C_j у кожний момент часу τ .

Графічна інтерпретація миттєвих швидкостей така: миттєва швидкість $v_j(\tau)$ є тангенсом кута нахилу радіус-вектора, проведеного з початку координат до точки на кривій $C = f(\tau)$. Тому, маючи значення миттєвих швидкостей, може бути відтворено загальний вигляд залежності $C = f(\tau)$ у вигляді (3.25), внаслідок чого може бути визначена початкова концентрація C_0 .

Отримані за рівнянням (3.26) значення концентрацій можна назвати миттєвими концентраціями. Така інтерпретація рівняння (3.26) та можливість подальшого відтворення загального виду залежності $C = f(\tau)$ дозволяють представити рівняння (3.26) у вигляді

$$y_j(\tau) = a_j(\tau)d\tau, \quad (3.27)$$

де $a_j(\tau) = v_j(\tau)$ – коефіцієнт, що дорівнює миттєвій швидкості процесу; $y_j(\tau) = C_j(\tau)$ – вихідна змінна, що дорівнює миттєвій концентрації.

Структура рівняння (3.27) дозволяє припустити, що для розрахунку коефіцієнтів $a_j(\tau)$ може бути використаний саме адаптивний алгоритм (рис. 3.5). Слід зазначити, що в цьому випадку знак «–», що вказує в рівняннях (3.22)–(3.26) на те, що відбувається витрачання оксиду, буде враховано у явному вигляді у рішенні рівняння (3.27).

Вихідні дані розрахунку миттєвих швидкостей шляхом реалізації адаптивного алгоритму задаються як представлено у табл. 3.4.

Слід зазначити, що для розрахунку миттєвих швидкостей операція нормування може не проводитися, тому що в розгляді знаходиться лише одна незалежна змінна, а подальша процедура вимагає знання величини миттєвої швидкості в натуральному вигляді.

Результати реалізації адаптивного алгоритму представляють у вигляді табл. 3.5.

Таблиця 3.4 – Вихідні дані для розрахунку миттєвих швидкостей процесу

τ , од. часу	$C_j(\tau)$, % мас.
0	C_0
τ_1	C_1
τ_2	C_2
τ_3	C_3
.	.
τ_N	C_N

Таблиця 3.5 – Подання результатів розрахунку миттєвих швидкостей

j	$a_j(\tau) = v_j(\tau) = a(\alpha+j, \gamma^*)$
0	$a(\alpha, \gamma^*)$
1	$a(\alpha+1, \gamma^*)$
2	$a(\alpha+2, \gamma^*)$
3	$a(\alpha+3, \gamma^*)$
4	$a(\alpha+4, \gamma^*)$
5	$a(\alpha+5, \gamma^*)$
6	$a(\alpha+6, \gamma^*)$
7	$a(\alpha+7, \gamma^*)$
8	$a(\alpha+8, \gamma^*)$
9	$a(\alpha+9, \gamma^*)$
.	.
N	$a(\alpha+N, \gamma^*)$
$N+1$	$a(\alpha+N+1, \gamma^*)$

Результати, що наводяться у вигляді табл. 3.5, відносяться до оптимального значення параметра алгоритму γ^* , що мінімізує величину оцінки дисперсії вихідної змінної $y(\tau) = C(\tau)$ за критерієм $S_\alpha(\gamma^*) = \min S_\alpha(\gamma)$.

Ідентифікатором події, що полягає у переході від стану s_1 до стану s_2 або s_3 , є стрибкоподібна зміна миттєвої швидкості, що впливає безпосередньо зі способу визначення швидкості – стрибкоподібна зміна концентрації оксиду внаслідок видачі готового продукту із системи або введення нової порції вихідного продукту викликає значну зміну концентрації за ту саму одиницю часу. Такі значення умовно виділено у табл. 3.5 жирним шрифтом, а рядки, що відповідають переходу між станами, виділені різними кольорами: синім кольором – перехід до стану s_2 , червоним кольором – перехід до стану s_3 . Слід зазначити, що перехід до стану s_3 може здійснюватися і з попереднього стану s_2 , а не тільки зі стану s_1 , як показано на рис. 3.4, враховуючи безперервність процесу.

Підсумком розрахунків, поданих у табл. 3.5, є ідентифікація станів системи.

Формально реалізацією адаптивного алгоритму можуть бути встановлені й інші ідентифікатори. Для цього рівняння (3.22), з урахуванням (3.23), перетворюється на вигляд

$$\ln v(\tau) = \ln \left(\frac{k(\tau)S(\tau)}{m(\tau)} \right) + \eta(\tau) \ln C(\tau). \quad (3.28)$$

У цьому випадку рівняння (3.24) може бути подане у вигляді

$$y(\tau) = b_0(\tau)x_0 + b_1(\tau)x_1(\tau), \quad (3.29)$$

де

$$y(\tau) = \ln v(\tau),$$
$$b_0(\tau) = \ln \left(\frac{k(\tau)S(\tau)}{m(\tau)} \right),$$

$$x_0 = 1, b_1(\tau) = \eta(\tau),$$

$$x_1(\tau) = \ln C(\tau),$$

а коефіцієнти $b_i(\tau)$ для $i = 0$ та $i = 1$ можуть бути визначені використанням адаптивного алгоритму. У цьому випадку матриця плану експерименту і вихідна матриця змінної задаються наступним чином:

$$F_N = \begin{bmatrix} 1 f_1^1 = x_1^1 \\ 1 f_2^1 = x_2^1 \\ 1 f_3^1 = x_3^1 \\ \cdot \cdot \cdot \\ 1 f_N^1 = x_N^1 \end{bmatrix}, Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ \cdot \\ y_N \end{bmatrix}, \quad (3.30)$$

де нижній індекс відповідає номеру експерименту, верхній індекс – номеру змінної.

Якщо в якості вхідних змінних вибрати $x_0 = 1$ та x_1 відповідно (3.25), то масштабування здійснюється лише щодо x_1 , наслідком чого є переведення значення x_1 у безрозмірний діапазон $[-1; 1]$.

Результати реалізації адаптивного алгоритму при такому виборі вхідних змінних та вихідної змінної виходять у координатах $b_0(\tau) - b_1(\tau)$. Відповідні набори значень формують точки з координатами $(b_0(\tau), b_1(\tau))$, розташування яких для різних станів формує в нормованому просторі кластери, що поділяються залежно від стану системи s_i .

Перехід від нормованих значень $b_0(\tau)$ и $b_1(\tau)$ до натуральних $a_0(\tau)$ та $a_1(\tau)$ здійснюється за формулами:

$$a_0 = b_0 - \overline{a_1 x_1}, \quad (3.31)$$

$$a_1 = \frac{b_1}{I}, \quad (3.32)$$

держуваних шляхом перетворення рівняння

$$y = a_0 x_0 + a_1 \left(x_1^{norm} I + \overline{x_1} \right), \quad (3.33)$$

де $\overline{x_1}$ – середнє значення змінної x_1 в вибірці даних,
 $\overline{x_1} = 0.5(x_1^{max} + x_1^{min})$, $I = x_1^{max} - \overline{x_1} = \overline{x_1} - x_1^{min}$.

Важливо, що коректне здійснення цієї процедури можливе лише у разі рівності інтервалів часу, тобто постійної величини кроку аргументу τ .

Розділення точок ($b_0(\tau)$, $b_1(\tau)$) у просторі змінних $b_0(\tau) - b_1(\tau)$ за отриманими кластерами можливо, наприклад, шляхом параметричної класифікації [20–27].

Етап 2.

Паралельний зсув осей у декартових координатах $\tau-C$ з метою приведення даних до стану s_0 здійснюється за формулами:

$$\tau' = \tau - \Delta\tau, \quad (3.34)$$

$$C' = C - \Delta C, \quad (3.35)$$

де $\Delta\tau$ – величина зсуву по осі τ , що вибирається таким чином, щоб концентрація оксиду після переходу в стан s_2 відповідала концентрація оксиду у стані s_0 .

Етап 3.

Для наведених до стану s_0 даних реалізується адаптивний алгоритм аналогічно до *Етапу 1*. Результатом є розрахунок миттєвих швидкостей, але не для загальної вибірки даних, а для наведених до стану s_0 даних, на основі яких у просторі змінних $C'-v'$ формуються точки з координатами (C', v') .

Етап 4.

Методом найменших квадратів за набором точок з координатами (C', v') у просторі змінних $C'-v'$ розраховуються оцінки коефіцієнтів апроксимуючих рівнянь.

Етап 5.

Здійснюється паралельний зсув осей у декартових координатах $v'-C'$ з метою приведення даних до стану s_0 по формулах:

$$C'' = C' - \Delta C', \quad (3.36)$$

$$v'' = v' - \Delta v', \quad (3.37)$$

де $\Delta C'$, $\Delta v'$ – величина зсувів по осях C' та v' відповідно. Якщо апроксимуюче рівняння має вигляд полінома другого ступеня (3.34), то величини зсувів визначаються розрахунком екстремумів функцій – апроксимуючих рівнянь, одержаних реалізацією *Етапу 4*:

$$v' = d_0 + d_1 C' + d_2 C'^2, \quad (3.38)$$

$$\Delta C' = -\frac{d_1}{2d_2}, \quad (3.39)$$

$$\Delta v' = d_0 + d_1 \Delta C' + d_2 (\Delta C')^2. \quad (3.40)$$

Підсумком реалізації запропонованої адаптивної технології є здобуття кінетичних рівнянь у координатах C'' – v'' у канонічному вигляді.

3.3. Експериментально-промислові дослідження та побудова технологічних схем на етапі термочасової обробки

Для конструювання функціоналу в контексті поставлених завдань були проведені промислові дослідження в чавуноливарному цеху промислового підприємства, що спеціалізується на виробництві виливків машинобудівного призначення. Метою досліджень було визначення наступних показників процесу: фактичної потреби ливарного конвеєра у розплаві, продуктивності комплексу обладнання з виготовлення ливарних форм, підготовлених до заливання, часу виконання технологічних операцій із доведення розплаву чавуну до заданого хімічного складу.

З метою апробації розробленої структури комплексного функціоналу для оптимізації процесу електродугової плавки було

проведено серію промислових досліджень у дуговій 10-ти тонній електропечі, що дозволяє реалізувати різні варіанти садки. Ділянка ливарного цеху з плавно-заливальною системою була показана на рис. 3.1. Відповідно, в печі такої ємності можуть бути оцінені можливості реального процесу з точки зору забезпечення заданої якості чавуну та реалізації можливостей управління з розгляду плавно-заливальної системи як системи масового обслуговування з відмовами та змінною структурою вузла обслуговування.

У табл. 3.6 представлений часовий графік промислового процесу плавки та термочасової обробки чавуну в електродуговій печі для забезпечення потреби у розплаві ливарного конвеєра при серійному характері виробництва.

В інтервалах між випусками чавуну піч працює у режимі міксера. Середня потреба ділянки заливки в розплаві становить 2.33 т/год, середній час випуску чавуну з печі 0.256 год. Сумарні витрати електроенергії у робочу зміну становлять 9226 кВт год, з яких 7690 кВт·год витрачається на плавку, 1536 кВт·год – на перегрів. Питомі витрати електроенергії на робочу зміну становлять 543 кВт год/т.

Таблиця 3.6 – Часовий графік базового процесу електродугової плавки

Час	Технологічна операція
1	2
23:45–6:45	Плавка
7:40	Випуск чавуну в кількості 1 т
8:05	Випуск чавуну в кількості 0.5 т
8:35	Випуск чавуну в кількості 0.5 т
8:45	Випуск чавуну в кількості 0.5 т
8:50	Випуск чавуну в кількості 0.5 т
8:55	Випуск чавуну в кількості 0.5 т

Продовження Таблиці 3.6

1	2
9:00	Випуск чавуну в кількості 0.5 т
9:05	Випуск чавуну в кількості 0.5 т
9:10	Випуск чавуну в кількості 1 т
9:20	Випуск чавуну в кількості 0.5 т
9:35	Випуск чавуну в кількості 1 т
10:00–10:25	Підвалка чавунного лому в кількості 4.5 т
10:25–11:00	Плавка
11:00–11:40	Підшихтування в кількості 4 т
11:40–12:30	Плавка
12:30	Випуск чавуну в кількості 0.5 т
12:40	Випуск чавуну в кількості 1 т
12:45	Випуск чавуну в кількості 1 т
12:50–12:55	Перегрів чавуну
13:00	Випуск чавуну в кількості 1 т
13:10	Випуск чавуну в кількості 1.5 т
13:40	Випуск чавуну в кількості 0.5 т
13:45	Випуск чавуну в кількості 0.5 т
13:50	Випуск чавуну в кількості 2 т
14:00	Випуск чавуну в кількості 1 т
14:10	Випуск чавуну в кількості 1 т

Температура чавуну – 1400–1450°C (при загальній масі рідкого металу до 12 т), до кінця плавки та початку заливки – 1450–1500°C.

Технологічна схема процесу, що відповідає даному графіку, представлена на рис. 3.6.

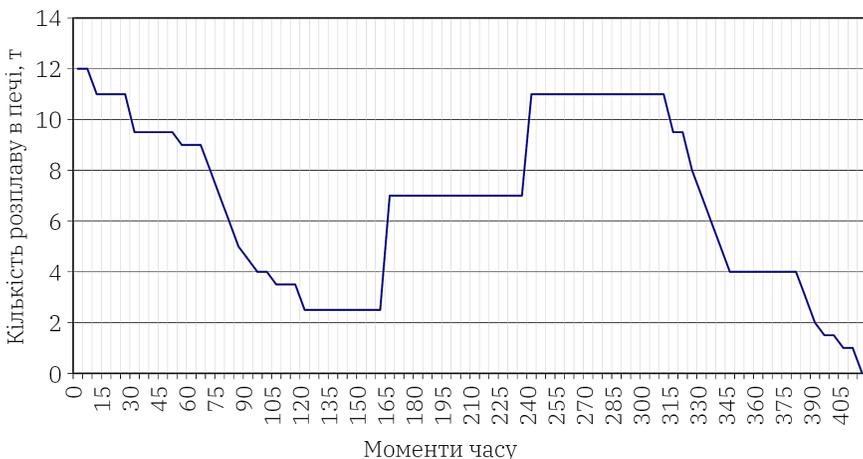


Рис. 3.6 – Технологічна схема дуплекс процесу «електродугова піч – електродугова піч-міксер» для виплавки чавуну СЧ200 – 250 ДСТУ 8833:2019 в базовому процесі. Середній інтервал часу між випусками розплаву: у моменти часу 1–3 – 55 хвилин, у моменти часу 3–9 – 25 хвилин, у моменти часу 9–28 – 7 хвилин, у моменти часу 33–51 – 14 хвилин

На основі результатів хронометражу були розраховані значення функціоналу (3.16), що характеризує ефективність базового технологічного процесу плавки в електродуговій печі, що виступає як вузол обслуговування СМО «електродугова піч-міксер – ливарний конвеєр» для різних інтервалів часу витримки розплаву в печі.

Приклади результатів моделювання СМО наведено у табл. 3.7 та 3.8.

З табл. 3.7 видно, що при витримці розплаву протягом 15 хв. при заданих вхідних параметрах оптимальне завантаження печі має бути більшим, ніж фактичне, що забезпечується даною піччю. Мінімальні витрати досягаються, отже, при максимально можливо завантаженні печі.

З табл. 3.8 видно, що витрати, пов'язані простоями конвеєра через відсутність металу, і енергетичні витрати «вирівнюються»,

а оптимальна кількість розплаву в печі становить 12 т. Приймавши оптимальне значення завантаження печі $m = 12$ т, всю технологічну схему можна розпочати будувати, починаючи з цієї маси розплаву. При побудові схеми в конкретному технологічному процесі необхідно враховувати, що при заданій потребі конвеєра в розплаві в певний момент часу необхідно зливати з печі розплав у кількості, що відповідає величині λ .

Приймавши за 1 канал обслуговування СМО об'єм печі, що забезпечує витримку 2 т розплаву, після заданого проміжку часу необхідно зливати в ківш 2 т розплаву. Зі зменшення потреби в розплаві та зміною часу витримки оптимальна кількість розплаву, що витримується в печі, зменшується.

Вочевидь, що в оцінці чисельного значення функціоналу мають значення коефіцієнти штрафу. Справді, збільшення вартості електроенергії призводить до збільшення параметра $S_2[n - m_k(n)]$, що знаходить своє відображення при розрахунку оптимального завантаження печі – графіки відповідних залежностей зсуваються по осях.

Результатом моделювання є оптимальна за сумарними витратами на виплавку технологічна схема процесу (рис. 3.7), яка враховує два конкуруючі критерії якості керування на етапі термочасової обробки розплаву – критерій мінімізації енерговитрат і критерій мінімізації простоїв конвеєра, вирішивши, таким чином, головну проблему використання електродугових печей, пов'язану з її низьким ККД в період термочасової обробки розплаву.

Однак слід зазначити, що ця схема не включає явно фактор якості сплаву, так як побудована на основі функціоналу (3.16), а не (3.19).

По даних хімічного аналізу чавуну в процесі плавки, відповідно до її технологічної схеми, було реалізовано процедуру адаптивного моделювання для визначення кінетичних рівнянь по усіх елементах складу на основі адаптивного алгоритму, представленого на рис. 3.5.

Для прикладу, у табл. 3.9 наведено результати розрахунку доли браку (B) за формулою (3.20), що визначає частку лиття, що не відповідає вимогам щодо регламентованих механічних властивостей.

Результати розрахунку, наведені в табл. 3.9, можуть бути використані для оптимізації часу витримки розплаву печі заданої

маси. Цей час $\tau_y(u)$ визначає інтервал витримки розплаву, за якого забезпечується мінімум ймовірності браку. Як впливає з табл. 3.9, збільшення об'єму ванни призводить до покращення якості одержуваного сплаву, і якщо час до генерації чергової заявки конвеєром $\tau_3(u) > \tau_y(u)_{opt}$, то виконання критерію якості керування на етапі термочасової обробки у вигляді (3.19) забезпечується витримкою розплаву протягом часу $\tau_y(u)_{opt}$. Однак вже за маси розплаву 8 т, внаслідок протікання у розплаві фізико-хімічних процесів, ймовірність браку за вмістом хімічних елементів в чавуні становить близько 30%. Тому визначальним чинником зниження ймовірності браку є вибір такого керування процесом, яке забезпечувало б виконання критерію якості керування (3.19).

Якщо $\tau_3(u) < \tau_y(u)_{opt}$, то неможливо забезпечити виконання оптимального часу витримки розплаву до видачі його на конвеєр, що забезпечує виконання критерію якості керування (3.5). При генерації заявки конвеєром у момент часу $\tau_3(u)$ оптимальне керування процесом має передбачати можливість швидкого переведення системи з фактичного початкового стану, отриманого на попередньому кроці процесу, в заданий кінцевий, що формується критерієм (3.5), тобто необхідне рішення задачі пошуку керування, оптимального по швидкодії, наприклад виду (1.34).



Рис. 3.7 – Оптимальна технологічна схема процесу

Таблиця 3.8 – Результати моделювання при $\tau = 45-60$ хв

Параметри СМО «електродугова піч-міксер – ливарний конвеєр»	Число каналів СМО «електродугова піч-міксер – ливарний конвеєр»					
	1	2	3	4	5	6
	Маса розплаву в печі, т					
	2	4	6	8	10	12
$P_0 = \left[1 + \sum_n \frac{(\lambda\tau)^n}{n!} \right]^{-1}$	0.1829	0.0647	0.033	0.0218	0.0164	0.0139
$P_{омк}(n) = \frac{(\lambda\tau)^n}{n!} P_0(n)$	0.8171	0.6461	0.4904	0.3617	2.44E-01	1.54E-01
$\lambda P_{омк}(n)$	0.0187	0.0148	1.12E-02	8.29E-03	5.60E-03	3.53E-03
$P(m(\tau))$	0.0375	0.0296	2.25E-02	1.66E-02	1.12E-02	7.06E-03
$Q_k P(m(\tau))$	7.3032	5.7747	4.3832	3.2324	2.18E+00	1.38E+00
$S_1 Q_k P(m(\tau))$	21909.64	17324.05	13149.71	9697.27	6549.77	4127.30
$(1-P_{омк}(n))$	0.1829	0.3539	0.5096	0.6383	0.7557	0.8461
$\lambda(1-P_{омк}(n))$	0.0042	0.0081	0.0117	0.0146	0.0173	0.0193
$[n-m_k(n)]$	1.313	3.313	5.313	7.313	9.313	11.313
$S_2 [n-m_k(n)]$	430.14	1085.34	1740.54	2395.74	3050.94	3706.14
$Z(m(\tau))$	22340	18409	14890	12093	9600.7	7833.4

Таблиця 3.9 – Результати розрахунку долі браку з невідповідності регламентованим механічним властивостям чавуну

Час, хв	Доля браку (<i>B</i>) за різною маси розплаву в печі, т							
	4	5	6	7	8	9	10	11
10	1	1	0.998	0.997	0.995	0.992	0.986	0.977
15	0.982	0.974	0.961	0.939	0.905	0.853	0.773	0.666
20	0.821	0.776	0.712	0.622	0.504	0.374	0.239	0.129
25	0.943	0.879	0.767	0.599	0.401	0.215	0.089	0.026
30	0.987	0.942	0.813	0.575	0.301	0.104	0.022	0.003
35	1	1	1	1	0.958	0.496	0.039	0.008
40	1	1	1	1	1	0.889	0.064	0.049

Враховуючи, що видача розплаву на конвеєр має передбачати точне дозування чергової порції, необхідно знати цю величину, яка повинна визначатися за оптимальним за критерієм (3.16) або (3.19) технологічною схемою процесу. Ця величина є завданням системи керування прямим і зворотним ходом печі при видачі розплаву, яка є частиною системи керування в комплексі «електродугова піч-міксер – конвеєр», що розглядається вище у вигляді СМО з відмовами. Отже, задачі синтезу системи керування на етапі термочасової обробки, як складової частини функціонуючої системи «електродугова піч-міксер – конвеєр» має передувати завдання моделювання процесу, причому моделлю для виконання цієї процедури є оптимальна технологічна схема плавки. Така схема, побудована на основі описаної процедури із застосуванням в якості комплексного функціоналу критеріїв виду (3.16) або (3.19), дозволяє визначати завдання для керування процесом видачі розплаву на конвеєр.

На етапах, що відповідають моментам часу 27–31 (рис. 3.7) відбувається підвалка шихти та плавлення. Для плавки трансформатор включається на такий ступінь, що забезпечує максимальна

швидкість плавлення. Цей принцип продемонстровано на рис. 3.8. При цьому оптимальне керування може бути визначено відповідно до процедури (1.23)–(1.35).

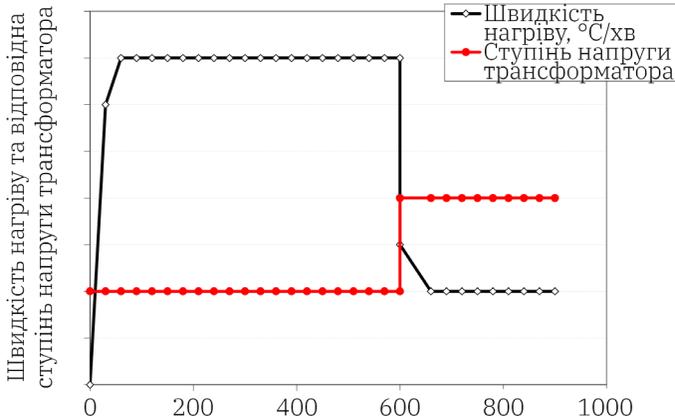


Рис. 3.8 – Принцип вибору ступеня напруги трансформатора

Керування процесом розплавлення на обраній ступені напруги трансформатора здійснюється системою регулювання положенням торця електродів відносно шихти, тобто довжиною дуги. Технічна реалізація системи керування забезпечується традиційними рішеннями (рис. 1.5 та 1.6), або іншими системами регулювання на сучасній елементній базі. Варіант формалізації задачі пошуку оптимального керування в такому випадку може бути представлено в наступному вигляді [29]

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t) + B(t)u(t), t \in [t_0, T], x(t_0) = x_0, x \in R_n, u \in R_m, \quad (3.41)$$

де t – момент часу на етапі плавлення; $A(t)$, $B(t)$ – матриці, які мають кусочно-неперервні елементи, що обмежені; $x(t)$ – вектор стану системи в момент часу t ; $u(t)$ – вектор-функція керування в момент часу t ; R_n – задана припустима множина значень вектора стану

системи; R_m – задана припустима множина значень вектор-функції управління.

Якщо переміщення електрода здійснюється електроприводом, то в якості керуючого впливу може бути обрана величина прикладеної до електродвигуна напруги, якщо ж переміщення електрода здійснюється за допомогою гідроприводу, то за керуючий вплив може бути обраний тиск у гідроциліндрі механізму переміщення електрода.

Компонентами фазового вектору доцільно вибрати координату робочого торця електрода щодо шихти або дзеркала розплаву та швидкість переміщення електрода. В цьому випадку система може бути описана рівняннями:

$$\dot{x}_1(t) = x_2(t), \quad \dot{x}_2(t) = ku(t), \quad (3.42)$$

де $x_1(t)$ – переміщення електроду; $x_2(t)$ – швидкість руху електроду;

$k = \frac{S}{m}$, S – площа поршня гідроциліндра переміщення електрода; m – маса системи, що рухається.

Критерій якості керування задається у вигляді

$$J_0 = x'(T)C_1x(T) + \int_{t_0}^T (x'(t)C_2(t)x(t) + u'(t)C_3(t)u(t))dt, \quad (3.43)$$

де C_i – невід'ємно визначені матриці.

При такому описі об'єкта керування та критерії його якості, керування плавкою на етапі плавлення зводиться до вирішення лінійно-квадратичної задачі, що вимагає мінімізації квадратичного функціоналу виду (3.39) на траєкторіях лінійної системи (3.37).

При цьому моменти часу t_0 , T , та початкове положення x_0 мають бути заданими, а матриця $C_i \geq 0$, якщо $x'(t)C_i x(t) \geq 0$ для будь-якого вектору x з заданої припустимої множини, та $C_i > 0$, якщо $x'(t)C_i x(t) > 0$ для будь-якого вектору x з заданої припустимої множини при $x(t) \neq 0$.

Для знаходження оптимального керування в лінійно-квадратичній задачі, що описується системою (3.37) з критерієм якості керування (3.39), встановлюються такі умови оптимальності:

$$\begin{aligned}
 H(t, x(t), u(t), \psi(t)) &= -x'(t)C_2(t)x(t) - u'(t)C_3(t)u(t) + \\
 &+ \psi'(t)[A(t)x(t) + B(t)u(t)], \\
 -\frac{\partial H}{\partial x} &= \dot{\psi}(t) = -A'(t)\psi(t) + 2C_2(t)x(t), \\
 \psi(t) &= -2C_1x(t), \\
 \frac{\partial H}{\partial u} &= B'\psi(t) - 2C_3(t)u(t) = 0,
 \end{aligned} \tag{3.44}$$

де $\psi(t)$ – рішення задачі Коши

$$\dot{\psi}(t) = -H_x(t, x_0(t), u_0(t), \psi(t)), \quad \psi(t) = -\varphi_x(x_0(t)), \tag{3.45}$$

де $\varphi_x(x_0(t)) = \frac{\partial \varphi(x)}{\partial x}$, $\varphi(x)$ – критерій якості керування:

$$J(u) = \varphi(x(T)) \rightarrow \inf.$$

Так як співвідношення (3.37) та (3.40) є не тільки необхідними, а й достатніми умовами оптимальності, оптимальне керування може бути знайдено шляхом реалізації трикрокової послідовної процедури:

Крок 1.

З умови (3.40) записується вираз для оптимального керування

$$u_0 = \frac{1}{2}C_3^{-1}(t)B'(t)\psi(t). \tag{3.46}$$

Крок 2.

Вираз для оптимального керування (3.42) підставляється в умови (3.37) та (3.40):

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_0(t) &= A(t)x_0(t) + \frac{1}{2}B_1(t)\psi(t), \\
 \dot{\psi}(t) &= -A'(t)\psi(t) + 2C_2(t)x_0(t), \\
 \psi(t) &= -2C_1x_0(t), \\
 B_1(t) &= B(t)C_3^{-1}(t)B'(t).
 \end{aligned}
 \tag{3.47}$$

Таким чином, отримана крайова задача для оптимальної траєкторії $x_0(t)$ та вектор сполучених змінних $\psi(t)$, для вирішення якої необхідно задати функцію вектору спряжених змінних.

Крок 3.

Функція вектору спряжених змінних шукається у вигляді

$$\psi(t) = -2P(t)x_0(t),
 \tag{3.48}$$

де $P(t)$ – симетрична матриця, що підлягає визначенню.

Диференціюванням по t , заміною $\dot{\psi}(t)$ та $\dot{x}_0(t)$ у відповідності до виразів (3.43) та підстановкою (3.44) в (3.43), отримуються рівняння:

$$\begin{aligned}
 \left[\dot{P}(t) + A'(t)P(t) + P(t)A(t) - P(t)B_1(t)P(t) + C_2(t) \right] x_0(t) &= 0, \\
 P(t)x_0(T) &= C_1x_0(T),
 \end{aligned}
 \tag{3.49}$$

які виконуються для будь-якого $x_0(t)$ у тому випадку, якщо виконуються матричне рівняння Ріккати:

$$\begin{aligned}
 \dot{P}(t) + A'(t)P(t) + P(t)A(t) - P(t)B_1(t)P(t) + C_2(t) &= 0, \\
 P(t) &= C_1.
 \end{aligned}
 \tag{3.50}$$

Оптимальне керування, що мінімізує функціонал (3.39) при знайденій матриці $P(t)$, записується у вигляді

$$u_0 = -C_3^{-1}(t)B'(t)P(t)x_0(t). \quad (3.51)$$

При вирішенні задачі стабілізації руху електрода, обираючи як пріоритетні вимоги стабілізації електричних режимів плавки, при постійних значеннях матриць A, B, C_2, C_3 об'єкт керування (3.38) описується системою

$$\dot{x}(t) = Ax + Bu, x(0) = x_0, \quad (3.52)$$

а критерій якості керування має вигляд

$$J_0 = \int_0^{\infty} (x'(t)C_2x(t) + u'C_3u)dt, C_2 > 0, C_3 > 0. \quad (3.53)$$

Оптимальне керування, згідно (3.47), має вигляд

$$u_0(t, x) = u_0(x) = -C_3^{-1}B'Px, \quad (3.54)$$

де P – постійна симетрична матриця, що є рішенням рівняння алгебри Ріккати

$$A'P + PA - PBC_3^{-1}B'P + C_2 = 0. \quad (3.55)$$

Одним із варіантів розв'язання даного рівняння є реалізація наступної процедури:

- етап 1: на основі обраного критерію якості керування у вигляді (3.49) виписується матриця C_3 та знаходиться матриця C_3^{-1} ;
- етап 2: будується матриця M з елементами m_{ij} вигляду

$$M = \begin{pmatrix} -A & BC_3^{-1}B' \\ C_2 & A' \end{pmatrix}; \quad (3.56)$$

- етап 3: реалізується QR-алгоритм, що приводить матрицю M до верхньої форми Шура

$$S = W' MW, \quad (3.57)$$

де W – ортогональна матриця; S – верхня блочно-трикутна матриця.

Для цього проводиться розкладання матриці M

$$M = QR, \quad (3.58)$$

де Q – ортогональна матриця; R – верхня трикутна матриця.

Ортогональна матриця Q будується як добуток $n-1$ елементарних відображень матриці H_i . На початковому етапі вибирається матриця H_1 вигляду

$$H_1 = E - 2\beta^2 uu', \quad (3.59)$$

де

$$2\beta^2 = \frac{1}{\gamma(\gamma - m_{11})}, \quad (3.60)$$

$$u = (m_{11} - \gamma m_{21}, \dots, m_{n1})',$$

$$\gamma = (m_{11}^2 + m_{21}^2 + \dots + m_{n1}^2)^{\frac{1}{2}}. \quad (3.61)$$

Перевіряється безпосередньо, що $H_1 = H_1' = H_1^{-1}$, $H_1 m = \gamma e_1$. Тут:

$$m = \begin{pmatrix} m_{11} \\ m_{21} \\ \cdot \\ \cdot \\ m_{n1} \end{pmatrix}, \quad e = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ \cdot \\ \cdot \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Отже, результатом перетворення (3.55) є отримання ортогональної матриці H_1 , а в матриці $M_1 = H_1 M$ піддіагональні елементи першого стовпця дорівнюють нулю.

На наступному етапі знаходиться матриця $M_2 = H_2 M_1$, причому матриця H_2 має вигляд

$$H_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \widehat{H}_2 \end{pmatrix},$$

де \widehat{H}_2 – матриця відображень, така ж, як і матриця H_1 , але $(n-1)$ порядку. При цьому в матриці M_2 піддіагональні елементи вже перших двох стовпців дорівнюють нулю.

Продовжуючи описану процедуру, знаходяться матриці вигляду

$$M_3 = H_3 M_2, \dots, M_{n-1} = H_{n-1} M_{n-2} = H_{n-1} \dots H_2 H_1 M = R, \quad (3.62)$$

де R – верхня трикутна матриця.

Так як $M = H_1 H_2 H_3 \dots H_{n-1} R = QR$, $Q = H_1 H_2 H_3 \dots H_{n-1}$, що впливає з рівності (3.58) та ортогональності матриці H_i , розклад (3.54) матриці M побудовано.

Наступним кроком є побудова послідовності матриць $M^{(k)}$:
 $M^{(1)} = RQ$, $M^{(2)} = R_1 Q_1 \dots$.

Так як $QM^{(1)}Q^{-1} = QRQQ^{-1} = QR = M$, матриці $M^{(k)}$ є ортогональними, подібно до M . При цьому послідовність $M^{(k)}$ сходиться до деякої матриці Шура;

– етап 4: форма Шура за допомогою деякої ортогональної матриці $V S_1 = V' S V$ переупорядковується таким чином, щоб першими n елементами головної діагоналі нової форми S_1 були власні значення $\lambda_i(M)$ такі, що $\text{Re} \lambda_i(M) > 0$, $i = 1, \dots, n$;

– етап 5: знаходиться матриця $U = WV$ та виділяються її блоки

$$U_{ij} \ (i = 1, 2; j = 1, 2) \ \text{розміру } n \times n: U = \begin{pmatrix} U_{11} & U_{12} \\ U_{21} & U_{22} \end{pmatrix};$$

– етап 6: рішенням методом Гауса системи рівнянь $U'_{11} P = U'_{21}$ визначається матриця P за формулою

$$P = U_{21} U_{11}^{-1}. \quad (3.63)$$

Побудована матриця P є рішенням рівняння Ріккати.

Система рівнянь вигляду (3.38) може бути перетворена з урахуванням особливостей керування процесом плавки в електродуговій печі. Для цього слід врахувати, що головною метою керування на етапі розплавлення шихти є регулювання електричної потужності і на практиці застосовуються диференціальні регулятори потужності, наприклад такий, як показано на рис. 1.5, що підтримують сталість відношення напруги до сили струму. При цьому параметр регулювання має вигляд

$$A = aI - bU = bI \frac{a}{b} - bI \frac{U}{I} = bIr_0 - bIr, \quad (3.64)$$

де I – сила струму, A ; U – напруга, B ; r – опір фази, Ом; $r_0 = \frac{a}{b}$ – задане значення повного опору, Ом; a , b – постійні коефіцієнти, що залежать від коефіцієнтів трансформаторів струму та напруги та необхідного співвідношення струму та напруги.

Переміщення електрода вниз зменшує відстань від торця електрода до поверхні шихти або дзеркала розплаву (шлаку), що викликає збільшення струму дуги та зменшення напруги між торцем електрода та ванною. При русі електрода вгору величина струму дуги починає падати, напруга між торцем електрода і ванною збільшуватися. Таким чином, величина опору може бути прийнята пропорційною переміщенню електрода. З огляду на це може бути записано рівняння

$$R(t) = k_1 x_1(t), \quad (3.65)$$

де k_1 – коефіцієнт пропорційності між величиною переміщення електрода та опором фази.

Якщо за пріоритет у задачі керування процесом плавки на етапі розплавлення шихти вибрати критерії якості сплаву, одержувані в результаті реалізації обраного керування, необхідно провести заміну змінних в системі (3.38), а саме: позначити через x_1 температуру ванни, через x_2 – опір фази r ; через x_3 – швидкість

руху електрода. Якщо при цьому врахувати лінійну залежність між опором фази і величиною переміщення електрода, аналітичний опис об'єкта керування набуде вигляду

$$\dot{x}_1 = k_1 x_2, \dot{x}_2 = k_2 x_3, \dot{x}_3 = k_3 u, \quad (3.66)$$

де x_1 – температура ванни, T ; x_2 – опір фази, r ; x_3 – швидкість руху електрода, v ; u – керування; k_1 – коефіцієнт пропорційності, що враховує силу струму та теплоємність ванни; k_2 – коефіцієнт пропорційності між опором фази і відстанню від торця електрода до поверхні ванни; k_3 – коефіцієнт пропорційності між швидкістю переміщення електрода і тиском в гідроциліндрі переміщення електрода (в разі використання гідроприводу для руху електрода), або між швидкістю переміщення електрода та напругою на електродвигуні (в разі використання електроприводу для руху електрода).

Матриці A та B при такому описі об'єкта керування мають вигляд: $A = \begin{pmatrix} 0 & k_1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$, $B = \begin{pmatrix} 0 \\ k_2 \end{pmatrix}$, а як функціонал, що має бути мінімізований, може бути обраний квадратичний функціонал вигляду

$$J_0 = x'(T)C_1 x(T). \quad (3.67)$$

Отже, задача керування електродуговою плавкою на етапі плавлення є завданням керування за кінцевим станом. При цьому необхідно врахувати, що кінцевий стан оцінюється за значеннями параметра якості сплаву, які повинні відповідати заданим (регламентним) на час видачі розплаву на конвеєр. Такі параметри – вихідні змінні процесу плавки – у свою чергу залежать від вхідних змінних процесу, що визначаються на основі вимірювання величин $x_i(t)$ в реальному часі. Тому задача керування значно ускладнюється – у сформульованій постановці потрібно шукати таке керування $u(t)$, за якого вектор-функція виходу $y(t) = Cx(t)$ була б близькою до заданої векторної функції $z(t)$, мінімізуючи квадратичний функціонал

$$J_0 = \frac{1}{2} e'(T)C_1 e(T), \quad (3.68)$$

де $e(t) = z(t) - y(t)$ – величина неузгодженості між фактичним значенням параметрів вектор-функції виходу $y(t)$ в процесі плавки та заданим еталонним значенням вектор-функції виходу $z(t)$.

Для побудови оптимальної технологічної схеми плавки та наступного синтезу оптимального керування та етапах плавки та термочасової обробки у разі довільних значень λ та μ необхідно мати модель, що зв'язує їх з вихідною змінною, якою має бути обрана величина маси розплаву у ванні, що мінімізує величину комплексного функціоналу виду (3.16) або (3.19). Для цього має бути розроблена загальна процедура синтезу оптимальної технологічної схеми плавки.

РОЗДІЛ 4
СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОДУГОВОЮ
ПІЧЧЮ ЯК ЕЛЕМЕНТОМ СИСТЕМИ МАСОВОГО
ОБСЛУГОВУВАННЯ «ЕЛЕКТРОДУГОВА ПІЧ – КОНВЕЄР»

4.1. Загальна процедура синтезу оптимальної технологічної схеми плавки для задачі керування процесом видачі розплаву на конвеєр

Вхідні дані для отримання аналітичного опису впливу параметрів функціонування СМО «електродугова піч-міксер – ливарний конвеєр» (λ, μ^{-1}) на оптимальну кількість розплаву, що підлягає витримці в печі до моментів видачі його на конвеєр, для типових електропечей ливарних цехів машинобудівних підприємств представлені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Вихідні дані для синтезу оптимальних технологічних схем плавки

Кількісні характеристики	Значення
Інтенсивність потоку заявок на розплав, що генерується ливарним конвеєром, λ , т/зміну	$\lambda_{\min} = 1$ $\lambda_{\max} = 11$
Середній час обслуговування заявок, що відповідає часу виконання технологічних операцій, $\bar{T} = \mu^{-1}$, хв	$\mu^{-1}_{\min} = 5$ $\mu^{-1}_{\max} = 45$
Середня кількість заявок, що генерується ливарним конвеєром, за середній час обслуговування заявки, $\rho = \frac{\lambda}{\mu} = \lambda \bar{T}$	$\lambda_{\text{норм}} \mu_{\text{норм}}^{-1}$ $\lambda_{\text{норм}} = \frac{\lambda - 6}{5}$ $\mu_{\text{норм}}^{-1} = \frac{\mu^{-1} - 25}{20}$
Вартість тонни литва, S_1 , у.о.	12000
Вартість електроенергії, S_2 , у.о./кВт	0.71
Витрата електроенергії на витримку та перегрів розплаву, кВт*год/т	105

Інструментом для побудови аналітичного опису обрано метод планування експерименту з побудовою центрального композиційного ортогонального плану другого порядку. Вхідними змінними є інтенсивність потоку заявок на розплав, що генерується ливарним конвеєром ($\chi_1 = \lambda$) та час виконання всіх технологічних операцій на етапі термочасової обробки ($\chi_2 = \mu^{-1}$). Вихідним параметром є оптимальна маса розплаву в печі (m^*), що мінімізує значення функціоналу (3.16), (Z).

На першому етапі необхідно визначити оптимальну технологічну схему електроплавки, що мінімізує функціонал виду (3.16), а потім розрахувати оптимальний набір (λ, μ^{-1}), що має наступний фізичний зміст: λ відповідає оптимальній інтенсивності видачі розплаву на ливарний конвеєр, μ^{-1} – час виконання технологічних операцій на етапі термочасової обробки, включаючи всі операції керування процесом. Серед останніх:

- науглерожування ванни шляхом занурення електродів при знятій напрузі у разі, якщо вміст вуглецю в розплаві не відповідає необхідному;

- регулювання температури ванни;

- введення феросплавів – це забезпечує коригування значень тих параметрів $F_i(\tau)$, вміст яких не змінюється внаслідок протікання фізико-хімічних процесів у даних термодинамічних та кінетичних умовах, проте не відповідає заданому.

У табл. 4.2 наведено центральний ортогональний композиційний план другого порядку, який застосовується для побудови аналітичного опису.

У табл. 4.3 показаний приклад розрахунку для середньої точки плану з вектором вхідних змінних $\chi = \begin{pmatrix} 6 \\ 25 \end{pmatrix}$.

Вихідні змінні розраховувалися аналогічно даним, представленим у табл. 3.7 та 3.8. Чисельним значенням вихідний змінної вибиралося значення маси розплаву, у якому досягався мінімум функціоналу (3.16).

Рівняння апроксимуючої кривої, має вигляд

$$Z = -9.7194m^{*3} + 260.96m^{*2} - 2091m^* + 6423.9. \quad (4.1)$$

Таблиця 4.2 – План експерименту

№ експерименту	χ_1	χ_2	$\chi_1^2 - \beta$	$\chi_2^2 - \beta$	m^*
1	2	3	4	5	6
1	+1(11)	+1(45)	-0.3333	-0.3333	m_1^*
2	-1(1)	+1(45)	-0.3333	-0.3333	m_2^*
3	+1(11)	-1(5)	-0.3333	-0.3333	m_3^*
4	-1(1)	-1(5)	-0.3333	-0.3333	m_4^*
5	+1(11)	0(25)	-0.3333	-0.6667	m_5^*
6	-1(1)	0(25)	-0.3333	-0.6667	m_6^*
7	0(6)	+1(45)	-0.6667	-0.3333	m_7^*
8	0(6)	-1(5)	-0.6667	-0.3333	m_8^*
9	0(6)	0(25)	-0.6667	-0.6667	m_9^*

Мінімум функціоналу досягається при $m = 6.054$ т, що відповідає точці експерименту № 9. Аналогічними розрахунками визначено всі експериментальні точки реалізації плану повного факторного експерименту. Значення, визначені таким чином, є матрицею оптимальних значень m^* .

Розрахунок коефіцієнтів моделі $m^* = f(\chi_1, \chi_2)$ наведено в табл. 4.4.

Матриця оцінок коефіцієнтів моделі має вигляд

$$A = \begin{pmatrix} 4.7898 \\ 1.9181 \\ 3.5732 \\ -0.6752 \\ -1.9237 \\ 1.7718 \end{pmatrix}.$$

Таблиця 4.4 – Розрахунок оцінок коефіцієнтів математичної моделі

$m_{експ}^*$	$\sum_{j=1}^N \chi_1^j m_{експ}^{*j}$	$\sum_{j=1}^N \chi_2^j m_{експ}^{*j}$	$\sum_{j=1}^N [(\chi_1^j)^2 - \beta] m_{експ}^{*j}$	$\sum_{j=1}^N [(\chi_2^j)^2 - \beta] m_{експ}^{*j}$	$\sum_{j=1}^N \chi_1^j \chi_2^j m_{експ}^{*j}$
11	11	11	3.63	3.63	11
3.713	-3.713	3.713	1.22529	1.22529	-3.713
0.5	0.5	-0.5	0.165	0.165	-0.5
0.3	-0.3	-0.3	0.099	0.099	0.3
8.019	8.019	0	2.64627	-5.37273	0
4	-4	0	1.32	-2.68	0
8.522	0	8.522	-5.70974	2.81226	0
1	0	-1	-0.67	0.33	0
6.054	0	0	-4.05618	-4.05618	0
	11.506	21.435	-1.35036	-3.84736	7.087

Математична модель у нормованому вигляді

$$m^* = 4.7898 + 1.918 \frac{\lambda - 6}{5} + 3.573 \frac{\bar{T} - 25}{20} - 0.675 \left(\left(\frac{\lambda - 6}{5} \right)^2 - 0.6667 \right) -$$

$$- 1.924 \left(\left(\frac{\bar{T} - 25}{20} \right)^2 - 0.6667 \right) + 1.772 \left(\frac{\lambda - 6}{5} \right) \left(\frac{\bar{T} - 25}{20} \right). \quad (4.2)$$

Статистичний аналіз точності виконано відповідно до t -критерію Стьюдента.

Оцінки дисперсій коефіцієнтів мають вигляд

$$s_i^2 = \begin{cases} 0.1667s^2, \\ 0.5s^2, \\ 0.25s^2, \end{cases} \quad (4.3)$$

Таблиця 4.3 – Розрахунок вихідної змінної для середньої точки плану

Параметри СМО	Маса розплаву в печі, т											
	Число каналів обслуговування											
	2	4	6	8	10	12	1	2	3	4	5	6
Початкова ймовірність стану системи	0.6154	0.549	0.538	1.1529	1.1519	1.1518						
Ймовірність відмови в обслуговуванні заявки	0.3846	0.107	0.022	0.0073	0.0009	9.53E-05						
Інтенсивність втрачених заявок, шт/хв	0.0096	0.003	0.001	0.0002	2.29E-05	2.38E-06						
Нестача металу, т/хв	0.0096	0.003	0.001	0.0002	2.29E-05	2.38E-06						
Витрати через брак металу, у.о./хв	115.38	32.19	6.56	2.2	0.27	0.03						
Витрати через брак металу, у.о./час обслуговування	2884.6	804.7	163.98	54.98	6.87	0.72						
Ймовірність обслуговування заявки	0.6154	0.893	0.9781	0.9927	0.9991	0.9999						
Інтенсивність заявок, що обслуговують, шт/хв	0.0154	0.022	0.0245	0.0248	0.025	0.025						
Середня кількість зайнятих каналів	0.0154	0.011	0.0082	0.0062	0.005	0.0042						
Коефіцієнт використання печі	0.0154	0.011	0.0082	0.0062	0.005	0.0042						
Кількість «зайвого» розплаву, т	1.985	3.989	5.992	7.994	9.995	11.996						
Витрати, пов'язані з витримкою «зайвого» розплаву, у.о.	355.09	713.6	1072.1	1430.3	1788	2146.3						
Перевірка загального завантаження печі	1.99711	4.001	6.004	8.006	10.01	12.008						
Значення функціоналу Z	3239.71	1518	1236.1	1485.2	1795	2147.0						

де s^2 – оцінка дисперсії неадекватності моделі, яка визначається за формулою

$$s_i^2 = \frac{1}{N - (k + 1)} \sum_{j=1}^N (m_p^* - m_{\text{експ}}^*)^2, \quad (4.4)$$

де k – число факторів; m_p^* – розрахункове значення оптимальної маси розплаву з математичної моделі (4.2).

Результати розрахунку оцінки дисперсії неадекватності моделі наведено у табл. 4.5.

Таблиця 4.5 – Розрахунок оцінки дисперсії неадекватності моделі

m_p^*	$m_p^* - m_{\text{експ}}^*$	S	m_{min}^*	m_{max}^*
11.19517	0.195169	0.038091	10.777	11.613
3.815568	0.102568	0.01052	3.398	4.233
0.50524	0.00524	2.75E-05	0.087	0.923
0.212639	-0.08736	0.007632	-0.205	0.63
7.773884	-0.24512	0.060082	7.356	8.192
3.937784	-0.06222	0.003871	3.52	4.356
8.180548	-0.34145	0.116589	7.763	8.598
1.034119	0.034119	0.001164	0.616	1.452
6.531014	0.477014	0.227542	6.113	6.949
–	–	0.465519	–	–

У табл. 4.6 наведено результати розрахунків довірчого інтервалу для оцінки вихідної змінної.

Таблиця 4.6 – Результати статистичного аналізу точності

φ	s^2	$t_{кр}$	s	$t_{кр}S$	δ
3	0.155173	3.182	0.39392	1.253453	0.417818

На рис. 4.1 представлені межі довірчого інтервалу та показано розташування експериментальних точок.

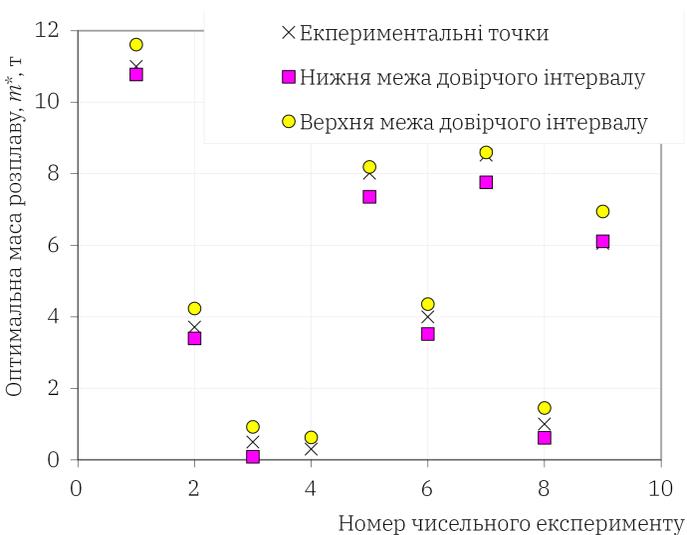


Рис. 4.1 – Межі довірчих інтервалів та розташування експериментальних точок

Як видно з аналізу отриманої моделі, вона адекватно визначає вплив інтенсивності потоку заявок на розплав, що генерується ливарним конвеєром, та часу виконання технологічних операцій на оптимальну масу розплаву печі.

Поверхня відгуку, що описує математичну модель (4.2), має вигляд, представлений на рис. 4.2.

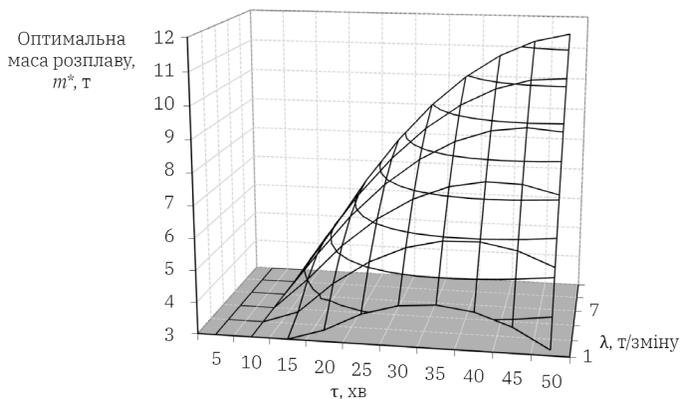


Рис. 4.2 – Поверхня відгуку, що описує залежність $m^* = f(\lambda, \mu^{-1})$

Як видно з рис. 4.2, для кожного значення інтенсивності генерованих заявок має місце наявність максимуму оптимальної маси розплаву. Графік залежності оптимальної маси розплаву в печі від часу виконання технологічних операцій у нормованому вигляді (табл. 4.1) та інтенсивності заявок на розплав представлений на рис. 4.3.

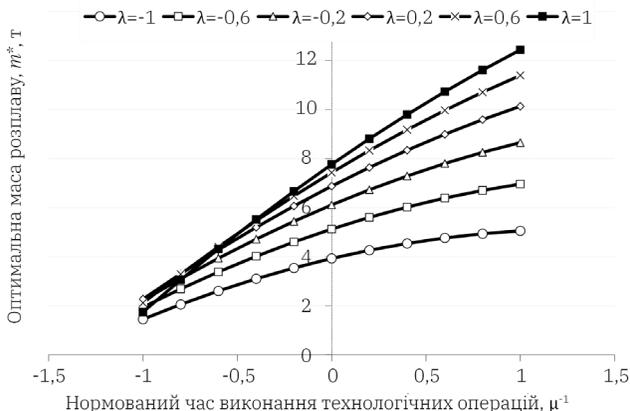


Рис. 4.3 – Залежність оптимальної маси розплаву в печі від часу його витримки для різних значень інтенсивності заявок на розплав

Для синтезу оптимальної технологічної схеми застосовано гребеневий аналіз, що дозволяє знайти субоптимальні значення вихідних змінних залежно від радіус-вектору вхідних змінних у факторному просторі. Схема, що ілюструє метод гребеневого аналізу, представлена на рис. 4.4 [28].

Вихідними для проведення аналізу є опис технологічного процесу математичною моделлю у вигляді полінома. У координатах « χ_1 – χ_2 » будується поверхня відгуку, що є графічним описом впливу вхідних змінних на параметр оптимізації. Потім у цих координатах будується умовний циліндр з радіусом r , що описує обмеження на вхідні змінні. Лінія перетину поверхні відгуку та поверхні циліндра даного радіусу розгортається на площину і на ній визначаються точки мінімуму та максимуму. Процедура пошуку субоптимальних значень описується параметрично:

$$\begin{cases} x^*(\lambda) = (\lambda I - A)^{-1} a, \\ r^*(\lambda) = \sqrt{x^{*T} x^*}, \\ y^*(\lambda) = a_0 + 2a^T x^* + x^{*T} A x^*, \end{cases} \quad (4.5)$$

де $x^*(\lambda)$ – матриця субоптимальних значень вхідних змінних у нормованому вигляді, що залежать від параметра λ ; $x^{*T}(\lambda)$ – транспонована матриця субоптимальних значень вхідних змінних; $r^*(\lambda)$ – радіус кола, що обмежує область вхідних змінних; I – одинична матриця; a_0, a_1, A – матриці оцінок коефіцієнтів; a^T – транспонована матриця оцінок коефіцієнтів при лінійних членах.

Два останні рівняння описують аналітично гребневі лінії, звідки й назва методу.

Система (4.5) після перетворень дозволяє отримати зручні для практики розрахункові формули:

– для визначення субоптимальних значень вхідних змінних

$$\chi_i = \frac{a_i}{2\lambda}, \quad (4.6)$$

– для визначення радіусу умовного циліндру, що описує обмеження

$$r = \sqrt{r^2}, r^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{a_i}{2\lambda} \right)^2; \quad (4.7)$$

– для визначення оптимального значення вихідної змінної

$$y^* = a_0 + \sum_{i=1}^n \frac{a_i^2}{2\lambda}. \quad (4.8)$$

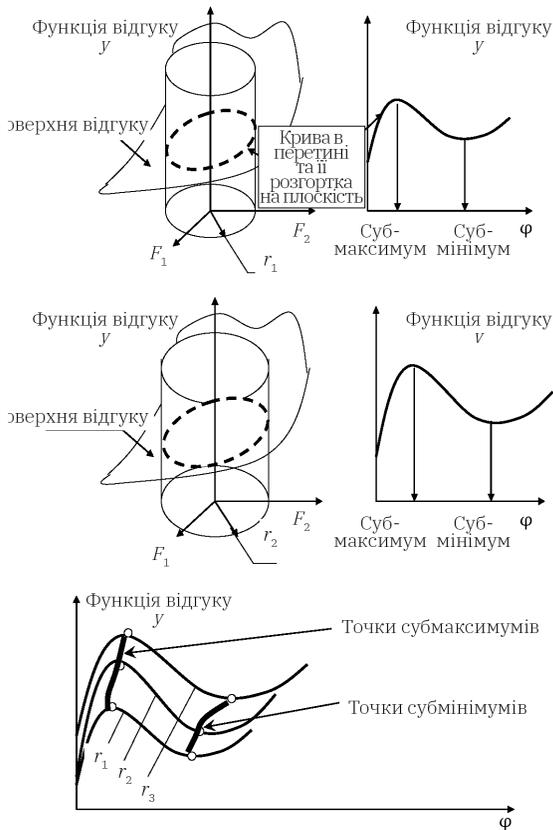


Рис. 4.4 – Схема, що ілюструє метод гребеневого аналізу

Радіус-вектор для розглянутої задачі описується рівнянням

$$r^{2*} = \begin{pmatrix} \frac{-0.959\lambda - 0.2617}{0.8859^2 - (\lambda + 1.9237)(\lambda + 0.6752)} \\ -1.787\lambda - 0.357 \\ \frac{-0.959\lambda - 0.2617}{0.8859^2 - (\lambda + 1.9237)(\lambda + 0.6752)} \end{pmatrix}^T \times \begin{pmatrix} \frac{-0.959\lambda - 0.2617}{0.8859^2 - (\lambda + 1.9237)(\lambda + 0.6752)} \\ -1.787\lambda - 0.357 \\ \frac{-0.959\lambda - 0.2617}{0.8859^2 - (\lambda + 1.9237)(\lambda + 0.6752)} \end{pmatrix}, \quad (4.9)$$

де λ – множник Лагранжа.

Залежність $r = r(\lambda)$ представлена на рис. 4.5

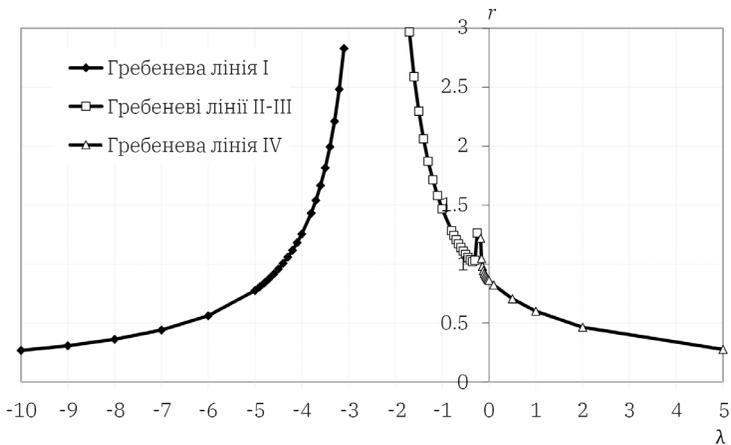


Рис. 4.5 – Залежність $r = r(\lambda)$

Як видно з рис 4.5, має місце існування двох полюсів, значення λ яких визначається з рівняння

$$\chi = \begin{pmatrix} \chi_1^* \\ \chi_2^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{-0.959\lambda - 0.2617}{0.8859^2 - (\lambda + 1.9237)(\lambda + 0.6752)} \\ \frac{-1.787\lambda - 0.357}{0.8859^2 - (\lambda + 1.9237)(\lambda + 0.6752)} \end{pmatrix}. \quad (4.10)$$

Рішення (4.10) існує в 3-х областях визначення λ , розділених полюсами $\lambda = -2.383$ та $\lambda = -0.2157$:

$\lambda \in]-\infty; -2.383[$ для гребневої лінії I;

$\lambda \in]-2.383; -0.2157[$ для гребневих ліній II-III;

$\lambda \in]-0.2157; +\infty[$ для гребневої лінії IV.

Множина субоптимальних рішень, одержуваних на математичній моделі (4.2), залежно від значень у всіх діапазонах областей визначення, представлено на рис. 4.6.

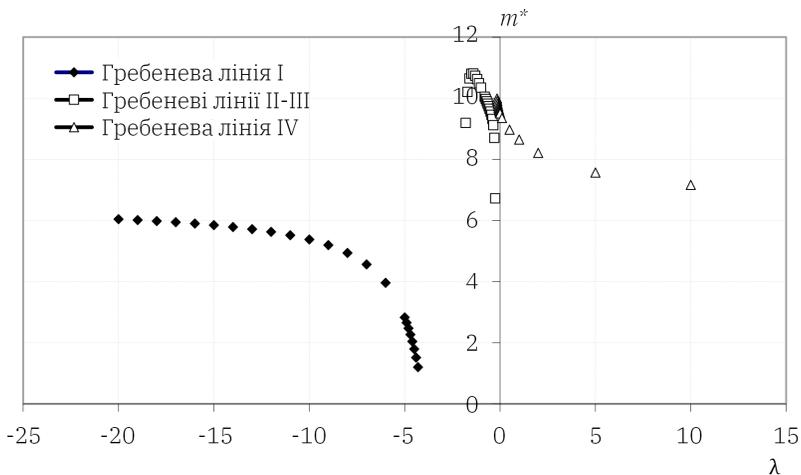


Рис. 4.6 – Залежність $m^* = m^*(\lambda)$

Множина субоптимальних остаточних рішень гребневого аналізу наведено на рис. 4.7.

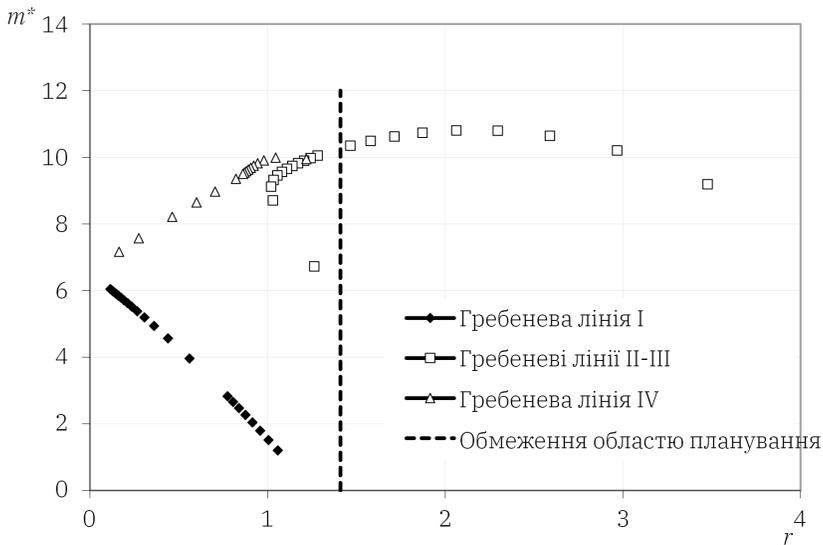


Рис. 4.7 – Залежність $m^* = r^*(\lambda)$

Процедура побудови оптимальної технологічної схеми полягає в наступному:

1. На основі моніторингу реального технологічного процесу плавки в конкретних промислових умовах визначаються фактичні показники функціонування СМО «електродугова пiч-міксер – ливарний конвеєр». Ці показники мають забезпечувати таке функціонування даної системи, щоб забезпечити виконання виробничої програми цеху.

2. На основі цих даних визначається фактична потреба в розплаві ливарного конвеєра, фактичний час виконання технологічних операцій та здійснюється операція нормування цих величин за формулою (1.78).

3. Розраховується радіус-вектор (4.7), що описує положення точки (λ, μ^{-1}) у факторному просторі.

4. Визначається оптимальне початкове завантаження печі.

5. Реалізується ітераційна процедура, подана на рис. 4.8.

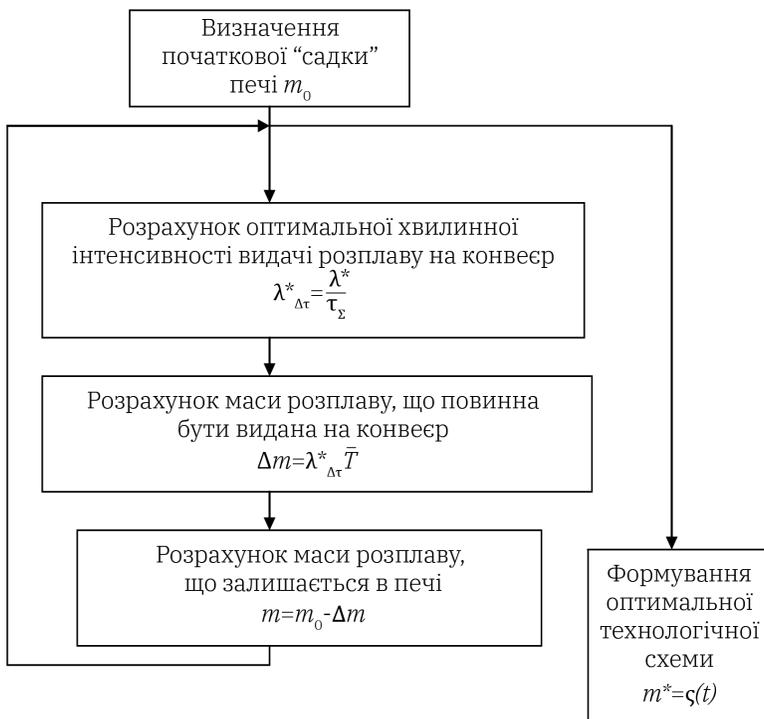


Рис. 4.8 – Процедура формування оптимальної технологічної схеми плавки

Запропонована процедура дозволяє формувати оптимальну технологічну схему плавки, що є основою для пошуку оптимального керування процесом на етапі термочасової обробки розплаву. Вона дозволяє формувати завдання (Δm) для вагодозуючого пристрою для керування процесами видачі розплаву на ливарний конвеєр, що виконує функцію керування приводом нахилу печі (рис. 1.13 та 1.14).

4.2. Оцінка суттєвості дії керуючого впливу на формування хімічного складу чавуну

При виборі керуючого впливу на розплав з метою доведення його до заданого, відповідно до стандарту або технічних умов, можна використати аналогію, наведену в роботі [12], де розглянуто алгоритм керування «в цілому» до дуплекс-процесу «вагранка – електродугова пич». Задачею керуючої дії її вплив на перебіг фізико-хімічних процесів в розплаві, або штучне додавання елемента в розплав задля його насичення цим елементом. Схема, що демонструє поведінку елемента (для прикладу відновлення вуглецю внаслідок фізико-хімічних процесів), представлена на рис. 4.9.

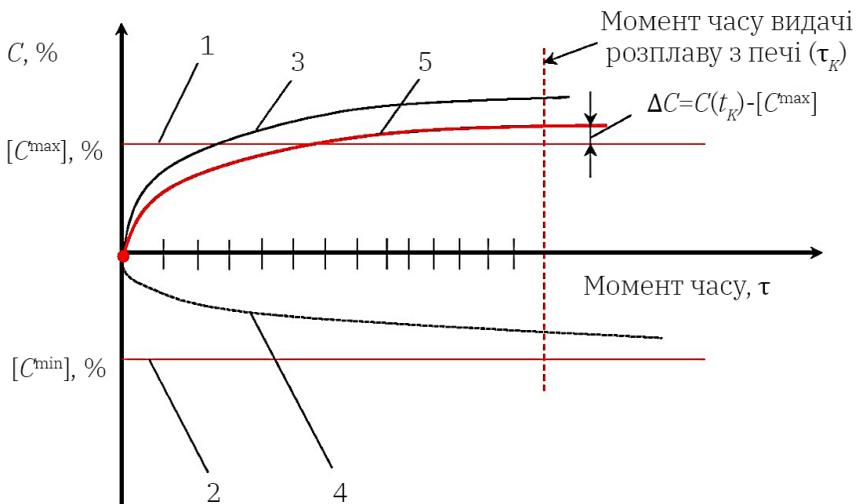


Рис. 4.9 – Поведінка вмісту хімічного елемента в чавуні внаслідок його відновлення в розплаві (на прикладі вуглецю): 1 – верхній допустимий вміст вуглецю; 2 – нижній допустимий вміст вуглецю; 3 – крива насичення розплаву вуглецем (теоретичний випадок); 4 – крива зниження ступеня насичення; 5 – «сумарна» крива зміни вмісту вуглецю

Принцип керування процесом, що має на меті доведення вмісту елемента в розплаві до заданого (на прикладі вуглецю) на момент видачі розплаву з електродугової печі на конвеєр, наведено на рис. 4.10. У цьому випадку можна говорити про оптимізацію керування по кінцевому стану, так як відносно термочасової обробки розплаву в електродуговій печі кінцевий стан відповідає видачі розплаву.

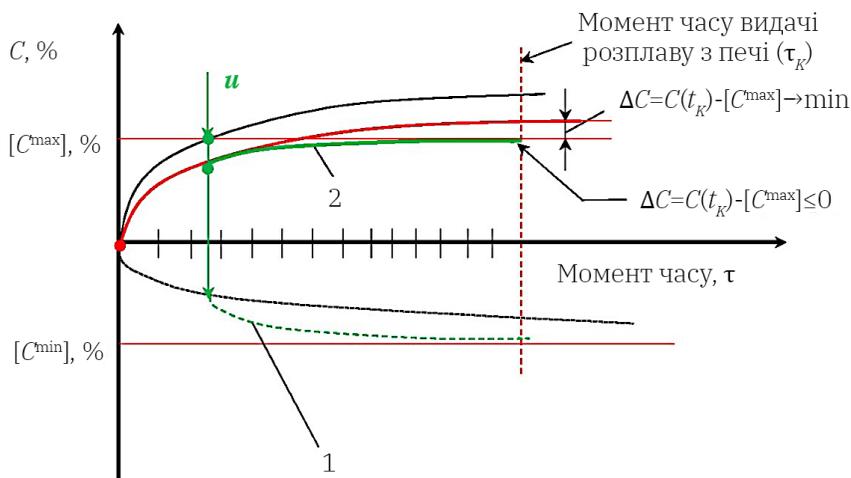


Рис. 4.10 – Принцип керування за кінцевим станом процесом термочасової обробки розплаву в електродуговій печі:
 u – керування; 1 – крива зниження ступеня насичення розплаву хімічним елементом внаслідок керуючого впливу u ;
 2 – «сумарна» крива зміни вмісту хімічного елемента після застосування керуючого впливу u

Форми кривих, що описують зміну вмісту вуглецю у часі на рис. 4.9 та 4.10 є демонстраційними (імовірними), а точний їхній вигляд може бути отриманий лише на підставі математичного моделювання, що має за мету визначення кінетичного рівняння, яке описує зміну вмісту елемента в часі.

Якщо ввести поняття нестационарного і стаціонарного режиму процесу, за аналогією з [12], перше з них відповідає етапу

протікання фізико-хімічного процесу, у результаті вміст елемента змінюється у часі, а другий – практично незмінному вмісту елемента. Однак з урахуванням вимог до хімічного складу сплаву, що передбачають необхідність потрапляння вмісту кожного елемента в заданий діапазон, є підстави вважати за стаціонарний режимом процесу такий, при якому вміст елемента змінюється в часі, але внаслідок цього вміст елемента не випаде за межі поля допуску, регламентованого стандартом або технічними умовами. Фактично це означає мінімізацію критерію (3.20).

Для визначення суттєвості впливу обраного варіанта керування на досягнення заданого кінцевого стану, що проявляється в переході процесу з нестационарного режиму в стаціонарний, відповідним математичним апаратом може бути дисперсійний аналіз. Процедура його відома і математично описується формулами (4.11)–(4.14), що дозволяють встановити значимість обраного керуючого впливу на стабілізацію вмісту хімічного елемента відносно якого виконується операція керування. При цьому під стабілізацією мається на увазі перехід процесу в стаціонарний режим

$$F = \frac{s_1^2}{s_2^2} \geq F_{кр}, \quad (4.11)$$

де

$$s_1^2 = \frac{n \sum_{k=1}^K \left(M(x^{(k)}) - \bar{x} \right)^2}{K-1}, \quad (4.12)$$

$$\bar{x} = K^{-1} \sum_{k=1}^K M(x^{(k)}), \quad (4.13)$$

$$s_2^2 = \frac{\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^n \left(x_{kj} - \bar{x} \right)^2 - n \sum_{k=1}^K \left(M(x^{(k)}) - \bar{x} \right)^2}{nK - K}. \quad (4.14)$$

В формулах (4.11)–(4.14) прийняті такі позначення:

$x_{ij}^{(k)}$ – випадкова величина, що відповідає вмісту i -го елемента хімічного складу в j -му експерименті в k -й момент часу;

K – кількість моментів часу, для яких проводиться аналіз даних;

n – число паралельних експериментів, що відповідають числу результатів хімічного аналізу по i -му елементу в k -й момент часу;

$M(x_i^{(k)})$ – математичне очікування випадкової величини, що розраховується за формулою (4.15) для k -го моменту часу

$$M(x_i^{(k)}) = n^{-1} \sum_{j=1}^n x_{ij}^{(k)}, \quad i = 1, N, \quad k = 1, K; \quad (4.15)$$

s_1^2 – факторна дисперсія;

s_2^2 – остаточна дисперсія.

Підсумком процедури дисперсійного аналізу в контексті задачі, що вирішується, має бути визначення моменту часу переходу об'єкта керування з нестационарного режиму в стаціонарний режим за вмістом хімічного елемента відносно якого виконується операція керування. Перехід з нестационарного в стаціонарний режим визначається як момент часу, коли дія керуючого впливу стає статистично значущою, тобто коли абсолютна різниця двох групових середніх значень $x^{(k)}$ перевищить величину $t_{кр} s$:

$$\left| M(x^{(1+r)}) - M(x^{(1)}) \right| > t_{кр} s \left(M(x^{(1+r)}) - M(x^{(1)}) \right), \quad r = 1, \dots, 4, \quad (4.16)$$

де

$$s = \sqrt{\frac{2}{n} s_2^2}. \quad (4.17)$$

Таким чином, визначивши момент переходу процесу з нестационарного в стаціонарний режим, можна оцінити величину невідповідності хімічного складу за кожним елементом значен-

ням, регламентованим стандартом або технічними умовами, у кожний момент часу в процесі плавки. Відповідно може бути визначена ефективність обраного варіанта керування на основі оцінки його впливу на вміст елемента на момент видачі розплаву на конвеєр. Формально цей критерій може бути поданий вигляді

$$\Delta = 1 - B \rightarrow \max, \quad (4.18)$$

де B – частка браку за невідповідністю вмісту елемента заданому, що визначається відповідно (3.20).

Нижче наведено приклад визначення ефективності керуючого впливу відносно забезпечення заданого вмісту вуглецю в дуплекс-процесі «вагранка – електродугова піч-міксер» [12]. Результати наведено в табл. 4.7.

Таблиця 4.7 – Результати дисперсійного аналізу

	Рівні впливу фактору керування для моментів часу k				
	1	2	3	4	5
Статистичні характеристики	3.74	3.35	*	3.45	3.38
	3.79	3.56	*	3.34	3.28
	3.6	3.48	*	3.37	3.21
	3.59	3.36	*	3.39	3.2
	3.8	3.55	*	3.4	3.28
	3.6	3.38	*	3.38	3.28
	3.69	3.46	*	3.35	3.34
	3.8	3.49	*	3.42	3.25
	3.8	3.35	*	3.32	3.3
	3.6	3.35	*	3.41	3.33

Продовження Таблиці 4.7

	1	2	3	4	5
	3.76	3.54	*	3.28	3.22
	3.67	3.46	*	3.3	3.29
$M\left(\overline{[C]^{(k)}}\right)$	3.701	3.455	–	3.332	3.307
$\overline{[C]}$	3.44875	3.44875	–	3.44875	3.44875
$M\left(\overline{[C]^{(k)}}\right) - [C]$	0.06363	3.91E-05	–	0.0136	0.0201
s_1^2			0.389571		
s_2^2			0.00575		
φ_1			3		
φ_2			44		
F			67.75		
$F_{кр}$			2.82		
$s\left(M\left(x^{(1+r)}\right) - M\left(x^{(1)}\right)\right)$			0.030958		
$t_{кр}$			2.07		
$t_{кр}S$			0.064082		
$\left M\left(x^{(1+r)}\right) - M\left(x^{(1)}\right)\right $	0	0.246	0.328	0.369	0.394

Примітка: * – дані для моменту часу 3 не враховувалися для практичної реалізації алгоритму керування «в цілому», оскільки планувалися до використання для подальшої перевірки гіпотези про працездатність алгоритму

З табл. 4.7 видно, що між першим і другим моментами часу вплив керування є суттєвим. Цей висновок обґрунтований тим, що між першим та другим моментами часу здійснюється операція коригування вмісту вуглецю у розплаві, виданому або з вагранки в разі проведення дуплекс-процесу «вагранка – електродугова піч-міксер», або у розплаві, що знаходиться в електродуговій печі після операції розплавлення. При цьому керування здійснюється або введенням феросплавів (табл. 2.5 та 2.6), або зануренням електродів у розплав при відключеній напрузі. В останньому випадку в разі вирішення задачі стабілізації вмісту вуглецю та кремнію оптимальне керування може бути визначено відповідно до процедури (1.7)–(1.21).

Таким чином, запроваджуючи поняття нестационарного і стаціонарного режимів, можна визначити час, починаючи з якого вплив керування, що розуміється як забезпечення заданого кінцевого стану по вмісту елементів хімічного складу, стає значним. Розрахункове значення цього моменту відповідає величині k , при якій крива вмісту хімічного елемента перетинається з верхньою або нижньою допустимою межею. Для прикладу, наведеного на рис. 4.10 для вуглецю, це верхня допустима межа [C^{max}].

4.3. Керування електродуговою піччю як машиною-автоматом

Розглядаючи електродугову піч як елемент СМО «електродугова піч-міксер – ливарний конвеєр», доцільно враховувати, що її функціонування має бути ув'язане із іншим обладнанням. Так, попереднім комплексом обладнання є системи транспортування та завантаження шихти, послідовним комплексом обладнання є заливальні установки, функціонування яких, своєю чергою, пов'язане безпосередньо з ливарним конвеєром. Функціонування останнього ув'язане з усім іншим обладнанням ливарного цеху, призначеним для виготовлення ливарних форм. Зважаючи на такий системний розгляд, доцільно розглядати електродугову піч як елемент автоматичної системи ливарного цеху, на виході якого формується готовий продукт у вигляді виливків.

В такому разі електродугова піч має представлятися як машина-автомат, що забезпечує видачу розплаву в заданій кількості заданої якості в необхідний час, відповідно до загальної циклограми процесу виготовлення виливків. При такому представленні електродугової печі задля синтезу керування піччю можна обрати блок-схему системи керування, показану на рис. 4.11 [1].

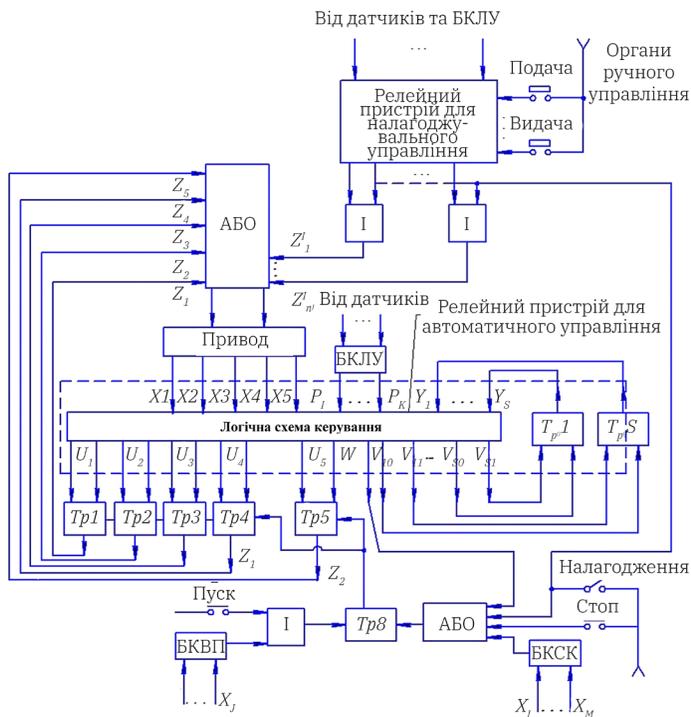


Рис. 4.11 – Приклад блок-схеми системи керування: БКЛУ – блок контролю логічних умов; БКСК – блок контролю стану кінцевих перемикачів; БКВП – блок контролю вихідного положення; x_i – сигнали, що знімаються з кінцевих перемикачів (вихідні сигнали приводу, вхідні сигнали для системи керування); Tr_i – тригери; I, АБО – логічні елементи; Y_i – сигнали з елементів пам'яті; Z_i – сигнали з релейного пристрою для налагоджувального управління; U_i – керуючі сигнали з системи керування на привод

Основою системи керування є багатотактний релейний пристрій – логічна схема. Вихідні сигнали логічної схеми впливають на вхід приводу, здійснюючи перемикання розподільників та переміщення робочих органів. Контроль крайніх положень робочих органів здійснюється кінцевими перемикачами, які подають сигнали на вхідні канали релейного пристрою. Крім них, на вхідні канали релейного пристрою повинні надходити сигнали від спеціальних схем, що здійснюють перевірку дозволяючих та підтверджуючих логічних умов, зазначених у циклограмі роботи приводу.

Межі тактів для приводу, що збігаються з початком руху або зміною швидкості робочих органів, визначаються моментами зміни значень сигналів у каналах розподільників. У той самий час межі тактів для релейного пристрою пов'язані зі станом кінцевих вимикачів. На початку будь-якого такту приводу кожен із робочих органів натискає певний кінцевий вимикач, тобто його положення фіксується цим вимикачем. Відповідне значення основного входу релейного пристрою вважається фіксованим. Потім у процесі руху робочого органу жоден із кінцевих вимикачів не натиснутий – орган займає нефіксоване положення, і відповідне значення входу релейного пристрою вважається нефіксованим. У процесі роботи приводу фіксовані значення основного входу релейного пристрою чергуються із нефіксованими. Проте за нефіксованих значеннях робочі органи приводу мають продовжити рух, тобто ніяких змін на вході приводу не повинно відбутися – вихід релейного пристрою повинен зберігати постійне попереднє значення, що відповідає фіксованому значенню основного входу. Ця вимога певною мірою визначає структуру логічної схеми релейного пристрою і має обов'язково враховуватись при його синтезі. Однак можливий і інший підхід – прийняти таку модель релейного пристрою системи керування, яка наперед враховує зазначену особливість приводу.

Перед вхідними каналами приводу встановлюються тригери з роздільними входами, що управляються сигналами від логічної схеми.

Виділення тригерів дозволяє скоротити кількість елементів логічної схеми релейного пристрою, спростити запис та процедуру синтезу системи керування, оскільки вводяться функції U_{ij} ,

які можуть бути рівними нулю при нефіксованих значеннях основного входу релейного пристрою. Скорочення оригінальної частини логічної схеми і виділення блоків тригерів, що однаково працюють, полегшує налагодження системи, її обслуговування та контроль, зокрема, визначення місця пошкодження при несправностях.

Введення в схему логічних елементів, «АБО», що стоять безпосередньо перед розподільниками, дозволяє мати окремі пристрої для автоматичного керування та налагоджувального управління. Сигнали U_{ij} надходять від логічної схеми пристрою автоматичного керування, сигнали Z_{ij} – від релейного пристрою налагоджувального управління.

Система керування пиччо має враховувати низку додаткових вимог, зумовлених, зокрема, міркуваннями надійності. Нижче надається перелік таких вимог, сформульованих в результаті аналізу типових причин збоїв у роботі систем керування приводом:

1. Необхідно враховувати проміжні значення основного входу релейного пристрою через конкуренцію робочих органів приводу. Проміжні значення основного входу, що з'являються при цьому, можуть збігатися з іншими значеннями основного входу. Щоб уникнути перемикання розподільників приводу при проміжних значеннях основного входу релейного пристрою відповідні значення повного стану повинні відрізнятися від будь-якого іншого, що враховується в процесі синтезу.

2. Повинні бути відсутніми критичні змагання елементів пам'яті релейного пристрою через відмінність їх часу спрацювання. Щоб уникнути цього, побудова релейного пристрою відбувається таким чином, щоб при будь-якій зміні внутрішнього стану перемикався лише один елемент пам'яті.

3. Має бути забезпечений нульовий захист системи керування, тобто якщо живлення зникає та раптом знов з'являється, то не має відбуватися мимовільне продовження роботи. Запуск машини-автомату має відбуватися лише після того, як оператор натисне на кнопку пуску.

4. Автоматичний режим може бути увімкнений лише при відповідному положенні всіх робочих органів приводу. Недотримання цієї вимоги може спричинити помилкові спрацювання та аварію.

5. Якщо в процесі роботи машини якийсь із кінцевих вимикачів не повернувся у вихідне положення (западе), то привід повинен бути зупинений.

6. Коли машина-автомат працює в автоматичному режимі, вплив на органи ручного керування (кнопки, тумблери) не повинен викликати жодних перемикачів. З іншого боку, переведення машини-автомату в режим налагодження виключає послідовність переміщень робочих органів, передбачену автоматичним режимом.

При описі роботи елементарних приводів за допомогою логічних змінних слід виходити з наступного. Якщо елементарний привод забезпечений двома кінцевими вимикачами, що фіксують крайнє положення робочого органу, причому його переміщення не обумовлено підтверджуючими логічними умовами, для характеристики цього приводу використовується одна змінна. Вона набуває нульового значення, коли шток циліндра перебуває у прибраному положенні або висувається, і одиничне, коли шток висунутий чи засувається.

Коли число перемикачів елементарного приводу більше двох або двох кінцевих вимикачах в процесі руху перевіряється підтверджуюча логічна умова, що число вихідних змінних елементарного приводу відповідає кількості кінцевих вимикачів. Змінна дорівнює нулю, якщо відповідний кінцевий вимикач не натиснутий і одиниці, коли він натиснутий.

Кількість тригерів пам'яті логічної схеми автоматичного керування, що формують сигнали U_{ij} , і навіть сигнали керування тригерами пам'яті, визначаються в процесі синтезу релейного пристрою.

Оптимальний варіант керування в поточному стані в даний момент часу по ходу процесу, що визначається множиною вхідних змінних $\{F_i\}$ в момент часу $\tau_3(u)$ генерації заявки конвеєром, визначається на основі алгоритму, що враховує наступні альтернативні варіанти:

- насичення ванни вуглецем;
- нагрівання / охолодження ванни;
- введення феросплавів.

Альтернативні можливі варіанти циклограм для кожної з названих альтернатив щодо варіантів керування наведено на

рис. 4.12–4.14. В циклограмах прийняті наступні позначення виконавчих механізмів (ВМ) відповідно до технологічних операцій, що вони здійснюють:

- ВМ1 – поворот зводу печі для завантаження шихти;
- ВМ2 – підйом – опускання електродів;
- ВМ3 – переміщення електродотримачів;
- ВМ4 – завантаження i -го компоненту шихти або феросплаву;
- ВМ5 – відкривання/зачинення робочої двері;
- ВМ6 – видача розплаву з печі в ківш;
- ВМ7 – переключення ступеня напруги трансформатора;
- ВМ8 – поворот рами заливального автомата;
- ВМ9 – заливка форм з ковша.

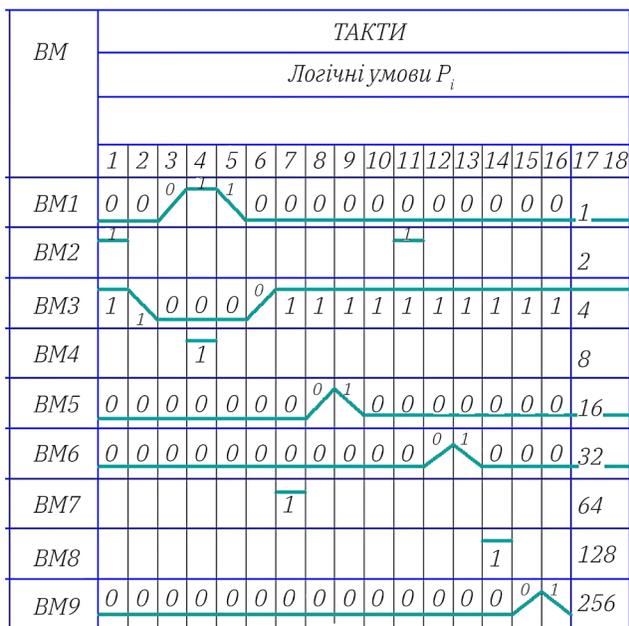


Рис. 4.12 – Циклограма роботи електродугової печі, що функціонує у складі ливарного конвеєра та розглядається як машина-автомат, з керуванням хімічним складом за допомогою занурення електродів

У тактах 1–6 здійснюється процес завантаження печі шихтою, в такті 7 виконується плавка (розплавлення шихти), в тактах 8–10 проводиться відбір проб на хімічний аналіз і очікується отримання результату, в тактах 11–16 здійснюється процес термочасової обробки: витримка розплаву при заданій температурі.

На межі тактів 10 і 11 відбувається включення механізму вертикального переміщення електродів, що занурює їх у розплав для науглерожування, однак це включення відбувається за логічною умовою p_0 , тобто у разі, якщо хімічний склад, отриманий після розплавлення шихти, не потрапляє у межі поля допуску.

На межі тактів 11 і 12 відбувається включення виконавчих механізмів нахилу печі – починається процес заливання, який триває доти, доки з печі не буде видано масу розплаву, що диктується технологічною схемою плавки. Сигнал на включення – відключення знімається з вагодозуючого пристрою, логічна умова p_1 , таким чином, формує таку вимогу – ливарний конвеєр генерує заявку на розплав.

На межі тактів 13 і 14 включається привод повороту заливального автомата – заповнений розплавом ківш повертається на позицію заливки готових ливарних форм, а порожній ківш з вільної позиції випорожнений на попередній операції заливки, розгортається на позицію заповнення. Як тільки ця операція виявляється виконаною, проводиться нахил ковша, заповненого металом, і заливання готових ливарних форм, встановлених на ділянці заливки ливарного конвеєра. Ця операція проводиться у такті 15.

Характерною особливістю альтернативного варіанта керування – нагріванням ванни – є перемикання ступеня напруги трансформатора, що здійснюється за логічною умовою p_0 на межі тактів 10 та 11 (рис. 4.13). Слід, однак, враховувати, що керування процесами насичення розплаву вуглецем та нагрівання ванни можуть поєднуватись – у разі, якщо розрахунок параметрів $F_i(t)$ показує, що на момент видачі розплаву при генерації заявки не виконується умова $\{F_i\} = \{F_i^3\}$. При цьому маються на увазі ті з вхідних змінних процесу F_i , які беруть активну участь у фізико-хімічних процесах на межах розділу фаз «розплаву – шлак – футеровка – атмосфера печі».

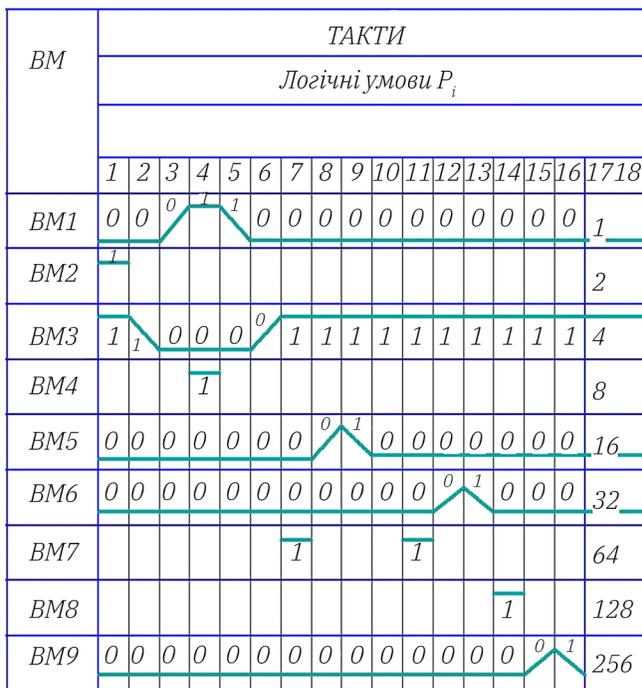


Рис. 4.13 – Циклограма роботи електродугової печі, що функціонує у складі ливарного конвеєра та розглядається як машина-автомат, з керуванням хімічним складом за допомогою нагрівання ванни

Якщо ж параметри F_i не беруть участь у фізико-хімічних процесах у даних конкретних умовах, у яких перебуває сплав, то за невиконання умов $\{F_i\} = \{F_i^s\}$ за цими елементами формуються команди керування виконавчими механізмами системи завантаження феросплавів. При цьому конкретна реалізація систем керування завантаженням феросплавів залежить від конструкції вузла завантаження, застосовуваних датчиків рівня та маси, конструкції заслінок на бункерах, компонування бункерів і т.і.

Варіант такої циклограми показано на рис. 4.14.

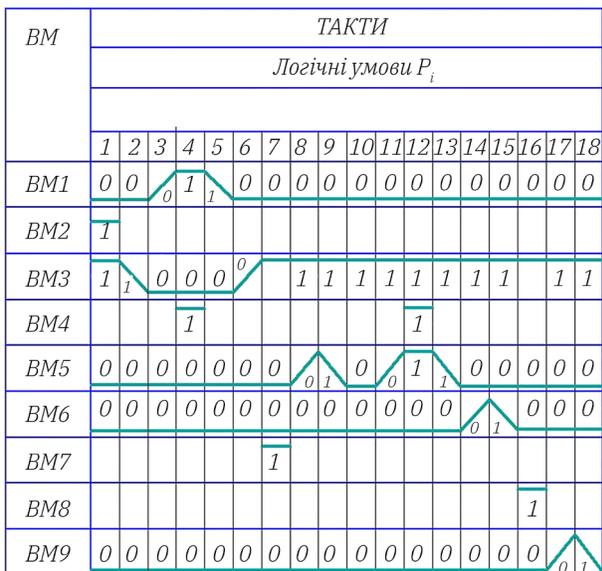


Рис. 4.14 – Циклограма роботи електродугової печі, що функціонує у складі ливарного конвеєра та розглядається як машина-автомат, з керуванням хімічним складом за допомогою введення феросплавів

Разом з тим, у практиці плавки можливі до застосування всі названі варіанти, і вибір будь-якого з них може бути здійснений на основі алгоритму оптимального керування, що реалізується в системі автоматичного керування з використанням блоку контролю логічних умов (БКЛУ). При генерації чергової заявки на розплав, перш ніж подати сигнал на нахил печі, блок системи керування БКЛУ (рис. 4.11) послідовно перевіряє виконання умов $\{F_i\} = \{F_i^3\}$ і формує сигнал керування залежно від того, за яким із параметрів необхідно проводити коригування.

Синтез логічної схеми керування електродуговою піччю як машиною-автоматом, ув'язаною з заливальним автоматом та конвеєром, на основі обраних циклограм здійснюється шляхом побудови таблиці включень відомими методами [1].

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Domin D., Penziev, P. Automated control systems. Kharkiv: TECHNOLOGY CENTER GROUP LTD, 2024. 130 p. <https://doi.org/10.62067/978-617-8242-09-1>
2. Trufanov Y. D., Chumakov K. Y., Liutyi A. Y. Matematychno modeliuvannya ta doslidno-eksperymentalne doslidszhennia enerhoefektyvnosti elektrotekhnolohichnoho kompleksu potuzhnoi duhovoї staleplavlynoi pechi // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2007. Vol. 4, Issue 1 (28). P. 64–69.
3. Naukovi osnovy vyrishennia innovatsiinykh problem identyfikatsii v systemakh avtomatyzatsii protsesiv elektrometalurhii stali ta splaviv / Trufanov Y. D., Liutyi A. P., Chumakov K. Y., Andryias Y. A., Kazanskaia T. Y., Dzhyoev V. V. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2010. Vol. 3, Issue 10 (45). P. 8–23.
4. Razzhyvyn A. V., Sahaida Y. M. Informatsiine zabezpechennia systemy avtomatychnoho keruvannia duhovoїu staleplavlynoiu pichchiu za temperaturoiu metalu // Visnik SUDU. 2000. Issue 3 (25). P. 215–220.
5. Razzhyvyn A. V., Serdiuk A. A. Modeliuvannya potuzhnosti ta napruhy na elektrychnii duzi // Naukovi pratsi DonNTU. 2003. Issue 64.
6. Domin D. Upravlinnia protsesom vydachi rozplavu na plavylno-zalyvalnii diliantsi lyvarnoho tsekhu // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "KhPI". Serii: Novi rishennia v suchasnykh tekhnolohiiakh. 2013. Issue 56. P. 208-216. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vcpinrct_2013_56_39
7. Domin D. Synthesis process control elektrodugovoy smelting iron // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2012. Vol. 2, Issue 10 (56). P. 4–9. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2012.3881>
8. Domin D. Udoskonalennia protsesiv keruvannia elektro-plavkoїu // Visnyk natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». 2010. Issue 4. P. 33–44.
9. Domin D. Optymizatsiia rezhymu roboty duhovoї elektropechi pry vyplavtsilehovanoho chavunu // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2004. Issue 6 (12). P. 43–46.

10. Domin D. Synthesis of optimal temperature regulator of electroarc holding furnace bath // Scientific Bulletin of National Mining University. 2012. Issue 6. P. 52–58.
11. Domin D. Mathematical description typification in the problems of synthesis of optimal controller of foundry technological parameters // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2014. Vol. 1, Issue 4 (67). P. 43–56. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.21203>
12. Domin D. Development of «whole» evaluation algorithm of the control quality of "cupola – mixer" melting duplex process // Technology Audit and Production Reserves. 2019. Vol. 3, Issue 1 (47). P. 4–24. doi: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2019.174449>
13. Domin D. Improving technology for manufacturing casting case of truck clutch release cylinder // ScienceRise. 2023. Issue 2 (85). P. 3–26. doi: <http://doi.org/10.21303/2313-8416.2023.003194>
14. Lysenkov V. Yu. Systematyzovani dani po khimichnomu skladu chavunu vahranochnoi plavky dlia vyhotovlennia tonkostinnykh vylyvkiv // XIX Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia mahistrantiv ta aspirantiv «Teoretychni ta praktychni doslidzhennia molodykh vchenykh»: materialy konferentsii. Kharkiv: NTU «KhPI», 2025. P. 735–736.
15. Domin D. Methodology of forming functional in the optimal control electric smelting // Technology Audit and Production Reserves. 2011. Vol. 1, Issue 1 (1). P. 15–24. doi: <http://doi.org/10.15587/2312-8372.2011.4082>
16. Domin D. Metody otsinky ta optymizatsiia pokaznykiv efektyvnosti tekhnolohichnoho protsesu plavky // Visnyk Kharkivskoho derzhavnogo politekhnichnoho universytetu. 2000. Issue 117. P. 42–44.
17. Domin D., Zaporozhchenko T. V. Enerhozberihaiucha tekhnolohiia otrymannialehovanohochavunu. Protsesylyttia. 2001. Issue 4. P. 3–5.
18. Nikolaiev D. A. Vyznachennia vplyvu rezhymiv elektroduhovoii plavky na formuvannia khimichnoho skladu stali // XIX Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia mahistrantiv ta aspirantiv «Teoretychni ta praktychni doslidzhennia molodykh vchenykh»: materialy konferentsii. Kharkiv : NTU «KhPI», 2025. P. 783–784.
19. Domin D., Domin O. Adaptive technology for constructing the kinetic equations of reduction reactions under conditions of a priori

- uncertainty // EUREKA: Physics and Engineering. 2021. Issue 4. P. 14–29. doi: <http://doi.org/10.21303/2461-4262.2021.001959>
20. Domin D. Constructing the parametric failure function of the temperature control system of induction crucible furnaces // EUREKA: Physics and Engineering. 2020. Issue 6. P. 19–32. doi: <http://doi.org/10.21303/2461-4262.2020.001489>
21. Classification rule for determining the temperature regime of induction gray cast iron / Stanovska I., Duhanets V., Prokopovych L., Yakhin S. // EUREKA: Physics and Engineering. 2021. Issue 1. P. 60–66. doi: <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2021.001604>
22. Penziev P., Lavryk Ye. Diagnostics of the temperature condition of cast iron melting in induction furnaces by the content of SiO₂ and CaO in slag // ScienceRise. 2024. Issue 1. P. 14–20. doi: <http://doi.org/10.21303/2313-8416.2024.003558>
23. Identification of temperature in cupola furnace based on the construction of the "slag composition – slag viscosity" model / Nikolaiev D., Selivorstov V., Dotsenko Y., Dzevochko O., Pereverzieva A., Dzevochko A. // Technology Audit and Production Reserves. 2025. Vol. 1, Issue 1 (81). P. 29–33. doi: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.322458>
24. Mourad A. Localization of vectors–patterns in the problems of parametric classification with the purpose of increasing its accuracy // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2016. Vol. 4, Issue 4 (82). P. 10–20. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.76171>
25. Aouati M. Improvement of accuracy of parametric classification in the space of $n \times 2$ factors-attributes on the basis of preliminary obtained linear discriminant function // EUREKA: Physics and Engineering. 2017. Issue 3. P. 55–68. doi: <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2017.00362>
26. Mourad A. Parametric identification in the problem of determining the quality of dusulfuration and dephosphoration processes of Fe-C alloy // Technology Audit and Production Reserves. 2017. Vol. 2, Issue 1 (34). P. 9–15. doi: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2017.99130>
27. Mourad A. Selection of state variables and algorithms of parametric identification of the object by its kinematic characteristics //

- ScienceRise. 2017. Issue 4 (2). P. 37–41. doi: <https://doi.org/10.15587/2313-8416.2017.99049>
28. Domin D. Adaptive modeling in problems of optimal control search termovremennoy cast iron // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2013. Vol. 6, Issue 4 (66). P. 31–37. URL: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/19453/17110>
29. Domin D. Mathematical modeling in the problem of selecting optimal control of obtaining alloys for machine parts in uncertainty conditions // Problems Of Mechanical Engineering. 2013. Vol. 16, Issue 6. P. 15–23. URL: <http://journals.uran.ua/jme/article/view/21309>

ДЬОМІН Дмитро Олександрович
Директор TECHNOLOGY CENTER PC
Доктор технічних наук, професор

**ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОДУГОВОЮ ПЛАВКОЮ
В ДУПЛЕКС-ПРОЦЕСАХ**

Монографія

ТОВ «ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ЦЕНТР ГРУП»
вул. Шатилова дача, 4, м. Харків, Україна, 61165
Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
№. 7582 від 01.02.2022
Електронна версія