

Проводиться теоретичне і математичне дослідження якості динамічного функціонування комп'ютерної стохастичної системи імітаційного моделювання процесів регулювання координат пічного електротехнологічного комплексу на основі дугових сталеплавильних печей. Дисперсійний аналіз впливів ймовірнісних чинників зовнішнього середовища проводиться стосовно комплексу заводу «Дніпрспецсталь», що діє, на основі моделей компонентного, кластерного і динамічного синтезу управляючих дій.

Ключові слова: дослідження, моделювання, система, керування

Проводится теоретическое и математическое исследование качества динамического функционирования компьютерной стохастической системы имитационного моделирования процессов регулирования координат печного электротехнологического комплекса на основе дуговых сталеплавильных печей. Дисперсионный анализ воздействий возможных факторов внешней среды проводится относительно комплекса завода «Днепрспецсталь», который действует на основании моделей компонентного, кластерного и динамического синтеза управляющих действий.

Ключевые слова: исследование, моделирование, система, управление

The dynamic functioning of computer stochastic system of imitating coordinates regulation of furnace electro technological complex on the basis of arch steel melting furnaces theoretical and mathematical research is carried out. Dispersive analysis of outer factors is made according «Dneprospecstal» factory complex, which acts on the basis of regulating action component, cluster and dynamic synthesis models.

Keywords: investigation, modeling, system, regulating

Вступ

На сучасному етапі подолання енергетичної кризи зросли вимоги до енергоємних виробництв, до числа яких відноситься металургія. У той же час, значне підвищення ефективності технологічних процесів, зв'язаних з плавкою кольорових та чорних металів, можливо на основі нових технологій в системах керування дуговими плавильними установками з використанням ЕОМ. Використання таких технологій дозволяє прискорити процес плавки, покращити якість продукції, знизити енергоспоживання, зменшити амортизаційні витрати. Особливої уваги заслуговують питання розробки схем технічних алгоритмів керування електротермічними установками. Цим питанням приділяється недостатня увага, що в основному пов'язана з досить складним математичним

СТОХАСТИЧНЕ ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ В ЗАВДАННЯХ ЙМОВІРНІСНОГО КОМП'ЮТЕРНОГО УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСАМИ РЕГУЛЮВАННЯ КООРДИНАТ В ЕЛЕКТРОМЕТАЛУРГІЇ

І. Д. Труфанов

Доктор технічних наук, професор

Кафедра "Електричні апарати"*

Контактний тел.: 8-050-421-17-42

E-mail: adlas@mail.ru

О. П. Лютий

Кандидат технічних наук, доцент

Директор з енергетики та ремонтів

БАТ "Електрометалургічний завод "Дніпрспецсталь"

Контактний тел.: 8 (061) 283-40-22

К. І. Чумаков, О. Е. Жорняк

Аспіранти

Кафедра "Електричні машини"*

Контактний тел.: 8-066-551-10-87

E-mail: adlas@mail.ru

І. В. Никоненко, І. О. Кащук

Кафедра "Електромеханічне обладнання енергоємних

виробництв"*

* Запорізький національний технічний університет

апаратом, що описує фізичні процеси, які відбуваються при плавці в індукторі у металі. Не дивлячись на тривалий рядків використання дугових установок, процеси що в них протікають, до цього години не достатньо вивчені. У роботі приводяться системо- та схемотехнічна оцінка сучасного стану розробок, присвячених оптимізації процесу плавки металів в дугових установках та виявлення основних тенденцій розвитку теорії та практики створення високоефективних плавильних агрегатів і систем керування на основі адаптаційних алгоритмів оптимізації.

1. Аналіз стану питання і постановка завдань досліджень

Сучасний стан стохастичного математичного моделювання процесів управління електротехнічними і електротехнологічними електрометалургійними комплексами базується на методах оптимізації ідентифікації і екстраполяції в завданнях розробки структурно-алгоритмічної структури системи регулювання координат технологічних машин і агрегатів [14, 15, 16, 18].

Питання синтезу структури системи регулювання координат електротехнологічного комплексу електросталеплавлення, що розробляються в даній роботі авторів, на базі методів стохастичного планування експерименту базується на основних положеннях:

- а) систем керування режимом ДСП на основі імовірнісних моделей процесів [20],
- б) методів та засобів керування режимами систем електропостачання потужних ДСП [22],
- в) синтезу електромеханічних систем на основі узагальненого характеристичного поліному [21],
- г) параметричної оптимізації багатократного інтегруючих електромеханічних систем з критерію максимальної добротності та запасу стійкості [23],
- д) багатокритеріальної оптимізації режимів електротехнологічного комплексу «Дугова сталеплавильна піч – електропостачальна мережа» [24],
- е) методів та засобів керування режимами систем електропостачання потужних ДСП [22],
- є) методів ситуаційного керування ДСП [19],
- ж) систем оптимізації режимів роботи потужних ДСП на основі інтегрального критерію енергозбереження [15] та інших.

У [15, 19–24] на основі методології [16]:

- а) статистичного моделювання процесів імовірнісного управління електротехнічними системами і комплексами;
- б) аналізу і синтезу кореляційних і регресійних моделей;
- в) дисперсійного аналізу впливу чинників;
- г) компонентного, кластерного і дискримінантного аналізу;
- д) спектрального аналізу випадкових процесів та полів;
- е) імовірнісних моделей теорії інформації;
- є) математичної теорії катастроф;
- ж) математичній теорії відновлення. Висвітлені та розроблені наступні основні завдання розвитку систем керування електротехнічним режимом ДСП на базі вище вказаних підходів, принципів і методології в напрямі:

- 1) розробки ієрархічних структур систем управління електричним режимом плавлення садіння (шихти);
- 2) розробки математичних моделей розпізнавання (ідентифікації) технологічних етапів плавлення металу;
- 3) розробки комп'ютерних програм і технічних комп'ютерних систем для реалізації процедур ідентифікації етапів плавлення широкого меню високоякісних сталей і прецизійних сплавів чорних і кольорових металів;
- 4) синтезу інтегральних і диференціальних критеріїв формування оптимізації характеристик координат електротехнічного комплексу ДСП;
- 5) розробки і комп'ютерної реалізації математичних моделей електричного режиму, як процесу зміни стану технологічного комплексу ДСП впродовж етапів плав-

ки у формі алгоритму диспетчера управління процесом плавлення садіння і присадок;

- б) розробки методів синтезу комплексу дій, що управляють, які оптимізують вірогідність стохастичних параметрів і година знаходження режиму в робочому стані;
- 7) розробка математичних моделей і методів синтезу систем регулювання електричного режиму ДСП, які оптимізують дисперсії одне- і тривимірних векторів струму дуги;
- 8) розробки математичних моделей і алгоритмів управління режимом динамічного функціонування багатомасових електромеханічних систем регулювання довжини дуги (переміщення електродів) при стохастичних хвилюваннях режиму;
- 9) розробки управлінь, що коректують, для пофазних підсистем автоматизації електричного режиму ДСП.

На основі вищевикладеного Нами ставляться задачі подальших досліджень в напрямі:

- а) розробки ієрархічної стохастичної системи управління координатами електротехнологічного комплексу електросталеплавлення;
- б) розвитку методів синтезу кореляційних і регресійних моделей оцінки точності, надійності і значущості функцій регресії в процесах розпізнавання (ідентифікації). Інформаційних параметрів в різних фазах ДСП;
- в) математичних моделей дисперсійного аналізу впливу виробничих чинників на час відпрацювання програми етапу плавлення садіння;
- г) розробки математичних програм – факторних моделей стискування інформації при її комп'ютерній обробці;
- д) реалізації в системах ПО процесів аналізу дискримінанта в завданнях оцінки максимуму дисперсій в програмах диспетчерського управління із забезпеченням регламентованого значення інтегрального показника – дисперсії координати, що регламентується;
- е) модифікації методу автономізації і стабілізації електричного режиму комплексу електросталеплавлення у функції навантажень фаз ДСП на основі компонентного, кластерного і дискримінантного аналізу стохастичних моделей теорії інформації;
- є) Модифікації методу ідентифікації експлуатаційних аварійних режимів (в даному випадку, коротких замикань у фазах) на основі дифузійних моделей катастроф;
- ж) модифікації методів інтегральних критеріїв процесів відновлення притехнічної реалізації систем регулювання технологічних етапів плавлення систем формування дисперсій струмів дуги, систем регулювання довжини дуги, системи стабілізації електричного і електротехнологічного режиму ДСП на базі асимптотичних нормальних оцінок розподілу випадкових величин.

2. Основні результати досліджень і їх обговорення

В даний час в експлуатації знаходяться дугові сталеплавильні печі постійного струму (ДС) і змінного струму (АС) (табл. 1).

На заводі «Днепрспецсталь» працює ДСП АС-типу 50 т в комплекті з АКР фірми Danielli (Італія) і вакууматер фірми Demag (Німеччина).

Подальші дослідження в області підвищення ефективності електросталеплавлення проводяться на основі сучасних показників роботи ДСП за технологією «вищого рівня» (табл. 2).

Таблиця 1

Основні системні характеристики АС- і ДС-типу печей

Країна, фірма	Тип печі	Місткість, т	Фірма-постачальник
Бельгія, La Louvriere	DC	115	Demag
Канада, Dofaco, Hamilton, Ontario	AC	165	Voest-Alpine/Fuchs
Китай, Baoshan, Shanghai	DC	2 × 150	Clecim
Shanghai №5 Steelworks	DC	2 × 100	ABB
Франція, Unimetal	DC	150	Clecim
Німеччина, ESF, Riesa	AC	70	Demag
Preussag Stahl, Peine	DC	100	MAN GHH
Японія, Daiwa Steei, Mizushima	DC	110	Clecim
Toa Steel, Kashima	DC	2 × 150	NKK
Tokyo Steel, Okayama	DC	1550	MAN GHH/NKK
Tokyo Steel, Utsunomiya	DC	250	IHI/ABB
Yamato Kogyo, Himeji	DC	140	Daido
Південна Корея, Dae Han, Shinpyug	AC	40	n.a.
Hanbo Steel, Asan Bay	DC	3 × 155	NKK
Kangwo №2 Works, Pohang	DC	130	Danell
Korea Iron & Steel, Masan	DC	120	MAN GHH
Posco, Kwangyan	DC	2 × 130	Nippon Steel
Люксембург, Arbed, Esch-Schiffange	AC	95	Fuchs
Arbed, Esch-Belval	DC	180	Demag
Малайзія, Malayawata, Pral	DC	80	ABB
США, Charter Electric, Saukyille, WI	DC	60	Fuchs/ABB
North Star, St. Paul, MN	DC	100	Voest-Alpine
Nucor, Hickman, AR	DC	2 × 165	MAN GHH/ABB
Pennsylvania Stee, Steelton, PA	DC	150	NKK SE

Таблиця 2

Основні системні показники енергетичної ефективності електросталеплавлення

Фірма (країна)	Основні показники технічної ефективності				
	$m_0/s, т/МВ \cdot А$	$\Delta q_r, \%$	$\Delta W_{\Sigma}, кВт \cdot г/т$	$\Delta t_n, хв$	Тип сталі
Deasero (Мексика)	50/36	1	18	16	Вуглець.
Radex (різні кр.)	різні	0,5	14–27	2–6	Вуглець. Легов.
Beltrame (Італія)	140/55	–	13–18	3–4	Вуглець.
Vallourec (Франція)	94/78	0,5	13	–	Вуглець. Легов.
Armco (США)	165/56	0	7,7	–	Легов.
Slater (США)	20/нема від.	–	10–20	–	Легов.
Lukens (США)	165/нема від.	0,5	10–20	3–7	Вуглець.
Daiwa (Японія)	38/30	0,4	8	1	Вуглець.
Nippon Kokai (Японія)	60/25	0,7	43	35	Корр.
Thyssen (Німеччина)	143/96	1	9–18	2,5	Нема від.
Moteforno (Швейцарія)	93/80	0,2–0,5	5	–	Вуглець.
Tokyo Steel (Японія)	154/нема від.	0,2–0,5	7–10	1–2	Вуглець.
MAN GHH (в різних кр.)	різні	–	13–30	5–7	Нема від.

Примітка. У таблиці m_0 – маса садіння, т; S – потужність (повна) пічного трансформатора, МВ · А; Δq_r – збільшення виходу придатного %; ΔW_{Σ} – скорочення витрати електроенергії, кВт · г/т – скорочення тривалості плавки, хв.; Тип сталі: Вуглець. – вуглецева, Легов. – легована, Корр. – корозійно-стійка

Вартісні параметри сировини для садіння ДСП і допустимі потужності дуги показані в табл. 3 і 4.

1) Основні теоретичні положення оптимального керування параметрами координат індукційного пла-

Таблиця 3

Системні вартісні параметри шихтованих присадок ДСП

Вид сировини	Хімічний відновлювач	Ціна (1996 р.), долл/т	Собівартість виробництва, долл/т	Вартість інвестицій, долл/т	Стан розробки і річна продуктивність
Чушковий чавун	кокс	135–160	—	—	—
Продукт прямого відновлення (Губчате залізо)	Газ	120–145	110–130	160–180	Апробов. процес, 12 млн. т
Продукт прямого відновлення (рідкий)	Газ	120–140	105–135	160–180	Апробов. процес, 5,5 млн. т
Продукт прямого відновлення (брикет.)	Газ	120–140	105–120	150–180	Апробов. процес, 0,9 млн. т
Карбід заліза	Газ	120–140	105–120	150–180	Апробов. процес, 0,35 млн. т
ФАСТ МЕТ	Вугілля	Нема даних	105–120	125–150	Установка що планується

Таблиця 4

Допустимі потужності дуги у функції діаметру електроду дугової печі

Діаметр електроду, мм	Середній максимальний струм, кА	Середня робоча потужність, мВт	
		Плавлення	Рафінування
560	70	51,0	47,0
610	80	58,5	53,5
660	95	69,0	63,5
710 (711)	110	80,0	73,5
760 (762)	125	91,0	83,5

Функціональні структури систем регулювання потужності ДСП показані на рис. 1. Параметри власної динаміки електромеханічної системи регулювання електричної дуги в відповідно з [15] показані на рис. 2.

вильного агрегату. На практиці часто виникає задача спроектувати систему, тобто визначити її структуру та характеристики таким чином, щоб вона мала найбільш можливу точність або який-небудь інший показник при

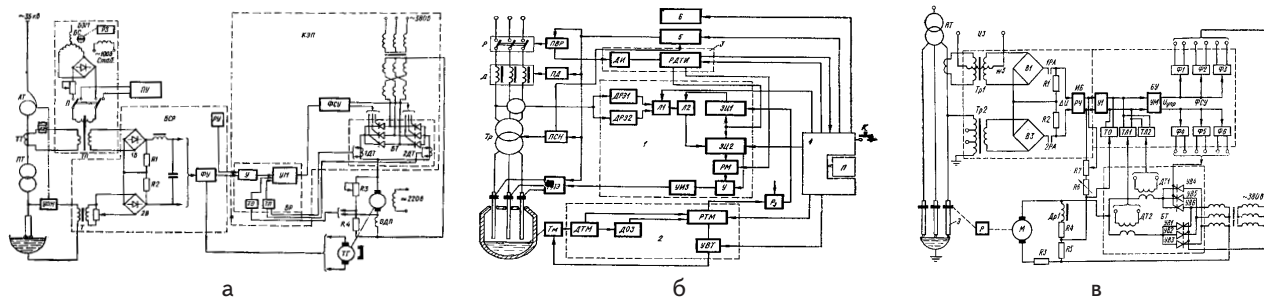


Рис. 1. Системи регулювання потужності. Схеми функціональні: а — АРДМ-Т-12; б — СПУ-004; в — СТУ-022 (7222)

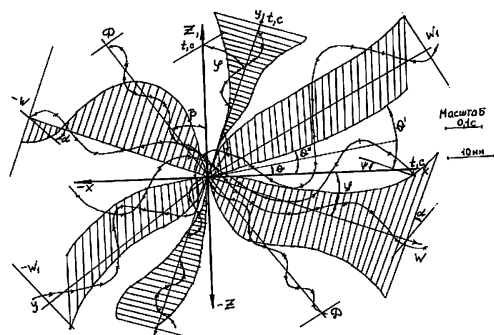


Рис. 2. Полігармонічні коливання електрода ДСП типу ДСВ-50

даних умовах. Системи автоматичного керування, в яких забезпечується найкраще значення якого-небудь основного показника якості системи, називають оптимальними. Величина, що характеризує якість системи, максимальне та мінімальне значення якої досягається для оптимальної системи, називається критерієм оптимальності. Таким критерієм оптимальності може бути один з показників якості перехідного процесу. Інший шлях — безпосереднє визначення оптимальної системи. Цю задачу можна ставити двома способами. В першій постановці задається структура системи і вимагається знайти оптимальне значення її числових параметрів, що забезпечують екстремум обраного критерію. В цьому випадку вимагається визначити екстремум функції системи однієї

або декількох змінних. Виразивши прийнятий критерій через невідомі параметри системи, можна принципово знайти такі ж значення, які відповідають екстремуму критерію оптимальності. При цьому для знаходження екстремуму критерію оптимальності можна застосовувати аналітичні або чисельні методи. У другій постановці задачі система вважається невідомою та потребує визначити її характеристики (в загальному випадку оператор системи), забезпечуючи досягнення прийнятого критерію якості. Ідеальним вирішенням задачі у такій постановці є визначення структури системи та всіх параметрів. Однак теорії, здатної дати вирішення цієї задачі у такій формі не існує. Теорія оптимальних систем дає методи визначення операторів оптимальних систем, відповідаючи екстремальним значенням прийнятого критерію якості. В загальному випадку, коли є декілька рівно важливих показників якості, які не вдається об'єднати в один інтегральний показник, синтез систем автоматичного керування на оптимальне значення кожного з цих показників в окремоті при обмеженні інших дає варіанти рішення, що є ідеальними для окремих показників. Значення цих варіантів може допомогти проектувальнику при виборі оптимального компромісного варіанту.

Частіше за все приходиться мати справу з критеріями оптимальності, значення яких визначається не поточним станом об'єкта, а поведінкою його у ході всього процесу управління. У результаті для визначення критерію оптимальності вимагається інтегрувати яку-небудь функцію, значення якої залежить від поточного стану об'єкта. Отже, в цьому випадку критерій оптимальності є інтегральним функціоналом, який може бути представлений в вигляді

$$Q(X, U) = \int_0^t F(X, U) dt, \quad (1.1)$$

$F(X, U)$ — функція вихідної величини об'єкта X та керування (керуючого впливу) U , які в загальному випадку є векторами, що мають довільне число складових, t — тривалість перехідного процесу.

До критеріїв оптимальності виду (1.1) відносять інтегральні критерії якості перехідних процесів. Підінтегральна функція цих критеріїв містить тільки вихідну величину X . Функціонали виду:

$$Q(U) = \int_0^t \sum_{i=1}^z k_i |u_i| dt, \quad (1.2)$$

$$Q(U) = \int_0^t \sum_{i=1}^z k_i |u_i| dt, \quad I = 1, 2, \dots, z \quad (1.3)$$

містять у підінтегральній функції рівняння U .

Вираз (1.2) використовується при мінімізації витрат робочого тепла тіла, звичайно палива, які визначаються значенням керуючого цими витратами впливом U . Сюди ж можна віднести системи, у яких керуючий вплив визначає значення електричного струму, споживаного об'єктом, наприклад електричною піччю. При вирішенні задачі оптимізації визначеного показника якості, вимоги до інших показників враховуються у вигляді обмежень їх значень. Існують такі обмеження, зумовлені конструкцією та умовами експлуатації, наприклад обмеження потужності, електроенергії, температури нагріву і т. д. В загальному випадку всі ці обмеження, як і критерій оптимальності, можуть бути представлені у вигляді функціоналів $Q_m(X, U)$, що створюють систему нерівностей: $Q_m(X, U) \leq 0$, $m = 1, 2, \dots$

В більш простих випадках обмежені величини $Q_m(X, U)$ можуть бути представлені у вигляді функції. Вони зводяться до обмежень, що накладаються на значення окремих вихідних величин, що задаються у вигляді нерівностей: $x_i - x_{пр} \leq 0$; $u_i - u_{пр} \leq 0$; де $x_{пр}$ та $u_{пр}$ — гранично допустимі значення відповідних координат, наприклад температури, потужності джерел живлення, переміщення електродів у дуговій печі і т. д. При вирішенні задачі оптимізації об'єкт керування в загальному вигляді описуються залежністю вихідних величин X від вхідних величин, тобто керування U та збудження Y :

$$X = A_0(U, Y, t), \quad (1.4)$$

де A_0 — оператор об'єкта в загальному випадку нелінійний. Час t в (1.4) бере участь у тому випадку, якщо об'єкт нестационарний. Звичайно залежність (1.4) задають у вигляді системи диференціальних рівнянь

$$\frac{dx_i}{dt} = \varphi_i, \quad x_i, \dots, x_n; \quad u_1, \dots, u_z; \quad y_1, \dots, y_i, t, \quad (1.5)$$

де φ_i — нелінійна функція в загальному випадку.

Завдання об'єкту керування повинно бути доповнено граничними умовами, тобто величинами, що характеризують початковий стан об'єкта при $t = 0$ та його кінцевий стан, його визначається метою керування у вигляді завдання G .

При такій постановці задача синтезу оптимальної системи автоматичного керування формулюються наступним чином. За даними синтезу математичного опису об'єкту керування (1.4), граничних умов, обмежень, зовнішніх збуджень Y та критерієм оптимальності (1.1) знайти UY , що забезпечує таке керування об'єктом, при якому мета керування досягається при мінімальному значенні критерію оптимальності та виконанні X обмежень. Знайти UY — визначити його математичний опис, тобто оператор A_u , що виражає керування U в загальному випадку через вихідну величину X , зовнішні впливи Y і час t $U = A_y(X, G, Y, t)$.

2) Схемотехнічні алгоритми керування електротермічними установками (ЕТУ)

2.1. *Загальні системні питання моделей систем керування електротермічними установками з ЕОМ.* Створення алгоритму керування будь-яким об'єктом в системі з ЕОМ насамперед пов'язано з розробкою математичної моделі об'єкта керування. На основі моделі процесу будуються алгоритм керування, контролю, діагностики та прогнозування стану цього процесу і системи в цілому. Під алгоритмом розуміють математичний опис системи (моделі системи) з тим чи іншим ступенем повноти та рівнем абстракції, що віддзеркалює реальну систему і відповідність заданій меті. Створенню алгоритму керування передують аналіз та експериментальне дослідження об'єкта керування, метою якого є ідентифікація об'єкту керування і системи в цілому, тобто отримання простого математичного опису системи. Особливо велика роль моделювання при керуванні процесом мікро-ЕОМ (мікро-процесорної системи), обчислювальні можливості якої обмежені. Це призводить до необхідності граничного спрощення опису об'єкта без втрати його основних властивостей. Розрізняють структурну ідентифікацію, пов'язану з віддзеркаленням структурних властивостей реальної системи, та ідентифікацію функціональних властивостей або поведінки, що відображає динамічні та статичні характеристики системи.

Методи ідентифікації об'єктів і систем діляться на теоретичні (аналітичні) та експериментальні. При створенні алгоритму керування використовуються методи теорії автоматичного керування, статичного аналізу, спрощення і т. п. Розробка моделей ведеться на основі законів фізики, електротехніки та інших наук, тобто використовуються загальні закони, справедливі для даної категорії фізичних явищ. В ході складання алгоритму за допомогою теоретичних досліджень уточнюються структурні властивості системи, а шляхом експерименту визначаються їх характеристики, наприклад передаточні функції, коефіцієнти підсилення і т. п. Особливо на першому етапі складання моделі слід залучати інтуїцію та здоровий глузд, які дозволяють встановити основні (первісні) залежності між змінними. Рівняння, використані для реалізації моделей, звичайно спрощують із урахуванням поставленої мети. Повна математична модель об'єкта керування може бути представлена у вигляді багатоконтактної перемикуючої схеми, що з'єднує аналогові блоки (чи програми ЕОМ), відтворюючі безперервні процеси в установці у відповідності до заданого режиму роботи. В такій моделі переключення відтворюють логічні зв'язки, які змінюють структуру об'єкта керування в залежності від його стану.

Детермінована умова перемикавання може бути записана у вигляді: $x = 1 \text{ } z < 0$; $x = 0$ при $z \leq 0$; імовірнісна умова визначається ймовірністю істинності логічного рівня $p(x \geq 1) = p(z > 1)$.

Для опису моделей функціонування системи керування можуть бути використані математичні вирази, принципіальні схеми процесів, словесні визначення та структурні схеми алгоритмів функціонування. Останній метод володіє найбільшою наочністю у відображенні всіх функціональних зв'язків між окремими частинами реального об'єкта. Окрім моделі функціонування об'єкта складається процедурна модель системи, що описує операційні дії, змінюючи режим роботи (наприклад, послідовність керування установкою у перехідних режимах), що підтримують (стабілізуючі) значення основних параметрів, а також виконуючі контроль, діагностику та прогнозування стану установки. До числа найбільш розповсюджених перехідних режимів відносять пуск та зупинку обладнання. В цьому випадку, як правило, процедурна модель включає перевірку ряду певних умов, а далі видачу керуючих впливів типу «увімкнути» – «вимкнути». Процедурні моделі представляються у словесній, структурній та операційних формах.

2.2. Методи ідентифікації координат керування електроречами. Відомо що досліджуваний об'єкт можна вважати ідентифікованим, тобто повністю розкритим якщо відомий його опис у вигляді векторного рівняння:

$$X = F(X, U, Y), \tag{2.1}$$

де X – вектор контрольованих параметрів стану, Y – вектор збудження.

В області номінального режиму та при відсутності істотних не лінійностей може бути представлено у лінійзованій формі:

$$X = AX + BU + DY, \tag{2.2}$$

де A – матриця коефіцієнтів розміром $n \times m$, характеризує стан об'єкта, B – матриця розміром $n \times m$, D – матриця розміром $n \times m$ коефіцієнтів збуджуючих впливів.

Векторне рівняння (2.1) може бути записано у так званій нормальній формі:

$$x_i = \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i=1}^m b_i u_i + \sum_{i=1}^p d_k y_k, \tag{2.3}$$

a_i, b_i, d_k – коефіцієнти, що є елементами відповідно матриць A, B, D .

Особливість електричних печей як об'єктів керування обмежує застосування аналітичних методів ідентифікації. Електричні печі у більшості випадків є об'єктами з розподіленими параметрами, процеси в яких описуються диференціальними рівняннями в часткових похідних. Тому для опису рівняння (2.2) та (2.3) непридатні. Для ідентифікації об'єктів з розподіленими параметрами використовуються інтегральні рівняння виду:

$$x_i(t) = x(t, l_k) = \int_0^t \int_{l_k} \omega_i(\lambda, \tau) u(\lambda, t - \tau) d\tau, \tag{2.4}$$

де t та τ – час; l_k та λ – просторові координати.

Теплові та електромагнітні процеси в системах з розподіленими параметрами можна аналізувати операторним методом з використанням опису виду:

$$F(p) = \frac{X(p)}{Y(p)} = \frac{P(\sqrt{p})}{Q(\sqrt{p})} = \sum_{i=1}^n \frac{p_i P(p_i)}{Q(p_i)} \frac{1}{\sqrt{p}(\sqrt{p} - \sqrt{p_i})}, \tag{2.5}$$

де p – оператор перетворення Лапласа; $Q(\sqrt{p})$ і $P(\sqrt{p})$ – поліноми аргументу \sqrt{p} ступенів n та m відповідно, причому $n < m$; p_i – не кратні корені рівняння $Q(p_i) = 0, i = 1, \dots, n$. Для дійсних коренів p_i оригінал кожного члена суми (2.5) визначається інтегралом ймовірності:

$$h_i(t) = e^{p_i t} \operatorname{erfc}(p_i \sqrt{t}). \tag{2.6}$$

Для комплексно спряжених коренів $p_i = k(1 \pm j)$ оригінал визначається інтегралом Френзеля [3]. Однак для довільних коренів виду $\operatorname{Re} p_i \pm j \operatorname{Im} p_i$ обернене перетворення для (2.5) елементарними функціями часу не визначається. Для знаходження оригінала функції (2.5) для довільних коренів p_i , можна використовувати спеціальні функції U та V :

$$h_i(t) = 2 \operatorname{Re} \frac{p_i P(p_i)}{Q(p_i)} \left[2e^{p_i t} - u(j p_i \sqrt{t}) - j V(j p_i \sqrt{t}) \right]. \tag{2.7}$$

Функцію (2.7) можна використовувати для ідентифікації електричних печей, в яких розподілені параметри суттєво впливають на протікаючі процеси. В [3] приводяться вирази для оригіналів функції (2.5) при різних коренях p_i . При аналізі енергетичних процесів, що протікають в ЕТУ, зручно використовувати середньозважену ентальпію як інтегральний показник:

$$i(t) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^n \gamma_i \int_{V_i} c_i(\Theta) \Theta_i(x, y, z, t) dx dy dz,$$

де M – загальна маса тіл, що нагріваються; γ_i – щільність металу; c_i – питома теплоємність; V_i – об'єми окремих частин металу; Θ – температура; $i = 1, \dots, n$ – кількість елементарних об'єктів. Ідентифікація процесу в цьому випадку зводиться до знаходження розрахункових співвідношень чи способів контролю споживаної потужності $P(t)$ та потужності втрат $P_n(t)$, зв'язаних з ентальпією

$$\text{співвідношенням: } \frac{di}{dt} = \frac{1}{M} [P(t) - P_n(t)].$$

Можливості аналітичних методів ідентифікації, основаних на детермінованому поданні зв'язків в об'єкті керування стосовно ЕТУ обмежені. Через різноманітність діючих факторів, що не піддаються контролю, та імовірнісного їх характеру не можуть бути з достатньою точністю описані термінованими методами процесу плавки твердої шихти, плавки у руднотермічних печах та інші. Для опису імовірнісних залежностей, характеризуючи стан процесу, використовують статичні методи планування експерименту та регресійного аналізу, що дозволяє отримати шукані оцінки залежності вихідного параметру X від n контрольованих величин y_i , у вигляді:

$$X = C_0 + \sum_{i=1}^n C_i y_i + \sum_{1 \leq i < j \leq n} C_{ij} y_i y_j + \dots, \quad (2.8)$$

де C_i – постійні коефіцієнти. Звичайно обмежуються рівнянням (2.8) не вище другого порядку. Коефіцієнти C_i можуть бути знайдені методами теорії планування експерименту [4], що дозволяє мінімізувати число дослідів та описувати процес з максимальною достовірністю. Якщо припустити, що на основі методів, викладених у [4], дослід сплановано, тобто обрана кількість дослідів N , число варійованих параметрів y_i та число r паралельних вимірів для кожного з дослідів, то в результаті можуть бути розраховані середні значення \bar{x}_u для кожного з дослідів вразкид (дисперсія) показань:

$$\bar{X}_u = \sum_{i=1}^r \frac{x_i}{r}; \quad \sigma_n^2 = \frac{1}{r-1} \sum_{i=1}^r (x_i - \bar{X}_u)^2. \quad (2.9)$$

Значимість отриманих результатів може бути оцінена за одним з критеріїв, наприклад за критерієм Ст'юдента. При позитивній оцінці значимості отриманих результатів оцінки коефіцієнтів C_i^* моделі (2.8) визначаються за формулою:

$$C_i^* = \frac{\sum_{i=1}^N y_{iu} \bar{X}_u}{\sum_{i=1}^N y_{iu}^2} \quad (2.10)$$

відповідаючи мінімуму середньоквадратичного відхилення оцінок коефіцієнтів C_i^* , що були знайдені за (2.10), проводять оцінку його адекватності ідентифікованості об'єкту з використанням одного із статичних критеріїв, наприклад критерій Фішера. При ідентифікації електротермічних процесів з урахуванням динамічних властивостей використовують опис моделі у вигляді (2.6) чи рівняння в кінцевих різницях:

$$X(t + \Delta t) = AX(t) + BU(t). \quad (2.11)$$

Ідентифікація моделі (2.11) включає дві стадії: апріорну структурну та експериментальну параметричну ідентифікацію. На стадії апріорної структурної ідентифікації здійснюється обґрунтований вибір складу векторів стану X та керування U , а також структури матриць зв'язку A та B . Вибір обґрунтований на фізичних уявленнях про процес та накопиченому досвіді експлуатації. При цьому вибір структури матриць A та B зводиться до визначення числа та положення відмінних від нуля коефіцієнтів шляхом порівнювання до нуля тих коефіцієнтів, які характеризують явно слабкі зв'язки в об'єкті або ті, що не мають фізичного змісту.

Експериментальна ідентифікація динамічного об'єкту у вигляді моделі, описаної (2.8) та (2.11), є складною задачею і складається з планування експерименту виміру непрямих параметрів протягом достатньо тривалого періоду часу та наступній обробці результатів для отримання оцінок коефіцієнтів, що утворюють матриці A , B та D за допомогою ітераційних методів.

2.3. Алгоритми оптимізації динамічного функціонування електротермічних установок. Алгоритм керування процесом в загальному випадку визначається процедурною моделлю. Керуючий вплив для лінійних законів визначається рівнянням:

$$U(p) = W_{\text{кор}}(p) \left[q(p) - \sum_{i=1}^N X_i(p) \right] + k p g(p), \quad (2.12)$$

де $W_{\text{кор}}(p)$ – передаточна функція корегуючої ланки, що визначається законом керування; X_i – сигнал зворотного зв'язку (основна керуюча змінна); N – число кіл зворотного зв'язку; k – коефіцієнт пропорційності.

При формуванні керуючого впливу для покращення динамічних властивостей системи та забезпечення необхідної якості керування вводять складову, пропорційну похідній від задаючого впливу. Ця складова дозволяє компенсувати інерційність об'єкту керування. Алгоритм формування керуючого впливу:

$$U(p) = q(p) - \sum_{i=1}^N X_i(p).$$

У кожному такті роботи системи сигнали головного зворотного зв'язку x_i , та неузгодження u порівнюються з максимально допустимими значеннями, які задаються перед початком роботи. При виході хоча б одного сигналу за допустимі межі реалізується одна з можливих умов: фіксація заданого положення з зупинкою системи (на виході нульове значення); фіксація заданого положення без зупинки системи (на вихід машини подається нульовий керуючий вплив, машина продовжує обробку інформації; відпрацювання нульового задаючого впливу, після чого машина зупиняється).

Алгоритми керування запускаються від таймеру, що дозволяє стабілізувати період дискретності та збільшити точність обчислень похідних.

Загальна задача оптимізації функціонування об'єкта керування може бути сформульована як задача пошуку екстремуму функції чи функціоналу при деяких обмеженнях. Якщо перехідними процесами в системі не можна знехтувати, рівняння повинно формуватися як функція часу. Звичайно порядок об'єкта в системах керування електротермічними не перебільшує другого. Оптимальне керування в цьому випадку повинно складатись з двох інтервалів, на кожному з яких керуючий вплив приймає граничну швидкість. Синтез керування при цьому зводиться до визначення моментів переключення t_1 та t_2 . Ця задача найбільш просто може бути вирішена методом стикування диференціальних рівнянь для двох інтервалів. В результаті може бути отримано рівняння:

$$T_1 T_2 \frac{d^2 x}{dt^2} + (T_1 + T_2) \frac{dx}{dt} = k_0 \left(u + \sigma T_1 \frac{du}{dt} \right). \quad (2.13)$$

З числового рішення якого знаходяться t_1 та t_2 як функції відхилення регулюємої величини Δx , максимального значення керування u_m та динамічних параметрів

об'єкту δ_1 та δ_2 . Знайдені таким чином параметри керування забезпечують відпрацювання збудження за кінцевий та мінімальний можливий час t_2 . В реальних системах практично завжди існує допустимий інтервал значень регулюемого параметра $x_k \pm x_m$, що дозволяє спростити закон керування. Синтез близького до оптимального, тобто квазіоптимального, рівняння розглянемо на прикладі об'єкта другого порядку:

$$\Delta u(t) = \Delta u_{m0}(t) - \Delta u_{mk}(t - t_1), \quad (2.14)$$

де T_1 та T_2 — постійні часу $T_1 > T_2$; k_0 — коефіцієнт підсилення; σ — параметр, що враховує характер реакції системи. Стосовно ЕТУ параметр враховує їх специфіку як об'єктів з розподіленими параметрами, що проявляється у швидкій реакції поверхневих шарів та у більш повільній реакції усередині шарів.

Розглянемо задачу переводу об'єкта (2.13) із стану x_0 , у стан $x_k \leq x \leq x_k \pm x_m$, використавши квазіоптимальне рівняння. В момент часу $t = 0$ вмикається максимально можливе керування u_m , а у момент часу t_1 проводиться переключення на кінцеве рівняння u_k , що розраховується із статичного рівняння об'єкту. Таке рівняння може бути записано у вигляді:

$$\Delta u(t) = \Delta u_{m0}(t) - u_{mk}(t - t_1),$$

де $\Delta u_{m0} = u_m - u_0$; $\Delta u_{mk} = u_m - u_k$.

Рух об'єкту (2.13) при рівнянні (2.14) та $t_1 \leq t \leq t_2$ описується рівняннями:

$$\Delta x(t) = k_0 \left[\Delta u_k + C_1(\Delta u_{m0} - \Delta u_{mk} e^{t_1/T_1}) + C_2(\Delta u_{m0} - \Delta u_{mk} e^{t_2/T_2}) e^{-t/T_2} \right]; \quad (2.15)$$

$$\Delta x(t) = -k_0 \left[\frac{C_1}{T_1} (\Delta u_{m0} - \Delta u_{mk} e^{t_1/T_1}) e^{t_1/T_1} + \frac{C_2}{T_2} (\Delta u_{m0} - \Delta u_{mk} e^{t_2/T_2}) e^{-t/T_2} \right], \quad (2.16)$$

де

$$\Delta u_k = \Delta u_{m0} - \Delta u_{mk} = u_k - u_0 = \frac{\Delta x_k}{k_0};$$

$$C_1 = \frac{T_1(1-\sigma)}{T_2 - T_1}; \quad C_2 = \frac{T_2(1-\gamma\sigma)}{T_1 - T_2};$$

$$\gamma = \frac{T_1}{T_2}; \quad y_1 = \frac{\Delta u_{m0}}{\Delta u_{mk}}; \quad y_2 = \frac{\Delta x_m}{k_0 \Delta u_{m0} (1-\gamma\sigma)};$$

k_0 — коефіцієнт посилення; σ — параметр, що враховує характер реакції. Оскільки $\Delta x(t_2) = \Delta x_k + \Delta x_m$ та $\frac{dx(t_2)}{dt} = 0$ функція перемикавання має вигляд:

$$k_0(1-\sigma)(\Delta u_{m0} - \Delta u_{mk} e^{t_1/T_1}) + \Delta x e^{t_2/T_2} = 0. \quad (2.17)$$

Числове значення (2.17) дозволяє знайти залежність часу переключення t_1 від часу t_2 та параметрів системи. Ці залежності отримали назву ліній перемикавання. Аналогічно можуть бути визначені моменти переключень для інших видів керування та об'єктів, у тому числі й для об'єктів, що описуються диференційними рівняннями в часткових похідних. Якщо розглянути методи оптимального керування не можуть бути використані, наприклад

через наявність значних та частих збуджень, то систему керування доцільно будувати за ієрархічним принципом. На першому рівні ієрархії такої системи можуть бути використані оптимальні або квазіоптимальні аналогові чи цифрові автоматичні регулятори, а на другому — мікропроцесорна система, що змінює завдання автоматичних регуляторів з урахуванням оптимізації процесу в цілому, тобто працююча у супервізорному режимі. За таким принципом будуються системи керування дугувими сталеплавильними печами великої ємності.

2.4. *Адаптаційні алгоритми розробки моделі процесу керування.* Використання ЕОМ в ЕТУ дозволяє вирішувати задачі адаптації систем керування до змінних умов оточуючого середовища чи об'єкта керування. Для систем керування з ЕОМ та особливо з мікропроцесорними засобами доцільно використовувати більш прості моделі об'єкта та алгоритми. В той же час ці моделі описують достатньо складні процеси, на які впливають численні фактори, які у більшості випадків не піддаються контролю. Задача створення адекватних моделей у цих випадках може бути вирішена шляхом адаптації, тобто корекції в процесі керування. Припустимо, що керування об'єктом (2.13) здійснюється за квазіоптимальним алгоритмом (2.14) з обчисленням часу переключення t_1 за (2.17). Час переключення t_1 в основному визначається постійною часу T_1 . Нехай також значення k_0 та σ постійні або можуть бути достатньо точно розраховані в залежності від стану об'єкта. Тоді після вмикання керування $\pm \bar{u}_m$ задача визначення моменту t_1 переключення на u_k при відомих значеннях y_1 та y_2 у (2.17) зводиться до уточнення постійної часу T_1 . Для цього можна використати особливість об'єкта, яка описується рівнянням (2.13), що при $(1-\sigma)e^{-t_0/T_1} = (1-\sigma)e^{-t_0/T_2}$

$$\Delta x(t_0) = 0 \quad \text{та} \quad \Delta x(t_0) = k_0 u_m \left[1 - (1-\sigma)e^{-t_0/T_1} \right].$$

Зафіксувавши тим чи іншим чином виконання умови $\Delta x(t_0) = 0$ та визначивши час t_0 в цей момент, розрахуємо уточнене значення T_1 :

$$T_1 = \frac{t_0}{\ln \frac{1-\sigma}{k_0 u_m - \Delta x(t_0)}}. \quad (2.18)$$

Для оптимізації процесу в цілому, як правило, використовують статичні моделі виду (2.8). Їх адаптація може бути здійснена наступним чином. Нехай (2.8) використовується для обчислення оцінки x на основі безперервного контролю непрямих параметрів процесу y_i . Точне значення x_0 можна контролювати періодично. Задача адаптації зводиться в цьому випадку до вибору та корекції коефіцієнтів C_i моделі (2.8) на основі періодичної зміни дійсного значення x_0 , щоб оцінки значень x , обчислених за (2.8), як можливо менше відрізнялись від дійсних параметрів параметра. Ця задача може бути вирішена методом послідовних наближень чи ітерацій:

$$C_i[n] = C_i[n-1] - \gamma_i[n] \frac{\partial J(C_i(n-1))}{\partial C_i}, \quad (2.19)$$

де J — якийсь функціонал, визначаючий міру відхилення оцінки x від дійсного значення x_0 чи кроку ітерації; γ_i — коефіцієнт, що визначає розмір чергового кроку. Якщо у якості функціонала J прийняти квадратичне

відхилення x_0 від $x = \sum_1^k c_i y_i$, то з (2.19) можна отримати основну формулу методу стохастичної апроксимації:

$$C_i[n] = C_i[n-1] - \gamma_i[n] \left(x_0 - \sum_{i=0}^k C_i[n-1] y_i \right) y_i. \quad (2.20)$$

Для постійного коефіцієнту C_0 моделі (2.8) вираз (2.20) має вид:

$$C_0[n] = (1 - \gamma[n]) C_0[n-1] + \gamma[n] C_{00}, \quad (2.21)$$

де $C_0[n-1]$ – попереднє значення оцінки C_0 ; C_{00} – значення C_0 , отримано в результаті чергового періодичного виміру.

Вираз (2.12) може бути використаний для оцінки математичного очікування чи середнього значення якої-небудь величини та адаптації цієї оцінки по ходу технологічного процесу.

Вирази (2.20) та (2.21) можуть бути використані для отримання ітераційних алгоритмів адаптації, що відрізняються законом $\gamma[n]$. Вибір цього закону визначає швидкість та стійкість процесу збіжності.

Загальний порядок та методи математичного опису та дослідження адаптивних систем автоматичного керування ті ж, що й для неадаптивних.

Параметри системи (2.15)–(2.17) з урахуванням (2.20) та (2.21) повинні бути визначені з урахуванням стохастичного характеру процесів керування, ідентифікації та екстраполяції в задачах планування експерименту як законів регулювання координат електротехнологічного комплексу електрометалургії сталі.

У відповідності з [15] технічні характеристики навантаження електрокомплексу дугового плавлення металу мають симетричні часові інтервали $E(x_i) = 0$ або $E([x_{i+s} - x_i]^2) = f(s)$ не залежить від часу та для теплових потоків за Ейнштейном [1] для дисперсії $f(s) = cs$ при $E(x) = 0$ (E – оператор математичного очікування).

Для $f(s)$ можливо [2] представлення x_1 у вінеровському виді за Тесельським:

$$x_1(\omega) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n(\omega) \psi_n(t), \quad (2.21)$$

де коефіцієнти a_n визначаються за відомим розкладенням у ряд Фур'є та у даному випадку $\psi_n(t)$ обчислюється за алгоритмом Galman [3] у формі базису:

$$E(a_n a_m) = \int_0^1 \int_0^1 E(x_i x_s) \psi_n(t) \psi_m(s) dt ds, \quad (2.22)$$

де при $t < s$ функція [3]:

$$E(x_i x_s) = E(x_i [x_t + (x_s - x_t)]) = E(x_i^2) + 0 = ct, \quad (2.23)$$

тут при $c = 1$ буде мати місце [4]:

$$E(x_i x_s) = \min(s, t), \quad (2.24)$$

тобто ядро $E(x_i x_s)$ буде неперервно та додатньо визначено. Виходячи з цих намірів при $a_n = a_m$ величина $E(a_n^2)$ функція М. Нисіо [5] в базисі $L_2[0,1]$, L – розподілу (з середнім 0 та дисперсією 1) буде дорівнювати:

$$E(a_n^2) = E \left\{ \int_0^1 \int_0^1 E(x_i x_s) \psi_n(t) \psi_n(s) dt ds \right\} = \int_0^1 \int_0^1 \delta(t-s) \psi_n(s) dt ds = \int_0^1 \psi_n^2(s) ds = 1. \quad (2.25)$$

Для визначення умов збіжності (2.25) необхідно використовувати функції Хаара [6]:

$$H_0(t) = 1; \quad 0 \ll t \ll 1; \quad H_1(t) = \begin{cases} 0 \ll t \ll 0,5; \\ 0,5 \ll t \ll 1 \end{cases} \quad (2.26)$$

та для загального випадку при $2^n \ll k \ll 2^{n+1}$ приймається:

$$H_k(t) = \begin{cases} 2^{n/2} \text{ при } \frac{k-2^n}{2^n} \leq t \leq \frac{k-2^n+(1/2)}{2^n}; \\ -2^{n/2} \text{ при } \frac{k-2^n+(1/2)}{2^n} \leq t \leq \frac{k-2^n+1}{2^n}, \end{cases} \quad (2.27)$$

тобто дані функції створюють ортогональну систему та для розкладення в ряд Фур'є використовується рівність Парсеваля

$$(f, g) = \sum_{k=0}^{\infty} (f, H_k)(g, H_k), \quad (2.28)$$

де H_k визначені за (2.27).

$$\text{При } S_k(t) = \int_{n+1}^t H_k dt, \quad \frac{2^{-n/2}}{4} \text{ та } 2H^n \ll k \ll 2^{n+1} \text{ коефі-}$$

цієнт $b_n = \max |a_k|$ (a_k – за (2.25)), будемо мати нормальний розподіл з середнім 0 та дисперсією 1 виду:

$$P(|x_n|) = 0(\sqrt{\log u}) = 1, \quad (2.29)$$

тобто (2.29) є наслідком леми Бореля – Кантелі за умовою використання $S_k(t)$ (функцією Шаудера) та при

$$x_i > 0 \quad (2.29):$$

$$P(|x_n| \gg x) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \left\{ \frac{\exp(-x^2/2)}{x} - \int_x^{\infty} \frac{\exp(-u^2/2)}{u^2} du \right\}. \quad (2.30)$$

У (2.30) для більших x_i другий член має менший порядок росту, чим величина інтеграла (2.28), тому приблизно

$$P(|x_n| \gg x) \approx \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{\exp(-x^2/2)}{x} \text{ при } x \rightarrow \infty. \quad (2.31)$$

При підстановці (2.31) у (2.30) будемо мати

$$\sum_{n=2}^{\infty} P(|x_n| > c\sqrt{\log u}) \leq K \sum_{n=2}^{\infty} \frac{n^{-c^2/2}}{\sqrt{\log u}}, \quad (2.32)$$

бо при $c > \sqrt{2}$ ліва частина кінцева.

Для значень $c > \sqrt{2 \log u}$ у відповідності з П. Леві [7] траєкторія руху центру координат (2.32) буде мати вигляд:

$$P \left(\limsup_{t \rightarrow \infty} \frac{x_t}{\sqrt{2t \log \log t}} = 1 \right) = 1. \quad (2.33)$$

У випадку $t > 0$ рівняння (2.33) буде мати значення

$$P\left(\lim_{h \rightarrow 0^+} \sup \frac{x_{t_0+h} - x_{t_0}}{\sqrt{2h \log \log h^{-1}}} = 1\right) = 1. \quad (2.34)$$

Це рівняння масо передачі (як рівняння теплопровідності) потоки енергії

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \quad (2.35)$$

при використанні міри Лебега отримаємо:

$$\lim_{t \rightarrow 0^+} \frac{1}{t} \int_{x-\varepsilon}^{x+\varepsilon} P_t(x, dy)(y - x^2) = b(x) \geq 0. \quad (2.36)$$

Рівняння (2.36) характеризує граничне відхилення координат гіперповерхонь параметрів регулюючої частини АСКТП.

Для системи регулювання координат комбінованого агрегату сталеплавління (ДСП + ГКР чи ДСП + АКOC) рівняння перетворення потоків енергії (електричної, карбонізаторів, карбюраторів, рафінуючих, розкислення) в теплоту плавлення садки та присадок у відповідності з [14] буде мати вигляд:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = a(x) \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \frac{b(x)}{2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2}, \quad (2.37)$$

де x — координата по висоті розплаву ванни; $a(x)$, $b(x)$ — визначені за (2.21). При початкових (граничних другого роду)

$$\lim_{t \rightarrow 0^+} \varphi(t, x) = \xi(x), \quad x \in R^1, \quad (2.38)$$

будемо мати рішення (2.37), яке у формі Лорана буде мати вид:

$$\varphi(t, x) = \varphi(t, x) + (y - x)\varphi_x(t, x) + \frac{(y - x)^2}{2} \varphi_{xx}(t, x) + z(t, x)(y - x)^2. \quad (2.39)$$

При використанні перетворення Лапласа — Стільєса [8] ряд (2.38) сходиться до виду:

$$g_i(u, x) = \sum_{n=1}^{\infty} \exp(-\lambda_n t) \varphi_n^2(n) = \frac{1}{2\pi t} \quad (2.40)$$

та при $\lambda_n \approx \frac{2\pi m}{A_i}$, де A — коефіцієнти Вейля [10], інтеграл (2.40) згідно теоремі Карлемана [12] (як закон регулювання x_i -ї координати електрокомплексу) буде мати значення

$$\sum_{\lambda_i \leq x} \varphi_i^2(u) \approx \frac{x_i}{\sqrt{2\pi \log \log t}}, \quad (2.41)$$

тобто логнормальний закон регулювання i у випадку великих значень ексцесу [11] процесу керування можливістю реалізації прийнятого закону керування буде визначена за центральною граничною теоремою для великих відхилень [11]:

$$P\left\{\frac{S_n}{\sqrt{n}} > a_n\right\} > E\varphi_n\left(\frac{S_n}{\sqrt{n}}\right) > E\varphi_n\left(\frac{S_n^*}{\sqrt{n}}\right) - \frac{c}{\sqrt{n}} > \exp\left(\frac{a_n^2(1+\varepsilon)}{2\sigma^2}\right), \quad (2.42)$$

де σ^2 — дисперсія, ε — відхилення параметра керування; S_n — коефіцієнти функції Шаудера $S_k(t)$.

Оцінка ефективності за виразами (2.30)–(2.42) проводиться за критерієм вартості всіх витрат $W_i = \Theta_i - \alpha Q_i$ (Q_i — вартість i -ї системи; α — коефіцієнт вартості $0 \leq \alpha \ll 1$). Максимальний прибуток $W_i = \Theta_i - \alpha Q_i \rightarrow \max$, обмеження

$$\sum n_{jl} l_j \geq \sum_{l \in z} E_{lf} X_{lf}, \quad f = 1, 2, \dots, F;$$

$$\sum B_{jl} l_j \leq \sum B_{j,f+1} l_j; \quad \sum C_{j,f,f+1} l_j \leq \sum B_{j,f+1} l_j.$$

Параметр надійності $P_{\mu l} \geq \sqrt{P_{\text{зі}}}$; $\forall l \in z$. Приоритетність ефективності системи μ -го найменування:

$$P_{\mu l} = \sum_{\lambda=1}^{L-1} \sum_{(\lambda)} P \sigma \tau = \sum_{\lambda=1}^{L-1} \sum_{(\lambda)} \prod_{j=1}^{k_{\mu}} C_{nj}^{\eta_j} p_j^{\eta_j} q_j^{\eta_j - \eta_j}, \quad (2.43)$$

де додавання в області τ розповсюджується на область, обмежену нерівністю $E_{\sigma \tau} = \sum_{\lambda=1}^{L-1} E_1^{(\mu)}$; $\lambda = 1, 2, \dots, L$, яка

є ознакою належності до групи λ комбінації $\sigma_{\tau} = \eta_1 \eta_2 \dots \eta_{2k_{\mu}}$; $\sum_{j=1}^{k_{\mu}} \eta_{j,v}$; $v = 0, 1, 2, \dots, \sum_{j=1}^{k_{\mu}} n_j$. Значення пріорі-

тета $P_{\mu l} = \sum_{\Theta=1}^{2^s-1} (-1)^{x+1} \left[1 - \prod_{j=1}^x (1 - P_j^{\Theta})^{n_{\Theta j}} \right]$. Система розв'язу-

ється на основі комп'ютерного алгоритму (рис. 3) методом цілочисельного лінійного програмування [13]:

$$\sum n_j^{(\mu)} S_j^{(\mu)} \rightarrow \min;$$

$$\sum_{j=1}^{k_{\mu}} n_j^{(\mu)} l_j^{(\mu)} \geq \sum_{l=1}^L E_l^{(\mu)}.$$

Абсолютний прибуток

$$\Theta_j = \sum_{l=1}^L \Theta_j P_{jl}^2;$$

$$S_j = AN_j S_j + S_{\text{неосн}};$$

$$W_j = \Theta_j - \alpha S_j;$$

$$j \in L_{\mu} = \{1, 2, \dots, k_{\mu}\}.$$

Комп'ютерне дослідження (рис. 3) процесів оптимізації функціональних структур керування електротехнічним комплексом ДСП (рис. 1) дозволило визначити найбільш ефективні режими сталеплавління за технологією «вищого рівня» (табл. 5).

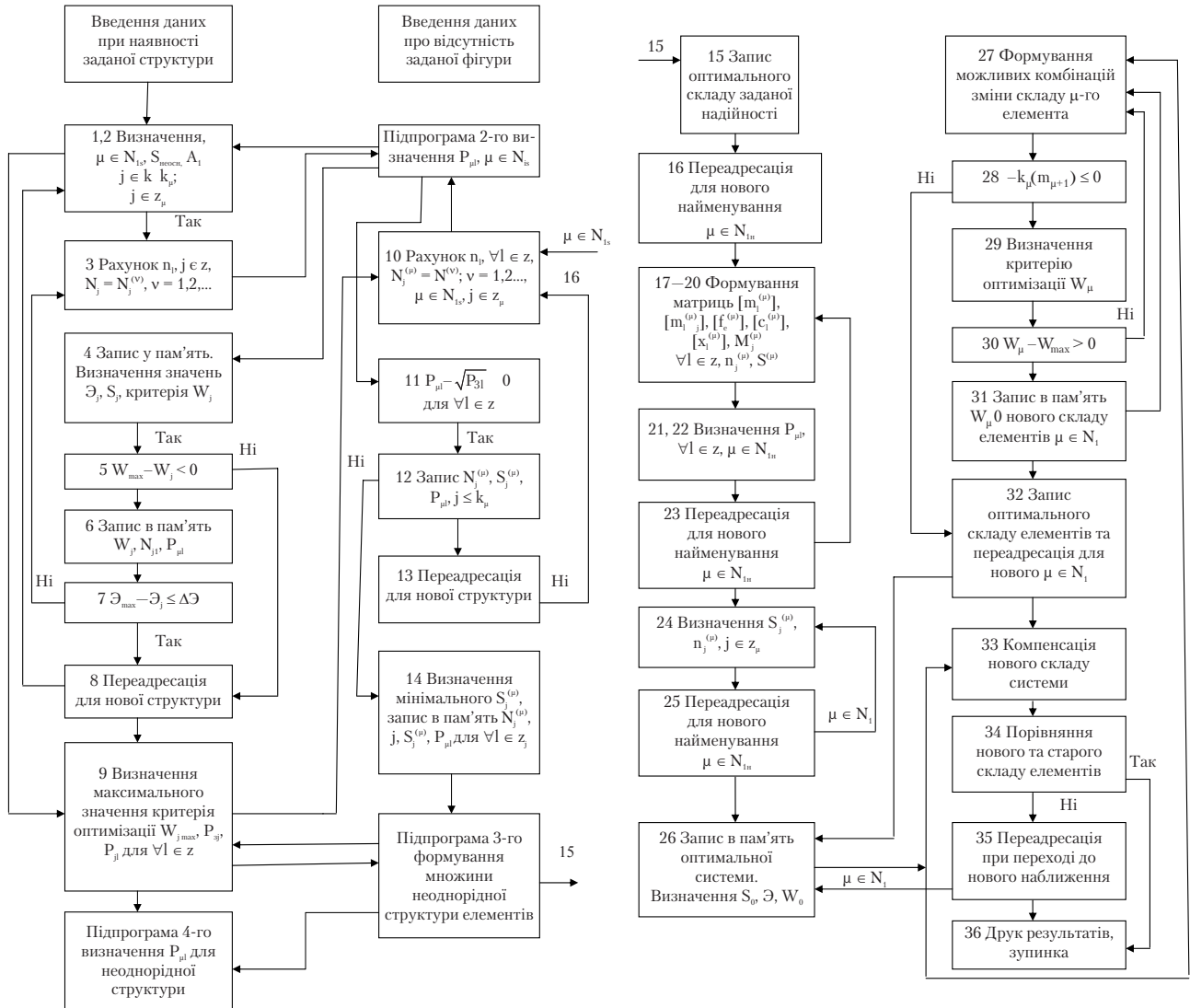


Рис. 3. Функціональна структура алгоритму визначення ефективності оптимізації параметрів системи

Таблиця 5

Основні якісні та кількісні показники ефективності електросталеплавління

Показники	Електропечі				
	Змінного струму 50–200 т			Постійного струму	
	ДСП	з ФКТГ	з ІЭУ розрах. знач.	Ємність 12 т	Модерн. 50 т
Використання електроенергії, кВт · год/т	607	583	529	487	456
Використання кисню, м ³ /т	32	73	—	13	9
Використання природного газу, м ³ /т	17	32	—	3,25	3,1
Втрати у «короткій» мережі, кВт · год/т	2,7	23,6	—	—	—
Теплові втрати з робочого простору, МДж/т	236,2	254,7	132,7	230,6	120,4
Величина електричного ККД, %	69	76	85	82,3	84
Електричні втрати у трансформаторі живлення, %	10,6	9,7	7,3	9,2	7,4
Витрати графітованих електродів, кг/т	6,7	5,2	3,76	1,47	1,32
Величина максимуму активної потужності	66,4	69,8	76,3	78,3	79,4
Угар електродів, кг/т	0,8	0,69	0,61	0,6	0,56
Підвищення швидкості розплавлення шихти, °C/хв/т	—	12,3	23,2	30	35
Збільшення градієнта КИН, °C/хв	20	28	42,2	40	43
Величина КИН, МВт · кА	71	82	102	125	143
Величина КИД, %	61,1	72,4	79,3	92	96
Пряма економія електроенергії (питома), кВт · год/т	—	40,3	78,6	70	75
Підвищення виходу доли «придатного», %	—	2,1	2,32	2,1	3,04

Висновки

На основі комплексного наукового підходу до вирішення проблем підвищення ефективності технологічних процесів, пов'язаних з плавкою кольорових та чорних металів за рахунок розробки схематичних алгоритмів керування електротермічними установками були розроблені адаптаційні алгоритми оптимізації, виявлені основні тенденції розвитку теорії та практики створення високо-ефективних плавильних агрегатів та проведена оцінка сучасного стану розробки нових технологій в системах керування індукційними плавильними установками з застосуванням ЕОМ.

Отримані результати дозволяють провести систематичну оцінку динамічної ефективності законів регулювання координат плавильного агрегату при стохастичному характері анізотропної середі плавильного простору, обумовленим просторовою неоднорідністю магнітного поля та індукційного джерела.

Література

- Aoki, M. Some computational consideration in inout signal synthesis problems [Текст] / M. Aoki, R. M. Staley. — In: Computing Methods in Optimization Problems. — 2. — N. Y., 1969.
- Vox, G. E. P. Discrimination among mechanistic models [Текст] / G. E. P. Vox, W. G. Hill. — N. Y.: Technometrics, 1967.
- Galman, Philip G. A new non linear model for system identification [Текст] / Philip G. Galman, S. A. Narendra Kumpati. — Proc. 5th Ann. Princeton Conf. Inform., 1971.
- Grenander U., Rosenblatt M. Statistical analysis of stationary time series. — N. Y., 1966.
- Guy, Iumarie. Descriptions mathematique des systems non lineares a parameter reparti [Текст] / Iumarie Guy. — Ann. telecomms. — 1972. — № 11–12.
- Keviczky, L. K. Optimal identification by simulation of the information obtained from processes [Текст] / L. K. Keviczky, Cs. Banyach. — Summer Simulation Conf., San Diego, 1972.
- Mehra Raman, K. Optimal inputs linear systems identification [Текст] / K. Mehra Raman. — 13th Joint Automat. Conf., N. Y., 1972.
- Ламперти, Дж. Вероятность [Текст] : пер. с англ. Н. Б. Левиной, С. А. Молчанова ; под ред. А. Н. Ширяева. — М.: Наука, 1973. — 184 с.
- Круг, Г. Планирование эксперимента в задачах идентификации и экстраполяции [Текст] / Г. Круг, Ю. А. Соцулин, В. А. Фатцев. — М.: Наука, 1977. — 208 с.
- Четвериков, В. Н. Стохастические вычислительные устройства систем моделирования [Текст] / В. Н. Четвериков, Э. А. Баканович. — М.: Машиностроение, 1989. — 272 с.
- Четвериков, В. Н. Вычислительная техника для статистического моделирования [Текст] / В. Н. Четвериков, Э. А. Баканович, А. В. Меньков ; под ред. В. Н. Четверикова. — М.: Советское радио, 1978. — 312 с.
- Куликов, Е. И. Методы измерений случайных процессов [Текст] / Е. И. Куликов. — М.: Советское радио, 1986. — 272 с.
- Боровиков, В. STATISTICA: искусство анализа данных на компьютере. Для профессионалов [Текст] / В. Боровиков. — СПб.: Питер, 2001. — 656 с.
- Моделивання системних характеристик в економіці [Текст] / О. М. Сінчук, Т. М. Берідзе, В. В. Кононенко, Н. В. Рябущенко. — Кременчуг: Кременчугський державний політехнічний університет ім. Остроградського, 2009. — 212 с.
- Труфанов, И. Д. Системы оптимизации режимов работы мощных дуговых сталеплавильных печей на основе интегрального критерия энергосбережения [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук / И. Д. Труфанов. — Запорожье: Запорожский государственный технический университет, 2001. — 530 с.
- Чернецкий, В. И. Математическое моделирование стохастических систем [Текст] / В. И. Чернецкий. — Петрозаводск: Изд-во Петрозаводского университета, 1994. — 488 с.
- Янке, Е. Специальные функции: формулы, графики, таблицы [Текст] : пер. с 6-го перераб. нем. изд. / Е. Янке, Ф. Эмде, Ф. Лёш; под ред. Л. И. Седова. — М.: Наука, 1968. — 344 с.
- Современные методы идентификации систем [Текст] / П. Эйкхофф, А. Ванечек, Е. Савараги и др.; под ред. П. Эйкхоффа. — М.: Мир, 1983. — 400 с.
- Ситуаційне керування в дугових сталеплавильних печах [Текст] / Л. Д. Костинюк, А. О. Лозинський, О. Ю. Лозинський та ін.; за ред. О. Ю. Лозинського, Я. Ю. Марущака. — Львів: Видавн. Національного ун-ту «Львівська політехніка», 2004. — 382 с.
- Лозинський, О. Ю. Системи керування режимом дугових сталеплавильних печей на основі ймовірнісних моделей процесів [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук / О. Ю. Лозинський. — Львів: Державний університет «Львівська політехніка», 1996. — 367 с.
- Марущак, Я. Ю. Синтез електромеханічних систем на основі узагальненого характеристичного полінома [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук / Я. Ю. Марущак. — Львів: Національний університет «Львівська політехніка», 2002. — 353 с.
- Гудим, В. І. Методи та засоби керування режимами систем електропостачання потужних дугових сталеплавильних печей [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук / В. І. Гудим. — Київ: ІЕД НАНУ, 2002. — 341 с.
- Гуль, А. І. Параметрична оптимізація інтегруючих електромеханічних систем за критерієм максимальної добротності та запасу стійкості [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук / А. І. Гуль. — Харків: НУ «Харківський політехнічний інститут», 2004. — 485 с.
- Паранчук, Я. С. Багатокритеріальна оптимізація режимів електротехнологічного комплексу «дугова сталеплавильна піч — електропостачальна мережа» [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук / Я. С. Паранчук. — Львів: НУ «Львівська політехніка», 2006. — 375 с.