

УДК 681.5.013

doi:10.20998/2413-4295.2021.04.08

## МОДЕЛЬНО-ПРОГНОЗУЮЧИЙ РЕГУЛЯТОР ДУТТЄВОГО РЕЖИМУ КИСНЕВО-КОНВЕРТЕРНОГО ПРОЦЕСУ

**О. В. СТЕПАНЕЦЬ, Ю. І. МАРІЯШ\***

кафедра автоматизації теплоенергетичних процесів, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ, УКРАЇНА  
\*e-mail: mariahyuriy@gmail.com

**АНОТАЦІЯ** На сьогоднішній день в Україні та у світі актуальною є проблема енергозбереження та зниження вартості виплавленої сталі. Металургійні підприємства розвиваються в умовах жорсткої конкуренції, основна причина – українська продукція надзвичайно енергомістка через зношеність основних фондів та застарілі технологічні процеси. Киснево-конвертерний процес – це процес виробництва сталі з рідкого чавуну з додаванням сталевих брухтів в конвертер і продувкою киснем зверху крізь водоохолоджувальну фурму. Сьогодні отримання сталі за допомогою киснево-конвертерного процесу є найпопулярнішим у світі та набуває все більшого розповсюдження. Основним недоліком киснево-конвертерного способу є необхідність надання початкової кількості тепла (у вигляді рідкого чавуну) і як наслідок – обмеження в переробці металевих брухтів. Зниження собівартості киснево-конвертерної сталі досягається через підвищення частки металобрухту за рахунок підвищення ступеня допалювання CO до CO<sub>2</sub> в порожнині конвертера, шляхом оптимального керування параметрами дуттєвого режиму з використанням модельно-прогнозуючого керування. Принцип модельно-прогнозуючого керування базується на математичній моделі об'єкта. Такий підхід мінімізує функціонал, що характеризує якість процесу. У якості функціоналу було обрано лінійно-квадратичний функціонал. Запропоновано прогнозуючу модель з урахуванням обмежень на зміну положення фурми та пневматичного клапану подачі кисню. Встановлено, що зміна швидкості зневуглицювання металу залежить від відстані фурми до рівня спокійної ванни і впливає на ступень допалювання CO до CO<sub>2</sub>. Процес зневуглицювання є нестационарним, описується аперіодичною ланкою першого порядку, коефіцієнт передачі й постійна часу якої залежить від періоду плавки й тривалості продувки. Вдосконалено математичну модель дуттєвого режиму киснево-конвертерної плавки за рахунок врахування впливу інтенсивності дуття на процес зневуглицювання ванни, що дозволило підвищити точність та якість керування дуттям в умовах зміни витрати кисню під час продувки. Результати моделювання системи автоматичного керування показують, що модельно-прогнозуючий регулятор забезпечує необхідний рівень CO<sub>2</sub> в конвертерних газах при зміні витрати кисню на продувку.

**Ключові слова:** модельно-прогнозуюче керування; оптимальне керування; лінійно-квадратичний функціонал; киснево-конвертерний процес; модель в просторі станів

## A MODEL PREDICTIVE CONTROLLER OF THE BLOWING MODE DURING BASIC OXYGEN FURNANCE PROCESS

**O. STEPANETS, Yu. MARIASH\***

Department of Automation of heat-and-power engineering processes, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, UKRAINE

**ABSTRACT** Today in Ukraine and the world, the problem of energy saving and reducing the cost of smelted steel is state of art. Metallurgical enterprises are developing in conditions of fierce competition, the main reason is that Ukrainian products are extremely energy-intensive due to the depreciation of fixed assets and outdated technological processes. The basic oxygen furnace process is a process of producing steel from liquid cast iron with the addition of steel scrap to the converter and blowing oxygen from above through a water-cooling lance. Nowadays, the production of steel by BOF process is the most popular in the world and is becoming increasingly common. The main disadvantage of the basic oxygen furnace is the need to provide the initial amount of heat (in the form of liquid cast iron) and as a consequence - restrictions on the processing of scrap metal. Reducing the cost of basic oxygen furnace steel is achieved by increasing the share of scrap metal by increasing the degree of afterburning of CO to CO<sub>2</sub> in the cavity of the converter, by optimal control of the parameters of the blast mode using model-predictive control. The principle of model-predictive control is based on a mathematical model of the plant. This approach minimizes the functional that characterizes the quality of the process. The linear-quadratic functional was chosen. A forecasting model is proposed taking into account the constraint on changing the position of the lance and the pneumatic oxygen supply valve. It was found that the change in the rate of decarburization of the metal depends on the distance of the lance to the level of the quiet bath and affects the degree of afterburning of CO to CO<sub>2</sub>. The decarburization process is non-stationary, described by a first-order inertial model, the transfer coefficient and time constant of which depends on the melting period and the duration of the purge. The mathematical model of the blast mode of oxygen-converter melting has been improved, taking into account the influence of the blast intensity on the decarburization process of the bath, which allowed to increase the accuracy and quality of blast control in terms of changing oxygen flow during purging.

*The simulation results of the automatic control system show that the model-predictive regulator provides the required level of carbon dioxide in the converter gases when the flow rate of oxygen for purge changes.*

**Keywords:** Model Predictive Control; Optimal Control; Linear-Quadratic Functional; Basic Oxygen Furnace; State Space Model

## Вступ

Кисневий конвертер призначений для виробництва сталі з рідкого чавуну та сталевого брухту при продуванні киснем. Сьогодні отримання сталі за допомогою киснево-конвертерного процесу (ККП) є найпопулярнішим у світі та набуває все більшого розповсюдження. Згідно зі статистичними даними частка ККП у світі складає 71.6% станом на кінець 2019 р. (70.8% станом на 2018 р.) [1]. В останні роки актуальними методами зниження вартості киснево-конвертерної сталі є засвоєння проектної потужності агрегатів, підвищення стійкості футерівки конвертерів, оптимізація та автоматизація технологічного процесу. Основним недоліком ККП є обмежена можливість збільшення частки металевго брухту. Для виготовлення сталі, в агрегат завантажують металевий брухт з часткою до 30% від металевго частини, решта рідкий чавун, який є значно дорожчим. На сьогоднішній день відомо декілька способів підвищення частки брухту у шихті: попередній підігрів металевго брухту поза конвертером та допалювання монооксиду до діоксиду вуглецю у порожнині конвертера [2]. Гази, які відходять з конвертера, в основному складаються з CO, тому ефективним методом є допалювання CO до CO<sub>2</sub>, так як він не потребує додаткового устаткування, а для досягнення бажаних показників достатньо керувати параметрами дуттьового режиму, такими як положення фурми і витрати кисню. Одним із сучасних підходів до аналізу і синтезу систем керування, що базуються на математичних методах оптимізації, є теорія управління динамічними об'єктами з використанням прогнозуючих моделей - Model Predictive Control (MPC). Ідея оптимізації прогнозованої керуючої дії, яка складає основу MPC-методів, виникла в рамках двох незалежних, проте близьких по суті підходів [3]. Перший, Dynamics Matrix Control (DMC), розвивався зусиллями фахівців компанії Shell Oil в середині 60-х років, а другий - Model Algorithmic Control (MAC) - був розроблений французькими інженерами хімічної промисловості в кінці 60-х. На базі останнього підходу вперше був створений комерційний пакет програм IDCOM (Identification and Command), який певною мірою послужив прообразом сучасних методів управління з прогнозом. MPC-підхід використовує математичну модель об'єкта, початковими умовами для якої служить її поточний стан. При заданому управлінні виконується прогноз руху об'єкта на деякому кінцевому відрізку часу (горизонті прогнозу). Виконується оптимізація управління, метою якого служить наближення регулюючих змінних прогнозуючої моделі до відповідного заданого значення на горизонті прогнозу. Реалізується знайдене оптимальне управління і здійснюється вимір

(або відновлення по вимірним змінним) фактичного стану об'єкта на кінець кроку. Починаючи з наступного кроку прогноз та пошук оптимального керування повторюються для нового стану об'єкта. Основною перевагою MPC-підходу, що визначає його успішне використання в практиці побудови та експлуатації систем управління, служить відносна простота базової схеми формування зворотного зв'язку, що поєднується з високими адаптивними властивостями. Хоча 90% усіх контролерів використовують PID-закони [4], MPC швидко став популярним, особливо в хімічній та нафтопереробній промисловості, завдяки простоті алгоритму та використанню моделі в просторі станів і передавальних функцій. Деякі дослідники поєднують MPC з іншими підходами для генерації завдань локальним контролерам, такими як нечітка логіка [5], штучні нейронні мережі [6] та інші. Керування параметрами дуттьового режиму потребує застосування сучасних методів та є показовим для MPC підходу через нестационарність процесу зневуглецювання, тому використання модель-прогнозуючого керування користується популярністю у дослідників [7], є виправданим.

## Мета роботи

Метою роботи є зниження собівартості киснево-конвертерної сталі, що є наслідком підвищення частки металобрухту за рахунок підвищення ступеня допалювання CO до CO<sub>2</sub> в порожнині конвертера, шляхом оптимального керування параметрами дуттьового режиму за допомогою модельно-прогнозуючого регулятора.

## Виклад основного матеріалу

У сучасних умовах розвитку металургійного виробництва актуальними являються задачі по розробці ресурсозберігаючих технологічних режимів виплавки сталі, теоретичних і практичних аспектів нових енергозберігаючих способів продувки сталеплавильної ванни технологічним газом та підвищення ефективності теплової роботи печей. Одним із шляхів зниження витратних показників є утилізація фізичної та хімічної енергії газів, які відходять із конвертера. Використання частини утвореного конвертерного газу, в якості палива в порожнині конвертера для нагріву металевго брухту дозволить збільшити частку брухту (рис. 1) у шихті [8], що в результаті приведе до зниження собівартості киснево-конвертерної сталі. Найбільш розповсюдженим способом збільшення ступеня допалювання CO у порожнині конвертера є регулювання відстані фурми над рівнем спокійної ванни [9].

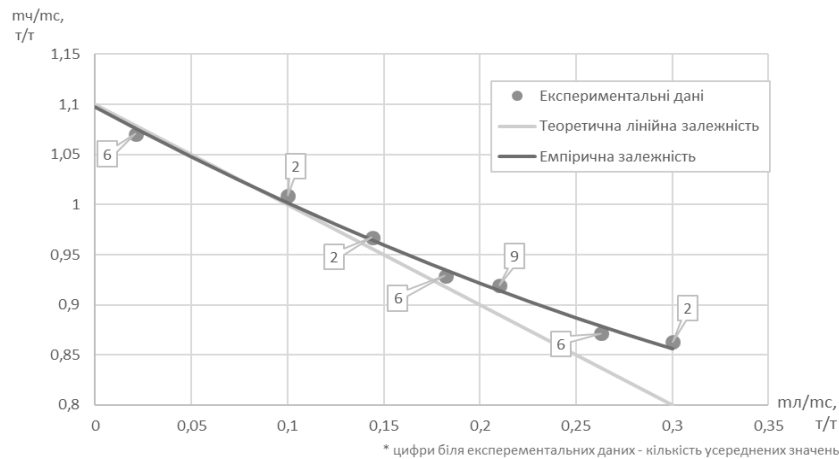


Рис. 1 – Залежність питомої (на тону сталеї) маси рідкого чавуну від питомої маси лому

Перехідний процес зміни швидкості зневуглицювання  $v_F$  від зміни відстані фурми до рівня спокійної ванни  $H$  описується інерційною ланкою першого порядку (1) виду[10]:

$$W_{v_c}(s) = \frac{k_{v_c}}{T_{v_c}s + 1}, \quad (1)$$

де  $k_{v_c} \frac{m}{xв \cdot м}$  – коефіцієнт передачі по каналу відстань фурми до рівня спокійної ванни – швидкість зневуглицювання;  $T_{v_c} c$  – стала часу.

Величина постійної часу – нестационарна та залежить від періоду плавки (рис.2).

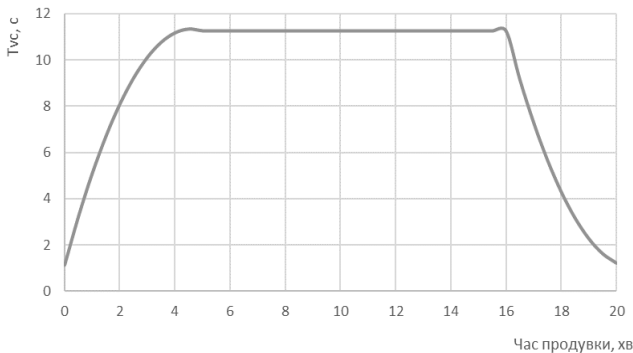


Рис. 2 – Залежність сталої часу від тривалості продувки

Зміна швидкості зневуглицювання приводить до зміни ступеня окиснення вуглецю до  $CO_2$  у порожнині конвертера. Цей процес також описується [10] інерційною ланкою першого порядку виду (2):

$$W_{\gamma_{CO_2}}(s) = \frac{k_{\gamma_{CO_2}}}{T_{\gamma_{CO_2}}s + 1}, \quad (2)$$

де  $k_{\gamma_{CO_2}} \frac{\%CO_2 \cdot xв}{m}$  – коефіцієнт передачі по каналу швидкість зневуглицювання – ступінь окиснення вуглецю до  $CO_2$ ;  $T_{\gamma_{CO_2}} c$  – стала часу.

За результатами експериментальних досліджень[10]  $T_{\gamma_{CO_2}} = 2,15 c$ ; коефіцієнт передачі по каналу швидкість зневуглицювання – ступінь окиснення вуглецю до  $CO_2$  визначається з балансового рівняння витрати дуття на продувку –  $k_{\gamma_{CO_2}} = 3,33 \frac{\%CO_2 \cdot xв}{m}$ .

Обидві ланки з'єднані послідовно (3) й передавальна функція системи в якій вхідна величина відстань фурми до рівня спокійної ванни, а вихідна – ступінь окиснення вуглецю до  $CO_2$ , буде мати вид:

$$W_{v_c}(s) = \frac{k_{v_c} \cdot k_{\gamma_{CO_2}}}{(T_{v_c}s + 1)(T_{\gamma_{CO_2}}s + 1)} = \frac{k_{\gamma_{CO_2}}^H}{(T_{v_c}s + 1)(T_{\gamma_{CO_2}}s + 1)}, \quad (3)$$

де  $k_{\gamma_{CO_2}}^H \frac{\%CO_2}{m}$  – коефіцієнт передачі по каналу відстань фурми до рівня спокійної ванни – швидкість зневуглицювання;

Лінійну прогнозуючу модель об'єкта управління можна представити у виді системи рівнянь:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} x_1'(t) \\ x_2'(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0, & 1 \\ -\frac{1}{T_{v_c}(t)T_{\gamma_{CO_2}}}, & -\frac{T_{v_c}(t) + T_{\gamma_{CO_2}}}{T_{v_c}(t)T_{\gamma_{CO_2}}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ \frac{1}{T_{v_c}(t)T_{\gamma_{CO_2}}} \end{bmatrix} H(t), \\ \gamma_{CO_2}(t) = k_{\gamma_{CO_2}}^H(t)x_1(t) \end{cases}$$

Одним з основних параметрів дуття є інтенсивність продувки, від якого залежить хід процесів окиснення домішок і шлакоутворення[11]. Ступінь допалювання  $CO_2$  в порожнині конвертера підвищується зі зростанням інтенсивності продувки, що пов'язано зі ростом швидкості зневуглицювання (рис. 3).

Технологічний об'єкт управління витрати кисню кисневого конвертера утворений фізичним з'єднанням пневмоприводу, регулюючого клапана (РК) та ділянкою трубопроводу з витратоміром, що представляє ємкість кисню, яка створює опір потоку

речовини та описується інерційною ланкою першого порядку зі запізненням (4):

$$W_{об}(s) = \frac{K_{об}}{T_{об}s + 1} e^{-\tau_{об}s}, \quad (4)$$

де  $K_{об} = \frac{\Delta y}{\Delta u} = \frac{600 \text{ м}^3/\text{хв}}{100\%PK} = 6 \frac{\text{м}^3/\text{хв}}{\%PK}$  – коефіцієнт

передачі;  $T_{об} = 0,62c$  – стала часу;  $\tau_{об} = 0,26c$  – запізнення. MPC-регулятор з квадратичним функціоналом при наявності обмежень розроблено за допомогою засобів пакету Matlab MPC Designer [12]. Синтез MPC-регулятора (рис. 4) було виконано використовуючи математичну модель дутьового режиму киснево-конвертерного процесу, яка описана вище.

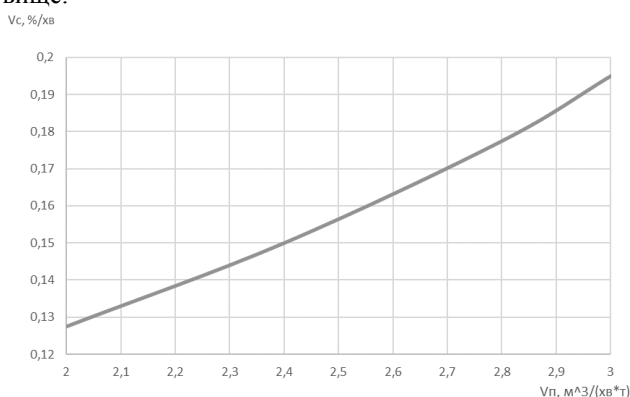


Рис. 3 – Залежність швидкості зневуглецювання від питомих витрат кисню у ванні

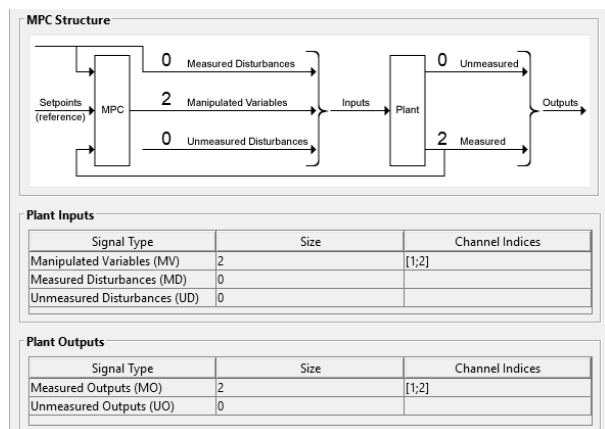


Рис. 4 – Структура модельно-прогнозуючого регулятора

Процедура моделювання виконувалась у середовищі Matlab Simulink. Було обрано алгоритм вирішення рівнянь ode23s (stiff/mod. Rosenbrock) зі зміною величиною кроку (variable-step). Абсолютна і відносна точність розрахунків – 0,0001. Структура моделі системи автоматичного регулювання киснево-конвертерним процесом з використанням MPC-стратегії наведена на рис. 5. Моделювання перехідних процесів під час продувки для 160-тонного конвертера

за алгоритмом регулювання витрати кисню, що націлений на забезпечення надійності роботи обладнання та регулювання положення фурми за енергозберігаючою технологією допалювання CO до CO<sub>2</sub> наведено на рис. 6.

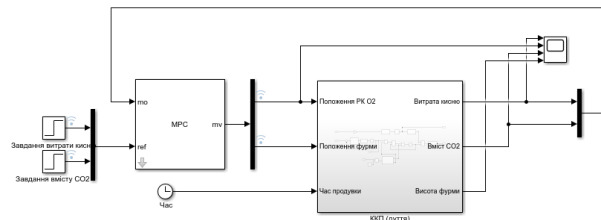


Рис. 5 – Модель системи керування на базі модельно-прогнозуючого регулятора

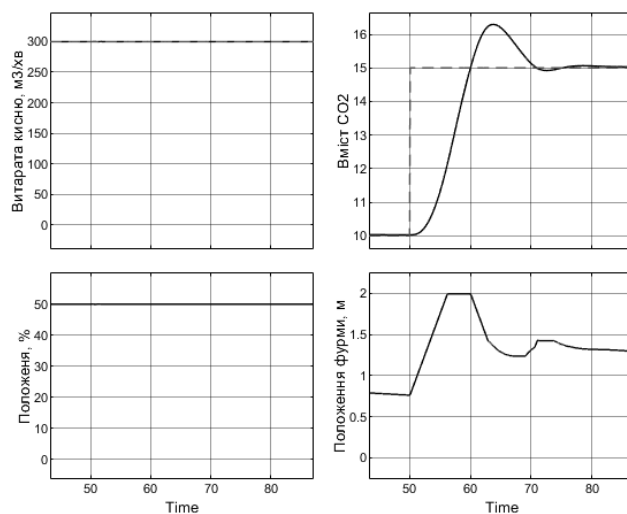


Рис. 6 – Перехідні процеси системи автоматичного регулювання параметрів дуття

На рис. 6 показані перехідні процеси системи керування з використанням модельно-прогнозуючого регулятора, в моделюванні завдання на витрату кисню встановлено 300м<sup>3</sup>/хв, початкове завдання на вміст CO<sub>2</sub> – 10%, на 50-й секунді продувки завдання встановлено на рівні 15%.

### Обговорення результатів

У результаті моделювання режиму продувки киснево-конвертерного процесу з використанням модельно-прогнозуючого регулятора перехідні процеси у випадку встановленого завдання на витрату кисню встановлено 300м<sup>3</sup>/хв та зміні завдання до вміст CO<sub>2</sub> з 10% на 15% забезпечили показники якості наведені в табл. 1. Процес зневуглецювання є нестационарним, описується інерційною ланкою першого порядку, коефіцієнт передачі й постійна часу якої залежить від періоду плавки й тривалості продувки. За рахунок застосування MPC підходу було досягнуто динамічне відхилення в 1,2% CO<sub>2</sub> з показником затухання 0,99 при цьому час виходу на режимне значення складає 21 секунду.

Таблиця 1 – Показники якості САР вмісту CO<sub>2</sub>

Показник якості	Величина
Статична похибка	0
Динамічна похибка	1,2%
Час регулювання	21 с
Показник затухання	0,99

Отримані перехідні процеси системи автоматичного регулювання киснево-конверторним процесом з використанням MPC-стратегії забезпечують вимоги поставленні до якості роботи системи.

### Висновки

Показано, що при визначеному хімічному складі чавуна тепловий режим процесу залежить від швидкості зневуглецювання, що залежить від відстані фурми до рівня спокійної ванни. Процес зневуглецювання є нестационарним, описується інерційною ланкою першого порядку, коефіцієнт передачі й постійна часу якої залежить від тривалості продувки, тому застосування класичних методів є складним. Керування параметрами дутьового режиму потребує застосування сучасних методів, а саме модельно-прогнозуючого регулятора. Згідно MPC-стратегії здійснюється прогноз поведінки об'єкта, виконується оптимізація отриманої структури, в результаті якої буде знайдено оптимальне управління киснево-конверторним процесом. У модельно-прогнозуючому керуванні в якості прогнозуючої моделі використовуються системи звичайних диференціальних рівнянь. Підхід передбачає мінімізацію лінійно-квадратичного функціоналу в режимі реального часу, який характеризує якість процесу регулювання.

### Список літератури

1. Basson E. *Steel Statistical Yearbook 2020 concise version*. Brussels, Belgium: Word Steel Association, 2020. 46 p.
2. Богушевский В. С., Сухенко В. Ю., Василенко Б. В. Управления конвертерной плавкой в режиме энергосберегающей технологии. *Проблеми енергоресурсозбереження в промисловому регіоні. Наука і практика : тези доп. II Всеукр. науково-практ. конф. молодих учених, спеціалістів, аспірантів* (Маріуполь, 11-12 травня 2016 р.). Маріуполь, 2016. С. 70–71.
3. Forbes M. G., Patwardhan R. S., Hamadah H., Gopaluni R. B. Model predictive control in industry: Challenges and opportunities. *IFAC-PapersOnLine*. 2015. Vol. 48. no. 8. P. 531–538. doi:10.1016/j.ifacol.2015.09.022.
4. Stepanets O., Mariiash Y. Analysis of influence of technical features of a pid-controller implementation on the dynamics of automated control system. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 3. no. 293. P. 60-69. doi: 10.15587/1729-4061.2018.132229.
5. Böhler L., Kraibl J., Görtler G., Kozek M. Fuzzy model predictive control for small-scale biomass combustion furnaces. *Applied Energy*. 2020. Vol. 276. P. 1-13. doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115339.
6. Shin Y., Smith R., Hwang S. Development of model predictive control system using an artificial neural network: A case study with a distillation column. *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 77. pp. 1-14, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124124.

7. Zhang J. Optimal Control Problem of Converter Steelmaking Production Process Based on Operation Optimization Method. *Discrete Dynamics in Nature and Society*. 2015. Vol. 2015. Article ID 483674. 13 pages. doi: 10.1155/2015/483674.
8. Backman J., et al. Methods and Tools of Improving Steel Manufacturing Processes: Current State and Future Methods. *International Federation of Automatic Control PapersOnLine*. 2019. Vol. 52(13). P. 1174–1179. doi:10.1016/j.ifacol.2019.11.355.
9. Богушевский В. С., Зубока К. М. Математичне моделювання конвертерного процесу за енергозберігаючою технологією. *Технологічні комплекси*. 2013. 2. С. 32-38.
10. Stepanets O., Mariiash Y. Model predictive control application in the energy saving technology of basic oxygen furnace. *Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska*. 2020. Vol. 10. no. 2. P. 70-74. doi: 10.35784/iapgos.931.
11. Bogushevskiy V. S., et al. System for the BOF Process Control. *The advanced Science open access Journal*. 2013. Vol. 5. P. 23-27.
12. MathWorks. Design Controller Using MPC Designer. URL: <https://www.mathworks.com/help/mpc/gs/introduction.html?ue>. (accessed 01.11. 2021).

### References (transliterated)

1. Basson E. *Steel Statistical Yearbook 2020 concise version*. Brussels, Belgium. Word Steel Association, 2020. 46 p.
2. Bohushevskiy V. S., Sukhenko V. Yu., Vasilenko B. V. Upravleniya konvertternoy plavkoi v rezhyme energhosberehaiushchei tekhnolohyy [Converter smelting control in energy-saving technology mode]. *Problemy energhoresursozberezhennia v promyslovomu rehioni. Nauka i praktyka: tezy dop. II Vseukr. naukovu-prakt. konf. molodykh uchenykh, spetsialistiv, aspirantiv* (Mariupol, 11-12 travnia 2016 r.) [Problems of energy saving in the industrial region. Science and practice: thesis II All-Ukrainian scientific-practical conf. young scientists, specialists, graduate students (Mariupol, May 11-12, 2016)]. Mariupol, 2016, pp. 70-71.
3. Forbes M. G., Patwardhan R. S., Hamadah H., Gopaluni R. B. Model predictive control in industry: Challenges and opportunities. *IFAC-PapersOnLine*, 2015, Vol. 48, no. 8, pp. 531–538, doi:10.1016/j.ifacol.2015.09.022.
4. Stepanets O., Mariiash Y. Analysis of influence of technical features of a pid-controller implementation on the dynamics of automated control system. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2018, Vol. 3, no. 293, pp. 60-69, doi: 10.15587/1729-4061.2018.132229.
5. Böhler L., Kraibl J., Görtler G., Kozek M. Fuzzy model predictive control for small-scale biomass combustion furnaces. *Applied Energy*, 2020, Vol. 276, pp. 1-13, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115339.
6. Shin Y., Smith R., Hwang S. Development of model predictive control system using an artificial neural network: A case study with a distillation column. *Journal of Cleaner Production*, 2020, Vol. 77, pp. 1-14, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124124.
7. Zhang J. Optimal Control Problem of Converter Steelmaking Production Process Based on Operation Optimization Method. *Discrete Dynamics in Nature and Society*. 2015. Vol. 2015. Article ID 483674. 13 pages. doi: 10.1155/2015/483674.

- Society*, 2015, Vol. 2015, Article ID 483674, 13 pages, doi: 10.1155/2015/483674.
8. Backman J., et al. Methods and Tools of Improving Steel Manufacturing Processes: Current State and Future Methods. *International Federation of Automatic Control PapersOnLine*, 2019, Vol. 52(13), pp. 1174–1179, doi:10.1016/j.ifacol.2019.11.355.
  9. Bohushevskiy V. S., Zuboka K. M. Matematychni modeliuvannya konverternogo protsesu za enerhozberihaiuchoiu tekhnolohiieiu [Mathematical modeling of the converter process by energy-saving technology]. *Technological complexes*, 2013, Vol. 2, p. 32-38.
  10. Stepanets O., Mariash Y. Model predictive control application in the energy saving technology of basic oxygen furnace. *Informatyka, Avtomatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska*, 2020, Vol. 10, no. 2, pp. 70-74, doi: 10.35784/iapgos.931.
  11. Bogushevskiy V. S., et al. System for the BOF Process Control. *The advanced Science open access Journal*, 2013, Vol. 5, pp. 23-27.
  12. MathWorks. Design Controller Using MPC Designer. Available at: <https://www.mathworks.com/help/mpc/gs/introduction.html?ue>. (accessed 1.11. 2021).

#### Відомості про авторів (About authors)

**Степанець Олександр Васильович** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», доцент кафедри автоматизації теплоенергетичних процесів; м. Київ, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4444-0705>; e-mail: [stepanets.av@gmail.com](mailto:stepanets.av@gmail.com).

**Stepanets Oleksandr** –Ph. D., Docent, associate professor, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Heat power engineer department, АТЕР, Kyiv, Ukraine; ORCID: : <http://orcid.org/0000-0003-4444-0705>; e-mail: [stepanets.av@gmail.com](mailto:stepanets.av@gmail.com).

**Маріяш Юрій Ігорович** – аспірант, Національний технічний університет «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», доцент кафедри автоматизації теплоенергетичних процесів; м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0812-8960>; e-mail: [mariahyuriy@gmail.com](mailto:mariahyuriy@gmail.com).

**Mariash Yuriy** – Ph. D. Student, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Heat power engineer department, АТЕР, Kyiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0812-8960>; e-mail: [mariahyuriy@gmail.com](mailto:mariahyuriy@gmail.com).

*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

Степанець О. В., Маріяш Ю. І. Модельно-прогнозуючий регулятор дутьєвого режиму киснево-конвертерного процесу. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». 2021. № 4 (10). С. 61-66. doi:10.20998/2413-4295.2021.04.08.

*Please cite this article as:*

Stepanets O., Mariash Y. A model predictive controller of the blowing mode during basic oxygen furnace process. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2021, no. 4 (10), pp. 61-66, doi:10.20998/2413-4295.2021.04.08.

*Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

Степанец А. В., Маріяш Ю. И. Модельно-прогнозирующий регулятор дутьевого режима кислородно-конвертерного процесса. *Вестник Национального технического университета «ХПИ». Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». 2021. № 4 (10). С. 61-66. doi:10.20998/2413-4295.2021.04.08.

**АННОТАЦІЯ** На сьогоднішній день в Україні і мирі актуальна проблема енергосбереження і зниження стоимости виплавленної сталі. Металургічні підприємства розвиваються в умовах жорсткої конкуренції, основною причиною – українська продукція незвичайно енергоємна із-за износу основних фондів і застарілих технологічних процесів. Кислородно-конвертерний процес – це процес виробництва сталі із рідкого чугуна з додаванням сталюго лома в конвертер і продувкою киснем зверху через водоохлаждающую фурму. Сьогодні отримання сталі з допомогою кислородно-конвертерного процесу є найпопулярнішим в світі і набуває все більшого поширення. Основним недоліком кислородно-конвертерного процесу є необхідність надання початкового кількості тепла (в формі рідкого чугуна) і як наслідок – обмеження в переробці металургічного лома. Зниження собівартості кислородно-конвертерної сталі досягається за рахунок збільшення частки металолома за рахунок збільшення ступеня дозигання CO до CO<sub>2</sub> в порожнині конвертера шляхом оптимального управління параметрами дутьєвого режиму з використанням модельно-прогнозованого управління. Принцип модельно-прогнозованого управління оснований на математичній моделі об'єкта. Таким чином мінімізується функціонал, що характеризує якість процесу. Як функціонал був вибрано лінійно-квадратичний функціонал. Представлено прогнозирующую модель з урахуванням обмежень на зміну положення фурми і пневматичного клапана подачі кисню. Встановлено, що зміна швидкості обезуглероживания металу залежить від відстані фурми до рівня спокійної ванни і впливає на ступінь дозигання CO до CO<sub>2</sub>. Процес обезуглероживания є нестационарним, описується аперіодическим звуком першого порядку, коефіцієнт передачі і постійне значення якого залежить від періоду плавки і тривалості продувки. Удосконалена математична модель дутьєвого режиму кислородно-конвертерної плавки, за рахунок урахування впливу інтенсивності дутья на процес обуглецивания ванни, що дозволило підвищити точність і якість управління дутьем в умовах зміни витрати кисню во время продувки. Результати моделювання системи автоматичного управління показують, що модельно-прогнозуемый регулятор забезпечує потрібний рівень вуглекислого газу в конвертерних газах при зміні витрати кисню на продувку.

**Ключевые слова:** модельно-прогнозируемое управление; оптимальное управление; линейно-квадратичный функционал; кислородно-конвертерный процесс; модель в пространстве состояний

Надійшла (received) 26.11.2021