

УДК 658.52.011.56

В.С. Богущевський д-р техн. наук, К.М. Зубова

(Україна, м. Київ, Національний технічний університет «Київський політехнічний інститут»)

НЕЧІТКЕ УПРАВЛІННЯ КИСНЕВО-КОНВЕРТЕРНОГО ПРОЦЕСУ

Вступ

На сьогодні Україна експортує близько 70 % своєї продукції, чим забезпечує понад 40 % зовнішніх валютних надходжень, з іншого боку, гірничо-металургійний комплекс (ГМК) держави створює біля чверті частини валового внутрішнього продукту країни. Але успішна діяльність вітчизняних металургійних підприємств цілком залежить від світових тенденцій розвитку металургії. Наша держава опинилася в умовах жорсткої конкуренції, а тому спроможність на світовому ринку в перспективі буде визначатися масштабами вітчизняних металургійних компаній, рівнем їх модернізації та впровадженням ефективних енерго- та ресурсозберігаючих технологій.

Одним із основних етапів ГМК є сталеплавильне виробництво. Провідні позиції серед відомих способів масового виробництва сталі займає саме киснево-конвертерний процес (ККП) завдяки відсутності витрат палива. У цьому разі для отримання сталі використовується не дефіцитний в Україні природний газ, а кисень, який отримують із повітря, пропускаючи його через спеціальний розділовий блок.

За допомогою ККП забезпечується більша частина світового виробництва сталі, так як його техніко-економічні показники виграють у більшості випадків, а саме – більш висока продуктивність, менші капітальні витрати, більш сприятливі умови для механізації та автоматизації виробничих процесів і поєднання процесу виплавки сталі з її безперервною розливкою.

В Україні діє сім киснево-конвертерних цехів (металургійні комбінати «Arcelor Mittal Кривий Ріг», «Азовсталь», «ММК ім. Ілліча», «ДМК ім. Дзержинського» і «ДМЗ ім. Петровського», Єнакіївський та Алчевський металургійні заводи), у них нараховується 21 конвертер.

Відомо, що для виплавки сталі за допомогою ККП в агрегат завантажують металевий брухт обсягом 20 – 25 % від металевої частини шихти (інше рідкий чавун). Для виплавки чавуну в домі основною сировиною є залізна руда та кокс, ціни на які за останні роки зросли більше ніж у два рази.

Істотним же недоліком ККП є обмежені можливості переробки металевого брухту. Враховуючи те, що газ, які відходять з конвертера, складаються приблизно із 90 % CO і 10 % CO₂, а тепловий ефект допалювання CO становить близько 21000 кДж/кг вуглецю, то великі резерви у збільшенні частки металевого брухту криються у підвищенні ступеня допалювання CO в конвертері. Основним способом вирішення цього завдання є зміна конструкцій фурм і керування режимом введення дуття.

Постановка задач дослідження

Мета дослідження - підвищення частки металевого брухту у шихті за рахунок збільшення ступеня допалювання CO до CO₂ у відхідних газах в порожнині конвертера шляхом регулювання відстані фурми над рівнем розплаву, не порушуючи умови шлакоутворення.

Методика проведення експерименту

У багатомірному об'єкті, яким є ККП, цілеспрямована зміна протікання технологічного процесу відбувається за допомогою керуючих діянь – витрат кисневого дуття, положення фурми, маси та часу подачі сипких матеріалів, які незалежні від зовнішнього середовища та суттєво впливають на керовані вихідні величини.

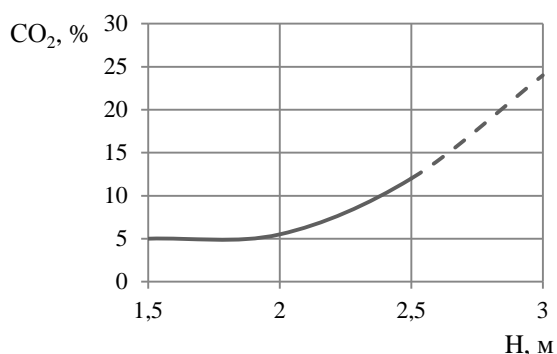


Рис. 1. Залежність ступеня допалювання CO у порожнині конвертера від висоти фурми над рівнем розплаву

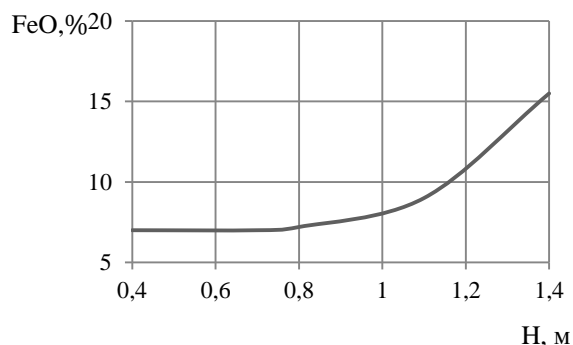


Рис. 2. Вплив висоти фурми над рівнем спокійної ванни на окисненість кінцевого шлаку

Як відомо [1], ефективного допалювання CO до CO₂ можна досягти шляхом підвищення відстані фурми над рівнем розплаву (рис. 1), але при цьому збільшується і кількість оксидів заліза у шлаці (рис. 2), що може призвести до погіршення умов шлакоутворення, техніко-економічних показників, а також завадити допалюванню CO до CO₂. При низькому положенні фурми над рівнем розплаву струмені кисню розмивають днище конвертера та виникають технологічні труднощі з виведенню основного шлаку.

Враховуючи ці всі особливості, було запропоновано керувати процесом продувки шляхом регулювання відстані фурми використовуючи безперервне вимірювання вмісту CO₂ у відхідних газах, за допомогою експресного газоаналітичного комплексу ЕМГ-20-1, та вміст FeO у шлаці за часом запізнення зміни температури води на вході та виході фурми [1].

У зв'язку із суттєвою нестаціонарністю процесу для ефективного регулювання запропоновано використовувати регулятор нечіткої логіки. Для побудови нечіткої моделі регулятора перш за все було вибрано вхідні та вихідні параметри, визначено їх діапазони зміни, кількість термів (табл. 1) та вид функцій приналежності.

Таблиця 1.

Вхідні та вихідні параметри ККП, чіткі та лінгвістичні змінні, а також інтервали зміни

Параметри моделі	Символ	Чіткі та лінгвістичні змінні, та інтервали зміни				
		3	4	5	6	7
Вхідні						
Поточне значення рівня фурми над розплавом, м	H ₁	Нижче А 0,5 – 0,8	Нижче середнього В 0,65 – 0,95	На середині С 0,8 – 1,1	Вище середнього D 0,95 – 1,25	Вище F 1,1 – 1,4
Масова частка FeO, %	FeO	Менше О 7 – 12,5	Задане R 10,0 – 15,0	Більше Т 12,5 – 20	-	-
Масова частка CO ₂ , %	γ	Набагато нижче заданого К 5 – 10	Не набагато нижче заданого L 7,5 – 12,5	Нижче заданого М 10 – 15	Задане I 12,5 – 17,5	Вище заданого G 15 – 20
Швидкість, (10 ⁻²), %/с	S	Від'ємне N -9,0 – 0	Нульове Z -0,5 – 0,5	Додатна P 0 – 3,0	-	-
Прискорення, (10 ⁻³), %/с ²	a	Від'ємне N -7,0 – 0,5	Додатне P -0,4 – 2,0	-	-	-
Вихідні						
Задане значення рівня фурми над розплавом, м	H ₂	Нижче А 0,5 – 0,8	Нижче середнього В 0,65 – 0,95	На середині С 0,8 – 1,1	Вище середнього D 0,95 – 1,25	Вище F 1,1 – 1,4

За вхідні параметри було вибрано – поточний рівень фурми над розплавом, значення масової частки CO₂, швидкість та прискорення зміни CO₂, а також значення масової частки FeO, а за вихідний параметр – задане значення рівня фурми над розплавом [2, 3]. Для всіх параметрів вибрано гаусові функції приналежності (рис. 3).

Для моделі розроблено 225 правил. База правил складалась таким чином (фрагмент)

Правило 1. Якщо H₁ = А, γ = К, S = N, a = P, f = O, то H₂ = F.

Правило 2. Якщо H₁ = А, γ = К, S = N, a = P, f = R, то H₂ = D.

Правило 3. Якщо H₁ = А, γ = К, S = N, a = P, f = T, то H₂ = С.

Правило 4. Якщо H₁ = А, γ = К, S = Z, a = N, f = O, то H₂ = F.

Правило 5. Якщо H₁ = А, γ = К, S = Z, a = N, f = R, то H₂ = D.

Побудову нечіткої моделі проводили в інтерактивній системі Matlab в пакеті Fuzzy Logic Toolbox. На рис. 4. наведено інтерфейс перегляду бази правил, а на рис. 5. візуальне зображення бази правил.

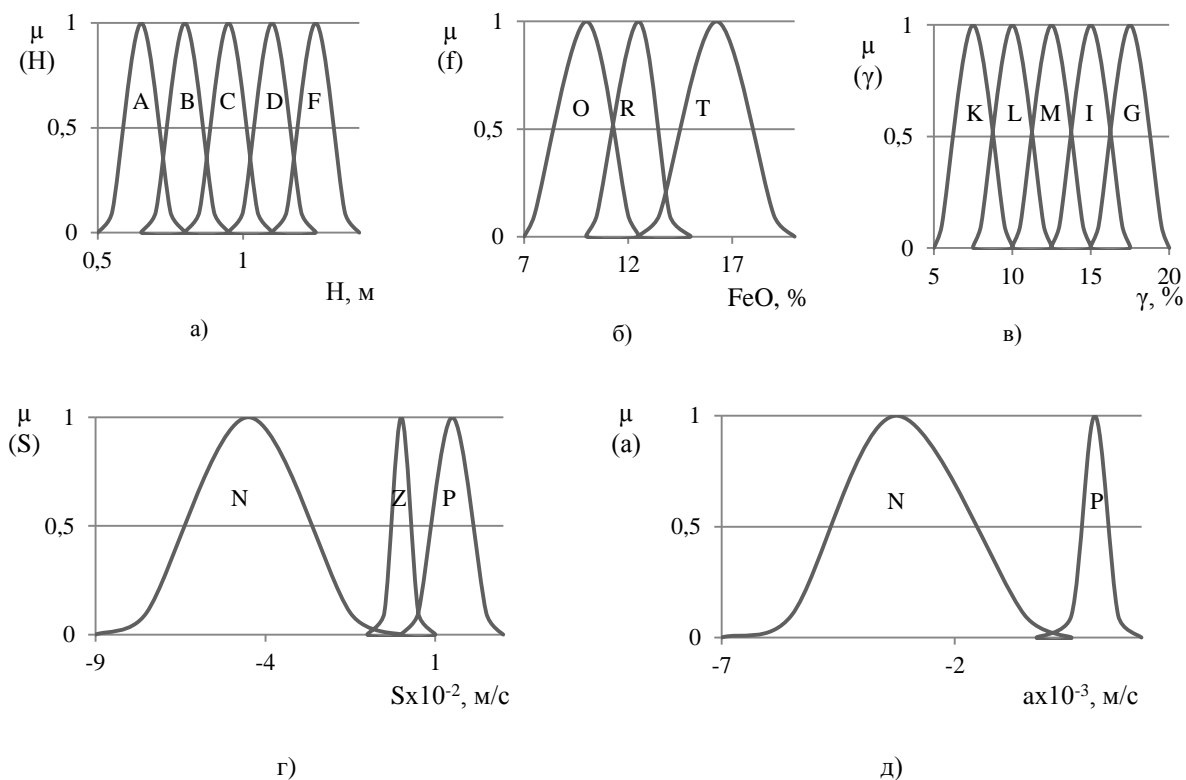


Рис. 3. Гаусові функції відстані фурми: а) масової частки FeO; б) масової частки FeO; в) швидкості зміни CO₂; г) прискорення зміни CO₂

Адекватність розроблених правил була перевірена шляхом зміни значень вхідних параметрів у нечіткій моделі. Для перевірки працездатності нечіткого регулятора було складено систему керування ККП (рис. 6) відповідно до рекомендацій роботи [4] та проведено імітаційне моделювання в реальному часі за допомогою інтерактивного інструменту для моделювання, імітації та аналізу динамічних систем – Simulink.

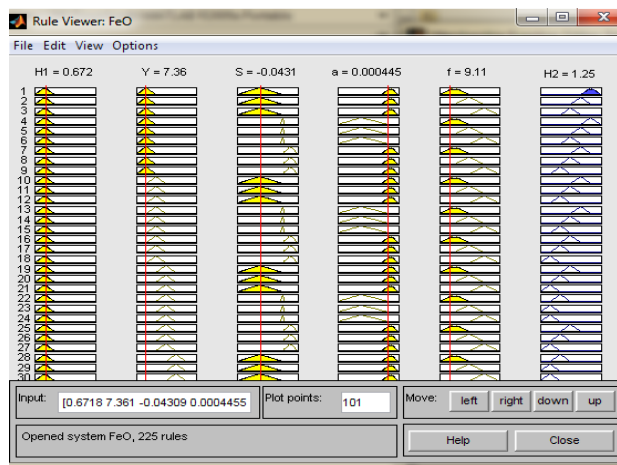


Рис. 4. Вікно інтерфейсу перегляду бази правил

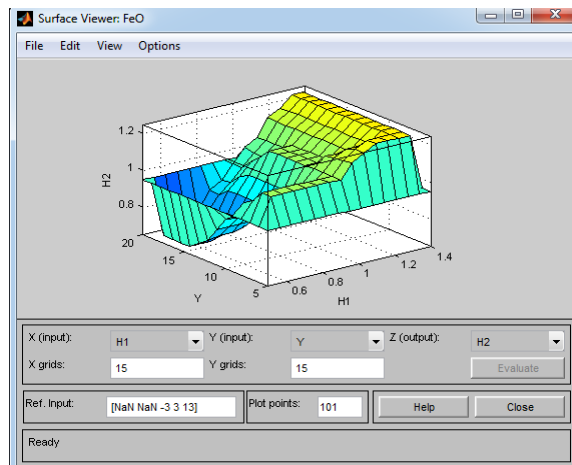


Рис. 5. Вікно візуального зображення поверхні нечіткого виводу

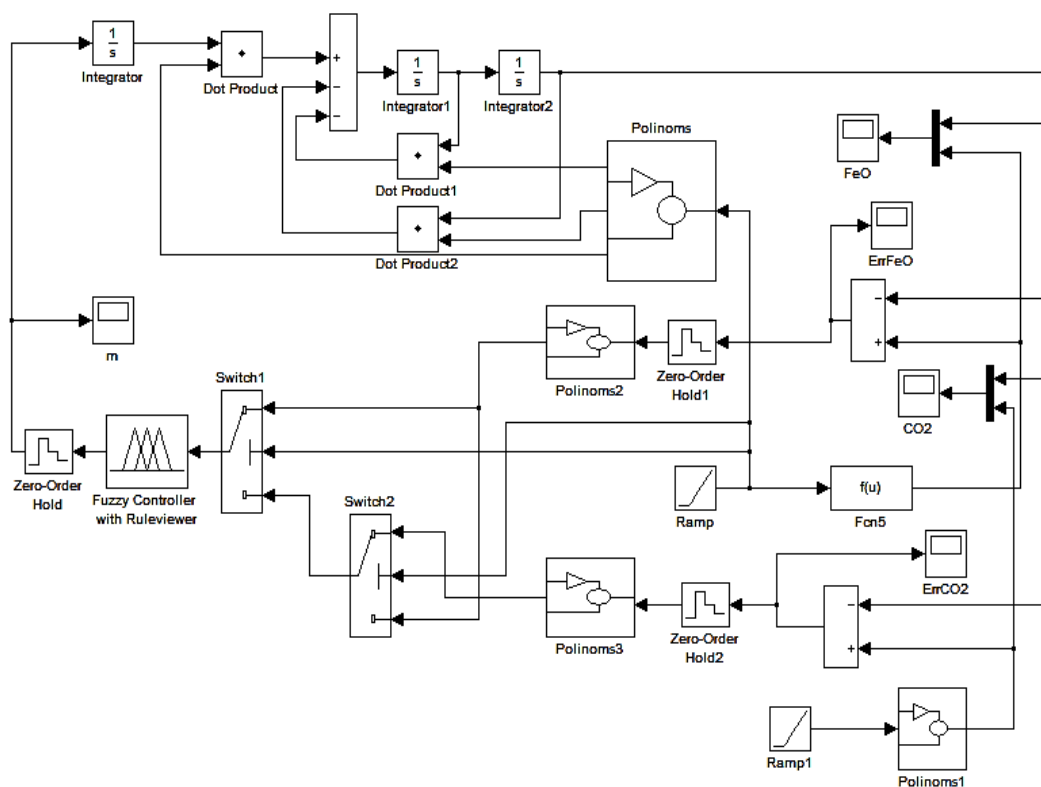


Рис. 6. Система керування ККП для одноярусної фурми

Для досягнення найменшої похибки запропоновано вести регулювання відповідно до періодів продувки. Оскільки в першому періоді температура розплаву низька і спорідненість кисню до заліза вища, ніж у вуглецю, то рекомендовано регулювати тільки вміст FeO у шлаці. У другому періоді відбувається інтенсивне зневуглюцювання розплаву, і на окиснення заліза кисню практично не вистачає. Тому у другому періоді потрібно регулювати вміст CO₂ у відхідних газах, що не призводить до значного підвищення кількості FeO. У третьому періоді спостерігається збільшення CO₂ та окиснення заліза, а тому у цьому періоді потрібно регулювати окисненість шлаку.

Об'єкт керування можна описати загальною передаточною функцією другого порядку [5]:

$$W(s) = \frac{\alpha_2(s)}{m(s)} = \frac{\alpha}{s(s^2 + bs + a)}, \quad (1)$$

де $b = 2\varepsilon \cdot T_1/T_2^2$; $a = 1/T_2^2$; $\alpha = k_H^{Y_{CO_2}} \cdot k_M$; $a = k_H^{Y_{CO_2}} \cdot k_M/T_2^2$.

У цьому разі вхід системи $u(\tau) = \alpha_1(\tau)$ – заданий ступінь окиснення CO до CO₂, а вихід $x(\tau) = \alpha_2(\tau)$ – відпрацьований системою ступінь окиснення вуглецю до CO₂, $m(\tau)$ – керуючий сигнал на виході регулятора.

Коефіцієнти a , b і α також залежать від часу продувки і при $k_M = 1$ мають вигляд як представлено на рис. 7. Їх зображено у блоці Polinoms.

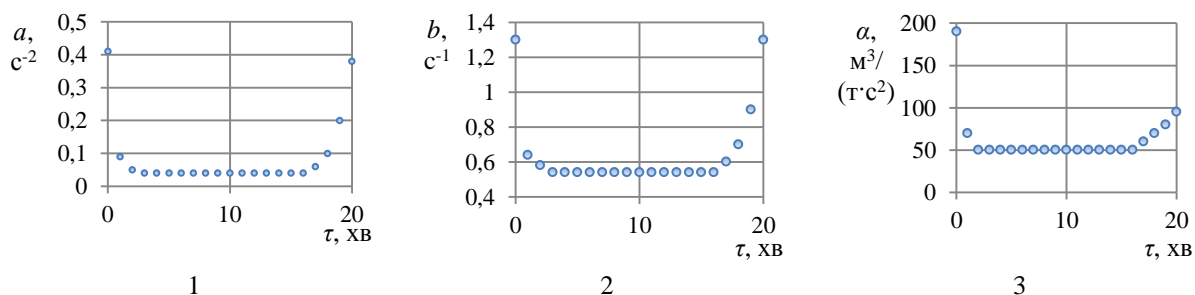


Рис. 7. Криві залежності коефіцієнтів а(1), в(2) та d(3) функції від тривалості продувки: 1) а; 2) b; 3) α

Для спрощення розрахунків механізм переміщення фурми описали передаточною функцією інтегруючої ланки

$$W_M(s) = \frac{k_M}{s},$$

де k_M – коефіцієнт передачі, c^{-1} .

Зміну кількості FeO відображає блок Polinoms1(рис. 8), а зміну CO₂ у часі - блок Fcn5 (рис. 9).

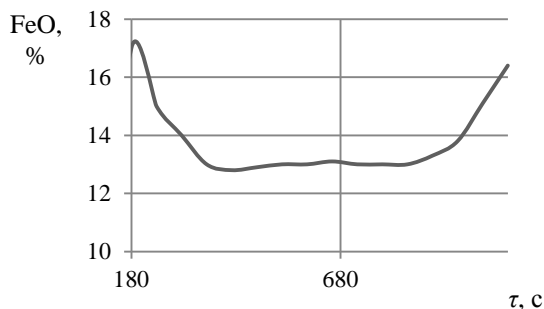


Рис. 8. Зміна кількості оксидів заліза з часом

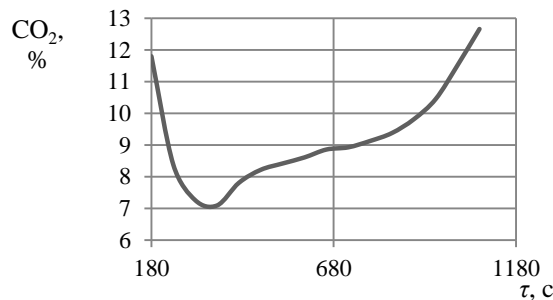


Рис. 9. Крива зміна кількості діоксидів вуглецю у часі

Для обох поліномів зображено швидкість та прискорення зміни похибки у блоках Polinoms3 та Polinoms2 відповідно. Перемикання з одного блока на інший на 300 с відбувається за допомогою перемикача Switch2, а потім знову на FeO на 960 с перемикачем Switch1. І з цього блока параметри похибки надходять на вхід регулятора. Система містить АЦП з фіксатором Zero-Order Hold, який характеризується кроком квантування, значення якого визначено в ході імітаційного моделювання і дорівнює 0,25 с. Регулятор нечіткої логіки знаходиться у блоці Fuzzy Controller with Ruleviewer. Час імітаційного моделювання складає від 180 до 1080 с, так як заплановано розпочинати нечітке регулювання у процесі продукції на виробництві саме із 180 с.

Похибка $e(t)$, що поступає на вхід регулятора, представляє собою різницю між заданим значенням ($r_1(t)$) та отриманим в результаті регулювання: $\theta(t) = r_1(t) - r_2(t)$. На вхід моделі надходить сигнал $m(t)$ з виходу блока Integrator. Вихідний сигнал об'єкта управління $r_2(t)$ отримуємо на виході блока Integrator1. На виході блока Polinoms формуються сигнали $a(t)$, $\alpha(t)$, $b(t)$, які у відповідних блоках множення Dot Product множаться на вихідний сигнал $m(t)$ відповідно записаному вище диференційному рівнянню (1).

Під час налаштування нечіткого регулятора за вхідні параметри вибрано похибку ($e(t)$), швидкість її зміни (s) та прискорення (a). За вихідний параметр взято керуюче діяння на рівень фурми (m). У результаті налаштування регулятора отримали такі діапазони зміни вхідних та вихідного параметрів: $e(t)$ [- 17; 17], s [- 1; 1], a [- 0,5; 0,5], m [- 0,09; 0,09].

За результатами регулювання побудовані відповідні криві (рис. 10 – 11)

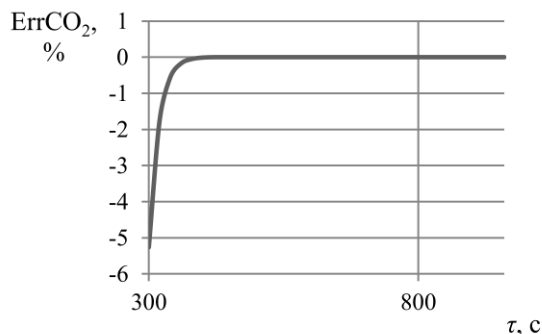


Рис. 10. Похибка по CO₂

Максимальна похибка по CO₂ відповідає значенню 5,26 %, але вже на 400 с зменшується і сягає нульового значення. Максимальна похибка по FeO у першому періоді відповідає значенню 15,57 % і досягає нульового значення на 250 с. У третьому періоді найбільша похибка сягає значення - 3 % і на 1012 с досягає нульового значення, але вже одразу починає збільшуватись, і на 1080 с відповідає значенню 0,194 %. Таке велике значення похибки у першому періоді викликане тим, що регулятор нечіткої логіки вмикали на 180 с, а в цей час значення FeO не дорівнює нулю.

Таким чином, завдяки поступовому регулюванню нам вдалось налаштувати систему регулювання процесом продукції, контролюючи кількість оксидів заліза у шлаці у допустимому інтервалі, та підвищити кількість діоксиду вуглецю у відхідних газах.

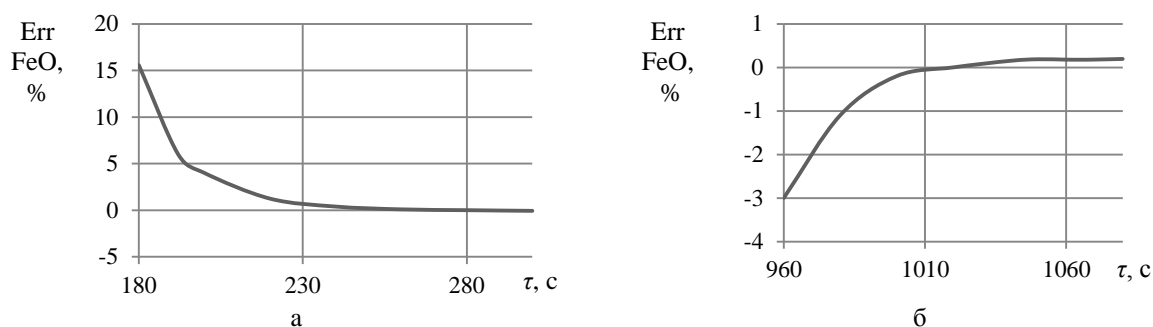


Рис. 11. Похибка по FeO: а) у першому; б) у третьому періоді

Висновки

Оскільки підвищення відстані фурми над рівнем розплаву може призвести не тільки до збільшення ступеня допалювання монооксиду вуглецю до діоксиду вуглецю, але і збільшити кількість оксидів заліза у шлаці, тому при складанні системи керування враховано не тільки кількість CO₂ у відхідних газах, але і кількість FeO у шлаці. Для більш ефективного керування ККП шляхом регулювання одноярусної фурми запропоновано керувати процесом відповідно до періодів продувки. І в першому періоді контролювати тільки кількість оксидів заліза у шлаці, у другому вміст CO₂ у відхідних газах, а у третьому знову окисненість шлаку. Таким чином, завдяки поступовому регулюванню нам вдалося налаштувати систему керування процесом продувки, контролюючи кількість оксидів заліза у шлаці у допустимому інтервалі, та підвищити кількість діоксиду вуглецю у відхідних газах у середньому до 11,31 %, а брухту відповідно до 26,3 %.

Запропонований підхід може використовуватися на будь-яких об'єктах гірничо-металургійного комплексу, що мають суттєву нестационарність.

Список літератури

1. Математические модели и системы управления конвертерной плавкой / В.С.Богушевский, Л.Ф.Литвинов, Н.А.Рюмшин, В.В.Сорокин; “Киевский институт автоматики” – К.: НПК, 1998. – 304 с.
2. Богушевский В. С. Управление продувкой конвертера в режиме энергосберегающей технологии / В. С. Богушевский, Е. Н. Зубова // Интеллектуальные системы принятия решений и проблемы вычислительного интеллекта. – 2013. – С. 71 – 74.
3. Богушевський В. С. Модель керування конвертерним процесом в умовах енергозберігаючої технології / В. С. Богушевський, Е. Н. Зубова // Системний аналіз та інформаційні технології. – 2012. – С. 26.
4. Гостев В.И. Нечеткие регуляторы в системе автоматического управления: // В.И.Гостев; – К.: “Радиоаматор”, 2008. – 972 с.
5. Богушевський В. С. Математична модель регулювання киснево-конвертерного процесу / В. С. Богушевський, К. М. Зубова // Технологічні комплекси. – 2013. № 2 (8). – С. 32 – 38.

Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф. Шкрабцем Ф.П.