

ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ КОНВЕРТЕРНОГО ПРОЦЕСУ ЗА ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧОЮ ТЕХНОЛОГІЄЮ

Анотація: В роботі проведено дослідження систем управління киснево-конвертерного процесу з ПІД-регулятором та регулятором нечіткої логіки. Встановлено, що процес нестационарний і залежить від часу та періодів продувки. В ході імітаційного моделювання налаштовано параметри регуляторів та досліджено якість регулювання за перехідним процесом.

Ключові слова: Ключові слова: киснево-конвертерний процес, металевий брухт, ПІД-регулятор, регулятор нечіткої логіки, Matlab, Simulink, імітаційне моделювання.

Вступ

Основним видом сталеплавильного виробництва як в Україні так і в світі є конвертерне. Плавка проводиться за рахунок внутрішніх фізичних і хімічних джерел тепла, що вноситься основною складовою шихти – чавуном. Надлишок тепла дозволяє переробляти металевий брухт в кількості 20 – 27% від металевої частини шихти [1]. Беручи до уваги, що щорічне утворення брухту сягає майже 50% від виробництва сталі, розроблено багато технологій для збільшення кількості брухту, що переробляється. Ці технології направлені на використання зовнішніх джерел тепла [2]. В той же час у самому конвертерному процесі є внутрішнє джерело тепла – конвертерні гази, які складаються на 90% з CO і на 10% з CO_2 , що визначається термодинамічними умовами процесу. Регулювання процесу в бік збільшення кількості CO_2 майже еквівалентно збільшенню кількості брухту, що перероблюється. Основним регулюючим діянням при цьому є відстань фурми, через яку подається кисень на продувку, над рівнем металевої ванни [3]. Проведені нами дослідження показали, що об'єкт є суттєво нестационарним, коефіцієнт передачі й постійні часу залежать від тривалості продувки, плавно змінюючись в окремі періоди плавки, з різкою зміною при переході від одного періоду до іншого [4]. Це порушувало нормальний процес регулювання стандартним ПІД-регулятором і привело до виникнення значних похибок у непередбачуваний момент часу.

Робота виконувалась в НТУУ “Київський політехнічний інститут” за темою “Модель керування конвертерною плавкою по енергозберігаючій технології”, Державний реєстраційний номер 0112U003476.

Постановка задач дослідження

Метою дослідження є підвищення точності роботи регулятора ступеню допалювання CO до CO_2 у відхідних газах в порожнині конвертера зміною відстані фурми над рівнем розплаву.

Результати досліджень

Передаточна функція об'єкта управління має вигляд класичної передаточної функції коливальної ланки, в якій вхідна величина відстань фурми до рівня спокійної ванни, а вихідна – ступінь окиснення вуглецю до CO_2 [5]:

$$W(s) = \frac{k_H^{\gamma_{CO_2}}}{T_2^2 s^2 + 2\varepsilon T_1 s + 1}, \quad (1)$$

де $k_H^{\gamma_{CO_2}} = k_{vC} \cdot k_{\gamma_{CO_2}}$ – коефіцієнт передачі по каналу відстань фурми до рівня спокійної ванни – ступінь окиснення вуглецю до CO_2 , $T_1 = (T_{vC} + T_{\gamma_{CO_2}})/2\varepsilon$ і $T_2^2 = T_{vC} \cdot T_{\gamma_{CO_2}}$ – постійні часу; ε – коефіцієнт демпфування, що дорівнює 0,9918. Тут k_{vC} , T_{vC} – відповідно коефіцієнт передачі по каналу відстань фурми до рівня спокійної ванни – швидкість зневуглецювання, $m/(x\varepsilon \times m)$, і постійна часу, c ; $k_{\gamma_{CO_2}}$, $T_{\gamma_{CO_2}}$ – відповідно коефіцієнт передачі по каналу швидкість зневуглецювання – ступінь окиснення вуглецю до CO_2 , $x\varepsilon/m$ вуглецю і постійна часу, c .

Для спрощення розрахунків механізм переміщення фурми опишемо передаточною функцією інтегруючої ланки:

$$W_m(s) = \frac{k_m}{s}, \quad (2)$$

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

В цьому випадку вхід системи $u(\tau) = \alpha_1(\tau)$ – задана ступінь окиснення вуглецю до CO_2 , а вихід $x(\tau) = \alpha_2(\tau)$ – відпрацьованій системою ступінь окиснення вуглецю до CO_2 , $m(\tau)$ – керуючий сигнал на виході регулятора, а система описується загальною передаточною функцією:

$$W(s) = \frac{\alpha_2(s)}{m(s)} = \frac{\alpha}{s(s^2 + bs + a)}, \quad (3)$$

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

Коефіцієнти a , b і α також залежать від часу продувки, описуються поліномами 3 – 5 ступенів, коефіцієнти яких змінюються в залежності від періоду продувки. Синтез системи управління з ПД-регулятором (рис. 1) і оптимізацію коефіцієнта передачі й постійних часу провели в інтерактивній системі Matlab за допомогою пакету Simulink.

Система складена наступним чином. Похибка егг, що поступає на вхід регулятора, представляє собою різницю між заданим

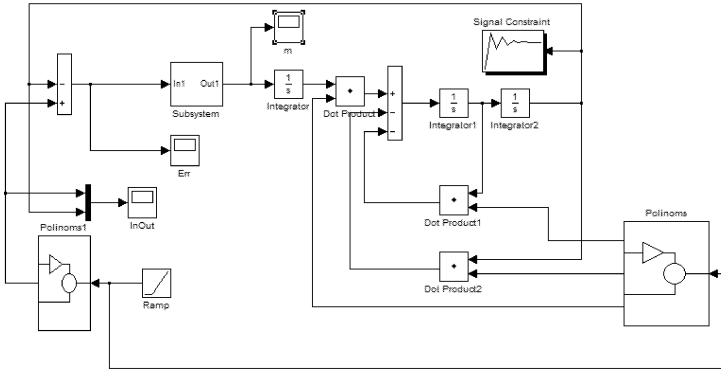


Рис. 1 – Блок-схема системи управління з ПІД-регулятором

значенням $\alpha_1(\tau)$ та отриманим в результаті регулювання: $\theta(\tau) = \alpha_1(\tau) - \alpha_2(\tau)$. На вхід моделі поступає сигнал $m(\tau)$ з виходу блоку Integrator. Вихідний сигнал об'єкта управління $\alpha_2(\tau)$ отримуємо на виході блоку Integrator1. На виході блоку Polinoms формуються сигнали $a(\tau)$, $b(\tau)$ і $\alpha(\tau)$, які у відповідних блоках множення Dot Product множаться на вихідний сигнал $m(\tau)$ відповідно записаному вище диференційному рівнянню (3). Зміну кількості CO_2 зображено у блоці Polinoms1.

Моделювання показало, що середньоквадратичне відхилення ступеню допалювання окису вуглецю у двоокис становить 1,1% абс., причому найбільші похибки відносились до моментів переходу плавки з одного періоду до іншого.

Для зменшення похибки нами було введено в систему блок адаптації у реальному часі коефіцієнта передачі k (рис. 2).

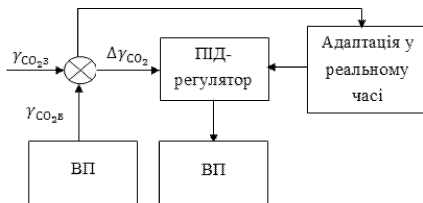


Рис. 2 – Система з ПІД-регулятором з модулем адаптації

Адаптацію проводили за середньо квадратичним відхиленням $\Delta\gamma_{CO_2з}$ виміряного ступеня допалення CO $\Delta\gamma_{CO_2в}$ від заданого значення $\Delta\gamma_{CO_2з}$. Адаптацію проводять за формулою:

$$\sigma(n) = \sqrt{\frac{\sum_{i=n-N+1}^n (\Delta\gamma_{CO_2}(i))^2}{N}} \quad (4)$$

де i – індекс поточного значення параметра, N – кількість вимірів, що входять в масив.

Поточне відхилення обчислюють з дискретністю 0,25 с.

Розрахунок ведеться за N значеннями відхилення $\Delta\gamma_{CO_2}$ так, що кожний раз після N етапів обчислення визначається нове значення $\sigma(n)$ (рис. 3). Робота починається з регламентації величини кроку Δk зміни коефіцієнта передачі регулятора. Далі алгоритм працює за циклом аж до досягнення шуканого оптимуму.

На початку циклу розраховується фактичне середньоквадратичне відхилення $\sigma(n)$. Потім воно порівнюється із значеннями, що мали місце на N і $2N$ кроків назад. Залежно від результату порівняння Δk розраховують так. Якщо при зміні k середньоквадратичне відхилення майже не змінюється, тобто $\sigma(n) - \sigma(n - N) < \varepsilon$, то величина кроку змінення подвоюється. При виконанні цієї умови перевіряється правильність напрямку пошуку – якщо середньоквадратичне відхилення збільшується, тобто дія регулятора погіршується, то знак Δk змінюють на зворотний. При правильному напрямку пошуку змінюють k на величину Δk доти, поки поблизу оптимуму не буде досягнуто співвідношення $\sigma(n - 2N) > \sigma(n - N) < \sigma(n)$. Далі величина кроку зменшується вдвічі, а напрямком пошуку змінюється на зворотний. Зміна коефіцієнта продовжується доти, поки середньоквадратичне відхилення не стане мінімальним і не буде досягнутий оптимум.

Після завершення оптимізації, як і раніше, на відстані N кроків перевіряється розрахунок середньоквадратичного відхилення. Якщо при цьому буде встановлено, що воно істотно зросло, то цикл оптимізації запускається знову.

Система оптимізації, таким чином, автоматично оптимізує настройку ПД-регулятора в процесі роботи. Оптимізація приводила до позитивного результату тільки для усунення невеликих збурень, що виникають в окремих періодах плавки. Середньоквадратичне відхилення похибки скоротилося до 0,8 %*абс*. При переході від одного періоду до другого похибка регулювання, як і в стандартному ПД-регуляторі, суттєво збільшувалася разом із тривалістю перехідного процесу.

Для зменшення похибки було прийняте рішення застосувати регулятор нечіткої логіки. За вхідні параметри обрано – поточний рівень фурми над розплавом, значення похибки регулювання масової частки CO_2 , швидкість та прискорення зміни похибки, а за вихідний параметр – задане значення рівня фурми над розплавом [6,7].

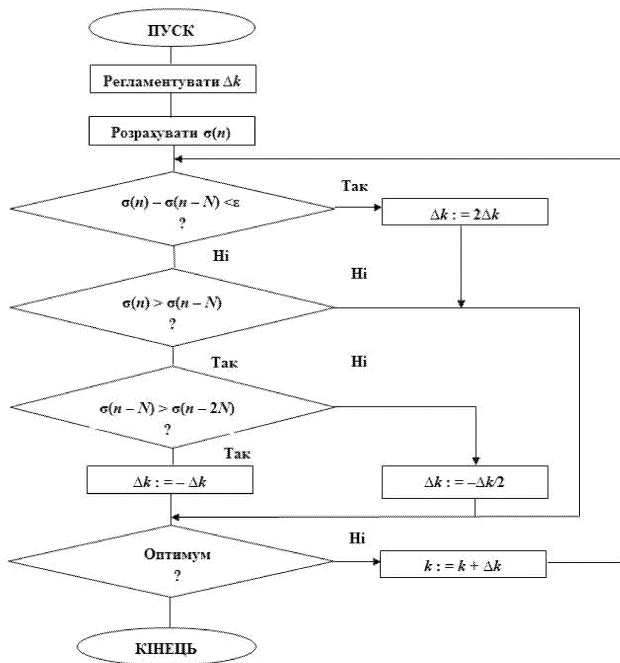


Рис. 3 – Блок-схема алгоритму адаптації

Побудову нечіткої моделі проводили в інтерактивній системі Matlab в пакеті Fuzzy Logic Toolbox. База включала 75 нечітких правил. Для моделювання розробили систему (рис. 4), яка аналогічна системі зображеній на рис. 1 та містить додатково АЦП, який характеризується кроком квантування, значення якого визначено в ході імітаційного моделювання, і дорівнює $0.25c$. Регулятор нечіткої логіки зображено у блоці Fuzzy Controller with Ruleviewer.

Оптимізацію нечіткого регулятора (НР) виконували шляхом зміни виду функцій приналежності (ФП) й кількості термів по кожному з чотирьох параметрів. При дослідженні встановлено, що найкращі результати показує НР з ФП у вигляді трикутника, що перетинає весь діапазон зміни параметру. Гаусові та ФП у вигляді рівнобедреного трикутника неефективні для використання, що пов'язано можливо з різким переходом від одного терму до іншого, або недостатньою кількістю термів та розроблених правил.

Подальші дослідження велись з використанням трикутних ФП, що перетинають весь діапазон зміни параметру з трьома, п'ятьма та сімома термами. В результаті визначено, що найбільша похибка регулювання складає 2,0785% абс. при використанні НР з трьо-

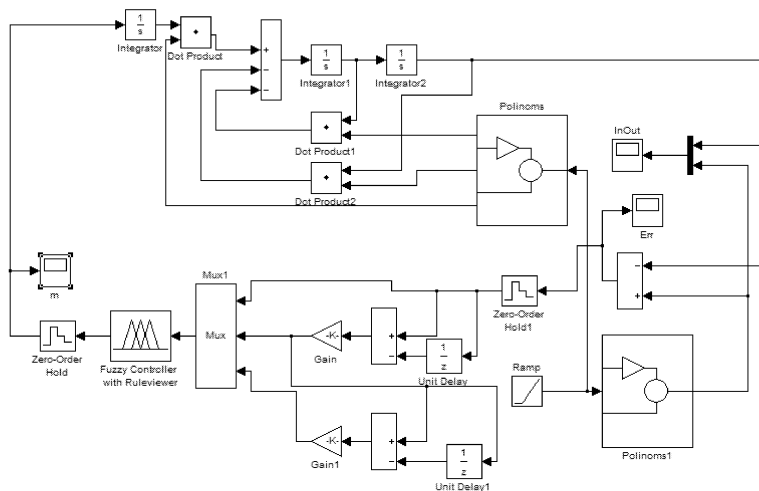


Рис. 4 – Система управління з нечітким регулятором

ма термами, а найменша похибка $\approx 0,7\%$ абс. з сімома термами. В той же час в останньому випадку збільшується тривалість перехідного процесу, що досягає при переході від одного періоду плавки до іншого 40 с. В результаті було обрано 5 термів зміни по кожному параметру. Середньоквадратичне значення похибки при цьому склало $0,5\%$ абс., що значно менше ніж у ПІД-регулятора з адаптацією. Зниження похибки відбулося в основному внаслідок кращого відпрацювання великих збурень при переході процесу з одного періоду до іншого.

Висновки

Застосування стандартних ПІД-регуляторів при регулюванні процесу допалення монооксиду вуглецю у ванні конвертера призводить до значних похибок, що визначається суттєвою нестаціонарністю процесу. Введення блоку адаптації коефіцієнта передачі в реальному масштабі часу суттєво скорочує похибки, що зв'язані з невеликими збуреннями, майже не прискорюючи реакцію на великі збурення. Нечіткий регулятор не погіршує реакцію на невеликі збурення, але суттєво поліпшує відпрацювання великих збурень.

Застосування системи з нечітким регулятором дозволило збільшити кількість CO_2 в газах, що відходять з конвертера, на 3 – 5%, підвищивши кількість перероблюваного металевих брухту на 4 – 6%.

Подальші дослідження направлені на включення системи управління допалюванням CO у CO_2 в АСУТП конвертерної плавки.

Список використаних джерел

1. Основи металургійного виробництва металів і сплавів / за ред. Д. Ф. Чернеги, Ю. Я. Готвянського. – К.: Вища школа, 2006. – 503 с.
2. *Бойченко Б.М.* Конвертерне виробництво сталі: теорія, технологія, якість сталі, конструкції агрегатів, рециркуляція матеріалів і екологія / Б. М. Бойченко, В. Б. Охотський, П. С. Харлашин: – Дніпропетровськ: РВА „Дніпро-ВАЛ”, 2004. – 454 с.
3. *Богушевський В. С.* Керування конвертерною плавкою в умовах енергозберігаючої технології / В. С. Богушевський, К. М. Зубова, В. Ю. Сухенко // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – 2011. – №5. – С. 65 – 69.
4. *Охотский В. Б.* Использование многоканальных фурм в сталеплавильных процессах. Конвертер. / Охотский В. Б. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2011. – №2. – С. 28 – 29.
5. *Богушевський В. С.* Математичне моделювання конвертерного процесу за енергозберігаючою технологією / В. С. Богушевський, К. М. Зубова // Технологічні комплекси. – 2013. – № 2 (8). – С. 32 – 38.
6. *Зубова К. М.* Енергозберігаюча модель контролю окисненості шлаку // Матеріали XI міжнародної науково-практичної конференції “Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра”, 18 квітня 2013 р., Київ. – С. 210 – 216.
7. *Богушевський В. С.* Управління конвертерною плавкою в режимі енергозбереження / В. С. Богушевський, К. М. Зубова // Научно-техническая информация. – 2013. №1. – С. 52 – 56.

Отримано 03.09.2014 р.