

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»**

**Дьомін Дмитро Олександрович**



**УДК 681.5:519.24**

**МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ УПРАВЛІННЯ  
ПРОЦЕСАМИ ЕЛЕКТРОПЛАВКИ  
В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ**

**Спеціальність 05.13.03 – системи і процеси управління**

**Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук**

**Харків - 2013**

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України

**Науковий консультант:**

доктор технічних наук, професор  
**Раскін Лев Григорович,**  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»,  
завідувач кафедри комп'ютерного моніторингу та  
логістики

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, професор  
**Путятін Євген Петрович,**  
Харківський національний університет радіоелектроніки,  
завідувач кафедри інформатики

доктор технічних наук, професор  
**Горбійчук Михайло Іванович,**  
Івано-Франківській національний технічний університет  
нафти і газу,  
завідувач кафедри комп'ютерних систем і мереж

доктор технічних наук, старший науковий співробітник  
**Суздаль Віктор Семенович,**  
Інститут сцинтиляційних матеріалів НАН України,  
провідний науковий співробітник відділу технології  
вирощування монокристалів

Захист відбудеться «30» травня 2013 р. о 14<sup>30</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.14 у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: вул. Фрунзе 21, м. Харків, 61002.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», вул. Фрунзе 21, м. Харків, 61002.

Автореферат розісланий «09» квітня 2013 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



Ліберг І. Г.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Результати досліджень ефективності систем управління електроплавкою, які використовуються в промисловості, показують, що їх доцільно вдосконалювати завдяки врахуванню критеріїв якості управління, що пов'язані з необхідністю мінімізації відхилення показників якості сплавів від регламентованих значень як на етапі плавки, так і на етапі термочасової обробки розплаву.

Для управління електроплавкою характерне те, що необхідно враховувати велику кількість параметрів, які змінюються в цьому процесі, а сам процес плавки відбувається в умовах невизначеності вхідних даних – параметрів, що описують стан системи. Внаслідок такої невизначеності, існує проблема оцінювання станів системи в процесі електроплавки та побудови адекватних моделей, які можуть бути використані для вирішення цієї проблеми. Існуючі функціональні, чисельні чи графічні залежності, що пов'язують вхідні та вихідні параметри процесів плавки, на основі яких може бути здійснений їх адекватний опис, в багатьох випадках не дозволяє моделювати управління плавкою. За таких умов пошук оптимального управління процесами на всіх етапах - як власно плавки, так і термочасової обробки, пов'язаний із значними складнощами.

Шляхом вирішення названої проблеми є розроблення методології визначення параметрів моделей, що описують процеси електроплавки, яка дозволяє отримувати адекватний математичний опис зв'язку вихідних змінних – суть параметрів якості сплавів, з параметрами, що характеризують стан системи в процесі плавки в реальному часі. Використання такої методології дозволило б моделювати та знаходити оптимальне управління процесами електроплавки, що задовольняє обраним критеріям якості управління як на етапі власно плавки, так і термочасової обробки, при наявності невизначеності параметрів, що описують цей процес.

У зв'язку з цим тема дисертаційної роботи, присвяченої проблемі моделювання та оптимізації управління електроплавкою в умовах невизначеності параметрів, що описують стан системи, є актуальною.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана на кафедрі ливарного виробництва НТУ «ХП» у відповідності до плану науково-дослідницької тематики кафедри. Як науковий керівник здобувач проводив дослідження у рамках госпрозрахункових НДР: «Розробка оптимального ресурсозберігаючого управління процесами плавки легованого чавуну» (ВАТ «Кременчуцький завод дорожніх машин», м. Кременчук); «Управління окислювально-відновлювальними процесами на етапі термочасової обробки розплаву з метою забезпечення заданих властивостей сплаву» (ПАТ «Харківський машинобудівний завод «Світло Шахтаря», м. Харків); «Модернізація систем управління процесами плавки на ТОВ «ХЗ ПТУ» з метою зменшення енерговитрат на плавку та браку з причин металургійного характеру» (ТОВ «Харківський завод підйомно-транспортного устаткування», м. Харків); «Моделювання функціонування плавильно-

заливальної системи з метою виявлення резервів зменшення потенційних витрат, пов'язаних з простоями конвеєра та енерговитрат в процесі плавки» (УкрДНТЦ «Енергосталь», м. Харків); «Програмно-технічна реалізація системи управління устаткуванням плавильно-заливально-формувальної ділянки цеху чавунного литва на базі імпульсних методів формоутворення» (УкрНДІЛивмаш, м. Харків). Як відповідальний виконавець брав участь у науково-дослідних господарських темах: «Оптимізація управління процесами електроплавки спеціального чавуну за критерієм мінімуму енерговитрат на 1 т. рідкого чавуну» (ВАТ «Кременчуцький завод дорожніх машин», м. Кременчук); «Управління термочасовою обробкою чавуну СЧ20 при виплавці його в електродуговій печі-міксері з метою усунення поверхневого відбілу та виключення мікротріщин» (ВАТ «Кременчуцький завод дорожніх машин», м. Кременчук); «Управління процесом виплавки легуючих присадок в індукційних печах ІСТ-04» (АТ «Куп'янський ливарний завод», м. Куп'янськ).

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є розроблення методології визначення структури та параметрів моделей, що описують процеси електроплавки в умовах невизначеності, яка дозволяє знаходити оптимальне управління на основних етапах процесу електроплавки.

Для досягнення зазначеної мети поставлені наступні завдання:

- запропонувати аналітичний опис процесу електроплавки на етапах розплавлення шихти та термочасової обробки, придатний для моделювання управління процесом на цих етапах, обрати та обґрунтувати критерії ефективності управління цими процесами, сформулювати проблеми, пов'язані з пошуком оптимального управління;
- запропонувати метод вирішення проблеми, пов'язаної зі складністю опису вектор-функції виходу на етапі плавлення шихти; розробити метод оцінювання параметрів моделей, які можуть бути використані для визначення вектор-функції виходу на етапі плавлення шихти - рівнянь регресії, побудова яких здійснюється за малій вибірці вхідних змінних - суть нечітких значень - в багатовимірному факторному просторі;
- запропонувати процедуру пошуку оптимального управління на етапі термочасової обробки розплаву, що знаходиться в електропечі до моменту видачі його на ливарний конвеєр на основі моделювання цього процесу;
- розробити метод оцінювання параметрів моделей, що описують динаміку хімічного складу розплаву та використовуються для вирішення задачі пошуку оптимального управління процесом плавки на етапі термочасової обробки розплаву;
- розробити алгоритм управління технологічним процесом на етапі термочасової обробки; запропонувати математичний опис і процедуру синтезу оптимального регулятора температури ванни, що дозволяє отримати оптимальні в розумінні швидкодії перехідні процеси в системі регулювання;
- провести експериментально-промислові дослідження розроблених методів моделювання та оптимізації управління в умовах реального серійного виробництва.

*Об'єкт дослідження* - управління процесами електроплавки.

*Предмет дослідження* - моделювання та оптимізація управління електроплавкою в умовах невизначеності.

**Методи дослідження.** Методи планування експерименту – для побудови математичних моделей типу «склад - властивості» та моделей, що описують фізико-хімічні процеси плавки; методи розпізнавання образів – для визначення вихідних параметрів системи; теорія оптимізації – при розробці і дослідженні алгоритмів пошуку оптимальних складів сплаву; теорія вірогідності – для визначення критеріїв ефективності управління процесами електроплавки; теорія систем масового обслуговування – при розробці методології формування цільового функціонала для оптимального управління електроплавкою; фундаментальні положення теорії управління – при пошуку оптимального управління електроплавкою.

**Наукова новизна отриманих результатів.** Полягає у вирішенні науково-практичної проблеми створення методології визначення структури та параметрів моделей, що описують процеси електроплавки в умовах невизначеності, яка дозволяє знаходити оптимальне управління технологічним процесом:

1. Вперше запропонована процедура оцінювання станів системи на етапі розплавлення шихти, заснована на побудові рівнянь регресії, які адекватно зв'язують вихідні змінні - суть параметри якості сплаву, і параметри, які описують стан системи, що дозволяє визначати параметри функції виходу і вирішувати задачу пошуку оптимального управління по кінцевому стану.

2. Вперше запропонована структура і аналітичний опис цільового функціонала для задачі оптимального управління електропечю, що поєднує в собі критерії кількісного і якісного характеру, і засновані на представленні електропечі елементом системи масового обслуговування «піч - ливарний конвеєр», в якому піч представляється багатоканальним вузлом обслуговування із змінним числом каналів, а також на моделюванні функціонування цієї системи, що дозволяє розробляти оптимальні технологічні схеми плавки для подальшого пошуку оптимального управління процесом на етапі термочасової обробки розплаву.

3. Вперше запропонована процедура пошуку оптимального управління на етапі термочасової обробки ванни до моменту видачі розплаву на ливарний конвеєр, заснована на представленні об'єкта управління лінійною системою в просторі змінних стану - суть вмісту елементів хімічного складу, і подальшому застосуванні принципу максимуму Понтрягіна, що дозволяє знаходити оптимальне управління окислювально-відновлювальними процесами шляхом насичення розплаву вуглецем.

4. Вперше запропоновано метод побудови рівнянь, які описують динаміку хімічного складу сплаву, що витримується в електропечі до моменту видачі його на ливарний конвеєр, заснований на реалізації ітераційної процедури оцінювання коефіцієнтів кінетичних рівнянь, що забезпечує можливість реалізації процедури пошуку оптимального управління по швидкодії на етапі термочасової обробки розплаву.

5. Вперше запропонований алгоритм оптимального управління процесом електроплавки на етапі термочасової обробки, заснований на використанні оптимальних технологічних схем процесу, логічному синтезі системи управління, оптимальному управлінні процесом насичення ванни вуглецем та синтезі оптимального регулятора температури ванни електропечі, застосування яких дозволяє реалізовувати управління по швидкодії, отримувати оптимальні в розумінні швидкодії перехідні процеси в об'єкті регулювання, і забезпечувати вимоги критерію якості управління на етапі термочасової обробки розплаву.

6. Отримали подальший розвиток методи штучної ортогоналізації планів пасивного експерименту, що описують експериментальні значення функції виходу в багатовимірному факторному просторі малої виборки нечітких даних, що дозволяє:

- проводити нечітку кластерізацію для формування підпросторів та подальшого локального опису функції відгуку;
- будувати локальні рівняння регресії в підпросторах повного факторного простору;
- розраховувати значення функції відгуку в точках ортогоналізованого плану експерименту.

7. Отримали подальший розвиток методи обробки несиметричного плану факторного експерименту, засновані на використанні процедури формування усиченого ортогонального реплікоподібного плану для відсіву малозначущих факторів і взаємодій в умовах малої вибірки нечітких даних, що забезпечує:

- можливість формування ортогонального плану для розрахунку оцінок коефіцієнтів рівняння регресії, що описує параметри виходу системи в просторі нечітких значень вхідних змінних;
- можливість вибору найбільш представницьких планів, що мінімізують максимальну оцінку дисперсії вихідної змінної;
- отримання на багатофакторному просторі нечітких даних адекватних математичних моделей, які пов'язують компоненти параметрів виходу системи та параметрів, що входять в опис станів системи.

**Практичне значення одержаних результатів.** Запропоновані методи моделювання та оптимізації управління процесами електроплавки дозволяють в реальних умовах експлуатації печей реалізовувати оптимальне управління процесами плавки як на етапі розплавлення, так і на етапі термочасової обробки – отримувати при цьому параметри якості дозволяють підвищити конкурентоспроможність готової продукції. Запропоновані рішення по алгоритмам управління процесами плавки дозволяють на етапах проектування нових або модернізації існуючих систем управління оптимізувати технічні рішення по програмно-технічній реалізації таких систем. Отримувати при цьому результати застосовуються при управлінні процесом виплавки чавунів різних марок в промислових електропечах, а також для синтезу систем управління технологічними процесами в пічах, що працюють в комплексі

формуально-заливальним обладнання цеху, на стадії їх проектування чи модернізації.

Результати досліджень покладені в основу програмно-технічної реалізації систем управління процесами виплавки двох марок чавунів в електродуговій печі ДЧМ-10, двох марок чавунів та трьох марок сталей в індукційній печі ІСТ1/08-М2 на ВАТ «Кременчуцький завод дорожніх машин» («Кредмаш»). Розроблені математичні моделі використанні при управлінні процесом виплавки легуючих присадок в індукційних печах ІСТ-04 на АТ «Куп'янський ливарний завод» (м. Куп'янськ). Запропонований алгоритм управління процесами електроплавки в печі, що працює в складі формуально-заливної ділянки цеху, використаний на стадії проектування автоматичної ливарної лінії на «УкрНДІ ливарного машинобудування, ливарної технології та автоматизації ливарного виробництва» (м. Харків). Запропоновані рішення по представленню електропечей як елементів системи масового обслуговування прийняті для використання в практиці проектування відповідних ділянок ливарних цехів та металургійних виробництв в ДП «Український науково-технічний центр металургійної промисловості «Енергосталь». Запропоновані рішення по оптимальному управлінню окислювально-відновлювальними процесами використані в практиці плавки в електродугових печах ПАТ «Харківський машинобудівний завод «Світло Шахтаря» (м. Харків), а рішення по синтезу оптимального регулятора температури ванни - для розробки програмно-технічної реалізації системи управління при модернізації електродугових печей ДСП-3 на ТОВ «Харківський завод підйомно-транспортного устаткування» (м. Харків).

Матеріали дисертації використовуються на кафедрі ливарного виробництва НТУ «ХПІ» в навчальному процесі підготовки за напрямками «Обладнання ливарного виробництва» та «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва».

**Особистий внесок здобувача.** Всі основні результати дисертації, що виносяться на захист, отримані здобувачем особисто, серед них - процедура отримання регресійних рівнянь типу «склад - властивості» в умовах малої вибірки нечітких даних; метод формування цільового функціонала для задачі оптимального управління електропечами, працюючими в складі плавильно-заливної системи; процедура отримання оптимальних технологічних схем плавки, на підставі яких можуть бути вирішені задачі пошуку оптимального управління; математичний опис станів системи на етапі термочасової обробки розплаву; метод оцінювання параметрів, що входять в опис станів системи на етапі термочасової обробки; алгоритм оптимального управління процесом електроплавки на етапі термочасової обробки.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати роботи доповідались та обговорювались на: Міжнародних конференціях «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (м. Харків, 1996 - 2012); науково-практичній конференції «Актуальные проблемы современной науки в исследованиях молодых учёных г. Харькова» (м. Харків, 1998); Науково-практичній конференції до 100-річчя ДП «Завод ім.

Малишева» (м. Харків, 2004); Конгресі ливарників «Литьє України – 2005», (м. Запоріжжя, 2005), Міждержавній науково-методичній конференції «Проблеми математичного моделювання» (м. Дніпродзержинськ, 2010), Міжнародній науковій конференції «Наукова періодика слов'янських країн в умовах глобалізації» (м. Київ, 2012), науково-технічній конференції «Ресурсозбереження та енергоефективність процесів і обладнання обробки тиском в машинобудуванні та металургії» (м. Харків, 2010 – 2012).

**Публікації.** Основний зміст дисертації відображено у 48 наукових публікаціях, з них 24 статті у наукових фахових виданнях України, з яких 15 без співавторів, 1 патенті України.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається із вступу, 6 розділів, висновків, додатків та списку використаних джерел. Повний обсяг дисертації складає 300 сторінок, включаючи 102 рисунків по тексту, 45 таблиць по тексту, 1 додатку на 6 сторінках, 330 найменувань використаних джерел на 33 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність дослідження, сформульована мета і визначені основні задачі роботи, дана характеристика наукової новизни і практичної значущості отриманих результатів, приведені відомості з практичного значення та апробації основних результатів роботи.

В **першому розділі** здійснений аналіз досліджень, проведених вченими та фахівцями в області управління процесами електроплавки. Праці А.Н.Соколова, Г.Ф. Платонова присвячені проблемам вибору параметрів та раціональних режимів роботи електропечей; А. Н. Макарова, М. Ф. Галкіна, Н. Ф. Владимірова - проблемам аналізу систем управління, математичним моделям, що використовуються в практиці управління електроплавкою, та оптимізації параметрів електроплавки. В працях І. Д. Труфанова, О.Ю.Лозинського, М.В. Едемського досліджені проблеми, пов'язані із створенням алгоритмів управління енергетичними режимами електроплавки на основі використання поточної інформації. Переважаючим в питаннях управління електроплавкою є підхід, заснований на вдосконаленні систем стабілізації електричних режимів плавки. В. А. Граčov в трудах, присвячених управлінню електроплавкою, пропонує звернути погляд дослідників в бік фізико-хімічних процесів, що протікають в розплаві, оптимальне управління якими відкриває широкі можливості для загального управління процесами плавки на основі технологічних параметрів.

Зроблено обґрунтований висновок про те, що використання існуючих моделей та алгоритмів управління електроплавкою, не дозволяють в повному обсязі реалізувати оптимальне управління за критерієм якості сплаву, зокрема у випадках, коли має місце невизначеність багатьох параметрів плавки, що описують стан системи в реальному часі.

Тому на сьогоднішній день перспективними завданнями в області вдосконалення процесів управління електроплавкою слід вважати розробку



методології визначення структури та параметрів моделей, що можуть бути використані для пошуку оптимального управління процесами електроплавки в умовах невизначеності параметрів, що описують стан системи в реальному часі.

**Другий розділ** присвячений формуванню процедури пошуку оптимального управління на етапі плавки на основі представлення об'єкту лінійними диференціальними рівняннями, що описують поведінку системи в реальному часі в процесі плавки; обґрунтуванню вибору критерію якості управління, вхідних та вихідних змінних, вибір яких є доцільним з точки зору моделювання та оптимізації управління процесом на етапі плавки.

Зв'язок параметрів, що описують процес електроплавки, показаний на рис. 1.

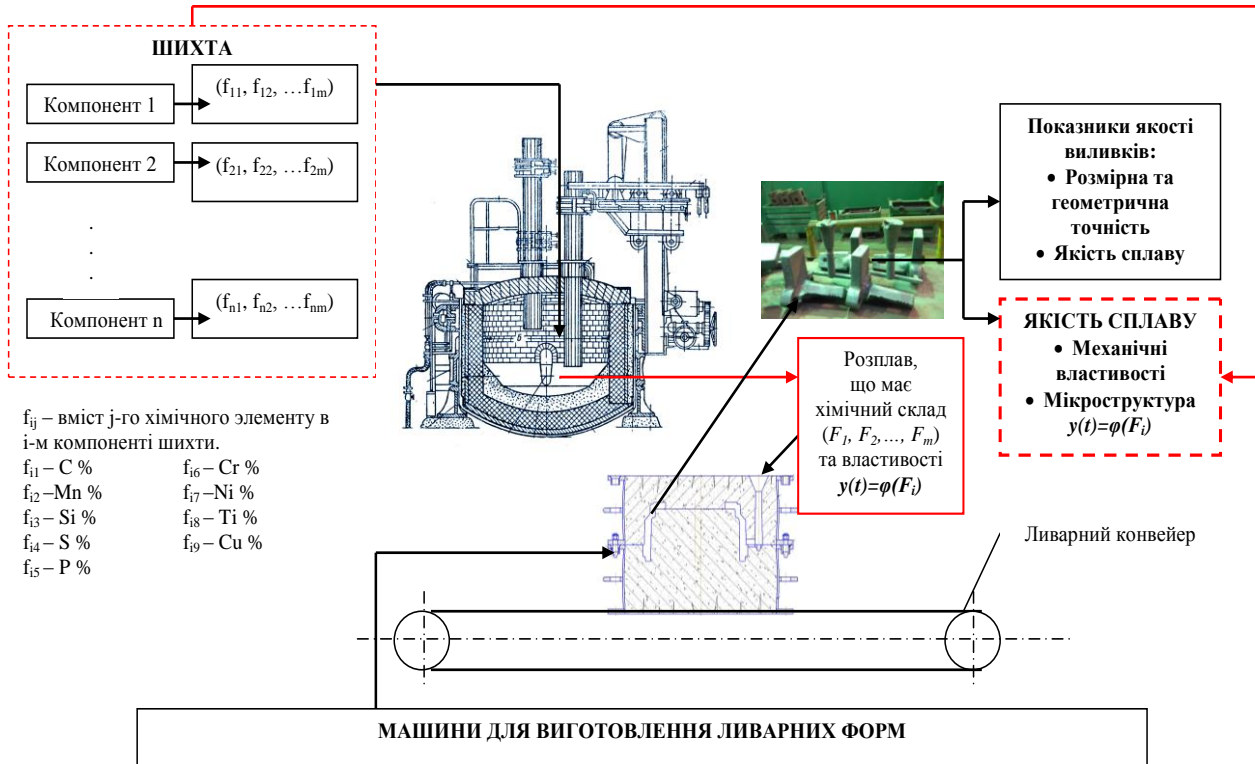


Рис. 1. Зв'язок параметрів, що описують процес електроплавки

Показано, що моделювання управління процесом електроплавки повинне виконуватись з урахуванням тієї обставини, що процес електроплавки має два етапи – розплавлення шихти, тобто власне плавки, та термочасової обробки до видачі розплаву на ливарний конвейєр. З урахуванням цього повинна виконуватись і оптимізація управління процесом для забезпечення виконання обраного критерію якості управління. Показано, що на першому етапі система може бути представлена у вигляді

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t) + B(t)u(t), \quad t \in [t_0, T], \quad x(t_0) = x_0, \quad x \in R_n, \quad u \in R_m, \quad (1)$$

де  $A(t)$ ,  $B(t)$  – матриці, які мають кусочно-неперервні елементи, що обмежені,  $x(t)$  – вектор стану системи в момент часу  $t$ ,  $u(t)$  – вектор-функція управління в момент часу  $t$ ,  $R_n$  – задана припустима множина значень вектора стану системи,  $R_m$  – задана припустима множина значень вектор-функції управління.

Для реального об'єкту

$$\square \quad x_1 = k_1 x_2, \quad \square \quad x_2 = k_2 x_3, \quad \square \quad x_3 = k_3 u, \quad (2)$$

де  $x_1$  – температура ванни,  $T$ ,  $x_2$  – опір фази,  $r$ ,  $x_3$  – швидкість руху електрода,  $v$ ,  $u$  – управління, тиск в гідроциліндрі переміщення електрода,  $k_1$  – коефіцієнт пропорційності, що враховує сила 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.

Критерій якості управління при цьому має вигляд

$$J_0 = \frac{1}{2} e'(T) C_1 e(T), \quad (3)$$

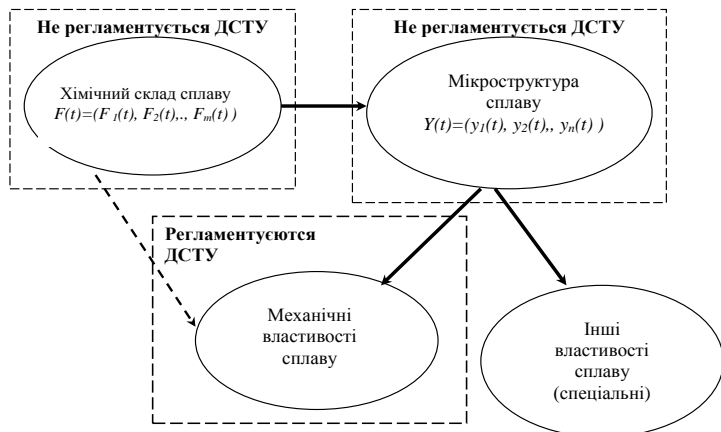
де  $e(t) = z(t) - y(t)$  – величина неузгодженості між фактичним значенням параметрів вектор-функції виходу  $y(t)$  в процесі плавки та заданим еталонним значенням вектор-функції виходу  $z(t)$ .

Досліджуваний об'єкт має особливість – зв'язок між параметрами, що описують стан системи (1), та параметрами вектор-функції виходу  $y(t)$  має складну функціональну залежність

$$y(t) = f(F_i(t), x(t)), \quad (4)$$

де  $F_i(t)$  – вміст  $i$ -го елемента хімічного складу сплаву в момент часу  $t$ .

Схема взаємозв'язку між вхідними та вихідними змінними в досліджуваному процесі представлено на рис. 2.



$F_1(t)$  – вміст вуглецю, [C], %,  $F_2(t)$  – вміст марганцю, [Mn], %,  $F_3(t)$  – вміст кремнію, [Si], %,  $F_4(t)$  – вміст сірки, [S], %,  $F_5(t)$  – вміст фосфору, [P], %,  $F_6(t)$  – вміст хрому, [Cr], %,  $F_7(t)$  – вміст нікелю, [Ni], %,  $F_8(t)$  – вміст титану, [Ti], %,  $F_9(t)$  – вміст міді, [Cu], %.

Рис.2. Схема взаємозв'язку між вхідними та вихідними змінними в досліджуваному процесі

Представлення функціональної залежності (4) в досліджуваному об'єкті з урахуванням введених змінних має вигляд:

$$y_i = a_0 + a_1 F_1 + \dots + a_m F_m + a_{12} F_1 F_2 + \dots + a_{m-1,m} F_{m-1} F_m + \dots + a_{12\dots m} F_1 F_2 \dots F_m, \quad (5)$$

$$F_i(t) = A_{0_i} e^{A_i e^{-\frac{E_i^a - S_i}{R_{x_i}(t) m}}}, \quad (6)$$

де  $A_{0_i}$  – параметр інтегрування кінетичного рівняння  $F_i = \varphi(t)$ ,  $A_i$  – параметр рівняння Арреніуса,  $E_i^a$  – енергія активації хімічної реакції, в якій бере участь компонент  $F_i$ ,  $x_1$  – температура ванни,  $S$  – площа реакційної поверхні в системі, в якій протікають хімічні реакції за участю компонента  $F_i$ ,  $m$  – маса розплаву в печі.

Таким чином, для пошуку оптимального управління процесом електроплавки на першому етапі є необхідність отримання адекватного рівняння регресії у вигляді (5). При цьому процес управління описується таким чином: по результатах виміру температури в електропечі за допомогою аналогово-цифрового перетворювача виконується розрахунок вмісту кожного з компонентів  $F_i$  за рівнянням (6), отриманий результат в цьому ж перетворювачі перераховується в значення параметра функції виходу, яке порівнюється із заданим значенням функції виходу, що встановлено на задатчику. При наявності неузгодженості цих двох величин відповідний сигнал управління подається на гідроциліндр рушія електроду, останній переміщує електрод таким чином, щоб ліквідувати цю неузгодженість.

Структурна схема системи управління на першому етапі процесу представлено на рис.3.

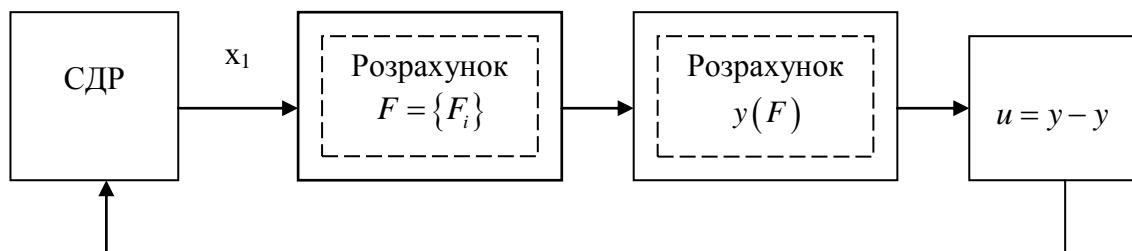


Рис. 3. Структурна схема системи управління

Проблемою на шляху реалізації такого підходу є велика складність, що пов'язана з отриманням рівняння регресії (5). Це зумовлено двома причинами. По-перше, вибірка вхідних змінних  $F_i$  мала, причому під малістю вибірки розуміється явна невідповідність між числом експериментів та кількістю параметрів рівняння, що оцінюється. По-друге, має місце невизначеність, що пов'язана з неточністю умов проведення експериментів, які описані нечітко по причині неможливості точного контролю параметрів, що описують технологічний процес електроплавки – власно змінних  $F_i$ . Тому для моделювання управління на першому етапі процесу електроплавки необхідна розробка методів оцінювання параметрів рівнянь регресії вигляду (5) за умов існування перелічених вище проблем. Реалізація цього завдання в умовах

нечітких вхідних змінних призводить до необхідності вирішення декількох складових, першої з яких є кластеризація точок, відповідних результатам експериментів, координати яких задані нечітко. Запропонована наступна процедура нечіткої кластеризації. Дійсні значення координат  $F_{jp}$  - нечіткі числа з відповідними функціями приналежності ( $L-R$ ) типу:

$$\mu(F_{jp}) = \begin{cases} L\left(\frac{\bar{F}_{jp} - F_{jp}}{\alpha_{jp}}\right), & F_{jp} \leq \bar{F}_{jp}, \\ R\left(\frac{F_{jp} - \bar{F}_{jp}}{\beta_{jp}}\right), & F_{jp} > \bar{F}_{jp}, \end{cases} \quad (7)$$

де  $\mu(F_{jp})$  - функції приналежності нечітких чисел  $F_{jp}$ ,  $\bar{F}_{jp}$  - модальне значення нечіткого числа  $F_{jp}$ ,  $j=1,2,\dots,n$ ,  $p=1,2,\dots,m$ ,  $\alpha_{jp}$ ,  $\beta_{jp}$  - лівий та правий коефіцієнти нечіткості в описі (7).

На основі сукупності модальних значень  $\bar{F}_{jp}$ ,  $j=1,2,\dots,n$ ,  $p=1,2,\dots,m$ , розраховується набір, що задає  $m$  - мірний гіперпаралелепіпед, вершини якого є центрами тяжіння  $2^m$  кластерів:

$$\begin{aligned} F_{p,\min} &= \min_j \{\bar{F}_{jp}\}, \quad p=1,2,\dots,m, \\ F_{p,\max} &= \max_j \{\bar{F}_{jp}\}, \quad p=1,2,\dots,m. \end{aligned} \quad (8)$$

Для кожної точки розраховується нечітка відстань до кожного з центрів тяжіння кластерів і відповідна функція приналежності. Далі отримані функції приналежності використовуються для відшукування кластера, що має по відношенню до точки, що розглядається, найвищу ступінь переваги. Формально процедура реалізується наступним чином. Для пари ( $k$ -й кластер,  $j$ -а точка) нечітке значення квадрату відстані від центру тяжіння кластеру до точки визначається за виразом

$$\rho_{kj}^2 = \sum_{p=1}^m (a_{kp} - F_{jp})^2, \quad (9)$$

де  $k=1,2,\dots,2^m$  - міра нечіткої відстані між  $k$ -ю вершиною і  $j$ -ю точкою.

При цьому функція належності нечіткого значення квадрата відстані від  $k$ -го центру до  $j$ -ї точки має вигляд:

$$\mu(F_{jp}) = \begin{cases} L\left(\frac{\left(\left(\bar{\rho}_{kj}^2\right) - \rho_{kj}^2\right)}{\alpha_{kj}}\right), \\ R\left(\frac{\left(\rho_{kj}^2 - \left(\bar{\rho}_{kj}^2\right)\right)}{\beta_{kj}}\right). \end{cases} \quad (10)$$

В результаті реалізації цієї процедури для кожної з точок отримані функції належності нечітких чисел, що відображають «відстані» до центрів відповідних кластерів. Ці числа порівнюються між собою та визначається кластер, «найближчий» по відношенню до розглянутої точки. Оцінка ступеня переваги нечіткого числа  $z_k$  перед нечітким числом  $z_l$  здійснюється за формулою

$$\eta(\mu(z_k), \mu(z_l)) = \sup_{z_k > z_l} \min\{\mu(z_k), \mu(z_l)\}, \quad k, l \in \{1, 2, \dots, m\}. \quad (11)$$

Номер кластера  $k^*$ , до якого буде приєднана чергова точка, визначається співвідношенням

$$k^* = \arg \min_k \min_l \left\{ \mu^\alpha \left( \rho_{kl}^2 \right) \right\}, \quad k, l \in \{1, 2, \dots, m\}. \quad (12)$$

Співвідношення (10) - (12) забезпечують рішення задачі нечіткої кластеризації.

**Третій розділ** присвячений розробці технології отримання адекватних рівнянь регресії, що описують параметри електроплавки в умовах малої вибірки нечітких даних. Технологія включає в себе реалізацію трьох послідовних процедур, спираючись на результати нечіткої кластеризації експериментальних точок: оцінювання параметрів локальних рівнянь регресії, що описують поведінку функції відгуку в кожній з підобластей факторного простору експериментів по нечітким початковим даним, і розрахунок нечітких оцінок значень функції відгуку в ортогональних вершинах повного факторного експерименту; рішення нечіткої багатоіндексної задачі призначення для формування усіченого ортогонального плану; оцінювання параметрів повного рівняння регресії, що описує експеримент в цілому, за нечіткими даними, і відсів малозначущих факторів і взаємодій.

Суть технології побудови адекватних рівнянь регресії в умовах малої вибірки нечітких даних полягає в наступному. Результируючий параметр  $y$  (критерій ефективності) залежить від  $m$  факторів, що впливають,  $F_1, F_2, \dots, F_m$ , причому така залежність має вигляд (5).

За результатами вимірювань значень факторів  $F_1, F_2, \dots, F_m$  і визначального параметра  $y$  в ряду з  $n$  дослідів формується матриця плану  $H$  і вектори  $A, Y$ , де шуканий вектор  $A$  оцінюється по методу найменших квадратів (МНК)

$$A = (H^T H)^{-1} H^T Y. \quad (13)$$

Сукупність результатів вимірювань нечітких чисел  $F_1, F_2, \dots, F_m$  утворює пасивний експеримент, при цьому відповідна матриця  $H$  не є ортогональною, що виключає можливість незалежного оцінювання впливу кожного з факторів і їх взаємодій в рівнянні (5). Для відсіву малозначущих факторів

результати вимірювань вхідних змінних перетворюються таким чином, щоб об'єднуюча їх матриця була б ортогональною.

Після операції нормування в  $m$ -мірному факторному просторі формується гіперкуб з центром на початку координат і довжиною ребер, що дорівнює двом, і вся множина результатів пасивного експерименту розбивається на  $2^m$  підмножин ( $E_1, E_2, \dots, E_N$ ) за правилом

$$E_e = \left\{ j : \min_s (F_s^0 - F_j)^T (F_s^0 - F_j) = (F_e^0 - F_j)^T (F_e^0 - F_j) \right\}, \quad (14)$$

де  $F_j = (F_{j1}, F_{j2}, \dots, F_{ji}, \dots, F_{jm})$  -  $j$ -а точка в нормованому факторному просторі,  $j = 1, 2, \dots, n$ ;  $F_s^0$  -  $s$ -я вершина гіперкуба,  $s = 1, 2, \dots, N$ .

Точки, що потрапили в  $l$ -й гіперквадрант факторного простору, який примикає до вершини  $F_l^0$  (їх число дорівнює  $n_l$ ), використовуються для локального опису функції відгуку в межах  $l$ -го гіперквадранта за допомогою рівняння регресії

$$y_l = b_{l0} + b_{l1}F_1 + b_{l2}F_2 + \dots + b_{lm}F_m, \quad (15)$$

параметри якого розраховуються по формулі МНК:

$$B_l = (H_l^T H_l)^{-1} H_l^T Y_l, \quad (16)$$

$$H_l = \begin{pmatrix} 1 & F_{j_1 1} & F_{j_1 2} & \dots & F_{j_1 m} \\ 1 & F_{j_2 1} & F_{j_2 2} & \dots & F_{j_2 m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & F_{j_{n_e} 1} & F_{j_{n_e} 2} & \dots & F_{j_{n_e} m} \end{pmatrix}, \quad B_l = \begin{pmatrix} b_{e0} \\ b_{e1} \\ \dots \\ b_{em} \end{pmatrix}, \quad Y_l = \begin{pmatrix} y_{j_1} \\ y_{j_2} \\ \dots \\ y_{j_{n_e}} \end{pmatrix}. \quad (17)$$

Після застосування процедур (14) - (16) до всіх гіперквадрантів факторного простору формується кусково-лінійний опис функції відгуку, складений з гіперплощин. Сукупність значень функції відгуку в точках, відповідних вершинам гіперкуба, утворює план активного ортогоналізованого повного факторного експерименту (ОПФЕ), реалізацією якого відбувається оцінювання регресійних коефіцієнтів за допомогою МНК.

Якщо при обробці даних реальних експериментів – результатів серійних промислових плавок - виникає ситуація, коли число експериментальних точок в різних гіперквадрантах простору опиняється різним, або в деяких підобластях факторного простору таких даних явно недостатньо, план експерименту перестає бути повним і ортогональним. Для вирішення цієї

проблеми розроблена процедура побудови реплікоподібного симетричного відносно центру експерименту ортогонального підплану, що є результатом рішення багатоіндексної задачі математичного програмування та другим етапом технології побудови адекватних рівнянь регресії.

Побудова усіченого представницького ортогонального плану проводиться таким чином. Сукупність факторів  $m$  розбивається на три підмножини  $\{A, B, C\}$  по  $p = \frac{m}{3}$  факторів в кожному:

$$A = \{F_1, F_2, \dots, F_p\}, \quad B = \{F_{p+1}, F_{p+2}, \dots, F_{2p}\}, \quad C = \{F_{2p+1}, F_{2p+2}, \dots, F_{3p}\}.$$

$$\text{Тут } F_l^A = F_l, \quad F_l^B = F_{p+l}, \quad F_l^C = F_{2p+l}, \quad l = 1, 2, \dots, p.$$

Формується ортогональний повний  $m$ -факторний план. Загальне число експериментів плану дорівнює  $2^m$ , а кількість експериментів, відповідних всім можливим комбінаціям рівнів факторів, що входять в будь-яку з підмножин, дорівнює  $2^p$ . Ці комбінації нумеруються для факторів  $F_l^C$ ,  $l = 1, 2, \dots, p$ , індексом  $i_1$ , а для факторів підмножин  $F_l^B$ ,  $l = 1, 2, \dots, p$ , і  $F_l^A$ ,  $l = 1, 2, \dots, p$ , відповідно індексами  $i_2$  та  $i_3$ . Тоді будь-якому рядку плану у відповідність ставиться трійка  $(i_1 \ i_2 \ i_3)$ . Множина комбінацій індексів  $\{i_1 \ i_2 \ i_3\}$  представляється у вигляді тривимірної решітки з  $2^p$  вузлами по кожній з трьох координат. Якщо ввести параметр

$$Z_{i_1 i_2 i_3} = \begin{cases} 1, & \text{якщо строка } (i_1, i_2, i_3) \text{ включена в експеримент,} \\ 0 & \text{в іншому випадку,} \end{cases}$$

то набір значень  $\{Z_{i_1 i_2 i_3}\}$ ,  $i_1 = 1, 2, \dots, 2^p$ ,  $i_2 = 1, 2, \dots, 2^p$ ,  $i_3 = 1, 2, \dots, 2^p$  однозначно визначає деякий план експерименту, який містить число рядків, що дорівнює числу одиниць в наборі. Вводиться наступна система рівнянь з булевими змінними:

$$\begin{aligned} \sum_{i_3=1}^{2^p} Z_{i_1 i_2 i_3} &= 1, \quad i_1 = 1, 2, \dots, 2^p, \quad i_2 = 1, 2, \dots, 2^p, \\ \sum_{i_2=1}^{2^p} Z_{i_1 i_2 i_3} &= 1, \quad i_1 = 1, 2, \dots, 2^p, \quad i_3 = 1, 2, \dots, 2^p, \\ \sum_{i_1=1}^{2^p} Z_{i_1 i_2 i_3} &= 1, \quad i_2 = 1, 2, \dots, 2^p, \quad i_3 = 1, 2, \dots, 2^p. \end{aligned} \tag{18}$$

Рішення системи рівнянь (18) визначає симетричний ортогональний план експерименту з числом рядків, що дорівнює  $2^{2p}$ . Критерій представництва плану, який визначає сумарну дисперсію експерименту, що задається вибраним набором  $\{Z_{i_1 i_2 i_3}\}$ , має вигляд

$$\Phi = \sum_{i_1}^{2^p} \sum_{i_2}^{2^p} \sum_{i_3}^{2^p} \sigma_{i_1 i_2 i_3}^2 Z_{i_1 i_2 i_3}, \tag{19}$$

де  $\sigma_{i_1 i_2 i_3}^2 = \sigma_v^2 = D(b_{v_0}) + D(b_{v_1})(F_1^{(0)}(V))^2 + D(b_{v_2})(F_2^{(0)}(V))^2 + \dots + D(b_{v_m})(F_m^{(0)}(V))^2$ ,  
 $F_i^{(0)}(V)$  - значення  $i$ -го чинника в  $V$ -ій вершині гіперкуба,  $D(b_{v_i})$  - дисперсія помилки оцінювання  $i$ -го коефіцієнта  $V$ -го рівняння регресії.

Оцінка дисперсії має вигляд

$$y_{i_1 i_2 i_3} = y_v = b_{v_0} + b_{v_1} F_1^{(0)}(V) + b_{v_2} F_2^{(0)}(V) + \dots + b_{v_m} F_m^{(0)}(V). \quad (20)$$

Запропонована технологія дозволила отримувати усічений ортогональний план експерименту. Однак, задача значно ускладнюється, якщо вимірювані значення функції відгуку – нечіткі числа. Функція приналежності такого нечіткого числа  $y_j^{(0)}$  визначається виразом

$$\mu(y_j^{(0)}) = \exp \left\{ -\frac{(y_j^{(0)} - \bar{y}_j^{(0)})^2}{2\sigma_j^2} \right\}, \quad (21)$$

а параметри  $\bar{y}_j^{(0)}$  та  $\sigma_j^2$  оцінюються статистично.

Вектор оцінок коефіцієнтів рівняння регресії, що описує функцію відгуку в кожному гіперквадранті, має вигляд

$$B_l = (H_l^T H_l)^{-1} H_l^T Y_l = R_l Y_l = \begin{pmatrix} \sum_{v=1}^{n_l} R_{0v}^{(l)} y_{jv} \\ \sum_{v=1}^{n_l} R_{1v}^{(l)} y_{jv} \\ \dots \\ \sum_{v=1}^{n_l} R_{mv}^{(l)} y_{jv} \end{pmatrix}, \quad (22)$$

де  $H_l$ ,  $B_l$ ,  $Y_l$  приведені в рівнянні (17), а  $R_{iv}^{(l)}$  - елемент матриці  $R_l = (H_l^T H_l)^{-1} H_l$ ,  $i = 0, 1, \dots, m$ ,  $v = 1, 2, \dots, n_l$ ,  $y_{jv}$  - значення функції відгуку для  $j$ -ї точки, що потрапила в  $v$ -й гіперквадрант.

Функція приналежності нечіткого числа  $b_i$  має вигляд:

$$\mu(b_i) = \exp \left\{ -\frac{(b_i - \bar{b}_i)^2}{2\sigma_i^2} \right\}, \quad (23)$$

$$\bar{b}_i = \sum_{v=1}^{n_l} R_{iv}^{(l)} \bar{y}_{jv}, \quad \sigma_i^2 = \sum_{v=1}^{n_l} (R_{iv}^{(l)})^2 \sigma_{jv}^2. \quad (24)$$



Характеристики функції приналежності значень функції відгуку в ортогональних точках плану розраховуються за формулами:

$$\bar{y}_l^{(0)} = \sum_{i=0}^m \bar{b}_{li} F_{li}^{(0)} = \sum_{i=0}^m \sum_{v=1}^{n_i} R_{iv}^{(l)} y_{jv} F_{li}^{(0)}, \quad (25)$$

$$\sigma_l^2 = \sum_{i=0}^m b_{li}^2 (F_{li}^2) = \sum_{i=0}^m \sigma_{li}^2 = \sum_{i=0}^m \sum_{v=1}^{n_i} (R_{iv}^{(l)})^2 \sigma_{iv}^2. \quad (26)$$

Рівень компактності плану в цілому оцінюється найменш компактним тілом невизначеності для функцій приналежності значень функцій відгуку в точках, що входять у вибраний план, і значення критерію для  $k$ -го плану визначається співвідношенням

$$D_k = \max_{l \in N_k} \sigma_l^2. \quad (27)$$

Таким чином, задача пошуку усіченого реплікоподібного представницького плану в умовах, коли результати вимірювань – нечіткі числа, зведена до пошуку набору  $z$ , що мінімізує (27) та задовольняє (18). Рішення цієї задачі досягається шляхом декомпозиції  $k$  ( $n-l$ ) двохіндексних задач призначення. Цей план обробляється стандартним шляхом з незалежним оцінюванням кожного коефіцієнту  $a_s$  рівняння регресії, що будується. Параметри функцій приналежності нечітких значень цих коефіцієнтів розраховуються через відповідні параметри функцій приналежності нечітких значень функції відгуку в ортогональних точках, що включені до плану.

Технологія відсіву малозначимих чинників і взаємодій полягає в наступному. Вибирається деяке значення рівня приналежності  $\alpha$ , вирішується рівняння

$$\mu(a_s^{(\sigma)}) = \exp \left\{ - \frac{(a_s^{(\sigma)} - \bar{a}_s^{(\sigma)})^2}{2D_s^{(\sigma)}} \right\} = \alpha, \quad s = 1, 2, \dots$$

і для кожного  $s$  визначається інтервал

$$\left[ a_s^{(\sigma) \min}, a_s^{(\sigma) \max} \right] = \left[ \bar{a}_{s\sigma} - \left( 2D_s^{(\sigma)} \ln \alpha \right)^{\frac{1}{2}}, \bar{a}_s^{(\sigma)} + \left( 2D_s^{(\sigma)} \ln \alpha \right)^{\frac{1}{2}} \right].$$

Якщо отриманий інтервал не захоплює нуль, то із ступенем упевненості не нижче  $\alpha$  можна вважати, що  $s$ -й доданок рівняння регресії значущий. Інакше з цим же ступенем упевненості його можна з рівняння виключити.

Запропонований метод забезпечує можливість підвищення точності оцінювання параметрів рівнянь регресії завдяки відсіву малозначимих факторів і їх взаємодій. Використавши таку технологію, було розроблено адекватні рівняння регресії, що описує залежність параметрів мікроструктури чавуну (розмір включень графіту на поверхні та в осьовій зоні, та кількість перліту на

поверхні та в осьовій зоні в перетині виливку «корпус циліндра зчеплення») від вмісту 9 компонентів хімічного складу чавуну: *C, Mn, Si, S, P, Cr, Ni, Ti, Cu*. Наявність таких рівнянь дозволила моделювати управління процесами електроплавки на першому етапі – розплаві шихти для подальшого виготовлення виливків з чавуну марок СЧ20 – СЧ30.

**Четвертий розділ** присвячений розробці методу побудови оптимальних технологічних схем електроплавки, що можуть бути використані для синтезу алгоритму оптимального управління на другому етапі електроплавки – термочасової обробки розплаву в печі, що працює в складі ливарного конвеєра при наявності невизначеності параметрів процесу при режимі роботи печі як міксера. На основі аналізу застосовності різних конструкцій функціоналу, який може бути використаним для пошуку оптимального управління на етапі термочасової обробки розплаву, зроблений висновок про необхідність комплексного підходу до формування функціоналу. Такий підхід ґрунтується на розгляданні електропечі як елемента складної системи «піч - ливарний конвеєр». При цьому показано, що критерієм якості управління є компромісний критерій, який мінімізує сумарні витрати на процес, зумовлені, з одного боку, зниженням продуктивності системи «піч - ливарний конвеєр» по причині простоїв на ділянці заливки внаслідок відсутності розплаву – неможливістю видачі потрібної її порції з печі, а з іншого боку – витратами технологічної електроенергії внаслідок витримки в печі надлишкової кількості розплаву. Показано, що такий компроміс забезпечується вибором оптимальної кількості розплаву в печі під час витримки його до видачі на конвеєр в залежності від фактичної потреби ливарного конвеєра у розплаві та часу виконання усіх технологічних операцій термочасової обробки.

Для конструювання функціонала електропіч представлена елементом системи масового обслуговування (СМО), конкретно - у вигляді багатоканального вузла обслуговування заявок на розплав, що генеруються ливарним конвеєром (рис. 4а).

Ливарний конвеєр 2 генерує потік заявок на розплав з деякою інтенсивністю  $\lambda_{ji}$ . Електропіч 1 видає на конвеєр розплав з деякою інтенсивністю  $\lambda_{ij}$ . Якщо в заданий момент часу надходження заявки вона не може бути виконана (піч не видає розплав на ливарний конвеєр), ливарна форма залишається не залитою, тобто має місце відмова. Заливка здійснюється тільки тієї подальшої форми, до надходження якої на ділянку заливки розплав може бути випущений з печі. Отже, систему «піч – ливарний конвеєр» можна представити СМО з відмовами, граф стану якої показаний на рис. 4б.

Задача вибору оптимальної технологічної схеми для подальшого синтезу алгоритму оптимального управління на етапі термочасової обробки розплаву зводиться до оптимізації по сумарних витратах кількості розплаву в печі в кожен момент часу з урахуванням необхідної потреби в розплаві ливарного конвеєра та невизначеності вхідних параметрів процесу на цьому етапі. Статистична обробка результатів хронометражу, виконаного в промислових умовах серійного виробництва, показала, що розподіл довжин інтервалів часу між формуванням заявок на розплав, генерованих ливарним конвеєром, є

експоненціальним. Тому, оптимізація структури СМО «піч - ливарний конвейер» здійснюється з використанням результатів визначення середньої кількості заявок на розплав в одиницю часу та середнього терміну виконання заявки.

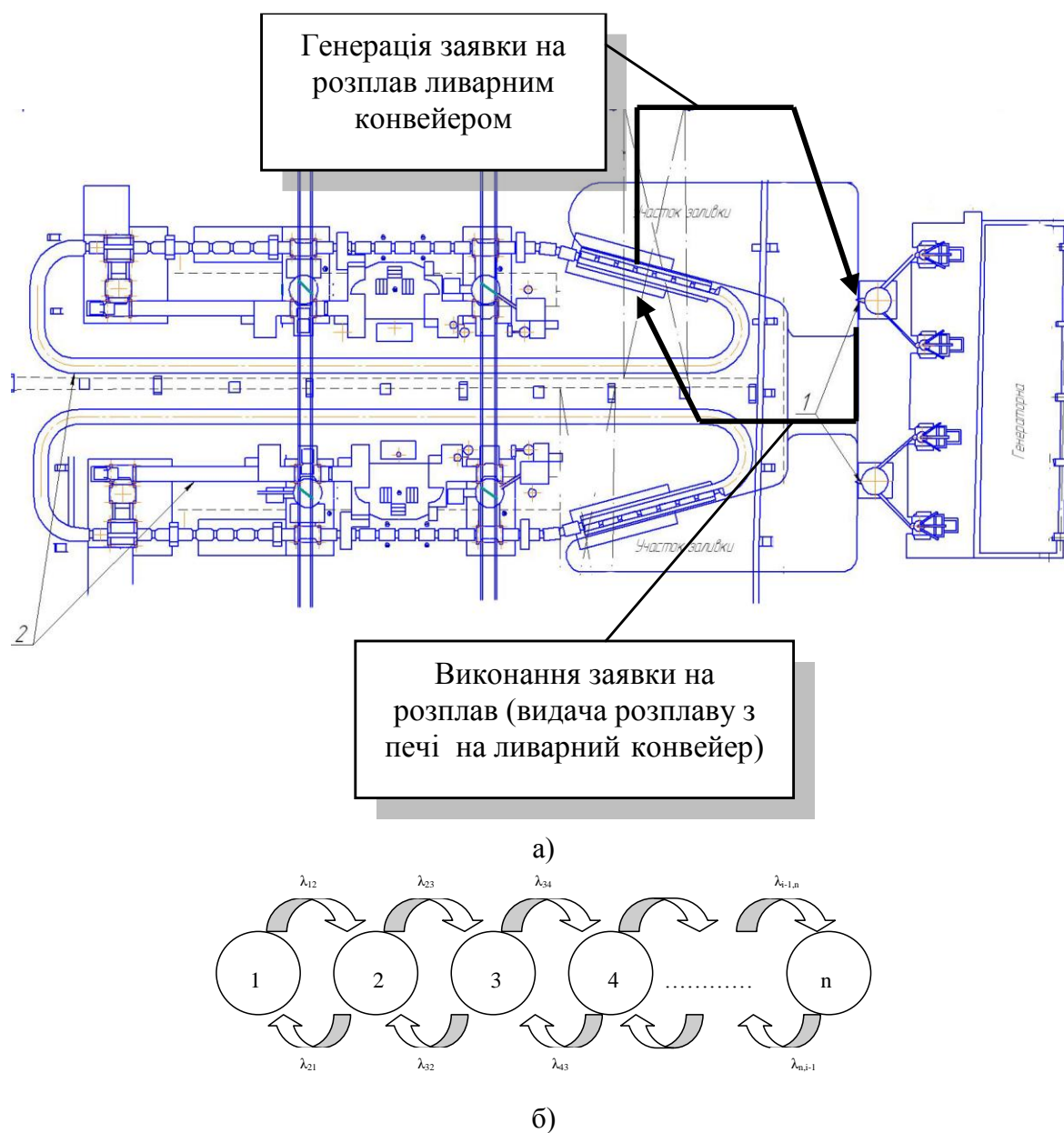


Рис. 4. Схема СМО «піч – ливарний конвейер»

а) – план ділянки цеху: 1 – електропіч, 2 – ливарний конвейер, б) – граф станів системи

Розроблений метод побудови оптимальної технологічної схеми процесу заснований на розрахунку сумарних витрат при обраному управлінні електроплавкою на етапі термочасової обробки розплаву. Ці витрати є функцією декількох змінних. Серед них: інтенсивність потоку заявок на розплав, що генерується конвеєром; вірогідність відмови в обслуговуванні заявки внаслідок відсутності необхідної кількості розплаву в печі або неможливості його видачі на конвеєр внаслідок невідповідної якості сплаву; середнє число використуваних каналів - завантаженої місткості електропечі в даний

момент часу; витрати, пов'язані з простоями на ділянці заливки та витримуванням в печі надлишків розплаву.

При такому розгляданні функціонал, що відображає компромісний критерій, має вигляд

$$Z(m(t)) = S_1 Q_k P(m(t)) + S_2 [m(t) - (Q_k - Q_k P(m(t))) / Q], \quad (28)$$

де  $Z(m(t))$  – сумарні витрати в момент часу  $t$ , пов'язані з простоями через відсутність розплаву і наявністю в печі надлишків розплаву;  $m(t)$  – маса розплаву в печі в момент часу  $t$ ,  $S_1$  – собівартість 1 тонни сплаву,  $S_2$  – витрати, пов'язані з термочасовою обробкою розплаву в печі,  $Q_k$  – інтенсивність потоку заявок на розплав, що генерується конвеєром,  $P(m(t))$  – вірогідність простою конвеєра внаслідок відсутності розплаву.

Мінімізація функціонала (28) виконується по параметру  $m(t)$ , її мета – визначення оптимальної кількості розплаву в печі в заданий проміжок часу. Приклад оптимальної технологічної схеми представлено на рис. 5.

Для можливостей використання запропонованого методу в умовах типового оснащення плавильних ділянок вітчизняних виробництв розроблено математичну модель, що описує залежність оптимального вмісту розплаву в печі на етапі термочасової обробки в залежності від інтенсивності потоку заявок ( $\lambda$ ) на розплав, що генерується конвеєром, та часом виконання цих заявок  $\bar{T}$ . Це виконано шляхом побудови центрального ортогонального композиційного плану другого порядку, причому для розрахунку оцінок коефіцієнтів математичної моделі в якості функції відгуку обрано оптимальну масу розплаву в печі, що визначена з використанням функціонала (28). Аналізом поверхні відгуку, що описує функцію виходу в моделі, за допомогою рідж-аналізу запропонована загальна процедура синтезу оптимальної технологічної схеми плавки для серії електропечей, що є найбільш використовуваними у вітчизняних цехах.

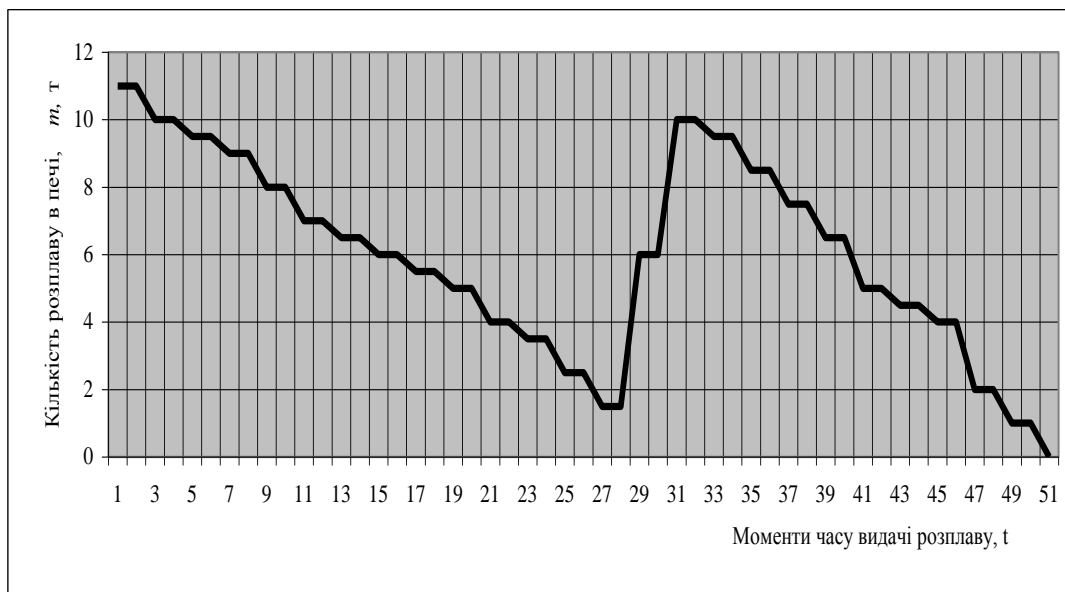


Рис. 5. Приклад оптимальної технологічної схеми плавки

Розроблена процедура формування оптимальної технологічної схеми плавки на етапі термочасової обробки показана на рис. 6.



Рис. 6. Процедура формування оптимальної технологічної схеми плавки

Запропонована процедура дозволяє формувати оптимальну технологічну схему плавки, що є основою для пошуку оптимального управління процесом на етапі термочасової обробки розплаву, бо містить в собі інформацію щодо параметрів рівняння (6) – оптимальну за критерієм сумарних витрат масу розплаву в печі  $m$  та площу реакційної поверхні  $S$ , що є функцією маси розплаву. Крім цього, оптимальна технологічна схема дозволяє формувати завдання  $(\Delta m)$  для вісодозуючого пристрою управління процесами видачі розплаву на ливарний конвеєр, що виконує функцію керування приводом нахилу печі.

**П'ятий розділ** присвячений розробці методів оцінювання параметрів рівнянь (6) та пошуку оптимального управління шляхом насичення розплаву вуглецем за умови, коли не виконуються вимоги критерію якості управління (3), а конвеєром згенерована заявка на розплав.

Для математичного опису системи використані кінетичні рівняння, що описують зміну в часі вмісту кожного елемента в розплаві при різній масі розплаву в печі (відповідно при різній глибині ванни і площі поверхні розділу фаз метал - шлак) і різній температурі. Задача управління досліджуваним процесом на етапі термочасової обробки є задачею швидкодії та формулюється таким чином: визначити оптимальне управління  $u_{opt}$ , що переводить процес за

мінімальний час з початкового стану  $F_i(t(0))=F_i(0)=F_i(0)$  у кінцевий, розташований на поверхні  $F(k) (F_1, F_2, \dots F_k) = 0$ .

Дана поверхня має аналітичний опис, що зв'язує вміст елементів хімічного складу сплаву, який забезпечує виконання вимог критерію якості управління (3). Для визначення цієї поверхні запропонована процедура рідж-аналізу (рис. 7) поверхні відгуку, яка описується рівняннями регресії виду (5), що дозволяє розрахувати субоптимальні значення параметрів  $F_i$  для усіх вихідних змінних, для яких будуються рівняння регресії (5), та визначити припустимі діапазони значень нечітких чисел  $F_i$ , що забезпечують задоволення вимог критерію якості управління (3) по декількох вихідних змінних.

Початковий стан формується хімічним складом сплаву, отриманого відразу після розплавлення шихти, тобто на виході першого етапу плавки.

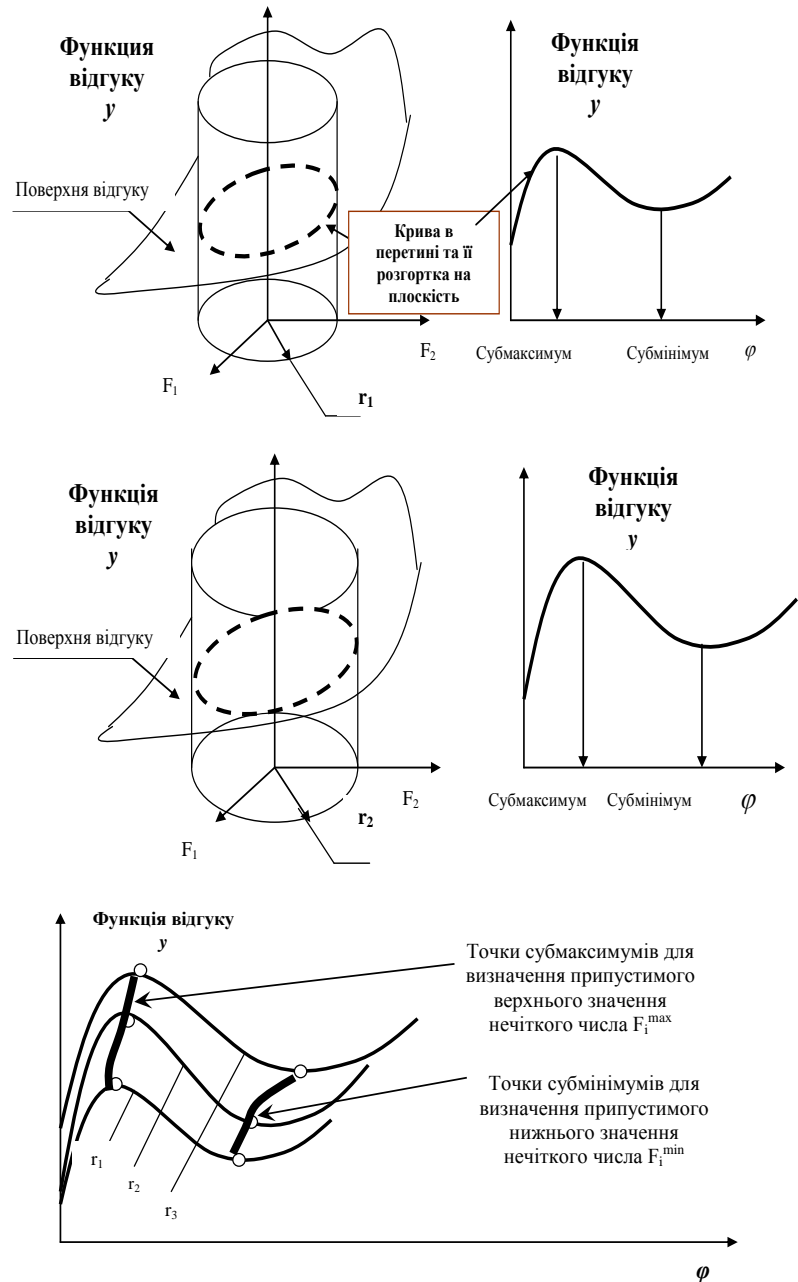


Рис. 7. Реалізація процедури рідж-аналізу - визначення діапазонів  $(F_i^{\min}; F_i^{\max})$

Встановлене, що при управлінні процесом виплавки чавуну пріоритетним є процес регулювання в розплаві вуглецю. Якщо його вміст в розплаві становить  $F_1 < F_1^{\min}$ , потрібне насичення вуглецем, що здійснюється зануренням у ванну електродів. Змінення значення параметру процесу  $F_1$  впливає на параметр процесу  $F_3$ , що є одним з головних параметрів електроплавки.

При управлінні процесом насичення розплаву вуглецем рівняння, що описують поведінку системи, мають вигляд:

$$\frac{dF_3}{dt} = K(a_0 + a_1 F_1), \quad \frac{dF_1}{dt} = bu, \quad (29)$$

де  $F_3$  - вміст кремнію в чавуні,  $F_1$  - вміст вуглецю в чавуні,  $a_0, a_1$  - коефіцієнти залежності вмісту кремнію від вмісту вуглецю в розплаві,  $u$  - управління,  $b$  - у загальному випадку деяка константа,  $K$  - константа швидкості хімічного процесу, що протікає в об'ємі розплаву і на границі поверхні розділу фаз «розплав - шлак».

Кінцевий стан описується рівнянням

$$f^{(k)}(F_1, F_3) = F_3 - \xi F_1 = 0, \quad (30)$$

де  $\xi$  - коефіцієнт, що характеризує необхідне співвідношення вмісту вуглецю і кремнію в чавуні.

Використання принципу максимуму Понтрягіна для визначення оптимального управління процесом насичення розплаву вуглецем дозволило встановити, що за умови опису системи у вигляді (29) момент перемикавання управління та рівняння лінії переключення описуються наступним чином:

$$t^{(s)} = t^{(k)} - \frac{\xi}{Ka_1}, \quad (31)$$

$$F_3^{(s)} = -\frac{a_0}{a_1} \xi + \frac{1}{2} \frac{b\xi^2}{Ka_1} u. \quad (32)$$

Фазові траєкторії та лінії переключення при цьому мають вигляд, що приведений на рис. 8.

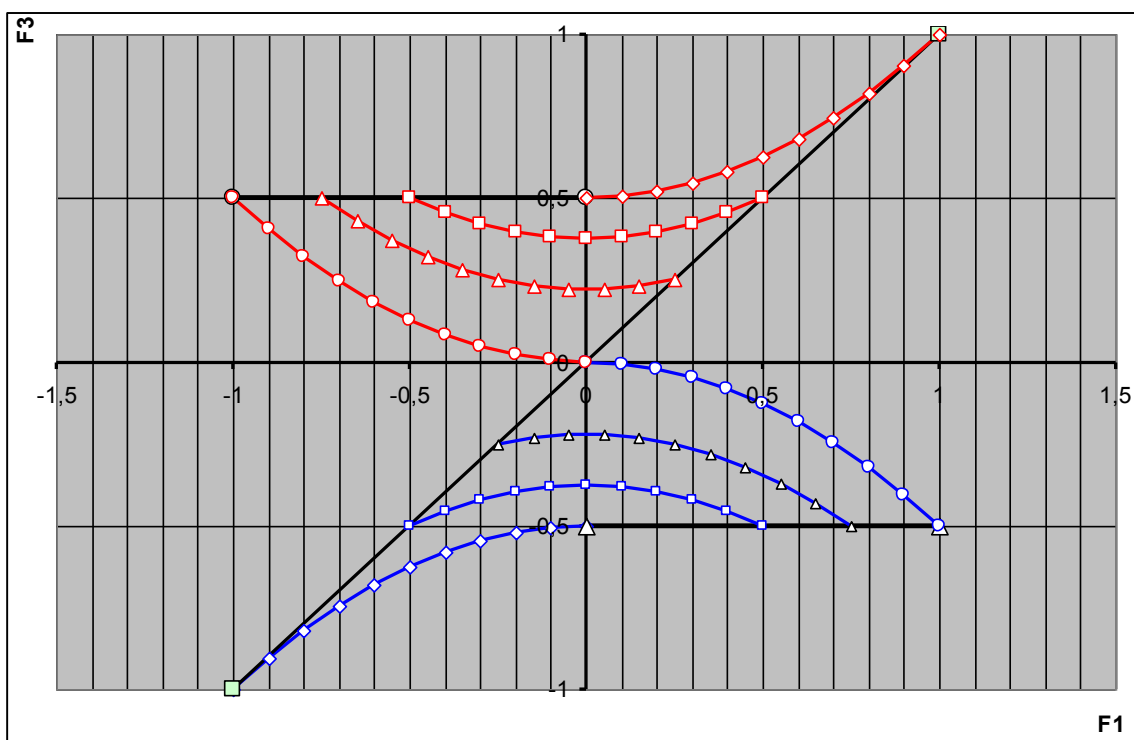


Рис. 8. Фазові траєкторії та лінії переключення

Для реалізації процедури пошуку оптимального управління необхідно знати коефіцієнти залежності вмісту кремнію від вмісту вуглецю в розплаві. Для визначення цих параметрів запропоновано процедуру оцінювання

параметрів кінетичних рівнянь, суть якої полягає в наступному. Записується загальне кінетичне рівняння для кожного елементу хімічного складу у вигляді

$$v_i(t) = \frac{dF_i(t)}{dt} = k_i \frac{S}{m} F_i^{v_i}(t), \quad (33)$$

де  $v_i$  - швидкість реакції, в якій змінюється вміст  $i$ -го елементу в розплаві,  $F_i$  - вміст  $i$ -го елементу в розплаві, що визначається за даними хімічного аналізу сплаву в процесі плавки,  $k_i$  - константа швидкості реакції, внаслідок якої змінюється вміст  $i$ -го елементу в розплаві,  $S$  - площа реакційної поверхні в системі «розплав - шлак»,  $m$  - маса розплаву в печі,  $v_i$  - порядок реакції, в якій бере участь  $i$ -й хімічний елемент.

Реалізується наступний рекурентний алгоритм розрахунку оцінок коефіцієнтів рівняння  $dF_i = v_i dt$ , що є оцінкою швидкості реакції, в якій змінюється вміст  $i$ -го елементу в розплаві.

Шаг 1. Розрахунок початкової дисперсійної матриці  $C_0$

$$C_0 = N(T_N' T_N)^{-1}. \quad (34)$$

Шаг 2. Розрахунок оцінок коефіцієнтів  $v_i$ ,  $i=1, \dots, k$

$$V = C_0 T_N' F. \quad (35)$$

Шаг 3. Розрахунок  $v_i(t)$  для набору значень  $\gamma$  з інтервалом  $\Delta\gamma$

$$v(1+j+\alpha, \gamma) = v(j+\alpha, \gamma) + \frac{C_j t(j+1)}{t'(j+1)C_j t(j+1) + G} [F(j+1) - t'(j+1)v(j+\alpha, \gamma)], \quad (36)$$

де  $G = \frac{\gamma}{1-\gamma}$ ,  $\gamma$  - параметр алгоритму рішення.

Оптимальне значення параметру алгоритму рішення  $\gamma$  знаходиться з рівняння

$$S_\alpha(\gamma^*) = \min_{\gamma} S_\alpha(\gamma), \quad (37)$$

де  $S(\gamma)$  визначається з формули (38) та при великих значеннях  $N$  співпадає з математичним очікуванням квадрату похибки оцінювання вихідної змінної.

$$S(\gamma) = \frac{1}{N-\alpha+1} \sum_{j=\alpha}^N \{F(j) - v'(j, \gamma)t(j)\}^2. \quad (38)$$

На основі визначених реалізацією рекурентного алгоритму (34) - (36) коефіцієнтів  $v_i$  розраховується послідовність оцінок коефіцієнту  $v_i(t)$ , що є оцінкою порядку реакції, в якій бере участь елемент  $i$ -й хімічний елемент

$$\ln v_i(t) = v_i(t) \ln F_i(t). \quad (39)$$

На основі розрахунку коефіцієнтів  $v_i(t)$  з рівняння (40) розраховується параметр  $K_i$

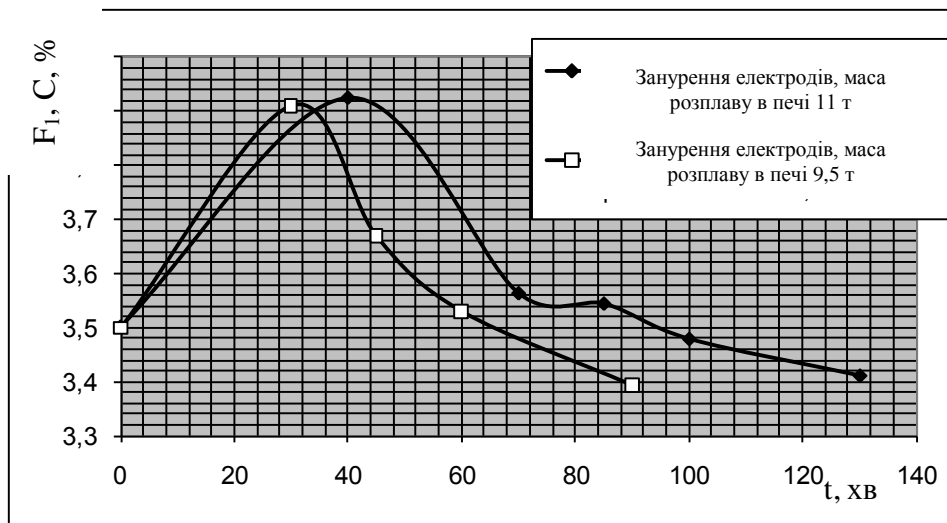


$$\ln v_i(t) = \ln K_i + v_i(t) \ln F_i(t), \quad (40)$$

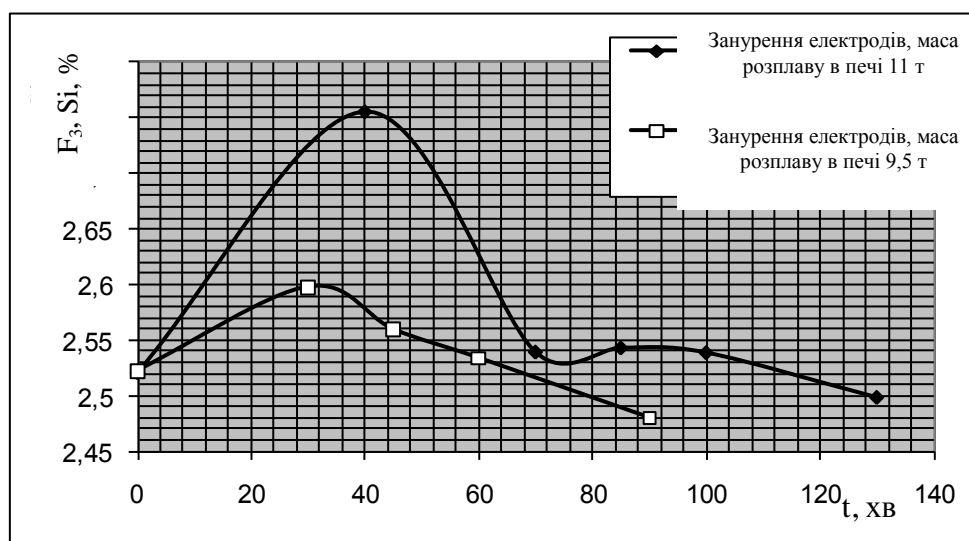
де  $k_i \frac{S}{m} = K_i$

Таким чином визначається константа швидкості процесу  $k_i$ , в якому приймає участь  $i$ -й елемент хімічного складу, та знаходиться залежність  $F_i(t)$ .

Приклади знайдених за описаною процедурою рішень приведені на рис. 9. Отриманні рішення дозволяють встановити рівняння регресії, що описує залежність між вмістом кремнію та вуглецю в розплаві, тобто визначити коефіцієнти  $a_0$ ,  $a_1$  в системі рівнянь (29).



а)



б)

Рис. 9. Кінетичні криві, що описують динаміку змінних  $F_1(t)$  та  $F_3(t)$  при управлінні насиченням розплаву вуглецем

а) – динаміка вмісту вуглецю в розплаві, б) – динаміка вмісту кремнію в розплаві

По результатах побудови кінетичних кривих для кожного елементу хімічного складу відкривається можливість визначення тих з елементів, вміст

яких на етапі витримки розплаву в печі майже не змінюється, що дозволяє спростити процедуру пошуку оптимального управління насиченням розплаву вуглецем завдяки зменшенню числа рівнянь, що описують стан системи на етапі термочасової обробки. При вирішенні практичної задачі по оптимальному управлінню процесом плавки чавуну марок СЧ20 – СЧ30 виявилось, що на етапі витримки розплаву в печі серед перелічених елементів хімічного складу змінюються лише вміст кремнію та вуглецю, що надало можливість пошуку оптимального управління на основі опису системи у вигляді (29).

**Шостий розділ** присвячений розробці алгоритму оптимального управління процесом електроплавки на етапі термочасової обробки розплаву. Запропонована процедура синтезу включає в себе логічний синтез системи управління та синтез оптимального регулятора температури ванни масою  $m(t)$ , що визначається оптимальною технологічною схемою плавки на етапі термочасової обробки.

В основу алгоритму покладено використання рішень, що отримуються на основі реалізації логічного синтезу системи управління, яка містить в собі блок контролю логічних умов (БКЛУ). БКЛУ визначає вибір способів управління: видача розплаву на конвеєр, якщо на момент генерації конвеєром заявки на

розплав його якість задовольняє вимогам критерію якості управління (3), насичення розплаву вуглецем реалізацією оптимального за швидкодією управління, що переводить систему з фактичного початкового стану до заданого кінцевого у вигляді (30), формування сигналів управління на виконавчі механізми бункерів з феросплавами та флюсами, оптимальне в розумінні швидкодії регулювання температури ванни.

Управління процесом видачі розплаву на конвеєр здійснюється за допомогою вісодозуючого пристрою, що виконує функції керування приводом нахилу печі та видачі на ливарний конвеєр порції розплаву, що диктується оптимальною технологічною схемою плавки та має вигляд завдання  $\Delta m$ .

Блок-схема вісодозуючого пристрою (рис. 10) складається з блоку живлення, трьох вимірювальних тензодатчиків, пристрою автоматичної установки системи «на нуль» (АУН) і вісовимірювального пристрою (ВП), які через блок управління

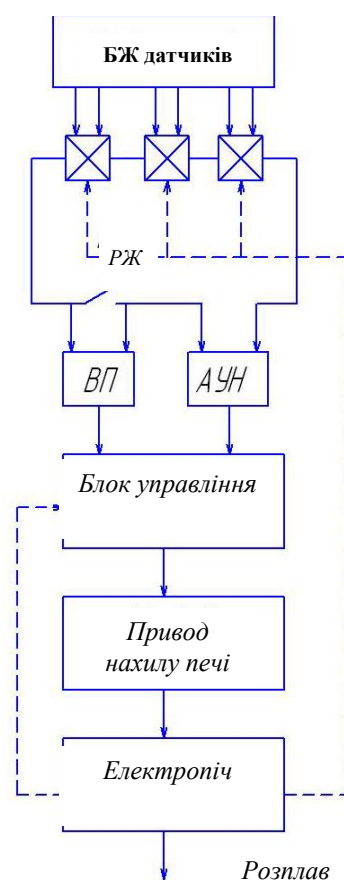


Рис. 10. Схема вісодозуючого пристрою для управління видачею розплаву з печі

здійснює операцію нахилу печі для видачі розплаву на конвеєр. Тензодатчики виконані у вигляді пружної балки з наклеєними на ній напівпровідниковими тензоелементами, що зібрані по мостовій схемі, напруга на яку подається від

автономного джерела живлення. Вісовимірювальний пристрій бере участь в процесі прямого ходу печі (нахил печі), зупинки нахилу печі (процес видачі розплаву) і реверсу печі.

Якщо ливарний конвеєр генерує заявку на розплав, перевіряються умови виконання вимог критерію якості (3) на основі розрахунку елементів вектор-функції  $F(t)$  за рівняннями (6). В разі виконання критерію (3) сигнал управління подається на виконавчий механізм приводу нахилу печі – відбувається видача порції розплаву відповідно до оптимальної технологічної схеми плавки. Якщо вимога критерію якості управління не може бути задоволена на момент видачі розплаву, перевіряється можливість щодо виконання вимоги критерію якості (3) шляхом насичення розплаву вуглецем.

Видача чергової порції розплаву на конвеєр призводить до зменшення температури ванни, що приводить до зміни параметрів рівнянь (6), тому необхідне оптимальне регулювання температури ванни до видачі нової порції на конвеєр. В роботі показано, що стан системи на цьому етапі описується наступним чином:

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = u, \\ \frac{dx_2}{dt} = x_1 - q, \end{cases} \quad (41)$$

де  $x_1 = \Delta Q_1$ ,  $x_2 = C_m \Delta T$ ,  $q = \Delta Q_2$ ,  $u = kU$ ,  $T$  - температура ванни,  $C_m$  - теплоємність ванни,  $Q_1$  - тепло, що підводиться до ванни від електричних дуг,  $Q_2$  - тепло, що віддається ванною внаслідок зменшення її об'єму після видачі порції розплаву на ливарний конвеєр та витримці до видачі чергової порції розплаву,  $U$  - напруга обраної ступені напруження трансформатору.

Початковий стан системи:  $x_1(0) = x_1^{(0)}$ ,  $x_2(0) = x_2^{(0)}$ , кінцевий стан системи:

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

Реалізацією принципу максимуму Понтрягіна встановлена оптимальна траєкторія системи та оптимальне управління у вигляді (42) та (43) відповідно:

$$x_2 = \frac{1}{2u_0} (x_1 - q)^2 \operatorname{sgn}(q - x_1), \quad (42)$$

$$u_{opt} = u_0 \operatorname{sgn} \left[ \frac{1}{2u_0} (x_1 - q)^2 \operatorname{sgn}(q - x_1) - x_2 \right]. \quad (43)$$

Рівняння для визначення моменту переключення  $\tau_s$  має вигляд

$$\begin{aligned} \tau_s = & \frac{x_1^{(0)} - q}{u_0} \operatorname{sgn} \left[ x_2^{(0)} - \frac{(x_1^{(0)} - q)^2}{2u_0} \operatorname{sgn}(q - x_1^{(0)}) \right] + \\ & + \sqrt{\frac{1}{u_0} \left| x_2^{(0)} + \frac{1}{2} (x_1^{(0)} - q) \left[ \frac{x_1^{(0)} - q}{u_0} \operatorname{sgn} \left[ x_2^{(0)} - \frac{(x_1^{(0)} - q)^2}{2u_0} \operatorname{sgn}(q - x_1^{(0)}) \right] \right] \right|}. \end{aligned} \quad (44)$$

Рівняння для визначення загального часу перехідного процесу  $\tau_k$  має вигляд

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

$$+ 2 \sqrt{\frac{1}{u_0} \left| x_2^{(0)} + \frac{1}{2} (x_1^{(0)} - q) \left[ \frac{x_1^{(0)} - q}{u_0} \operatorname{sgn} \left[ x_2^{(0)} - \frac{(x_1^{(0)} - q)^2}{2u_0} \operatorname{sgn}(q - x_1^{(0)}) \right] \right] \right|} \quad (45)$$

Застосування оптимального регулятора температури ванни дозволяє отримувати оптимальні в розумінні швидкодії перехідні процеси в об'єкті регулювання.

Реалізація управління процесами термочасової обробки у вигляді алгоритму показана на рис. 11.

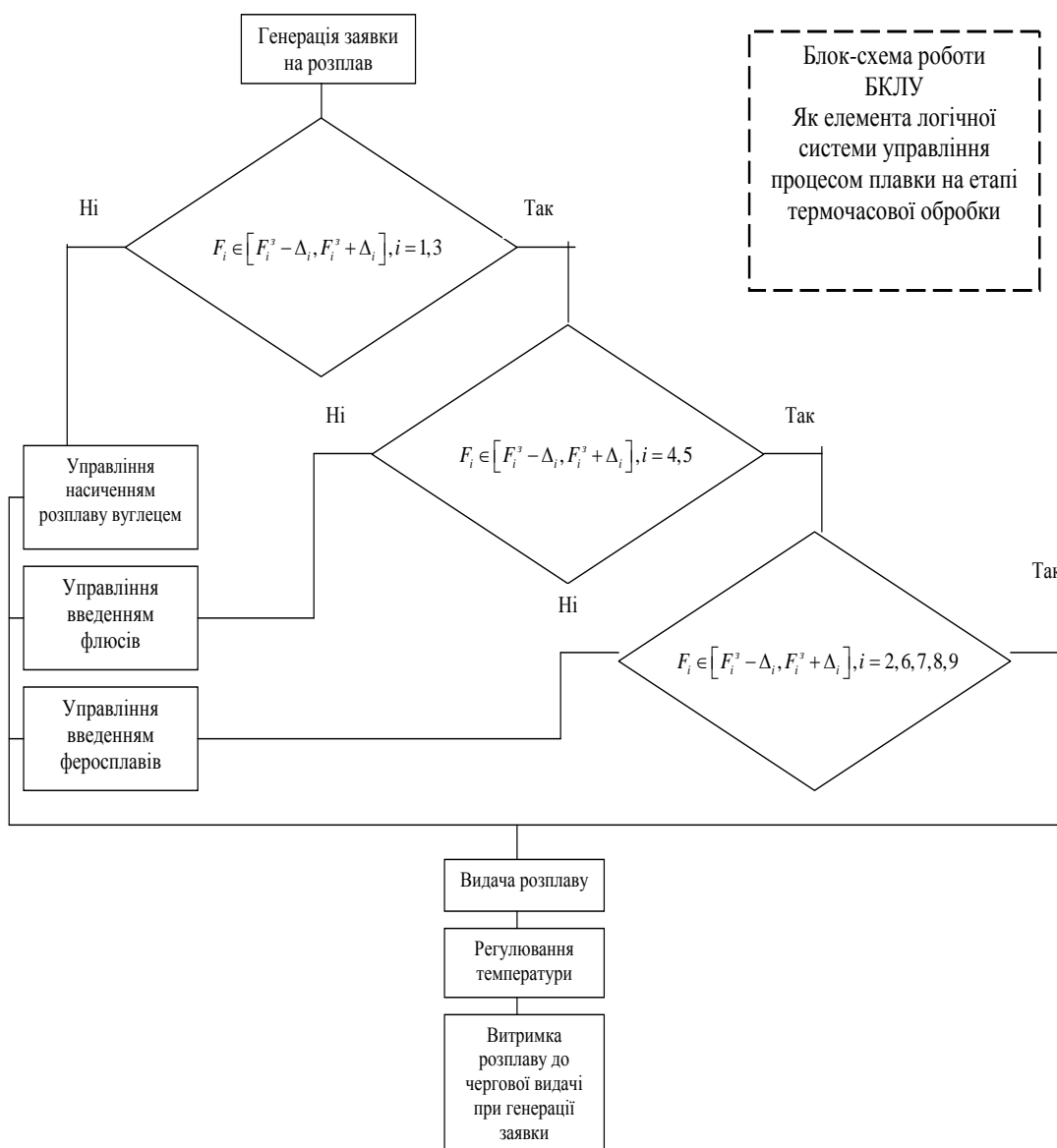


Рис. 11. Алгоритм оптимального управління процесом електроплавки на етапі термочасової обробки

Технічна реалізація запропонованого алгоритму оптимального управління дозволяє вирішувати задачі інтеграції до функціонуючих промислових систем управління, вдосконалюючи їх завдяки доповненню систем регулювання електричних режимів системами управління електроплавкою по кінцевому стану в умовах невизначеності параметрів плавки (рис. 12).

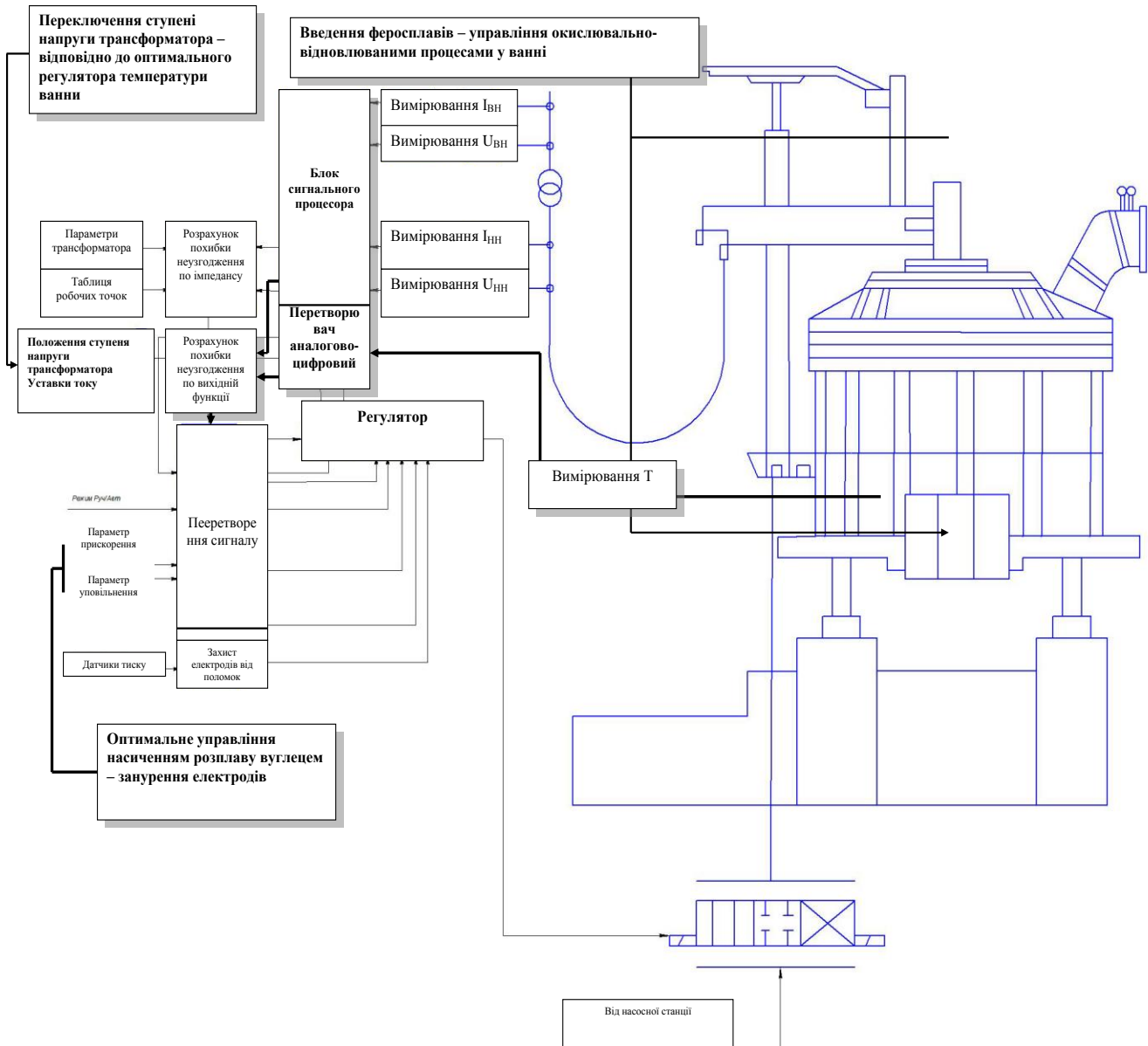


Рис. 12. Схема, що пояснює інтеграцію рішень по оптимізації управління процесом електроплавки до функціонуючих промислових систем управління

Таким чином, запропонований алгоритм оптимального управління на етапі термочасової обробки розплаву дозволяє забезпечити виконання вимог критерію якості управління у вигляді (3) та у вигляді (28).

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена науково-прикладна проблема моделювання та оптимізації управління електроплавкою на основі

моделювання процесів плавки і термочасової обробки, що протікають в реальному часі, в умовах невизначеності.

Отримані наступні основні результати:

1. На основі проведеного аналізу існуючих моделей та систем управління процесами електроплавки виявлені їх недоліки та встановлено, що характерною особливістю процесів управління електроплавкою є невизначеність параметрів, що описують стан системи. Існує проблема оцінювання станів системи та пошуку оптимального управління на всіх етапах плавки, а функціональні, чисельні чи графічні залежності, що пов'язують вхідні та вихідні параметри процесів плавки, на основі яких може бути здійснений їх адекватний опис, в багатьох випадках не дозволяє моделювати управління плавкою.

2. Встановлено, що проблемами на шляху моделювання та оптимізації управління процесами електроплавки є: складність безпосереднього контролювання основних параметрів процесу; в багатьох випадках неадекватність використовуваного аналітичного опису, що дозволяє оцінити неконтрольовані параметри процесу; проблеми визначення структури та параметрів моделей процесів плавки і термочасової обробки, придатних для управління процесами електроплавки в реальному часі; складності з формуванням представницької виборки експериментальних даних, що відбувається безпосередньо в промислових умовах, для побудови такого опису; неоднозначність у підходах до пошуку оптимального управління електроплавкою при моделюванні управління на обох етапах процесу – плавки та термочасової обробки.

3. Показано, що ефективним способом подолання основної проблеми використання класичних методів для знаходження оптимального управління плавкою, обумовленої неможливістю вимірювання параметрів, що описують процес, є побудова рівнянь регресії, які адекватно зв'язують вихідні змінні - суть параметри якості сплаву, і вхідні змінні - вміст елементів хімічного складу, що є нечіткими числами, і аналіз описуваної їм поверхні відгуку; реалізація цих процедур дозволяє визначати оптимальне управління процесом по кінцевому стану.

4. Теоретично та експериментально доведено, що розроблена методологія штучної ортогоналізації дозволяє оптимальним чином оцінювати параметри моделей, що описують процеси електроплавки за умов, коли вхідні змінні - суть нечіткі числа, а вибірка даних для визначення структури та оцінювання параметрів моделей мала, що дозволяє будувати адекватний аналітичний опис процесів електроплавки по малій вибірці даних, доступних для контролю у виробничих умовах в режимі нормальної експлуатації електропечей.

5. Показано, що структура цільового функціонала, який визначає ефективність управління плавкою в електропечі, працюючої у складі плавильно-заливальної системи, може бути отримана з розгляду електропечі як елемента системи масового обслуговування «піч - ливарний конвеєр», в якому піч представлена багатоканальним вузлом обслуговування із змінним числом каналів, при цьому стає можливим врахувати в конструкції функціоналу кілька «конкуруючих» критеріїв якості: мінімізація браку лиття, мінімізація

енерговитрат на плавку і максимізація продуктивності плавильно-заливальної системи. Такий підхід дозволяє моделювати процес в умовах невизначеності параметрів термочасової обробки та використовувати отриманий функціонал для розробки оптимальної технологічної схеми процесу, яка закладається в алгоритм оптимального управління електроплавкою.

6. Розроблена процедура оцінювання параметрів кінетичних рівнянь, що описують динаміку вмісту елементів хімічного складу сплаву, заснована на застосуванні рекурентного алгоритму, дозволяє визначати ті параметри, що входять в аналітичний опис стану системи на етапі термочасової обробки, зменшивши тим самим їх невизначеність, та знаходити оптимальне управління процесом насичення ванни вуглецем розплаву при витримці його в печі до видачі на конвейер.

7. Запропонований алгоритм оптимального управління процесом електроплавки на етапі термочасової обробки, заснований на використанні оптимальних технологічних схем процесу, логічному синтезі системи управління, оптимальному управлінні процесом насичення ванни вуглецем та синтезі оптимального регулятора температури ванни електропечі, дозволяє в умовах невизначеності вхідних змінних реалізовувати управління по швидкодії, отримувати оптимальні в розумінні швидкодії перехідні процеси в об'єкті регулювання, і забезпечувати вимоги критерію якості управління на етапі термочасової обробки розплаву.

8. На реальних промислових об'єктах - електродугових і індукційних печах ДЧМ-10, ІСТ-1-08/5 та ІСТ-04 - проведені експериментальні дослідження отриманих рішень, сформованих на основі розробленої методології моделювання та оптимізації управління процесами, що протікають в реальному часі, при виплавці чотирьох марок чавунів і трьох марок сталей, виплавці легуючих присадок і при модернізації систем управління плавильно-заливально-формуальної ділянки чавуноливарного цеху.

9. Результати промислового освоєння моделювання управління електродуговою плавкою впроваджені на ВАТ «Кременчуцький завод дорожніх машин», ПАТ «Харківський машинобудівний завод «Світло Шахтаря»; моделювання управління процесами на плавильно-заливально-формуальної ділянці цеху – на ДП «Український науково-технічний центр металургійної промисловості «Енергосталь»; алгоритми оптимального управління процесами електроплавки – на ТОВ «Харківський завод підйомно-транспортного устаткування», «УкрНДІ ливарного машинобудування».

Результати дисертаційної роботи використано у навчальному процесі кафедри ливарного виробництва НТУ «ХП».

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Демин Д.А. Пути стабильного повышения марки сложнолегированного чугуна / Д.А. Демин // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ, 1999. - №54. - С.98-100.

2. Дёмин Д.А. Резервы ресурсосбережения при плавке легированного чугуна / Д.А. Дёмин // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ, 1999. - №55. - С.53-55.

3. Дёмин Д.А. Новые теоретические аспекты синтеза анализа и управления ваграночным процессом / Д.А. Дёмин // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. - Харьков: ХГПУ, 1999. - №66. - С.89-92.

4. Дёмин Д.А. Адаптивный подход к разработке энергосберегающей технологии электродуговой плавки / Д.А. Дёмин // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ, 2000. - №77. - С. 24-25.

5. Дёмин Д.А. Системный подход к разработке технологии плавки с учетом “наследственности” шихтовых материалов / Д.А. Дёмин, Т.В. Запорожченко, И.А. Болотова // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ, 2000. - №78. - С.29-30.

*Здобувачем запропоновано метод оцінки спадковості шихтових матеріалів на склад сплаву, що використаний для визначення керованості процесу плавки під час витримки його в печі до видачі на ливарний конвейер.*

6. Дёмин Д.А. Методы оценки и оптимизация показателей эффективности технологического процесса плавки / Д.А. Дёмин // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ, 2000. - №117. - С. 42-44.

7. Дёмин Д.А. Статистическое моделирование зависимостей между структурными составляющими чугуна, модифицированного ферросилицием / Д.А. Дёмин // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. Харьков: ХГПУ. - 2000. - №119. - С. 36-39.

8. Дёмин Д.А. Выбор области планирования промышленных экспериментов при решении задачи оптимизации свойств легированного чугуна / Д.А. Дёмин // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ, 2000. - №128. - С. 121-126.

9. Дёмин Д.А. Статистическое моделирование зависимостей между структурными составляющими и твёрдостью чугуна, модифицированного ферросиликованадием / Д.А. Дёмин // Процессы литья. – Киев: ФТИМС, 2001. - №2. - С. 55-58.

10. Дёмин Д.А. Оптимизация процесса восстановления продуктов эрозии, полученных после электроэрозионной обработки никелевых сплавов / Д.А. Дёмин, В.В. Горбенко, И.А. Винник // Процессы литья. – Киев: ФТИМС, 2001. - №3. - С.85-90.

*Здобувачем отримано математичну модель, що описує вплив управляючих параметрів відновлюваного процесу на вихід кінцевого продукту – легуючої присадки для виплавки чавунів та сталей.*

11. Дёмин Д.А. Энергосберегающая технология получения легированного чугуна / Д.А. Дёмин, Т.В. Запорожченко // Процессы литья. – Киев: ФТИМС, 2001. - №4. - С. 3-5.



*Здобувачем отримано оптимальну за критерієм енерговитрат технологічну схему електроплавки, що покладена в систему управління процесом виплавки легованого чавуну.*

12. Демин Д.А. Оптимизация режима работы дуговой электропечи при плавке легированного чугуна / Д.А. Демин // Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харків: Технологічний Центр, 2004. - №6(12).2004. – С. 43-46.

13. Демин Д.А. Идентификация чугуна для определения рациональных режимов легирования / Д.А. Демин, А.Б. Божко, А.В. Зрайченко, А.Г. Некрасов// Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харків: Технологічний Центр, 2006. - №4/1(22).2006. – С. 29-32.

*Здобувачем запропоновано та реалізовано метод статистичної класифікації чавуну для визначення способу управління процесом виплавки легованих чавунів в електропечах.*

14. Демин Д.А. Моделирование кинетики химсостава чугуна при плавке в электродуговой печи / Д.А. Демин // Вісник Національного технічного університету „ХПІ”. – Харків: НТУ «ХПІ», 2005. - №27. - С.41-46.

15. Демин Д.А. Управление электродуговой плавкой на основе построения адаптивной модели «химический состав - микроструктура чугуна» / Д.А. Демин // Вісник Національного технічного університету „ХПІ”. – Харків: НТУ «ХПІ», 2007. - №30. - С.31-43.

16. Дьомін Д.О. Адаптивний підхід до моделювання параметрів електродугової плавки / Д.О. Дьомін // Наукові вісті Галицької Академії, Івано-Франківськ: Галицька Академія, 2008. - №2(14).2008. – С.24 – 31.

17. Демин Д.А. Оценивание параметров уравнения регрессии в условиях малой выборки / Д.А. Демин, О.В.Серая // Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харків: Технологічний Центр, 2009. - №6/4(42).2009. – С. 14-19.

*Здобувачем сформульовано задачу побудови рівнянь регресії в умовах малої виборки промислових даних та окреслено можливе вирішення задачі оцінювання їх параметрів.*

18. Демин Д.А. Совершенствование процессов управления электроплавкой / Д.А. Демин // Вісник Національного технічного університету „ХПІ”. – Харків: НТУ «ХПІ», 2010. - №4. - С.33-44.

19. Демин Д.А. Искусственная ортогонализация пассивного эксперимента в условиях малой выборки нечетких данных / Д.А. Демин, Л.Г. Раскин // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Харків: УкрДАЗТ, 2010. - №1(80). - С.20-23.

*Здобувачем сформульовано ідею штучної ортогоналізації при плануванні пасивного експерименту в умовах малої виборки нечітких даних та використання її для отримання математичних моделей «склад - властивості».*

20. Демин Д.А. Принятие решений в процессе управления электроплавкой с учетом факторов нестабильности технологического процесса

/ Д.А. Дёмин // Вісник Національного технічного університету „ХПІ”. – Харків: НТУ «ХПІ», 2010. - №17. - С.67-72.

21. Дёмин Д.А. Метод обработки малой выборки нечетких результатов ортогонализированного пассивного эксперимента / Д.А. Дёмин, Т.И. Каткова. // Вісник Інженерної Академії. – Київ: Інженерна Академія України, 2010. - №2.2010. – С. 234-237.

*Здобувачем запропонований метод обробки малої виборки нечітких даних для отримання рівнянь регресії по промисловим даним при реалізації штучної ортогоналізації пасивного експерименту.*

22. Дёмин Д.А. Оценка представительности усеченных ортогональных подпланов плана полного факторного эксперимента / Д.А. Дёмин, О.В. Серая // Системні дослідження та інформаційні технології. – Київ: Інститут системних досліджень, 2010, - №3. – с.84-88.

*Здобувачем розроблено метод оцінки точності багатофакторних рівнянь регресії, які побудовані за допомогою штучної ортогоналізації в умовах малої виборки нечітких даних.*

23. Дёмин Д.А. Синтез систем управления технологическими процессами электродуговой плавки чугуна / Д.А. Дёмин // Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харків: Технологічний Центр, 2012. - №2/10(57).2012. – С. 4-9.

24. Дёмин Д.А. Линейный регрессионный анализ малой выборки нечетких исходных данных / Д.А. Дёмин, О.В. Серая // Международный научно-технический журнал "Проблемы управления и информатики". - 2012. - № 4. - С. 129-142.

*Здобувачем розглянуто задачу оцінювання параметрів рівняння регресії для малої вибірки вихідних даних, коли умови проведення спостережень задані нечітко.*

25. Спосіб виплавлення комплексної лігатури [Текст] : пат. 17244 Україна: МПК (2006) C22B 7/00 7 C22C/00 / Д. О. Дьомін, І. О. Мезенцева, В. В. Горбенко, Л. В. Камкіна; заявник та патентовласник Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». - №2006 03291; заявл. 27.03.06; опубл. 15.09.06, Бюл. № 9. — 3 с.

*Здобувачем розроблено математичну модель процесу відновлення для виплавлення комплексної лігатури.*

26. Дёмин Д.А. Применение параметрических методов распознавания образов для исследования длительности модифицирующего эффекта / Д.А. Дёмин / Тезисы докладов научно-технической конференции “Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье”. - Харьков. - 1996. - с.56.

27. Дёмин Д.А. Оптимизация химического состава сложнолегированного чугуна / Д.А. Дёмин / Сборник трудов “Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье”. - Харьков. - 1997. - с.161-162

28. Дёмин Д.А. Статистическое моделирование тепловых процессов ваграночной плавки / Д.А. Дёмин / Сборник трудов “Актуальные проблемы

современной науки в исследованиях молодых ученых г. Харькова”. - Харьков. -1997. - с.33-34

29. Дёмин Д.А. Статистическое моделирование стационарного и нестационарного периодов плавки чугуна дуплекс-процессом вагранка-дуговая электропечь / Д.А. Дёмин / Сборник трудов “Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье”. - Харьков. - 1998. - с.154-156.

30. Дёмин Д.А. Перспективная технология получения синтетического чугуна / Д.А. Дёмин / Сборник трудов международной научно-производственной конференции „100 лет производственной и научной работы центральной лаборатории ГП „завод им. В.А. Малишева”. - Харьков. - 2003. - с.166-171.

31. Дёмин Д.А. Моделирование системы массового обслуживания „Дуговая печь-литейный конвейер” / Д.А. Дёмин / Тезисы докладов “Экономический путь к высококачественному литью”. – Киев: Редакция журнала „Процессы литья” при участии МП „Информлитьё”. - 2005. - с.38-40

32. Дёмин Д.А. Методика промышленных исследований при освоении новых оливок или оптимизации технологии их изготовления в литейных цехах / Д.А. Дёмин / Тезисы докладов “Экономический путь к высококачественному литью”. – Киев: Редакция журнала „Процессы литья” при участии МП „Информлитьё”. - 2005. - с.155-157.

33. Дёмин Д.А. Метод обработки малой выборки нечетких результатов ортогонализированного пассивного эксперимента / Д.А. Дёмин, Т.И. Каткова / Тези доповідей Міжнародної науково-методичної конференції «Проблеми математичного моделювання». – Дніпродзержинськ. - 2010. – с.20-21.

## АНОТАЦІЇ

**Дьомін Д. О. Моделювання та оптимізація управління процесами електроплавки в умовах невизначеності.** На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.03 – системи і процеси управління. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2013.

Дисертація присвячена рішення актуальної науково-практичної проблеми – розробленню методів моделювання та оптимізації управління процесами електроплавки в умовах невизначеності.

Виконано моделювання процесів управління плавкою на всіх етапах. Розроблена технологія штучної ортогоналізації, що дозволяє оптимальним чином оцінювати параметри математичних моделей, що описують процеси електроплавки, в умовах, коли вхідні змінні суть нечіткі числа, а вибірка даних для побудови моделей мала. Розроблено структуру функціоналу, який визначає ефективність управління електропеччю, що працює у складі ливарного конвейєра, та може бути використаним для розробки алгоритму оптимального управління електроплавкою. Розроблена процедура оцінки параметрів

аналітичного опису динаміки хімічного складу сплаву в реальному часі для визначення оптимального управління процесами насичення ванни вуглецем. Запропоновано алгоритм оптимального управління процесом електроплавки на етапі термочасової обробки, що дозволяє реалізовувати управління по швидкодії, отримувати оптимальні в розумінні швидкодії перехідні процеси в об'єкті регулювання, і забезпечувати вимоги критерію якості управління на етапі термочасової обробки розплаву.

*Ключові слова:* моделювання, оптимізація, керований процес, система управління, невизначеність, електроплавка, штучна ортогоналізація, система масового обслуговування.

**Дёмин Д. А. Моделирование и оптимизация управления процессами электроплавки в условиях неопределенности.** На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.03 - системы и процессы управления. - Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2013.

Диссертация посвящена решению актуальной научно-практической проблемы - разработке методов моделирования и оптимизации управления процессами электроплавки в условиях неопределенности.

Разработана методология определения структуры и оценивания параметров моделей, описывающих процессы электроплавки в условиях неопределённости, позволяющая находить оптимальное управление на всех этапах процесса электроплавки – собственно плавки и термовременной обработки расплава до выдачи его конвейер. Разработана технология искусственной ортогонализации, позволяющая оптимальным образом оценивать параметры математических моделей, описывающих процессы электроплавки, в условиях, когда входные переменные суть нечеткие числа, а выборка данных для построения моделей мала. Выполнено моделирование процессов управления электроплавкой с использованием математических моделей «состав - свойство», полученных на основе искусственной ортогонализации, в процессе функционирования системы управления электроплавкой. Разработана структура функционала, определяющего эффективность управления электропечью, работающей в составе литейного конвейера, который может быть использован для разработки алгоритма оптимального управления электроплавкой на этапе термовременной обработки. Разработана процедура оценки параметров кинетических уравнений, описывающих динамику химического состава сплава в реальном времени, которая может быть использована для определения структуры и параметров математических моделей, описывающих состояние системы на этапе термовременной обработки. Определение этих параметров обеспечивает возможность поиска оптимального управления процессом насыщения ванны углеродом до выдачи расплава на конвейер при генерации соответствующей заявки. Предложен алгоритм оптимального управления процессом электроплавки на этапе термовременной обработки, позволяющий

реализовывать управление по быстродействию, получать оптимальные в смысле быстродействия переходные процессы в объекте регулирования, и обеспечивать требования критерия качества управления на этапе термовременной обработки расплава.

*Ключевые слова:* моделирование, оптимизация, управляемый процесс, система управления, неопределённость, электроплавка, искусственная ортогонализации, система массового обслуживания.

**D. A. Demin. Simulation and optimization of control of electrosmelting processes under uncertainty conditions.** Manuscript.

Thesis for the degree of doctor of technical sciences on specialty 05.13.03 – control systems and processes. – National Technical University «Kharkov Politechnic Institute», Kharkov, 2013.

The thesis is dedicated to the urgent scientific and practical problem - the development of simulation and optimization techniques of control of electrosmelting under uncertainty conditions.

A technology of artificial orthogonalization was developed. It allows estimating the parameters of the mathematical models that describe the electrosmelting, under circumstances where input variables are ambiguous, and data retrieval for models construction is small. The electrosmelting processes were simulated, applying the mathematical models "structure - property" based on the artificial orthogonalization in the operation of the control system of the electrosmelting. A structure of a functional was developed. The functional defines efficiency of the control of an electric furnace, which is a part of the casting conveyor, which could be used to develop the electrosmelting optimal control algorithm. A procedure for estimating the parameters of kinetic equations was developed. These equations describe the dynamics of the chemical composition of the alloy in real time, which could be used to determine the structure and parameters of the mathematical models that describe the state of the system during the thermo temporary melt processing for further search of the optimal control of the electrosmelting. The algorithm of the optimal control of the electrosmelting during the thermo temporary processing was suggested. This processing allows implementing the speed control, getting optimal transients in the controlled system in terms of speed, and ensuring the requirements for a criterion of quality control during the thermo temporal melt processing.

*Keywords:* simulation, optimization, controlled process, control system, uncertainty, electrosmelting, artificial orthogonalization, queuing system.

Відповідальний за випуск  
к.т.н., проф. кафедри ливарного виробництва НТУ «ХПІ»  
Таран Б.П.

Підписано до друку 02.04.2013. Формат 60x84/16.  
Папір офсетн. Друк – різнографічний. Умовн. друк. арк.0,9  
Гарнітура Times New Roman. Наклад 100 прим. Замовлення №

---

Надруковано у ПП «Технологічний Центр»

Свідоцтво ДК № 4452 від 10.12.2012 р.

61145, м. Харків, вул. Шатилова дача, 4

---