

Маріяш Ю.І.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Степанець О.В.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Любицький С.В.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

СПОСІБ РЕАЛІЗАЦІЇ МОДЕЛЬНО-ПРОГНОЗУЮЧОГО КЕРУВАННЯ ПАРАМЕТРАМИ РЕЖИМУ ДУТТЯ КИСНЕВО-КОНВЕРТЕРНОГО ПРОЦЕСУ В ПРОГРАМОВАНОМУ ЛОГІЧНОМУ КОНТРОЛЕРІ

Стаття направлена на розробку сучасних систем автоматичного керування, які повинні забезпечувати високі показники якості роботи в умовах змінних режимів роботи промислового обладнання за рахунок ефективних структур та алгоритмів керування. Мета дослідження полягає у зниженні собівартості киснево-конвертерної сталі, що є наслідком підвищення частки металобрухту за рахунок підвищення ступеня допалювання CO до CO₂ в порожнині конвертера, шляхом оптимального керування параметрами дуттєвого режиму з використанням модельно-прогнозуючого керування. Було розглянуто дуттєвий режим киснево-конвертерної плавки як технологічний об'єкт керування, виконано аналіз проблематики регулювання параметрів дуття в умовах нестаціонарності швидкості зневуглецювання металу. Наявні системи автоматичного керування не задовольняють в повній мірі вимогам, що висувуються до якості роботи системи при програмному керуванні параметрами режиму дуття та стабілізації збурень. Значна нестаціонарність швидкості зневуглецювання металу, стохастичність вимірювання технологічних параметрів, взаємопов'язаність контурів є причинами такої ситуації. Звідси випливає необхідність застосування удосконалених систем автоматичного регулювання, до яких відноситься модельно-прогнозуюче керування. Застосування модельно-прогнозуючого регулятора дозволило покращити якість регулювання для контуру витрати кисню на 39% та для контуру регулювання вмісту CO₂ у конвертерних газах на 97%; максимальне динамічне відхилення вмісту CO₂ у конвертерних газах було знижено на 16,5% у порівнянні з комбінованою системою регулювання. Розглянуто реалізацію програмно-апаратної системи керування з використанням модельно-прогнозуючого регулятора на базі програмованого логічного контролера. Отримані результати моделювання підтвердили підвищення якості роботи системи автоматичного керування в порівнянні з комбінованою системою регулювання, звідки випливає доцільність застосування удосконаленої системи автоматичного регулювання з використанням модельно-прогнозуючого керування.

Ключові слова: модельно-прогнозуюче керування, оптимальне керування, квадратичний функціонал, киснево-конвертерний процес, модель в просторі станів, алгоритм керування.

Постановка проблеми. Сучасний киснево-конвертерний процес (ККП) є високотехнологічним і автоматизованим виробництвом, яке забезпечене великою кількістю контрольно-вимірювальної та регулюючої апаратури. У сучасних умовах розвитку металургійного виробництва актуальними являються завдання по розробці ресурсозберігаючих технологічних режимів виплавки сталі, теоретичних і практичних аспектів нових енергозберігаючих способів продувки

та підвищення ефективності засвоєння теплової енергії [1]. При ручному управлінні хід продувки часто відхиляється від оптимального, порушується процес шлакоутворення, у результаті чого шлак або звертається, або спінюється, що призводить до виносів та викидів. Тільки 45–50% плавки, а іноді й менше, випускають при ручному управлінні з першої спроби [2]. Важливими параметрами режиму дуття є інтенсивність продувки, висота фурми над рівнем спокійної ванни, гли-

бина проникнення, тиск та кількість струменів кисню [3]. Завдання керування ККП – отримання металу з певним хімічним складом і температурою по завершенню процесу продувки. Однак пряме вимірювання цих параметрів упродовж продувки неможливе внаслідок відсутності відповідних датчиків, які можуть працювати в умовах ККП [4]. За таких умов актуальним є застосування алгоритмів керування, що дають змогу вести процес за оптимальним режимом.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Для побудови автоматизованої системи керування (АСК) ККП використовують різноманітні підходи: застосування статичних і динамічних прогнозованих моделей [5] (рекомендації щодо доведення плавки за результатами проміжних вимірів та історії «вдалих» плавок); контроль вихідних параметрів плавки [6]; динамічне керування продувкою [7]. Наприклад, у статті [8] використання нейронних мереж зі зворотнім поширенням дозволяє провести аналіз великих наборів даних, щоб забезпечити оптимізацію процесу плавки. Оптиміальне динамічне керування режимом дуття з використанням прогнозуючих моделей [9] дозволило Zhang та ін. покращити отримання наприкінці продувки металу з певним хімічним складом і температурою, що сприяло підвищенню якості сталі. Однак підвищення температури металу призводить до перегріву елементів водоохолоджуючих конструкцій та зниження продуктивності агрегату.

Завдання на витрату дуття під час продувки визначається з урахуванням гами протилежних вимог, примирити які неможливо без компромісів. У традиційних способах інтенсивністю продувки керують за інформацією про початкові умови і швидкості декарбонізації або по температурі конвертерних газів. Критерієм управління є запобігання викидів металу. Однак дотримання цієї умови знижує продуктивність агрегату і надійність управління через перегрів елементів водоохолоджуючих конструкцій [10]. При статичному управлінні плавкою прагнуть забезпечити отримання заданих значень масової частки вуглецю і температури, задаючись усередненими значеннями масових часток вуглецю ванни, що окислюється до СО в порожнині конвертера за рахунок кисневого дуття, оксидів заліза і марганцю в кінцевому шлаку [11]. Ці параметри в основному залежать від дуттьового режиму. Для врахування ступеня засвоєння кисню ванною інтенсивність продувки по її ходу коригують на основі інформації про тепловий потік на водоохолоджуючих

елементах [12]. На практиці витрату кисню на продувку підтримують на максимально високому рівні під час продувки. Це викликано бажанням знизити тривалість продувки, що повинно збільшити продуктивність конвертера. Однак висока інтенсивність продувки може не забезпечити розплавлення лому до кінця режиму дуття, а також ускладнити формування шлаку.

При динамічному управлінні витратою дуття [6] вимірюють початкові умови (число змін футерування конвертера при експлуатації ОКГ, насипну щільність брухту, масову частку кремнію в чавуні і його температуру), температурне розширення екранних труб підйомного газоходу ОКГ і в результаті вимірювань вводять корекцію, що враховує перехідний режим теплової роботи елементів водоохолоджуючих конструкцій у вигляді похідної від температурного лінійного розширення елементів. Висота розташування фурми має оптимальні межі. При надмірно високому розташуванні фурми кінетична енергія струменів втрачається на шляху до зустрічі з ванною, тому кисневі струмені не вступають в реакцію ("поверхневий обдув"); при надмірно низькому положенні ("жорстке продування") посилюються викиди крапель металу газами і пошкоджується фурма, істотно сповільнюється шлакоутворення через зменшення кількості FeO в шлаку [13]. Оптиміальна висота зазвичай знаходиться в межах від 1,0 до 2,5 м, що відповідають відстані до рівня ванни в спокійному стані висота зазвичай зростає при збільшенні місткості конвертера і залежить від особливостей прийнятої в цеху технології. У публікації [14] Охотський В. Б. зазначає, що не змінюючи відстань фурми під час продувки не можливо досягти економічної ефективності процесу. Зміну висоти положення фурми під час продувки, зазвичай, використовують для регулювання окислення шлаку і прискорення його формування. Великий розвиток отримало нечітке керування положенням фурми [15], метою якого є підвищення частки CO₂ у газах, що відходять.

Постановка завдання. Метою роботи є реалізація оптимального керування параметрами дуттьового режиму з використанням модельно-прогнозуючого керування (МПК) на базі програмованого логічного контролера, що дозволить підвищити частку металобрухту за рахунок підвищення ступеня допалювання СО до CO₂ в порожнині конвертера.

Виклад основного матеріалу дослідження. Виконаємо синтез модельно-прогнозуючого регулятора (МПР) з квадратичним функціоналом при наяв-

ності обмежень режиму дуття киснево-конвертерної плавки. Розробка модельно-прогнозуючого регулятора складається з таких основних етапів: побудова прогнозуючої моделі; визначення функціоналу, що характеризує якість регулювання; рішення оптимізаційної задачі – пошук оптимальної стратегії керування, що забезпечує мінімум функціоналу. Для побудови прогнозуючої моделі МПР використаємо математичну модель режиму дуття киснево-конвертерного процесу [16]. Для системи автоматичного регулювання продувки киснево-конвертерного процесу розглядається задача програмного керування та стабілізації при виникненні збурень, тому необхідно перейти до інкрементної форми (1) прогнозуючої моделі в просторі станів:

$$\Delta u(t) = u(t) - u(t-1) \Rightarrow u(t) = u(t-1) + \Delta u(t) \quad (1)$$

$$x'(t) = Ax(t) + Bu(t-1) + B\Delta u(t).$$

Для цього введемо новий стан $x_u(t) = u(t-1)$ та розширимо (2) систему:

$$\begin{cases} x'(t) = Ax(t) + Bu(t-1) + B\Delta u(t) \\ x'_u(t) = x_u(t) + \Delta u(t). \end{cases} \quad (2)$$

В результаті отримано прогнозуючу модель (3) режиму продувки киснево-конвертерного процесу у вигляді керованої канонічної форми моделі в просторі станів:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} x'(t) \\ x'_u(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ x_u(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ I \end{bmatrix} \Delta u(t) \\ y(t) = [C \ 0] \begin{bmatrix} x(t) \\ x_u(t) \end{bmatrix}. \end{cases} \quad (3)$$

Виконаємо перетворення неперервної моделі (3) в дискретну модель (4) в просторі станів використовуючи метод Ейлера [17]:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \\ x_3(k+1) \\ x_4(k+1) \\ x_5(k+1) \\ x_6(k+1) \\ x_u(k+1) \\ x_H(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_d & B_d \\ 0 & I \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ x_3(k) \\ x_4(k) \\ x_5(k) \\ x_6(k) \\ x_u(k) \\ x_H(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_d \\ I \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta u_{VO_2}(k) \\ \Delta H(k) \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} v(k) \\ \gamma_{CO_2}(k) \end{bmatrix} = [C_d \ 0] \cdot \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ x_3(k) \\ x_4(k) \\ x_5(k) \\ x_6(k) \\ x_u(k) \\ x_H(k) \end{bmatrix}. \end{cases} \quad (4)$$

В результаті отримано нові матриці \bar{A}_d , \bar{B}_d , \bar{C}_d (5) керованої канонічної дискретної форми моделі в просторі станів:

$$\bar{A}_d = \begin{bmatrix} 1 - \frac{T_0}{T_v^{uO_2}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{T_0}{T_v^{uO_2}} & 0 \\ 0 & 1 & T_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T_0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{T_0}{T_{1CO_2}^{uO_2}} & -\frac{T_0 T_{2CO_2}^{uO_2}}{T_{1CO_2}^{uO_2}} & 1 - \frac{T_0 T_{2CO_2}^{uO_2}}{T_{1CO_2}^{uO_2}} & 0 & 0 & \frac{T_0}{T_{1CO_2}^{uO_2}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & T_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{T_0}{T_{1CO_2}^{uO_2}} & 1 - \frac{T_0 T_{2CO_2}^{uO_2}}{T_{1CO_2}^{uO_2}} & 0 & \frac{T_0}{T_{1CO_2}^{uO_2}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$\bar{B}_d = \begin{bmatrix} \frac{T_0}{T_v^{uO_2}} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{T_0}{T_{1CO_2}^{uO_2}} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{T_0}{T_{1CO_2}^{uO_2}} \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; \bar{C}_d = \begin{bmatrix} k_{vCO_2}^H & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{1CO_2}^{uO_2} & 0 & 0 & k_{2CO_2}^H & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

де

$$k_{1CO_2}^H = 12,15 \text{ \%}/\text{M}; k_{vCO_2}^H = 6 \text{ M}^3 / (\text{x}\theta \cdot \text{\%}); k_{2CO_2}^H = -0,756 \frac{\text{\%CO}_2}{\text{\%uO}_2};$$

$$T_0 = 0,1c; T_v^{uO_2} = 1,2c; T_{1CO_2}^{uO_2} = 9,55c; T_{2CO_2}^{uO_2} = 14,98c; T_{3CO_2}^{uO_2} = 7,05c;$$

$$T_{1CO_2}^H(\tau) = T_v^H T_{1CO_2}^{vCO_2} = 15,16 \cdot e^{-\left(\frac{\tau-3,47}{2,9}\right)^2} + 14,21 \cdot e^{-\left(\frac{\tau-15,57}{2,6}\right)^2} + 24,68 \cdot e^{-\left(\frac{\tau-9,73}{6,0}\right)^2} [c];$$

$$T_{2CO_2}^H(\tau) = T_v^H + T_{CO_2}^H = 7,05 \cdot e^{-\left(\frac{\tau-3,47}{2,9}\right)^2} + 6,61 \cdot e^{-\left(\frac{\tau-15,57}{2,6}\right)^2} + 11,48 \cdot e^{-\left(\frac{\tau-9,73}{6,0}\right)^2} + 2,15 [c].$$

τ – час від початку продувки, хв.

Для реалізації модельно-прогнозуючого регулятора було обрано провідне, незалежне від виробника ПЛК програмне забезпечення автоматизації систем керування CODESYS V3.5 [18], що відповідає вимогам стандарту ІЕС 61131-3. Був запрограмований функціональний блок прогнозуючої моделі МПР (рис. 1). Код відповідного функціонального блоку доступний за посиланням https://drive.google.com/drive/folders/19ipMsPrWhdqQZB5xW9l6DWuikaKBeQsq?usp=share_link.

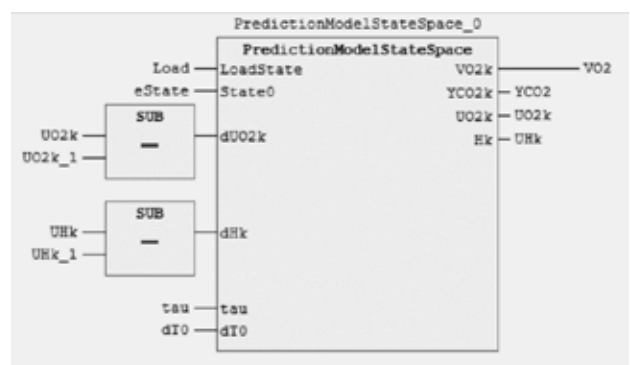


Рис. 1. Функціональний блок прогнозуючої моделі МПР

Математична модель для прогнозу у якості початкових умов використовує поточний стан сис-

теми. Оскільки поточний стан системи виміряти не є можливим, необхідно розробити спостерігач стану. Для розглянутої системи виконується критерій Калмана [19] щодо спостережуваності та керуваності, оскільки ранг відповідних матриць дорівнює кількості станів системи, а, отже, може бути розроблений спостерігач стану та регулятор. Структурна схема спостерігача стану системи наведена на рисунку 2, в якості спостерігача було використано спостерігач Луенбергера.

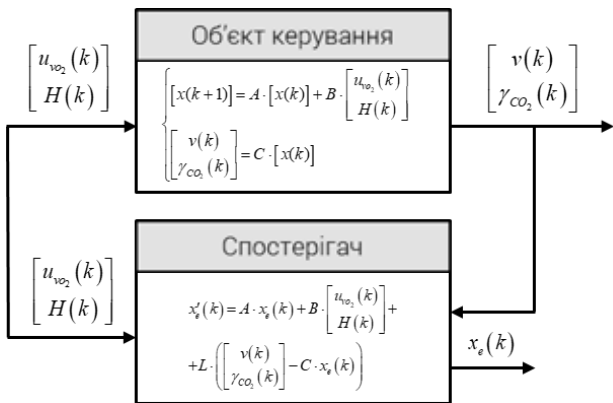


Рис. 2. Структурна схема спостерігача стану системи

Перевага використання спостерігача Луенбергера – наявність додаткового контуру корекції стану при виникненні розбіжності між моделлю та реальною поведінкою об'єкту [20]. Математична модель спостерігача Луенбергера (6) представлена у вигляді рівняння:

$$x_e'(k) = A \cdot x_e(k) + B \cdot \begin{bmatrix} u_{CO_2}(k) \\ H(k) \end{bmatrix} + L \cdot \begin{bmatrix} v(k) \\ \gamma_{CO_2}(k) \end{bmatrix} - C \cdot x_e(k), \quad (6)$$

де $L = \begin{bmatrix} l_1 & 0 \\ 0 & l_2 \\ 0 & l_3 \\ 0 & l_4 \\ 0 & l_5 \\ 0 & l_6 \end{bmatrix}$ – дискретизована матриця компенсатора спостерігача.

Розробка компенсатора спостерігача L залежить від бажаного характеристичного рівняння: $(s - \beta_1) \cdot (s - \beta_2) \cdot \dots \cdot (s - \beta_n) = 0$. Полоси спостерігача повинні забезпечувати швидку збіжність похибки спостереження $\begin{bmatrix} v(k) \\ \gamma_{CO_2}(k) \end{bmatrix} - C \cdot x_e(k)$ до 0. Це означає, що похибка оцінки спостерігача повинна зменшуватись в 2-5 разів швидше, ніж стан самого об'єкту [20].

Розглянемо модель (8) та знайдемо l_1 компенсатора спостерігача. Враховуючи динамічні властивості об'єкту для синтезу спостерігача, власні значення матриці є $\beta_1 = -2.5$. Для пошуку l_1 використаємо формулу Аккермана [21]. У результаті виконання функції acker пакету

MATLAB [22], що реалізує формулу Аккермана, $l_1 = 0.023$. Аналогічно для $\beta_{2-4} = -0.75$ та $\beta_{5,6} = -1$ отримано $l_2 = 0.01; l_3 = -0.0019; l_4 = 0.0001; l_5 = 0.0081; l_6 = -0.0017$.

Був запрограмований функціональний блок (рис. 3) спостерігача стану Луенбергера. Код відповідного функціонального блоку доступний за посиланням https://drive.google.com/drive/folders/19ipMsPrWWhdqQZB5xW9l6DWuikaKBeQSsq?usp=share_link.

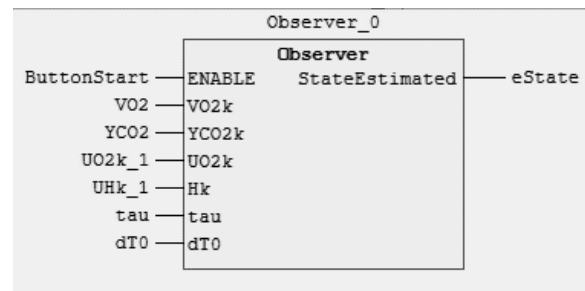


Рис. 3. Функціональний блок спостерігача стану Луенбергера

Наступним важливим елементом МПР є функціонал. Якість управління охарактеризуємо за допомогою квадратичного функціоналу (7):

$$J_k(\bar{y}, \Delta \bar{u}) = \sum_{j=1}^P \left[(y_{k+j} - r_{k+j})^T R (y_{k+j} - r_{k+j}) + \Delta u_{k+j-1}^T Q \Delta u_{k+j-1} \right], \quad (7)$$

де R та Q – додатно визначені симетричні матриці; P – кількість кроків горизонту прогнозу. Виконаємо вибір горизонту прогнозу виходячи з динаміки процесу та коефіцієнтів матриць R та Q відповідно до якості бажаного перехідного процесу системи керування: $R = \begin{bmatrix} 0.2 & 0 \\ 0 & 1.5 \end{bmatrix}; Q = \begin{bmatrix} 0.2 & 0 \\ 0 & 0.03 \end{bmatrix}; P = 35$. Горизонт керування C – горизонт, в межах якого керуюча дія може змінюватись. Як видно з рис. 4, при збільшенні горизонту прогнозу якість регулювання зростає до критичної точки (35 кроків), після якої якість вже не зростає, але складність обчислень збільшується в геометричній прогресії. Для забезпечення необхідної якості регулювання системи керування було обрано горизонт керування в 5 кроків.

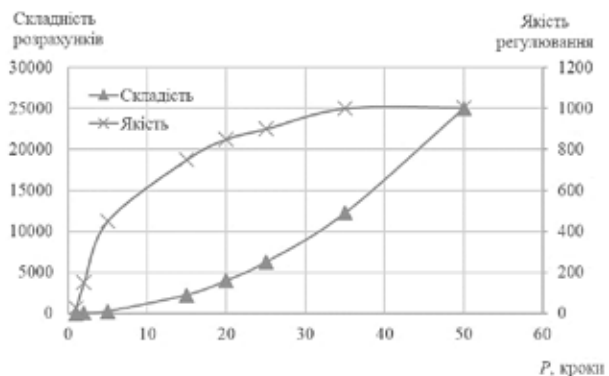


Рис. 4. Залежність складності розрахунків та якості регулювання від горизонту P

Був запрограмований функціональний блок функціоналу. Код відповідного функціонального блоку доступний за посиланням https://drive.google.com/drive/folders/19ipMsPrWhdqQZB5xW9l6DWuikaKBeQSq?usp=share_link.

Для пошуку оптимальної стратегії керування було сформовану задачу оптимізації функціоналу (7) при наявності обмежень (8):

$$\begin{aligned}
 J_k &= J_k(\bar{y}(\Delta\bar{u}), \Delta\bar{u}) = J_k(\Delta\bar{u}) \rightarrow \min_{\Delta\bar{u} \in E^{n^p}} \\
 H_{\min} &\leq H(t) \leq H_{\max} & u_{\min} &\leq u_{\text{O}_2}(t) \leq u_{\max} \\
 dH_{\min} &\leq \frac{dH(t)}{dt} \leq dH_{\max} & du_{\min} &\leq \frac{du_{\text{O}_2}(t)}{dt} \leq du_{\max} \quad (8) \\
 H_{\min} &= 1.5M & u_{\min} &= 0\% \\
 H_{\max} &= 3.0M & u_{\max} &= 100\% \\
 dH_{\min} &= -0.2\%/c & du_{\min} &= -25\%/c \\
 dH_{\max} &= 0.2\%/c & du_{\max} &= 25\%/c
 \end{aligned}$$

Задачу з оптимізації при наявності обмежень вирішимо за допомогою методу штрафних функцій (штрафна функція – квадратична). Мінімізація функціоналу при наявності обмежень зводиться до стандартної задачі багатовимірної оптимізації. Штрафна функція визначається виразом (9):

$$\begin{aligned}
 F(\Delta u) &= J_k(\Delta\bar{u}) + P(r, l(\Delta u)) \\
 r &- \text{штрафний параметр,} \\
 l(\Delta u) &- \text{обмеження.}
 \end{aligned} \quad (9)$$

Обраний квадратичний функціонал є опуклою функцією, тому має місце задача опуклого програмування. Квадратичний функціонал заданий алгоритмічно, тому було застосовано методи нульового порядку. Їх застосовують у тих випадках, коли з якихось причин визначення градієнта цільової функції неможливе, а також у тих випадках, коли функція задана алгоритмічно, зокрема, коли для обчислення значень функції за тих чи інших значеннях аргументу потрібно провести натурний або числовий експеримент. У якості методу оптимізації було обрано метод Хука-Дживса [23], який показав оптимальне співвідношення між кількістю кроків та обрахунків цільової функції при вирішенні оптимізаційної задачі у порівнянні з симплексним методом та методом найшвидшого спуску. Пошук згідно цього методу складається із послідовності кроків пошуку для дослідження функції навколо базисної точки, з якої у випадку успіху робиться пошук за зразком.

Був запрограмований функціональний блок (рис. 5) методу оптимізації Хука-Дживса. Код відповідного функціонального блоку доступний за посиланням https://drive.google.com/drive/folders/19ipMsPrWhdqQZB5xW9l6DWuikaKBeQSq?usp=share_link.

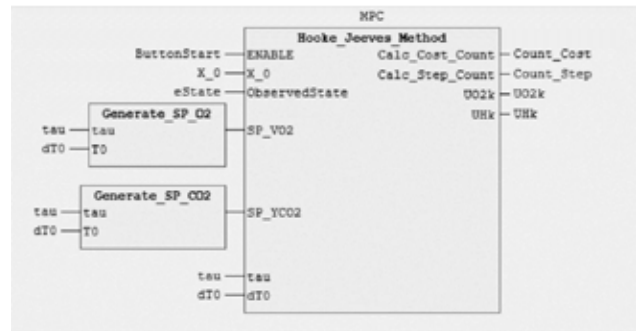


Рис. 5. Функціональний блок методу оптимізації Хука-Дживса

Процедура імітаційного моделювання МПК параметрами дуття ККП виконувалась у середовищі Matlab Simulink (модель процесу) та SoftPLC CODESYS V3.5 (МПП). У середовищі Matlab Simulink було обрано алгоритм вирішення рівнянь Euler зі постійною величиною кроку (fixed-step) 0.1с. Абсолютна і відносна точність розрахунків – 0,001. У середовищі програмування CODESYS V3.5 тип виконання основної задачі заданий циклічний з кроком 0.1с, що достатньо для реального процесу. Комунікація між Matlab Simulink та CODESYS V3.5 виконується за допомогою протоколу OPC UA. Виконаємо моделювання перехідних характеристик системи автоматичного регулювання режиму дуття киснево-конвертерного процесу з використанням модельно-прогнозного підходу. Розглянемо перехідну характеристику системи регулювання інтенсивністю дуття кисневого конвертера з наперед визначеною зміною завдання (рис. 6).

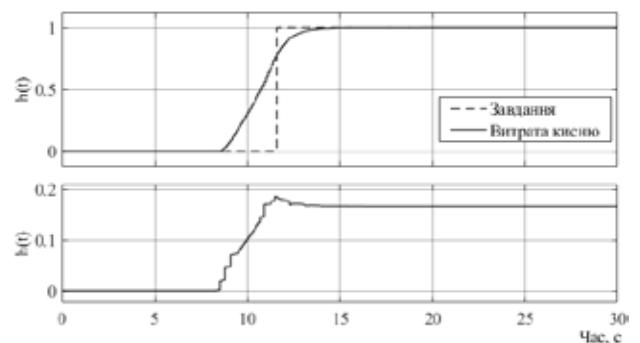


Рис. 6. Перехідна характеристика системи регулювання продукції киснем

Для системи регулювання вмісту CO₂ під час продувки киснево-конвертерного процесу розглядається задача програмного керування та стабілізації при виникненні збурень: зміни витрати кисню на продувку, зміна швидкості зневуглицювання, введення сипучих та ін. Перехідна характеристика

системи регулювання вмісту CO_2 з наперед визначеною зміною завдання наведена на рис. 7.

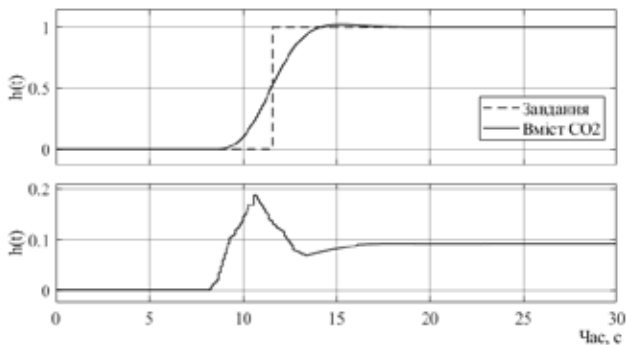


Рис. 7. Перехідна характеристика системи регулювання вмісту CO_2

Було виконано моделювання перехідних процесів режиму дуття тривалістю 20 хв для 160-тонного конвертера з модельно-прогнозуючим регулюванням та комбінованої системи регулювання з ПД-регуляторами вмісту CO_2 у димових газах та витрати кисню для задачі програмного керування. Отримані перехідні процеси системи автоматичного регулювання режиму дуття киснево-конвертерної плавки з використанням комбінованої системи автоматичного регулювання забезпечили ISE для контуру витрати кисню – 9075 та вмісту CO_2 у конвертерних газах – 1397; максимальне динамічне відхилення вмісту CO_2 у конвертерних газах склало 17,5%; з використан-

ням модельно-прогнозуючого регулятора забезпечили ISE для контуру витрати кисню – 5577 та вмісту CO_2 у конвертерних газах – 43; максимальне динамічне відхилення вмісту CO_2 у конвертерних газах склало 0,95%.

Висновки. Було розроблено систему автоматичного регулювання параметрами режиму дуття ККП і виконано її аналіз. Синтезовано спостерігач стану Луенбергера режиму дуття ККП. Враховуючи динамічні властивості об'єкту розраховано компенсатор спостерігача L на бажане характеристичне рівняння, використовуючи формулу Аккермана. Досліджено модель режиму дуття ККП на спостережливість та керованість згідно критерія Калмана. Розроблено спостерігач стану та регулятор, який забезпечує мінімізацію лінійно-квадратичного функціоналу. Квадратичний функціонал заданий алгоритмічно, тому було застосовано метод оптимізації нульового порядку – Хука-Дживса. Застосування модельно-прогнозуючого регулятора дозволило покращити якість регулювання для контуру витрати кисню на 39% (квадратичне відхилення зменшено з 9075 до 5577); для контуру регулювання вмісту CO_2 у конвертерних газах на 97% (квадратичне відхилення зменшено з 1397 до 43); максимальне динамічне відхилення вмісту CO_2 у конвертерних газах було знижено на 16,55% (з 17,5% до 0,95%) у порівнянні з комбінованою системою регулювання з ПД-регуляторами.

Список літератури:

1. Степанець О. В., Маріяш Ю.І. Модельно-прогнозуючий регулятор дуттєвого режиму киснево-конвертерного процесу. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення у сучасних технологіях. 2021. № 4 (10). С. 61–66. URL: <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2021.04.08>.
2. Основи металургійного виробництва металів і сплавів: Підручник / Д.Ф.Чернега та ін. К.: Вища школа, 2006. 503 с.
3. Глинов Г. М., Маковський В. А. АСУ ТП в чорній металургії. М.: Металлургия, 1999. 312 с.
4. В.С. Богушевський, Н.А. Рюмшин, Н.А. Сорокин АСУ ТП виробництва сталі в конвертерах: НПО «Промавтоматика», 1991. 177 с.
5. Mariash Y., Stepanets O. Model predictive control application in the energy saving technology of basic oxygen furnace. Modeling, Control and Information Technologies. 2019. No. 3. P. 124–126. URL: <https://doi.org/10.31713/mcit.2019.33>.
6. АСУ ТП конвертерного виробництва та спеціальної електрометалургії / В.С. Богушевський та ін. НПК «Київський інститут автоматики», 1997. 288 с.
7. Богушевський В. С., Сухенко В. Ю., Василенко Б. В. Управління конвертерною плавкою в режимі енергозберігаючої технології. Енергоресурсозбереження в металургійній промисловості. 2016. С. 70–71.
8. Metallurgical Data Science for Steel Industry: A Case Study on Basic Oxygen Furnace / V. Nenchev et al. steel research international. 2022. URL: <https://doi.org/10.1002/srin.202100813>.
9. Zhang J. Optimal Control Problem of Converter Steelmaking Production Process Based on Operation Optimization Method. Discrete Dynamics in Nature and Society. 2015. Vol. 2015. P. 1–13. URL: <https://doi.org/10.1155/2015/483674>.
10. В. С. Богушевський, К. М. Зубова Модель управління конвертерною плавкою на основі нечіткої логіки. Матеріали XX міжнародної конференції з автоматичного управління Автоматика-2013, Миколаїв, 27 вересня 2013 р. С. 152.

11. Contribution of CO₂ Emissions from Basic Oxygen Steelmaking Process / N. Madhavan et al. *Metals*. 2022. Vol. 12, no. 5. P. 797. URL: <https://doi.org/10.3390/met12050797>.
12. Математична модель АСУ конвертерної плавки/ В.С. Богушевський, Ю.В. Оробцев, Н.А. Рюмшин, Н.А. Сорокин: НПК «Київський інститут автоматики», 1996. 210 с.
13. Snigdha G., Bharath B. N., Viswanathan N. N. BOF process dynamics. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*. 2018. Vol. 128, no. 1-2. P. 17–33. URL: <https://doi.org/10.1080/25726641.2018.1544331>.
14. Охотський В. Б. Використання багатоканальних фурм у сталеплавильних процесах. Конвертер. Металургійна та гірничорудна промисловість. 2011. № 2. С. 28–29.
15. В. С. Богушевський, К. М. Зубова Модель управління конвертерною плавкою на основі нечіткої логіки. Матеріали ХХ міжнародної конференції з автоматичного управління Автоматика-2013, Миколаїв, 27 вересня 2013 р. С. 152.
16. Stepanets O., Mariiash Y. Model predictive control application in the energy saving technology of basic oxygen furnace. *Informatyka, Automatyka, Pomiar w Gospodarce i Ochronie Środowiska*. 2020. Vol. 10, no. 2. P. 70–74. URL: <https://doi.org/10.35784/iaggos.931>.
17. Petrosky-Nadeau N., Zhang L. Solving the Diamond-Mortensen-Pissarides model accurately. *Quantitative Economics*. 2017. Vol. 8, no. 2. P. 611–650. URL: <https://doi.org/10.3982/qe452>.
18. WHY CODESYS? THE RIGHT CHOICE FOR USERS AND DEVICE MANUFACTURERS ACROSS ALL INDUSTRIES URL: <https://www.codesys.com/the-system/why-codesys.html> (дата звернення: 31.03.2023).
19. Cai R.-Y., Zhou H.-C., Kou C.-H. Kalman rank criterion for the controllability of fractional impulse controlled systems. *IET Control Theory & Applications*. 2020. Vol. 14, no. 10. P. 1358–1364. URL: <https://doi.org/10.1049/iet-cta.2019.0027>.
20. Vinodh K. E., Jovitha J., Ayyappan S. Comparison of four state observer design algorithms for MIMO system. *Archives of Control Sciences*. 2013. Vol. 23, no. 2. P. 243–256. URL: <https://doi.org/10.2478/acsc-2013-0015>.
21. Costandin M., Dobra P., Gavrea B. A new proof of Ackermann's formula from control theory. *Studia Universitatis Babeş-Bolyai Matematica*. 2017. Vol. 62, no. 3. P. 325–329. URL: <https://doi.org/10.24193/subbmath.2017.3.05>.
22. Acker. Pole placement design for single-input systems ece.northwestern.edu/local-apps/matlabhelp/toolbox/control/ref/acker.html (дата звернення: 31.03.2023).
23. Moser I. Hooke-Jeeves revisited. 2009 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC), Trondheim, Norway, 18–21 May 2009. 2009. URL: <https://doi.org/10.1109/cec.2009.4983277>.

Mariash Yu.I., Stepanets O.V., Liubyskyi S.V. METHOD OF IMPLEMENTATION OF MODEL PREDICTIVE CONTROL OF THE BLOWING MODE PARAMETERS OF THE BASIC OXYGEN FURNACE PROCESS IN A PROGRAMMED LOGIC CONTROLLER

The article is aimed at the development of modern automatic control systems, which should provide high performance indicators in the conditions of variable operating modes of industrial equipment due to effective control structures and algorithms. The purpose of the study is to reduce the cost of basic oxygen furnace (BOF) steel, which is a consequence of the increase in the share of scrap metal due to the increase in the degree of post-burning of CO to CO₂ in the BOF cavity, by optimal control of the parameters of the duty mode using model-predictive control. The blowing mode of basic oxygen furnace as a technological object of control was considered, the problem of control blowing parameters in conditions of non-stationarity of the rate of metal decarburization was analyzed. The existing automatic control systems do not fully satisfy the requirements for the quality of the system's operation during software control of the parameters of the blowing mode and stabilization of disturbances. Significant nonstationarity of the rate of metal decarburization, stochasticity of measurement of technological parameters, interconnectedness of contours are the reasons for this situation. This implies the need to use advanced control systems, such as model-predictive control. The use of a model-predictive controller made it possible to improve the quality of control for the oxygen flow circuit by 39% and for control the CO₂ content in BOF gases by 97%; the maximum dynamic deviation of the CO₂ content in the BOF gases was reduced by 16.5% compared to the combined control system. The implementation of a software-hardware control system using a model-predictive control based on a programmable logic controller is considered. The obtained simulation results confirmed the improvement of the quality of the automatic control system in comparison with the combined control system, which suggests the feasibility of using an improved automatic control system using model-predictive control.

Key words: model-predictive control, optimal control, quadratic functional, basic oxygen furnace, state space model, control algorithm.