

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«НАЦІОНАЛЬНИЙ ГІРНИЧИЙ УНІВЕРСИТЕТ»

ГУЛІНА ІРИНА ГРИГОРІВНА

УДК 681.515: 519.7: 669-52

**АВТОМАТИЗАЦІЯ КЕРУВАННЯ ТЕПЛОВИМ СТАНОМ ДОМЕННОЇ
ПЕЧІ ЗА ЦИКЛАМИ НАКОПИЧЕННЯ-ВИПУСКУ ЧАВУНУ**

Спеціальність:
05.13.07 – автоматизація процесів керування

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дніпропетровськ – 2015

Дисертація є рукописом.

Робота виконана на кафедрі безпеки інформації та телекомунікацій Державного вищого навчального закладу «Національний гірничий університет» (м. Дніпропетровськ) Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, доцент
Корнієнко Валерій Іванович,
професор кафедри безпеки інформації та телекомунікацій, Державний ВНЗ «Національний гірничий університет» (м. Дніпропетровськ) Міністерства освіти і науки України

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Щокін Вадим Петрович,
завідувач кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту Державного ВНЗ «Криворізький національний університет» Міністерства освіти і науки України,

кандидат технічних наук, доцент
Миленький Володимир Васильович,
доцент кафедри автоматизації хімічних виробництв Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України.

Захист відбудеться «01» липня 2015 р. о 11 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.080.07 при Державному вищому навчальному закладі «Національний гірничий університет» Міністерства освіти і науки України (49005, м.Дніпропетровськ, просп. К. Маркса, 19).

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Державного вищого навчального закладу «Національний гірничий університет» за адресою: 49005, м.Дніпропетровськ, просп. К. Маркса, 19.

Автореферат розісланий «28» травня 2015 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 08.080.07,
кандидат технічних наук, доцент

О.В. Остапчук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Доменне виробництво посідає важливе місце в структурі споживання ресурсів металургійних переділів, тому актуальним є проведення досліджень з метою зниження витрат на виробництво чавуну шляхом підвищення якості його систем автоматичного керування (САК). З позицій керування доменний процес (ДПР) є складним об'єктом керування (ОК), що має нелінійні залежності, нестационарні параметри, залежні (багатозв'язкові) змінні, високий рівень завад, а також значну інерційність і час запізнювання. При цьому, одним з важливих напрямів є вдосконалення САК тепловим станом (ТС) доменної печі (ДП), оскільки ця система створює умови раціонального співвідношення процесів прямого і непрямого відновлення заліза, що дозволяє досягти економічності ДПР.

Розробці таких систем керування присвячені дослідження вчених В.І. Большакова, Г.М. Глінкова, Г.Г. Грабовського, В.І. Гранковського, В.С. Егорова, Ю.В. Каганова, Б.І. Китаєва, М.Д. Клімовицького, В.Г. Макієнка, Миленького В.В., В.І. Набоки, М.П. Ревуна, Н.А. Спіріна, А.К. Тараканова, І.Г. Товаровського, Щокіна В.П. і багатьох інших.

Для автоматичного керування складними ОК найбільш ефективними є адаптивні системи, що використовують поточну інформацію про процес та дозволяють підвищити якість керування в умовах завад. У таких системах стратегія керування ґрунтується на використанні математичної моделі об'єкта в контурі керування і визначенні керуючих дій в реальному часі за прогнозом результатів процесу.

Для реалізації адаптивних систем керування необхідна наявність адекватних прогнозуючих моделей. Це викликає необхідність використання маловитратних і ефективних засобів оцінювання й ідентифікації, для чого найбільш перспективним є використання методів систем штучного інтелекту, зокрема, нейронних мереж (НМ) і систем з нечіткою логікою, які здатні до навчання і є універсальними й ефективними апроксиматорами.

Таким чином, обґрунтування і розробка методів та алгоритмів синтезу керування в процесі функціонування САК ТС ДП, що враховують стохастичність його змінних і використовують адаптацію прогнозуючих моделей для компенсації запізнювань і нестационарності параметрів, є актуальними.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. В основу роботи покладені матеріали, які узагальнюють дослідження автора в рамках реалізації науково-дослідних робіт, які виконувалися в Державному ВНЗ «Національний гірничий університет» відповідно до закону України № 2623-14 від 11 липня в 2001 р. «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки», Постанов Кабінету Міністрів України «Про заходи щодо розвитку гірничо-металургійного комплексу», «Про хід виконання Програми розвитку залізород-

ної промисловості України», «Державної комплексної програми розвитку України», затвердженою Постановою Кабінету Міністрів України.

Дисертаційна робота виконана відповідно до досліджень за держбюджетною НДР «Інтелектуальні технології управління процесами гірничого виробництва в задачах енергозбереження та енергоефективності» (№ держреєстрації 0113U000402), де здобувачка була виконавцем.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення якості керування тепловим станом доменної печі в умовах зміни його динамічних параметрів шляхом синтезу й реалізації адаптивного керування на основі ідентифікації доменного процесу та прогнозування його технологічних змінних.

Досягнення поставленої мети передбачає вирішення наступних завдань дослідження:

- теоретично обґрунтувати принципи побудови систем автоматичного керування тепловим станом доменної печі підвищеної якості;
- дослідити особливості теплового стану доменної печі і обґрунтувати вибір критерію його керування;
- обґрунтувати алгоритми і розробити методику інтелектуальної ідентифікації і прогнозування теплового стану доменної печі;
- розробити систему адаптивного керування тепловим станом доменної печі з інтелектуальним прогнозуванням та оцінити її якість.

Об'єкт дослідження - тепловий стан доменної печі.

Предмет дослідження - методи створення САК тепловим станом доменної печі.

Методи дослідження. В основу досліджень покладені методи теорії автоматичного керування для розробки структури та алгоритмів керування адаптивної САК; методи систем штучного інтелекту (НМ, нечітка логіка) для розробки прогнозуючих моделей керованих процесів; методи нелінійної динаміки для визначення характеристик керованих процесів; методи час-частотних (вейвлет) перетворень для фільтрації сигналів; методи імітаційного моделювання для визначення ефективності запропонованих системи, методик і алгоритмів; статистичні методи для обробки модельних і експериментальних даних.

Наукові положення:

1. Стабілізація середнього значення рівня розплаву чавуну, отриманого на основі вейвлет фільтрації, забезпечує усунення фазового зрушення при його оцінці та дозволяє стабілізувати хімічний склад чавуну на випуску.

2. Синтез керуючих дій режимами завантаження і дуття виконується на основі адаптації прогнозуючих моделей, які враховують хімічний склад і температуру чавуну на випуску, що дозволяє підвищити точність керування тепловим станом доменної печі.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Вперше обґрунтовано, що підвищення якості керування тепловим станом доменної печі досягається шляхом створення безпошукових систем непря-

мого адаптивного керування з ідентифікацією об'єкту керування за допомогою навчання нейронних прогнозуючих моделей, що забезпечує реалізацію оптимального за точністю відтворення задаючих дій.

2. Вперше встановлено, що нелінійні нейронечіткі апроксимації хімічного складу чавуну на випуску за середніми значеннями рівня розплаву за плавку тісно пов'язані з фактичним хімічним складом. Це дозволяє виконувати стабілізацію хімічного складу чавуну на випуску шляхом стабілізації рівня розплаву.

3. Обґрунтовано застосування адаптивних фільтрів-апроксиматорів, що використовують нейронні мережі, нечітку логіку і вейвлет перетворення сигналів для ідентифікації і прогнозування теплового стану доменної печі, що забезпечує отримання в реальному масштабі часу для нелінійного об'єкту керування інтелектуальних прогнозуючих моделей підвищеної точності.

4. Визначено, що використання вейвлет низькочастотної фільтрації для оцінки тренда рівня розплаву, що характеризує тепловий стан доменної печі, на відміну від часової фільтрації, забезпечує відсутність фазового зсуву та зниження обсягу обчислень.

Достовірність та обґрунтованість наукових положень та результатів підтверджується: коректністю постановки і вирішення задач; застосуванням сучасних методів теоретичного аналізу та математичного моделювання з урахуванням загальноприйнятих припущень; достатнім обсягом експериментів, проведених на об'єкті автоматизації, що забезпечило з ймовірністю не менше 0,95 відхилення модельних і експериментальних результатів не більше 10%; адекватністю отриманих прогнозуючих моделей.

Практичне значення одержаних результатів:

1. Розроблена методика ідентифікації теплового стану доменної печі за часовими реалізаціями, що включає визначення стану нелінійного об'єкту керування та реконструкцію його моделі, яка забезпечує отримання моделей підвищеної точності з використанням адаптивних фільтрів-апроксиматорів із зниженням обчислювальних витрат шляхом визначення порядку породжуючої системи.

2. Обґрунтовано значення інтервалу керування тепловим станом доменної печі, що враховує динамічні параметри каналів керування та спектральні властивості сигналів об'єкту керування. Це дозволило на основі методів нелінійної динаміки ідентифікувати показники тренда рівня розплаву, що характеризує тепловий стан доменної печі.

3. Розроблена адаптивна САК тепловим станом доменної печі з інтелектуальним прогнозуванням, що використовує локальні адаптивні системи з самоналагоджувальним і ПІД регуляторами, які забезпечують підвищення точності керування.

4. Розроблені алгоритми та програми використовуються в навчальному процесі Державного ВНЗ «Національний гірничий університет» при підготовці магістрів та спеціалістів спеціальності 8(7).05090302 «Телекомунікаційні системи та мережі».

Рівень впровадження отриманих результатів. Методика ідентифікації теплового стану доменної печі за часовими реалізаціями, а також програми розробки адаптивної САК тепловим станом доменної печі з інтелектуальним прогнозуванням впроваджені в комплекс програмних засобів проектування і проектів реконструкції розробки ППКІ «Металургавтоматика», а також в АСК ТП ДП-3 Маріупольського металургійного комбінату ім. Ілліча (ММК).

Особистий внесок здобувача. Наукові положення та результати, які виносяться на захист, отримані автором самостійно. Здобувачка брала безпосередню участь в теоретичних дослідженнях і в роботах з впровадження отриманих результатів, а також самостійно виконала прикладні дослідження.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи доповідалися на: VIII міжнародній науково-практичній конференції «Veda a technologie: krok do budoucnosti – 2012» (м. Прага, 27.02-05.03.2012 р.); міжнародній науково-практичній конференції «Наукова індустрія європейського континенту – 2012» (м. Прага, 27.11-05.12.2012 р.); міжнародній науково-практичній конференції «Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании – 2012» (м. Одеса, 18.12-27.12.2012 р.).

Публікації. Основні результати дисертації опубліковані в 11 роботах, з них 8 у наукових фахових виданнях (1 в наукометричній базі Scopus) і 3 в матеріалах конференцій.

Структура та обсяг дисертаційної роботи. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, додатків та списку використаних джерел. Загальний обсяг роботи – 168 сторінок, із них 117 сторінок – основний текст. Дисертація містить 4 таблиці, 41 рисунок, 9 додатків на 29 сторінках і список використаних джерел із 180 найменувань на 17 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність роботи, сформульовані мета та завдання досліджень, наведений зв'язок роботи з науковими програмами та темами, викладена наукова новизна та практичне значення отриманих результатів.

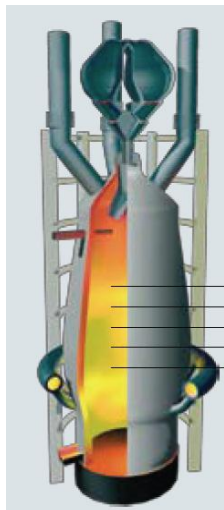
В першому розділі виконаний аналіз існуючих САК ДП і методів контролю, прогнозування та керування складними технологічними об'єктами, на основі чого сформульовані основні завдання досліджень.

Велика матеріало- і енергоємність доменного виробництва зумовлює можливість значних економічних ефектів, пов'язаних із збільшенням продуктивності, зменшенням витрат сировини та енергії, поліпшенням якості готової продукції при впровадженні досконалих систем автоматизації.

До основних керуючих дій відносяться параметри режиму завантаження та режиму дуття ДП (рис. 1). Вихідними величинами ДП як ОК є якість чавуну, продуктивність печі та економічна ефективність її роботи.

З позицій керування ДПР є нелінійним динамічним ОК. Одним з перспективних напрямків є вдосконалення САК ТС ДП. Їх завданням є підтримка стабільного ТС печі, що дозволяє досягти високих техніко-

економічних показників процесу (зменшити витрати коксу, а також збільшити продуктивність печі) при відповідній якості чавуну. При цьому вибір критерію та алгоритму керування ТС є актуальним завданням. Підвищення якості керування вимагає наявності відповідної апріорної (адекватних прогнозуючих моделей) і апостеріорної (поточних вимірювань і результатів обробки) інформації. Для чого необхідно використовувати маловитратні та ефективні засоби оцінювання й ідентифікації. Серед них перспективним є використання методів систем штучного інтелекту (НМ і систем з нечіткою логікою).



Керування «зверху» (режим завантаження):

- рудне навантаження;
- послідовність завантаження;
- розподіл матеріалів по перетину.

Керування «знизу» (режим дуття):

- витрата, температура та вологість дуття;
- витрата кисню, пари, природного газу (вугільного пилу).

Рис. 1. Керування доменним процесом «зверху» та «знизу»

При цьому, в адаптивних системах використання моделей в контурі керування дозволяє ідентифікувати динамічні характеристики ОК, відновлювати невимірювані змінні стану й корегувати параметри регулятора в реальному часі.

Другий розділ присвячений обґрунтуванню принципів побудови САК ТС ДП, вибору критерію керування, а також обґрунтуванню методів оцінювання, ідентифікації та прогнозування ТС ДП.

Із нелінійності та нестационарності ДПР витікає необхідність обґрунтування й розробки методів і алгоритмів синтезу керування в процесі функціонування САК, які враховують стохастичність його змінних і використовують адаптацію прогнозуючих моделей для компенсації запізнювань і нестационарності параметрів в реальному масштабі часу.

В результаті теоретичних досліджень принципів побудови робастних, оптимальних і адаптивних систем керування встановлено, що переважним для підвищення якості керування ТС ДП є використання безпошукових систем непрямого адаптивного керування з ідентифікацією ОК за допомогою навчання прогнозуючих моделей (рис. 2). При цьому основний контур розімкнений, що обумовлює асимптотичну стійкість САК.

У такій системі виконується ідентифікація ОК шляхом навчання (адаптації) його моделі за величиною похибки $e[k]$ між реальним виходом ОК $x[k]$ і його

оцінкою $\hat{x}[k+1]$. Потім, за адаптованою моделлю визначаються коефіцієнти регулятора $\hat{a}[k]$, який за завданням $q[k]$ виконує керуючу дію $u[k]$.

Від якості адаптивних локальних САК залежить досягнення ефективності роботи всієї ДП. Тому вони повинні будуватися як оптимальні в сенсі якості керування, що, проявляється в точності відтворення задаючих дій $q[k]$ (мінімізації похибки системи).

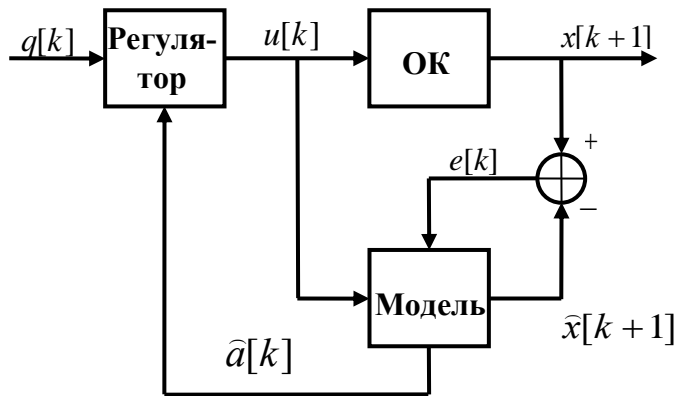


Рис. 2. Структура системи непрямого адаптивного керування з моделлю, що навчається

вмісту кремнію та сірки за середніми значеннями РР за плавку тісно пов'язані з фактичним вмістом кремнію та сірки в чавуні на випуску (коефіцієнти взаємної кореляції для умов ДП-6 Нижньотатгільського металургійного комбінату (НТМК) складають 0,87 і 0,81, відповідно).

Тому критерій автоматичного керування ТС ДП вибрано у вигляді:

$$J = \|\hat{U} - U^{3ad}\| \rightarrow \min, \quad (1)$$

де \hat{U} – усереднене значення РР, а U^{3ad} – задане значення РР, відповідне необхідному ТС ДП.

На критерій (1) накладені обмеження за допустимим діапазоном ΔU^{3ad} відхилення поточного значення РР від його завдання U^{3ad} ($\hat{U} \subset x$, $\{U^{3ad}, \Delta U^{3ad}\} \subset q$).

Вибраний критерій керування ТС ДП дозволяє шляхом стабілізації усередненого значення РР забезпечити стабілізацію якості чавуну на випуску.

Спостереження за сигналом з можливо меншою похибкою зводиться до завдання фільтрації. Для реалізації оцінювання й ідентифікації ОК використовуються адаптивні фільтри-апроксиматори (АФА). В них процес адаптації включає оцінювання виходу фільтру та корегування його параметрів за значенням вихідної похибки.

У роботі для ідентифікації та прогнозування ТС ДП обґрунтовано використання АФА на основі НМ, нечіткої логіки й вейвлет перетворення сигналів, які

Контроль циклів накопичення-випуску рідких продуктів плавки, які характеризуються зміною рівня розплаву (РР), є одним з найбільш об'єктивних методів оцінки ТС сурми ДП. Причому, зважаючи на коливальний характер сигналу РР, інтерес для оцінки ТС представляють не миттєві значення, а поточне усереднене значення (тренд) РР.

В результаті статистичної обробки встановлено, що нелінійні нейронечіткі апроксимації

забезпечують отримання для нелінійного ОК інтелектуальних прогнозуючих моделей підвищеної точності в реальному часі.

Для визначення стану системи, що породжує тренд РР, запропоновано визначати: кореляційну розмірність (порядок породжуючої системи – глибину пам'яті процесу), кореляційну ентропію (глибину точного прогнозу) і показник Херста, який дозволяє класифікувати часові послідовності та визначати еволюцію їх породжуючих систем.

В результаті, обґрунтована методика ідентифікації ТС ДП за часовими реалізаціями динамічних процесів, що включає визначення стану нелінійного ОК і реконструкцію його моделі підвищеної точності з використанням АФА.

Третій розділ присвячений розробці адаптивної САК ТС ДП з інтелектуальним прогнозуванням.

В процесі ідентифікації ОК на основі експериментальних даних, отриманих в умовах ДП-6 НТМК, визначені статистичні характеристики випусків чавуну, вибрано інтервал керування, а також визначені характеристики процесу, що породжує тренд (усереднене значення) РР. Середній час циклу накопичення-випуску чавуну (тривалість плавок) складає $\bar{t}_q = 155$ хв, а його середньоквадратичне відхилення – $\sigma_q = 46,7$ хв. Тоді коефіцієнт варіації циклу – $K_q = \sigma_q / \bar{t}_q = 0,301$. Значення інтервалу керування Δt визначається як динамічними властивостями ОК, так і спектральними характеристиками його сигналів.

Для вибору Δt запропонована система рівнянь:

$$\Delta t = \bar{t}_q / N_{ann}; \quad (2)$$

$$\Delta t = T_{p\min} / N_{ann}; \quad (3)$$

$$\Delta t + \tau_{\max} \leq T_{np} \leq \tau_{кор}, \quad (4)$$

де N_{ann} – кількість точок для апроксимації часового інтервалу (5...10); $T_{p\min} = (3...5) \cdot T_{\min}$ – мінімальний час регулювання; T_{\min} – мінімальне значення постійної часу каналів керування; T_{np} – необхідна глибина прогнозування; τ_{\max} – максимальне значення запізнювання по каналах керування; $\tau_{кор}$ – інтервал кореляції керованої величини (тренда РР).

Вирази (2)-(3) визначають умову (за теоремою Відроу) переходу від одного безперервного інтервалу до його дискретного виду, а вираз (4) – умову забезпечення необхідної глибини прогнозу T_{np} .

Відповідно до (2) і (3) прийнято значення інтервалу керування $\Delta t = 30$ хв. Для рівня значущості кореляційного зв'язку 0,2 визначено, що для прийнятого Δt умова (4) також виконується.

Для тренда РР визначені його кореляційна ентропія $K_C = 0,36$ і кореляційна розмірність $D_C = 2,35$. При цьому, інтервал точної передбачуваності (глибина точного прогнозу) склав $T_C = 4,46$ такту (тривалістю Δt), а розмірність фазового простору (глибина пам'яті) тренда РР – $4 \leq d \leq 6$. Значення показника

Херста $H = 0,23 < 0,5$ характеризує тренд РР, як ергодичний мінливий процес, що складається з частих спадів-підйомів.

Для прогнозування тренда РР використовувалися лінійний (Lin), нейронечіткий (Anfis), нейровейвлетний (WVNN) та нейромережвий (NN) АФА із структурою Вінера-Гаммерштайна та глибиною пам'яті $d = 4$.

Тренд РР розбивався на навчальну й перевірочну послідовності порівну, а у якості критерію навчання використовувалася відносна середньоквадратична похибка в перевірочній послідовності (табл. 1).

Похибки прогнозу та час навчання для різних АФА Таблиця 1

Тип АФА	Lin	Anfis	WVNN	NN
Похибка прогнозу на 10 тактів / T_C , %	47,1/43,6	5,21/0,42	11,6/6,13	12,1/4,25
Час навчання, с/такт	0,13	4,55	4,46	13,9

Встановлено, що тренд РР породжується істотно нелінійним процесом, для прогнозування якого найбільш ефективними є АФА на основі Anfis і NN (похибки близько 5...12 % для глибини прогнозу до 10 тактів). Статистична перевірка за непараметричним критерієм знаків підтвердила значимість отриманих результатів.

Запропоновано САК ТС ДП (рис. 3), що складається з двох локальних систем, які реалізують керування режимом дуття (з індексом 1) та режимом завантаження (з індексом 2).

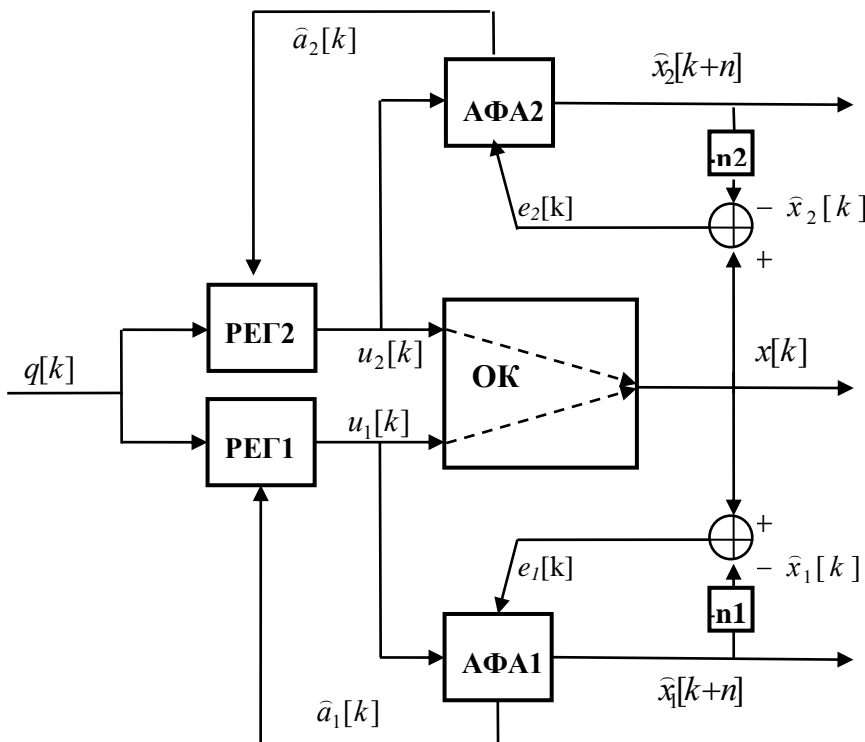


Рис. 3. Структура САК ТС ДП

У САК за заданим значенням $q[k]$ регулятори РЕГ1 і РЕГ2, коефіцієнти $\hat{a}_1[k]$, $\hat{a}_2[k]$ яких скореговані за наслідками ідентифікації ОК за допомогою АФА1 і АФА2, виконують керуючі дії $u_1[k]$ і $u_2[k]$, що впливають на стан ОК $x[k]$.

САК ТС ДП будується як оптимальна в сенсі якості керування:

$$J = \|q[k] - x[k]\| \rightarrow \min, \quad (5)$$

де, згідно (1) $\hat{U} \subset x$ та $\{U^{3ad}, \Delta U^{3ad}\} \subset q$.

Для реалізації локальних САК розглянуто

використання САК із самоналагоджувальним регулятором і прогнозуючою моделлю у вигляді АФА (СНС+АФА).

ОК і регулятор утворюють основний контур системи, а АФА – інформаційний. Синтез на поточному такті полягає в адаптації параметрів моделі і обчисленні прогнозу виходу ОК на n тактів, а також визначенні за завданням $q[k+1]$ керування $u[k]$, що відповідає мінімуму критерію похибки керування:

$$J_\varepsilon = E\{(\varepsilon[k])^2\} = E\{(q[k+1] - \hat{x}[k+n])^2\} \rightarrow \min. \quad (6)$$

Для моделі ОК з лінійно вхідним керуванням:

$$\hat{x}[k+n] = A\{x[k], \hat{a}_A[k]\} + C\{x[k], \hat{a}_C[k]\} \cdot u[k], \quad (7)$$

де A – функція частини ОК, інваріантної до керування (автономного руху ОК); C – функція чутливості керування; $\hat{a}_A[k]$, $\hat{a}_C[k]$ – вектори параметрів, що настроюються для функцій A і C відповідно, – рівняння регулятора має вигляд:

$$u[k] = \frac{q[k+1] - A\{x[k], \hat{a}_A[k]\}}{C\{x[k], \hat{a}_C[k]\}}. \quad (8)$$

Розглянуто також використання локальної адаптивної САК з ПІД-регулятором і прогнозуючою моделлю (PID+АФА), де синтез керування

$$u[k] = u[k-1] + P[k] \cdot (\varepsilon[k] - \varepsilon[k-1]) + I[k] \cdot \varepsilon[k] + D[k] \cdot (\varepsilon[k] - 2\varepsilon[k-1] + \varepsilon[k-2]) \quad (9)$$

передбачає знаходження значень параметрів P , I , D , які мінімізують похибку регулювання (6). При задоволенні вимог щодо використання градієнтних методів для ОК з лінійно вхідним керуванням параметри визначаються як:

$$P[k] = P[k-1] + \alpha_P \cdot \varepsilon[k] \cdot C\{x[k], \hat{a}_C[k]\} \cdot (\varepsilon[k] - \varepsilon[k-1]); \quad (10)$$

$$I[k] = I[k-1] + \alpha_I \cdot \varepsilon[k] \cdot C\{x[k], \hat{a}_C[k]\} \cdot \varepsilon[k]; \quad (11)$$

$$D[k] = D[k-1] + \alpha_D \cdot \varepsilon[k] \cdot C\{x[k], \hat{a}_C[k]\} \cdot (\varepsilon[k] - 2\varepsilon[k-1] + \varepsilon[k-2]). \quad (12)$$

де $\alpha_P, \alpha_I, \alpha_D$ – коефіцієнти настроювання ПІД-каналів.

Оцінка ефективності розглянутих локальних САК виконувалась для типових ОК ДПР: послідовно сполучених аперіодичної ланки із запізнюванням і безінерційної квадратичної ланки (PIT2) – структура Вінера-Гаммерштайна, нелінійної динамічної моделі теплопередачі (NLD), а також моделі каналів керування зверху (PITtop) та знизу (PITbat) у вигляді лінійних аперіодичних ланок із запізнюванням (табл. 2 і рис. 4).

З особливостей ДПР глибина прогнозу в каналах керування зверху прийнята $n_2 = 10$ тактів, а знизу – $n_1 = 3$ такта та глибина пам'яті – $d = 4$.

Як завдання (Set-point) використовувалася східчаста функція Хевісайда, а час спостереження складав 256 тактів (близько 5 діб при вибраному інтервалі керування). Нестационарність ОК складала 10...20 % від номінальних значень їх параметрів за час спостереження.

Встановлено, що для нелінійних моделей ТС ДП пропонувані САК забезпечують похибки прогнозування стану ОК за допомогою Anfis АФА на рівні 0,02...0,03 і похибки керування на рівні 0,02...0,05, що в 4...7 разів менше похибок для САК без прогнозування (PID). Час синтезу керування на один такт прогнозу складає: для СНС+АФА – 1,4...2,7 с; для PID+АФА – 3,6...4,7 с і для PID – 0,07...0,13 с, що не вносить часових обмежень на застосування цих систем в контурах керування ТС ДП.

Похибки прогнозування та керування ОК

Таблиця 2

Об'єкт керування	Похибка прогнозування, відн. од.		Похибка керування, відн. од.		
	Шум = 0	Шум = 0,1	СНС+АФА	PID+АФА	PID
PIT2	0,019	0,024	0,028	0,047	0,206
NLD	0,017	0,026	0,023	0,029	0,187
PITtop	0,055	0,087	0,085	0,093	0,102
PITbat	0,024	0,058	0,081	0,064	0,068

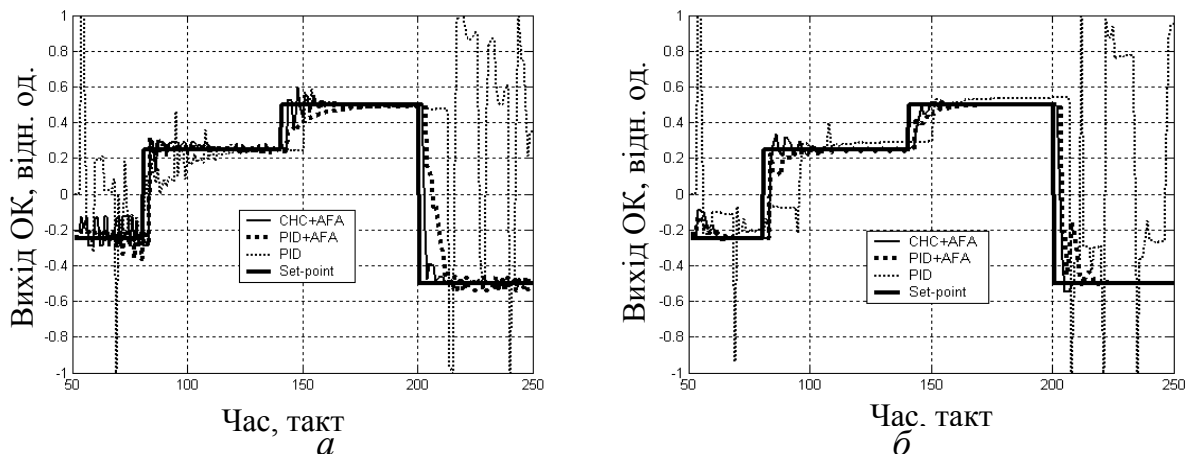


Рис. 4. Результати керування нелінійними ОК: PIT2 (а) і NLD (б)

Статистична перевірка підтвердила значимість отриманих результатів.

Таким чином, розроблена адаптивна САК з інтелектуальним прогнозуванням стану ОК з використанням локальних адаптивних систем із самоналагоджувальним і ПІД регуляторами, яка забезпечує підвищення якості керування складним багатозв'язковим ОК.

Четвертий розділ присвячений технічній реалізації адаптивної САК ТС ДП, експериментальним дослідженням і використанню результатів роботи.

Тренд є значеннями РР ДП, усередненими за часом накопичення-випуску чавуну \bar{t}_c . Одним з ефективних способів усереднення сигналів є їх низькочастотна фільтрація, що реалізується за допомогою, наприклад, лінійних цифрових фільтрів нижніх частот (ФНЧ). Для такого ФНЧ частота зрізу складає $f_{cp} = \bar{t}_c^{-1}$, а період дискретизації сигналу повинен бути не більшим інтервалу керування Δt ТС ДП.

В результаті фільтрації сигналу РР лінійним цифровим ФНЧ (рис. 5.а) встановлено, що між трендом і сигналом є істотний фазовий зсув ($delay \geq 10 \cdot \Delta t = 5 \text{ годин}$). Разом з тим, цього недоліку позбавлені фільтри з частотним або час-частотним (вейвлет) перетвореннями. У вейвлет ФНЧ фільтрація ґрунтується на дискретному вейвлет перетворенні (ДВП) сигналу, пороговому обмеженні коефіцієнтів вейвлет розкладання (трешолдингу) та зворотньому ДВП модифікованих вейвлет коефіцієнтів.

Встановлено, що при фільтрації сигналу РР за допомогою вейвлет ФНЧ (рис. 5.б) затримка між сигналом і його трендом відсутня. Крім того, вейвлет ФНЧ в порівнянні з лінійним ФНЧ має кращі згладжуючі властивості.

Розробка та реалізація адаптивної САК ТС ДП (рис. 6) включають етапи ідентифікації, прогнозування й синтезу керування.

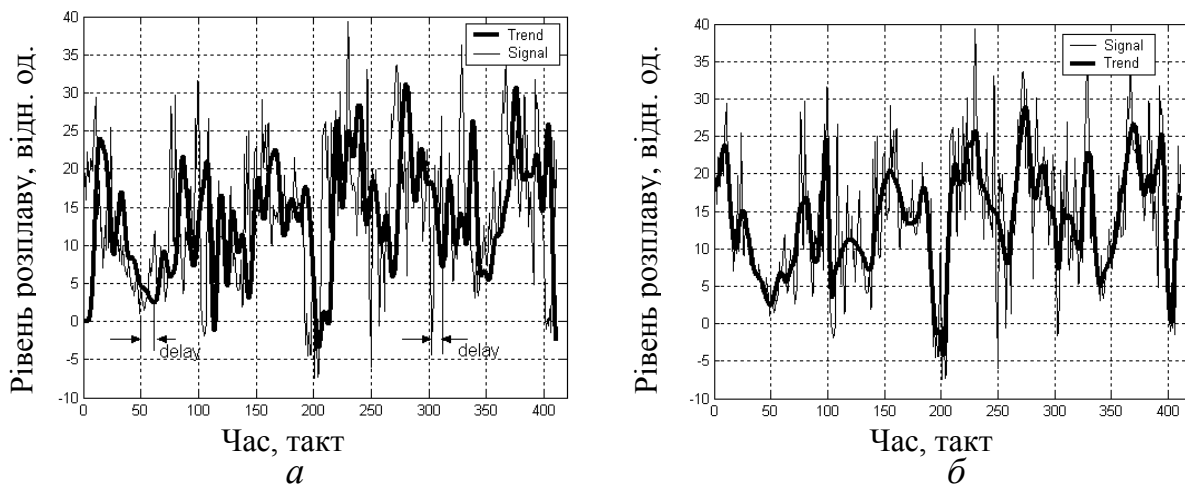


Рис. 5. Сигнал РР (Signal) і його тренд (Trend), отримані за допомогою лінійного цифрового (а) і вейвлет (б) ФНЧ

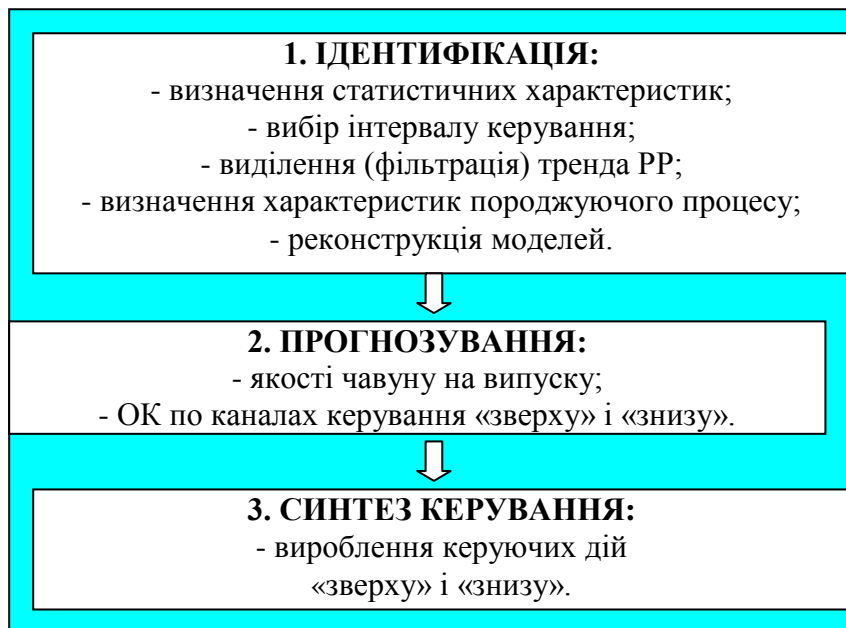


Рис. 6. Етапи розробки та реалізації САК ТС ДП

Експериментальні дослідження проводилися в умовах ДП-3 ММК, де середній час цикла накопичення-випуску чавуну складає $\bar{t}_q = 116 \text{ хв}$, середньоквадратичне відхилення – $\sigma_q = 20,2 \text{ хв}$ і коефіцієнт варіації – $K_q = \sigma_q / \bar{t}_q = 0,174$. Згідно (2)-(4) інтервал керування прийнятий таким, що дорівнює $\Delta t = 20 \text{ хв}$.

Встановлено, що для нейронечітких апроксимацій температури чавуну та вмісту в ньому кремнію й сірки за трендом РР, коефіцієнти взаємної кореляції з фактичними значеннями показників склали для: сірки – 0,72; кремнію – 0,85 і температури чавуну – 0,91.

Для тренда РР визначені його кореляційні ентропія $K_c = 0,49$ та розмірність $D_c = 2,21$, а також показник Херста $H = 0,21$. При цьому, глибина точного прогнозу складала $T_c = 6,17$ такту, а розмірність фазового простору – $3 \leq d \leq 5$.

Для прогнозування тренда РР і показників якості чавуну використовувалися лінійний (Lin), нейронечіткий (Anfis), нейровейвлетний (WVNN) і нейронний (NN) АФА (рис. 7).

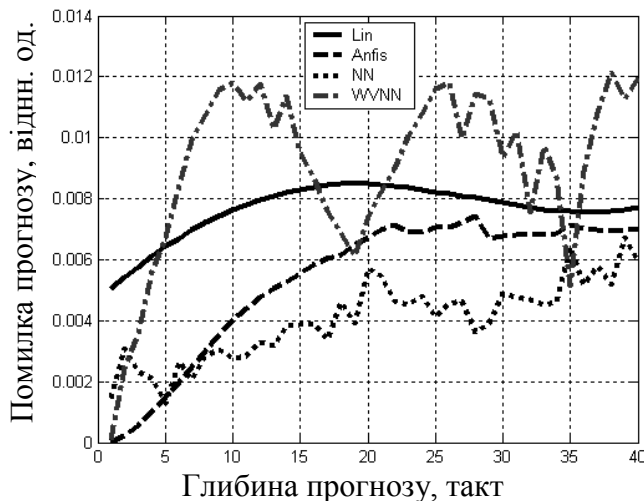


Рис. 7. Похибки прогнозу тренда РР

Статистична перевірка підтвердила значимість отриманих результатів.

Пропонована керуюча система (рис. 8) є складовою комплексної АСК ДП і для реалізації її керуючих впливів використовуються існуючі підсистеми. Зверху – це підсистема завантаження для зміни рудного навантаження (загальних витрат коксу), а знизу – підсистема регулювання теплового режиму фурменних зон для зміни загальних витрат природничого газу (або пиловугільної суміші). Оцінка якості адаптивної САК з самоналагоджувальними регуляторами і прогнозуючими моделями виконувалася на основі експериментальних даних.

Результати керування ТС ДП (рис. 9) відображають значення тренда РР в некерованому (Plant nContr) та керованому (Plant wContr) режимах, задане значення тренда РР (Set-point), виходи АФА контурів керування зверху (AFA top out) та знизу (AFA bot out), а також зміни керуючих дій зверху (Control top) та знизу (Control bot).

Встановлено, що похибки прогнозу тренда РР не перевищують 1,2 % з глибиною в 40 тактів (≈ 13 годин). При цьому, найменші похибки має NN АФА. Встановлено також, що відносна похибка прогнозу для температури чавуну не перевищує 1 %, а для вмісту кремнію і сірки – 5 % при глибині прогнозу до 8 випусків чавуну (≈ 15 годин). При цьому найменші похибки мають NN (для температури чавуну) і Anfis (для вмісту кремнію та сірки) АФА.

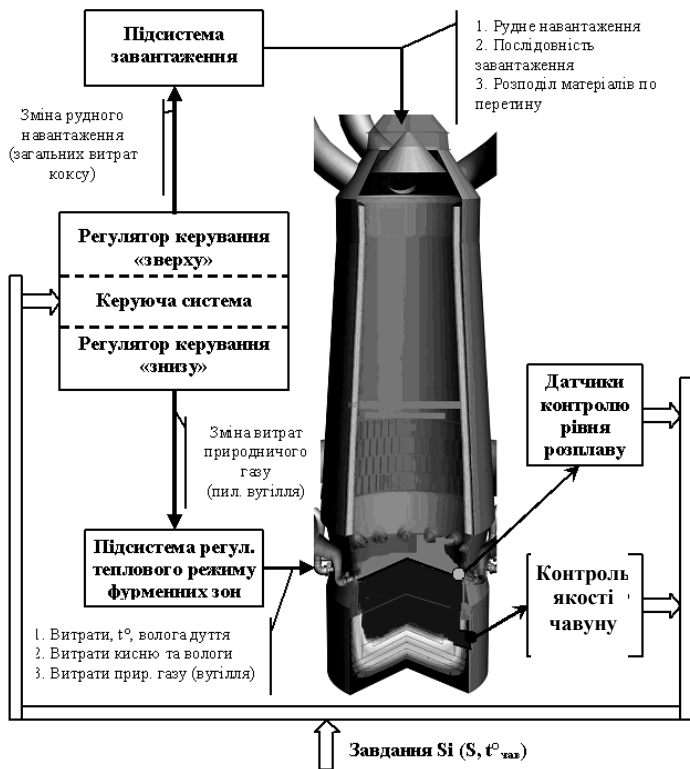


Рис. 8. Схема автоматизації керування ТС ДП

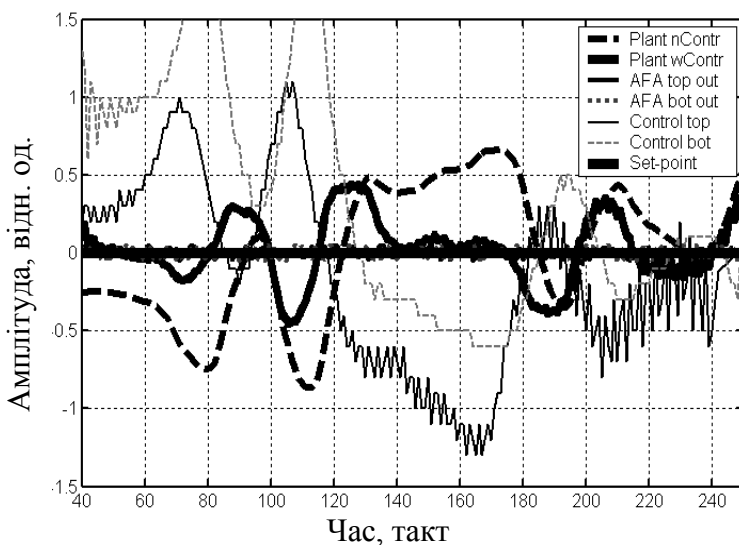


Рис. 9. Результати керування ТС ДП за трендом РР

У додатках наведені програми моделювання, таблиці експериментальних даних, а також акти про використання результатів дисертаційної роботи.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота є завершеним науковим дослідженням, в якому вирішена наукова задача, що полягає в автоматизації керування тепловим

Встановлено, що використання адаптивної САК ТС ДП дозволяє знизити середньоквадратичну похибку керування в 1,59 разів. При цьому, витрати на синтез керування не вносять часових обмежень на застосування цих систем в контурах керування ТС ДП. Статистична перевірка за критерієм знаків підтвердила значимість отриманих висновків.

САК ТС ДП покращує використання природного газу в ДПР і знижує питомі витрати коксу не менше, ніж на 2 кг/т чавуну щодо базового значення.

Пропонована САК ТС ДП реалізується за допомогою комплексу технічних засобів

АСК ТП на базі мікропроцесорних контролерів, промислових серверів і автоматизованих робочих місць, елементна база та програмне середовище яких обирається відповідно до вимог конкретного металургійного комбінату.

Розроблені методика, алгоритми та програми впроваджені в комплекс програмних засобів проектування, виробництва, а також в учбовий процес при підготовці магістрів і спеціалістів спеціальності 8(7).05090302 «Телекомунікаційні системи та мережі».

станом доменної печі в умовах зміни його динамічних параметрів шляхом синтезу і реалізації адаптивного керування на основі ідентифікації теплового стану та його прогнозування за циклами накопичення-випуску чавуну, яке забезпечує зниження похибки керування та за рахунок цього підвищення ефективності всього доменного процесу.

Основні наукові та практичні результати полягають в наступному:

1. Встановлено, що підвищення якості керування тепловим станом доменної печі в умовах наявності значних запізнювань може бути забезпечене шляхом створення адаптивних систем керування з прогнозуванням.

2. Вперше обґрунтовано, що підвищення якості керування тепловим станом доменної печі досягається шляхом створення безпошукових систем непрямого адаптивного керування з ідентифікацією об'єкту керування за допомогою навчання нейронних прогнозуючих моделей, що забезпечує реалізацію оптимального за точністю відтворення керуючих дій.

3. Встановлено, що нелінійні нейронечіткі апроксимації вмісту кремнію та сірки за середніми значеннями рівня розплаву за плавку тісно пов'язані з фактичним вмістом кремнію та сірки в чавуні на випуску (коефіцієнти взаємної кореляції складають 0,87 і 0,81, відповідно). Це дозволяє виконувати стабілізацію тренда рівня розплаву, що забезпечує стабілізацію хімічного складу чавуну на випуску.

4. Обґрунтовано застосування адаптивних фільтрів-апроксиматорів, що використовують нейронні мережі, нечітку логіку та вейвлет перетворення сигналів для ідентифікації й прогнозування теплового стану доменної печі, що забезпечує отримання в реальному масштабі часу для нелінійного об'єкту керування інтелектуальних прогнозуючих моделей підвищеної точності.

5. Розроблена методика ідентифікації теплового стану доменної печі за часовими реалізаціями, що включає визначення стану нелінійного об'єкту керування та реконструкцію його моделі, яка забезпечує отримання моделей підвищеної точності з використанням адаптивних фільтрів-апроксиматорів із зниженням обчислювальних витрат шляхом визначення порядку породжуючої системи. На основі експериментальних даних виконана ідентифікація теплового стану доменної печі, що дозволило оцінити точність прогнозування за допомогою інтелектуальних засобів показників якості чавуну на випуску (не гірше 5 %).

6. Обґрунтовано значення інтервалу керування тепловим станом доменної печі, що враховує динамічні параметри каналів керування та спектральні властивості сигналів об'єкту керування. Це дозволило на основі методів нелінійної динаміки ідентифікувати показники тренда рівня розплаву, що характеризує тепловий стан доменної печі. При цьому встановлено, що тренд рівня розплаву породжується істотно нелінійним процесом, для прогнозування якого найбільш ефективним є використання нейронечітких і нейромережових адаптивних фільтрів-апроксиматорів (похибка менше 6 % для глибини прогнозу до 5 годин для

умов ДП-6 НТМК і менше 1 % для глибини прогнозу до 13 годин для умов ДП-3 ММК).

7. Розроблені лінійний цифровий та вейвлет фільтри нижніх частот, що дозволяють оцінити тренд рівня розплаву доменної печі, який характеризує її тепловий стан. Встановлено, що лінійний цифровий фільтр нижніх частот має фазовий зсув оцінки тренда більше 5 годин, що не відповідає технологічним вимогам. При цьому вейвлет фільтр нижніх частот не має фазового зсуву, володіє кращими згладжуючими властивостями та вимагає в 3,7 рази менше обчислень.

8. Вперше розроблена адаптивна САК тепловим станом доменної печі з інтелектуальним прогнозуванням, що використовує локальні адаптивні системи з самоналагоджувальним і ПД регуляторами, які забезпечують підвищення якості керування. Встановлено, що для нелінійних моделей теплового стану доменної печі запропонована САК забезпечує помилки прогнозування на рівні 0,02...0,03 і помилки керування на рівні 0,02...0,05. При цьому, використання адаптивної САК дозволяє понизити середньоквадратичну помилку керування в 1,59 разів, а витрати на синтез керування не вносять часових обмежень на застосування цієї системи в контурі керування тепловим станом доменної печі.

9. Розроблені методика, алгоритми та програми впроваджені в комплекс програмних засобів проектування та проектів реконструкції розробки ППКІ «Металургавтоматика», впроваджені в АСК ТП ДП-3 ММК, а також в учбовий процес Державного ВНЗ «Національний гірничий університет» при підготовці магістрів спеціальності 8.05090302 «Телекомунікаційні системи та мережі».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Фахові видання:

1. Корнієнко В.І. Комплексна оцінка, ідентифікація та прогнозування складних нелінійних процесів / В.І. Корнієнко, І.Г. Гуліна, Л.В. Будкова, // Науковий вісник НГУ. – 2013. – № 6. – С. 124-131. – ISSN 2071-2227 (наукометрична база Scopus).

2. Гуліна И.Г. Идентификация, прогнозирование и управление сложным многосвязным объектом управления / И.Г. Гуліна, В.И. Корниенко, А.Ю. Гусев, В.Г. Макиенко // Системы обработки информации. – 2012. – № 9 (107). – С. 31-35. – ISSN 1681-7700.

3. Гуліна И.Г. Выбор критерия автоматизированного управления инерционным объектом горно-металлургического производства / И.Г. Гуліна, А.Ю. Гусев, В.И. Корниенко, В.Г. Макиенко // Гірничча електромеханіка та автоматика. – 2012. – Вип. 89. – С. 71-73.

4. Гуліна И.Г. Оценка тренда состояния сложного объекта управления / И.Г. Гуліна // Системы управління, навігації та зв'язку. – 2012. – Вип. 1 (21). – Т. 1. – С. 61-64.

5. Гуліна И.Г. Адаптивная САУ сложным многосвязным объектом управления с интеллектуальным прогнозированием / И.Г. Гуліна, В.И. Корниенко //

Системы обработки информации. – 2011. – № 8(98). – С. 57-62. – ISSN 1681-7710.

6. Гулина И.Г. Идентификация и прогнозирование теплового состояния доменной печи по уровню расплава / И.Г. Гулина, В.И. Корниенко // Гірнична електромеханіка та автоматика. – 2011. – Вип. 87. – С. 69-75.

7. Корниенко В.И. Обоснование принципов построения систем управления тепловым состоянием доменной печи / В.И. Корниенко, И.Г. Гулина // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2011. – № 4. – С. 111-115. – ISSN 2071-2227.

8. Корнієнко В.І. Методологія побудови інтелектуальних прогнозуючих систем оптимального керування нелінійними технологічними процесами / В.І. Корнієнко, І.Г. Гуліна // Гірнична електромеханіка та автоматика. – 2010. – Вип. 85. – С. 75-82.

Тези доповідей на конференціях:

9. Гулина И.Г. Оценка качества адаптивной САУ с интеллектуальным прогнозированием / И.Г. Гулина // VIII международная научно-практическая конференция «Veda a technologie: krok do budoucnosti – 2012» (г. Прага, 27.02-05.03.2012 г.). – С. 66-67.

10. Гулина И.Г. Прогнозирование тренда уровня расплава доменной печи / И.Г. Гулина // Международная научно-практическая конференция «Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании – 2012» (г. Одесса, 18.12-27.12.2012 г.). – Вып. 4. – Том 13. – С. 76-78.

11. Гулина И.Г. Моделирование САУ тепловым состоянием доменной печи / И.Г. Гулина // Международная научно-практическая конференция «Научная индустрия европейского континента – 2012» (г. Прага, 27.11-05.12.2012 г.). – С. 66-68.

Особистий внесок автора. Теоретичні дослідження й експериментальні перевірки теоретичних положень дисертаційної роботи виконані автором самостійно. У роботах, опублікованих у співавторстві здобувачеві належить: [1,2,5,7,8] – обґрунтування та розробка принципів, алгоритмів і програм ідентифікації, прогнозування та керування тепловим станом доменної печі; [3] – дослідження статистичних характеристик об'єкту керування; [6] – дослідження інтелектуальних методів ідентифікації та прогнозування нелінійних технологічних процесів.

АНОТАЦІЯ

Гуліна І.Г. Автоматизація керування тепловим станом доменної печі за циклами накопичення-випуску чавуну. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – автоматизація процесів керування. – ДВНЗ «Національний гірничий університет», Дніпропетровськ, 2015.

В роботі подане наукове обґрунтування і нове вирішення задачі, що полягає в побудові системи автоматизованого керування тепловим станом

доменної печі підвищеної якості в умовах зміни його динамічних параметрів шляхом синтезу і реалізації адаптивного керування на основі ідентифікації теплового стану та його прогнозування за циклами накопичення-випуску чавуну.

На основі отриманих результатів обраний критерій керування теплового стану доменної печі, що дозволяє шляхом стабілізації тренда рівня розплаву забезпечити стабілізацію вмісту кремнію та сірки в чавуні. Розроблена адаптивна система керування з інтелектуальним прогнозуванням стану об'єкта з використанням локальних підсистем із самоналагоджувальним і ПД регуляторами. Розроблено комплекс алгоритмів адаптивного керування, який містить алгоритми поточного оцінювання та прогнозування стану керованого процесу, їх ідентифікації та адаптивного керування, що дозволяє реалізувати системи, інваріантні до зміни режимів роботи, й, таким чином, підвищити якість керування тепловим станом доменної печі.

Ключові слова: доменна піч, тепловий стан, інтелектуальне прогнозування, ідентифікація, адаптивне керування, нейронні мережі, нечітка логіка, вейвлет перетворення.

АННОТАЦІЯ

Гулина И.Г. Автоматизация управления тепловым состоянием доменной печи по циклам накопления-выпуска чугуна. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.07 – автоматизация процессов управления. – ГВУЗ «Национальный горный университет», Днепропетровск, 2015.

В работе представлено научное обоснование и новое решение задачи, заключающейся в построении системы автоматизированного управления тепловым состоянием доменной печи повышенного качества в условиях изменения его динамических параметров путем синтеза и реализации адаптивного управления на основе идентификации теплового состояния и его прогнозирования по циклам накопления-выпуска чугуна.

Впервые обосновано, что повышение качества управления тепловым состоянием достигается путем создания бесперспективных систем непрямого адаптивного управления с идентификацией объекта управления посредством обучения нейронных прогнозирующих моделей, что обеспечивает реализацию оптимального по точности воспроизведения задающих воздействий.

Установлено, что нелинейные нейронечеткие аппроксимации содержания кремния и серы по средним значениям уровня расплава за плавку тесно связаны с фактическими содержаниями кремния и серы в чугуне на выпуске. Это позволяет выполнять стабилизацию тренда уровня расплава, что обеспечивает стабилизацию содержания кремния и серы в чугуне на выпуске.

Обосновано применение адаптивных фильтров-аппроксиматоров, использующих нейронные сети, нечеткую логику и вейвлет преобразования сигналов

для идентификации и прогнозирования теплового состояния доменной печи, что обеспечивает получение в реальном масштабе времени прогнозирующих моделей повышенной точности.

Разработана методика идентификации теплового состояния по временным реализациям, включающая определение состояния нелинейного объекта управления и реконструкцию его модели, которая обеспечивает получение моделей повышенной точности с использованием адаптивных фильтров-аппроксиматоров со снижением вычислительных затрат путем определения порядка порождающей системы.

Обоснована методика выбора интервала управления тепловым состоянием доменной печи, учитывающая динамические параметры каналов управления и спектральные свойства сигналов объекта управления. Это позволило на основе методов нелинейной динамики идентифицировать показатели тренда уровня расплава, характеризующего тепловое состояние доменной печи.

Разработаны линейный цифровой и вейвлет фильтры нижних частот, позволяющие оценить тренд уровня расплава доменной печи, характеризующий ее тепловое состояние. Установлено, что линейный цифровой фильтр нижних частот имеет значительный фазовый сдвиг (задержку) оценки тренда, что не соответствует технологическим требованиям. При этом вейвлет фильтр нижних частот не имеет фазового сдвига, обладает лучшими сглаживающими свойствами и требует меньше вычислений.

Впервые разработана адаптивная САУ с интеллектуальным прогнозированием, использующая локальные адаптивные системы с самонастраивающимся и ПИД регуляторами, которые обеспечивают повышение качества управления тепловым состоянием доменной печи. Использование адаптивной САУ позволяет снизить среднеквадратическую ошибку управления в 1,59 раз, а затраты на синтез управления не вносят временных ограничений на применение этой системы в контуре управления тепловым состоянием.

Разработанные методика, алгоритмы и программы использованы при выполнении госбюджетной научно-исследовательской работы, внедрены в комплекс программных средств проектирования, внедрены в промышленность и в учебный процесс

Ключевые слова: доменная печь, тепловое состояние, интеллектуальное прогнозирование, идентификация, адаптивное управление, нейронные сети, нечеткая логика, вейвлет преобразование.

ABSTRACT

Gulina I.G. Automation of control of the thermal state of high furnace by the accumulation-issue cycles of cast-iron. - Manuscript.

Dissertation for obtaining of scientific degree of candidate of technical sciences on the specialty 05.13.07 – automation of control processes. – The state higher educational institution «National Mining University», Dnipropetrovsk, 2015.

The work presents the scientific argumentation and new solution of task consisting in the construction of the automated control system of the thermal state of high furnace of higher quality in the conditions of change of its dynamic parameters by means of synthesis and realization of adaptive control on the basis of identification of the thermal state and its prediction by the accumulation-issue cycles of cast-iron.

On the basis of received results it was chosen the criterion of the thermal state control of high furnace, which allows by stabilizing of trend of fusion level to provide stabilizing of silicon and sulphur content in cast-iron. The adaptive control system is developed with the intellectual prediction of the state of object using the local subsystems with self-tuning and PID regulators. The complex of algorithms of adaptive control, which contains the algorithms of current evaluation and prediction of the guided process, their identification and adaptive control state is developed, that allows to realize the systems, invariant to the change of the work modes, and, thus, increase the control quality of high furnace thermal state.

Keywords: blast-furnace, thermal state, intellectual prediction, identification, adaptive control, neuron networks, fuzzy logic, wavelet transformation.

ГУЛІНА Ірина Григорівна

**АВТОМАТИЗАЦІЯ КЕРУВАННЯ ТЕПЛОВИМ СТАНОМ ДОМЕННОЇ
ПЕЧІ ЗА ЦИКЛАМИ НАКОПИЧЕННЯ-ВИПУСКУ ЧАВУНУ**

(Автореферат)

Підписано до друку 20.05.15. Формат 60x90/16.
Папір офсет. Ризографія. Ум. друк. арк. 0,9.
Обл.-вид. арк. 0,9. Тираж 120 пр. Зам. №

Державний ВНЗ «Національний гірничий університет»
49005, м. Дніпропетровськ, просп. К. Маркса, 19