

О. В. СТЕПАНЕЦЬ, Ю. І. МАРІЯШ

СИНТЕЗ МОДЕЛЬНО-ПРОГНОЗУЮЧОГО РЕГУЛЯТОРА РЕЖИМУ ДУТТЯ КИСНЕВО-КОНВЕРТЕРНОГО ПРОЦЕСУ

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 дуттьового режиму з використанням модельно-прогнозуючого керування. Синтезовано оптимальну систему керування параметрами дуттьового режиму киснево-конвертерної плавки за принципом зворотного зв'язку на базі модельно-прогнозуючого керування при використанні лінійно-квадратичного функціоналу.

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

O. STEPANETS, Yu. MARIASH

MODEL–PREDICTIVE BLOWING MODE CONTROLLER SYNTHESIS FOR THE OXYGEN-CONVERTER PROCESS

The purpose of the research was to find a solution for a decrease in the cost price of the basic oxygen furnace steel. It is conditioned by an increase in the scrap metal portion due to an increase in the CO to CO₂ afterburn degree in the basic oxygen furnace cavity according to the optimal model predictive control of the parameters of the blowing mode. The optimal parameter control system was synthesized for the blowing mode of the oxygen-converter melting on the basis of the feedback based on the model-predictive control using the linear-quadratic functional and it enabled a simultaneous control of the blowing intensity and the lance position when programmatically changing the task for the oxygen consumption and CO₂ content improving also the control quality and energy saving during the melting process due to an increased afterburn degree during the CO to CO₂ conversion that is a consequence of an increased portion of the scrap metal. Closed CO to CO₂ afterburn degree control systems were improved by the synthesis of the model-predictive controller taking into consideration process limitations imposed on the shifting rate of controlling mechanisms, improving thus the process control quality in the case of the limitations. The suggested solution enables certain process control quality improvement under the conditions of process limitations. A comparative investigation of the operation of the model – predictive controller and combined control system with PID–controllers showed that the obtained transition processes of the automatic control of the blowing mode for the basic oxygen furnace melting using the automatic model-predictive controller provided ISE values for the oxygen consumption loop equal to 5577 and the CO₂ content equal to 43 in basic oxygen furnace gases with a maximum dynamic deviation of the CO₂ content in converter gases equal to 0.95 %. The use of the model-predictive controller allowed us to improve the control quality for the oxygen consumption loop by a factor of 1.63 CO₂ and by a factor of 32.5 for the CO₂ content control loop in converter gases. A maximum dynamic deviation of the CO₂ content in converter gases was reduced by 16.55 % in comparison to that in the combined control system equipped with PID-controllers.

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

Вступ

Виробництво сталі – це складний процес, який потребує застосування комплексу технологічного, енергетичного та транспортного устаткування, кожне з яких вимагає відповідної автоматизації. Сьогодні отримання сталі за допомогою киснево-конвертерного процесу (ККП) є найпопулярнішим у світі та набуває все більшого розповсюдження. Згідно даних *Steel Statistical Yearbook 2020* [1] частка ККП у світі складає 71,6 % станом на кінець 2019 р. Українська металургійна продукція надзвичайно енергомістка через зношеність основних фондів та застарілі технологічні процеси. Для виготовлення сталі в кисневий конвертер (КК) завантажують металобрухт об'ємом до 30 % від металеві частини. Решта – рідкий чавун, який є дорожчим у порівнянні з металобрухтом [2] та потребує доменного виробництва. Тому актуальною проблемою ККП є збільшення частки лому при виплавці конвертерної сталі.

Наразі відомо кілька способів підвищення частки брухту у шихті: попередній підігрів металевого брухту поза конвертером та допалювання монооксиду до діоксиду вуглецю у порожнині

конвертера [3]. Гази, які відходять з конвертера, в основному складаються з CO, тому ефективним методом є допалювання CO до CO₂, 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 керування динамічними об'єктами з використанням прогнозуючих моделей – модельно-прогнозуюче керування (МПК, англ. Model Predictive Control, MPC). Ідея оптимізації прогнозованої керуючої дії, яка складає основу МПК-методів, виникла в рамках двох незалежних, проте близьких по суті підходів [4]. Перший, *Dynamics Matrix Control (DMC)*, розвивався зусиллями фахівців компанії *Shell Oil* [5], а другий – *Model Algorithmic Control (MAC)* – був розроблений французькими інженерами хімічної промисловості [6]. На базі останнього підходу вперше був створений комерційний пакет програм *IDCOM (Identification and Command)*, який певною мірою послужив прообразом сучасних методів управління з прогнозом.

Ідеологія модельно-прогнозуючого (МП) підходу полягає у наступній схемі управління динамічними об'єктами за принципом зворотного зв'язку [7]: розглядається математична модель об'єкта (відносно проста), 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 керування, метою якого служить наближення прогнозу прогнозуючої моделі до відповідного заданого значення (уставки) на горизонті керування; реалізується знайдене оптимальне керування і здійснюється вимір (або відновлення по виміряним змінним) фактичного стану об'єкта на кінець кроку; горизонт прогнозу зсувається на крок вперед, і даний алгоритм повторюється. Хоча більшість контролерів (близько 90 %) використовують ПД (Пропорційно-інтегрально-диференціальний)-закони [8] та нечітку логіку [9], все більше дослідників впроваджують *MPC* для досягнення більшої якості керування. Деякі дослідники поєднують *MPC* з іншими підходами для генерації завдань локальним контролером, такими як нечітка логіка, штучні нейронні мережі [10] та інші. Саме тому *Model Predictive Control* набуває популярності в хімічній та нафтопереробній промисловості завдяки простоті алгоритму та використанню моделі в просторі станів і передавальних функцій.

Мета роботи

Метою роботи є підвищення частки металобрухту за рахунок підвищення ступеня допалювання CO до CO_2 в порожнині конвертера, шляхом оптимального керування параметрами дуттьового режиму з використанням МПК.

Для досягнення поставленої мети вирішувались наступні завдання дослідження:

- досліджено особливості технологічного процесу режиму продувки киснево-конвертерної плавки;
- досліджено підходи до синтезу систем керування та розроблено математичну модель системи керування процесом продувки киснево-конвертерної плавки;
- синтезовано модельно-прогнозуючий контролер та проведено моделювання системи керування дуттьового режиму киснево-конвертерної плавки.

Виклад основного матеріалу

Сучасний киснево-конвертерний процес є високотехнологічним і автоматизованим виробництвом, яке обладнане великою кількістю контрольно-вимірювальної та регулюючої апаратури. Виплавка сталі – це інтенсивний процес, тому оператор конвертера фізично не має можливості опра-

цювати великий об'єм інформації, вибрати найкращий режим та оперативно втрутитись у хід технологічного процесу плавки. Важливими параметрами режиму дуття є інтенсивність продувки, висота фурми над рівнем спокійної ванни, глибина проникнення, тиск та кількість струменів кисню [3].

Для побудови автоматизованої системи керування (АСК) ККП використовують різноманітні підходи: застосування статичних і динамічних прогнозованих моделей (рекомендації щодо доведення плавки за результатами проміжних вимірів та історії «вдалих» плавок); контроль вихідних параметрів плавки [11]; динамічне керування продувкою. Наприклад, у статті [12] використання нейронних мереж зі зворотнім поширенням дозволяє провести аналіз великих наборів даних, щоб забезпечити оптимізацію процесу плавки. Оптимальне динамічне керування режимом дуття з використанням прогнозуючих моделей [13] дозволило авторам покращити отримання наприкінці продувки металу з певним хімічним складом і температурою, що сприяє підвищенню якості сталі, однак підвищення температури металу призводить до перегріву елементів водоохолоджуючих конструкцій та зниження продуктивності агрегату.

Використання частини утвореного конвертерного газу в якості палива в порожнині конвертера для розплавлення металевого брухту дозволить збільшити частку брухту (рис. 1) у шихті, що в результаті призведе до зниження собівартості киснево-конвертерної сталі.

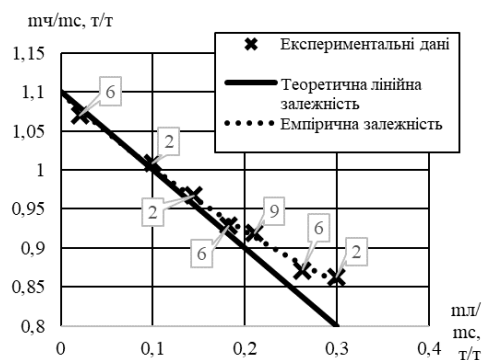


Рис. 1 – Залежність питомої (на тону сталі) маси рідкого чавуну від питомої маси лому (2, 6, 9 – кількість усереднених точок)

Враховуючи, що гази, які відходять з конвертера, складаються приблизно з 90 % CO і 10 % CO_2 , а питома теплота згоряння CO становить 12,7 МДж/м³ [14], великі резерви в збільшенні частки брухту криються в підвищенні ступеня згоряння CO в порожнині конвертера. Динамічна залежність зміни ступеня окиснення вуглецю до CO_2 від зміни відстані фурми до рівня спокійної ванни описується у вигляді керованої канонічної форми моделі в просторі станів (1):

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} x_1'(t) \\ x_2'(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0, & 1 \\ -\frac{1}{T_{1\gamma_{CO_2}}^H(\tau)}, & -\frac{T_{2\gamma_{CO_2}}^H(\tau)}{T_{1\gamma_{CO_2}}^H(\tau)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} H(t), \\ \gamma_{CO_2}(t) = \begin{bmatrix} k_{\gamma_{CO_2}}^H & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix}. \end{cases} \quad (1)$$

Перехідні процеси зміни ступеня окиснення вуглецю до CO₂ в залежності від зміни положення пневмоклапану дуття кисню можна представити у

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} x_1'(t) \\ x_2'(t) \\ x_3'(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{T_{1\gamma_{CO_2}}^{u_{O_2}}(\tau)} & -\frac{T_{3\gamma_{CO_2}}^{u_{O_2}}(\tau)}{T_{1\gamma_{CO_2}}^{u_{O_2}}(\tau)} & -\frac{T_{2\gamma_{CO_2}}^{u_{O_2}}(\tau)}{T_{1\gamma_{CO_2}}^{u_{O_2}}(\tau)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u_{v_{O_2}}(t), \\ \gamma_{CO_2}(t) = \begin{bmatrix} k_{\gamma_{CO_2}}^{u_{O_2}} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{bmatrix}. \end{cases} \quad (2)$$

Виконано синтез модельно-прогнозуючого регулятора з квадратичним функціоналом при наявності обмежень режиму дуття киснево-конвертерної плавки. Розробка модельно-прогнозуючого регулятора складається з таких основних компонентів: побудова прогнозуючої моделі; визначення функціоналу, що характеризує якість регулювання; рішення оптимізаційної задачі – пошук оптимальної стратегії керування, що забезпечує мінімум функціоналу. Структурна схема

$$J_k(\bar{y}, \Delta \bar{u}) = \sum_{j=1}^P \left[(y_{k+j} - r_{k+j})^T R (y_{k+j} - r_{k+j}) + \Delta u_{k+j-1}^T Q \Delta u_{k+j-1} \right], \quad (3)$$

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:



Рис. 2 – Структурна схема спостерігача стану системи

вигляді керованої канонічної форми моделі в просторі станів (2):

спостерігача стану системи наведена на рис. 2, в якості спостерігача було використано спостерігач Луенбергера (рис. 3).

Перевага використання спостерігача Луенбергера – наявність додаткового контуру корекції стану при виникненні розбіжності між моделлю та реальною поведінкою об'єкту.

Якість управління охарактеризуємо за допомогою лінійно-квадратичного функціоналу (3):

$$R = \begin{bmatrix} 0,2 & 0 \\ 0 & 1,5 \end{bmatrix}; \quad Q = \begin{bmatrix} 0,2 & 0 \\ 0 & 0,03 \end{bmatrix}; \quad P = 35.$$

У результаті було синтезовано систему автоматичного регулювання режиму дуття киснево-конвертерного процесу з використанням модельно-прогнозуючого регулятора.

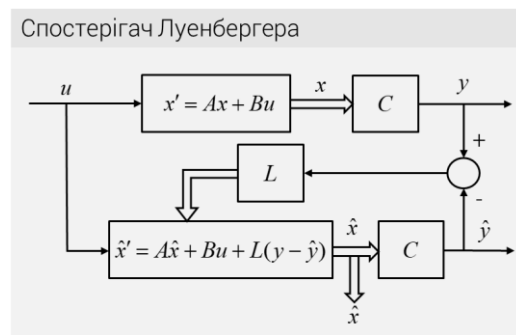


Рис. 3 – Модель спостерігача стану Луенбергера

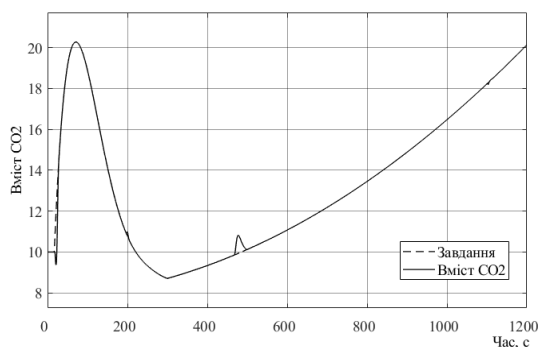


Рис. 4 – Перехідні процеси системи автоматичного регулювання режиму дуття киснево-конвертерної плавки з використанням модельно-прогнозуючого регулятора

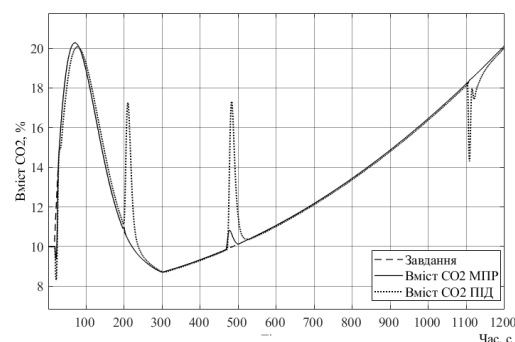


Рис. 5 – Перехідні процеси системи автоматичного регулювання режиму дуття киснево-конвертерної плавки

Обговорення результатів

Було виконано моделювання перехідних процесів (рис. 4) режиму дуття тривалістю 20 хв для 160-тонного конвертера з модельно-прогнозуючим регулюванням вмісту CO_2 (табл. 1) у димових газах та витрати кисню для задачі програмного керування та з комбінованої системи регулювання (рис. 5) з ПІД-регулятором.

Таблиця 1 – Показники якості САР вмісту CO_2

Показники якості	Збурення – вихід
Статична похибка	0
Динамічна похибка	-0,058
Час регулювання, с	38
Показник затухання	1
Перерегулювання, %	0
<i>Integral of the square error (ISE)</i>	0,031

Отримані перехідні процеси системи автоматичного регулювання режиму дуття киснево-конвертерної плавки з використанням 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 %. 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 %.

Застосування модельно-прогнозуючого регулятора дозволило покращити якість регулювання для контуру витрати кисню у $9075/5577 = 1,6$ раз та для контуру регулювання вмісту CO_2 у конвертерних газах у $1397/43 = 32,5$ раз; максимальне динамічне відхилення вмісту CO_2 у конвертерних газах було знижено на 17 % у порівнянні з комбінованою системою регулювання з комбінованою системою. Отримані показники якості роботи САР

задовольняють вимогам, поставленим до якості роботи системи, звідки випливає доцільність застосування удосконаленої системи автоматичного регулювання з використанням модельно-прогнозуючого керування.

Висновки

Синтезовано модельно-прогнозуючий регулятор дуттьового режиму ККП, складовими якого є спостерігач стану Луенбергера, алгоритмічно заданий лінійно-квадратичний функціонал і метод оптимізації нульового порядку, який вирішує задачу пошуку оптимального керування. Результати моделювання показали, що розроблений модельно-прогнозуючий регулятор забезпечив *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 %. Застосування модельно-прогнозуючого регулятора дозволило покращити якість регулювання для контуру витрати кисню у 1,6 разів та для контуру регулювання вмісту CO_2 у конвертерних газах – у 32,5 разів; максимальне динамічне відхилення вмісту CO_2 у конвертерних газах було знижено на 17 % у порівнянні з комбінованою системою регулювання.

Застосування системи модельно-прогнозуючого керування, яка спрямована на енергоефективне засвоєння тепла за рахунок покращення точності та якості регулювання, забезпечує підвищення ступеня допалювання CO до CO_2 в порожинні конвертера шляхом пошуку оптимального положення фурми над рівнем спокійної ванни та пневмоклапану витрати кисню, що дозволить збільшити частку брухту у шихті на 2,7% і, як наслідок, може призвести до зниження собівартості киснево-конвертерної сталі.

Список літератури

1. Basson E. A cross-section of steel industry statistics 2010–2019. – Brussels, Belgium: World Steel Association, 2020. – 46 p. – URL: <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Steel-Statistical-Yearbook-2020-concise-version.pdf?x25904> (дата звернення 04.10.2022).
2. Ціни на сталеливарну сировину продовжують зниження. – 08.02.2021. – URL: <https://www.expert.kiev.ua/tsini-na>

- stalelivarnu-sirovinu-prodovzhuyut-znizhennya/ (дата звернення: 04.10.2022).
3. Степанець О. В. Модельно-прогнозуючий регулятор дугтєвого режиму киснево-конвертерного процесу / О. В. Степанець, Ю. І. Маріяш // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – 2021. – № 4(10). – С. 61–66. – ISSN 2079-5459 (print). – DOI: <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2021.04.08>.
 4. Forbes M. G. Model Predictive Control in Industry: Challenges and Opportunities / M. G. Forbes, Rohit S. Patwarghan, Hamza Hamadah, R. Bhushan Gopaluni // IFAC-PapersOnLine. – 2015. – Vol. 48, Iss. 8. – pp. 531–538. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.09.022>.
 5. Cutler C. R. Dynamic matrix control – A computer control algorithm / C. R. Cutler, B. L. Ramaker // Joint Automatic Control Conference, August 13–15, San Francisco, California. – 1980. – Vol. 1. – Paper WP5-B. – DOI: <https://doi.org/10.1109/JACC.1980.4232009>.
 6. Richalet J. Model predictive heuristic control: Applications to industrial processes / J. Richalet, A. Rault, J. L. Testud, J. Papon // Automatica. – 1978. – Vol. 14, Iss. 5. – pp. 413–428. – DOI: [https://doi.org/10.1016/0005-1098\(78\)90001-8](https://doi.org/10.1016/0005-1098(78)90001-8).
 7. Stepanets O. V. Model Predictive Control Toolbox Design for Nonstationary Process / O. V. Stepanets, Yu. I. Mariash // KPI Science News. – 2021. – No. 1. – pp. 42–49. – DOI: <https://doi.org/10.20535/kpissn.2021.1.217992>.
 8. Stepanets O. Analysis of influence of technical features of a pid-controller implementation on the dynamics of automated control system / O. Stepanets, Y. Mariash // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2018. – Vol. 3, No. 2(93). – pp. 60–69. – DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.132229>.
 9. Novikov P. Selecting a method for the parametric adaptation of pi-controller in the control systems of boiler assemblies at thermal power stations with supercritical parameters / P. Novikov, O. Shtifzon, O. Bunke, S. Batiuk // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2022. – Vol. 2, No. 2(116). – pp. 61–68. – DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.254116>.
 10. Shin Y. Development of model predictive control system using an artificial neural network: A case study with a distillation column / Y. Shin, R. Smith, S. Hwang // Journal of Cleaner Production. – 2020. – Vol. 277. – No. 124124. – 14 p. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124124>.
 11. Богущевский В. С. АСУ ТП конвертерного виробництва та спеціальної електрометалургії : моногр. / В. С. Богущевский, А. А. Ларионов, І. Д. Буга. – Київ: НПК «Київський інститут автоматики», 1997. – 288 с.
 12. Nenchev B. Metallurgical Data Science for Steel Industry: A Case Study on Basic Oxygen Furnace / B. Nenchev, C. Panwisawas, X. Yang, J. Fu, Z. Ding, Q. Tao, J.-C. Gebelin, A. Dunsmore, H. Dong, M. Li, B. Tao, F. Li, J. Ru, F. Wang // Steel research international. – 2022. – Vol. 93, Iss. 12, No. 2100813. – DOI: <https://doi.org/10.1002/srin.202100813>.
 13. Zhang J. Optimal Control Problem of Converter Steelmaking Production Process Based on Operation Optimization Method / J. Zhang // Discrete Dynamics in Nature and Society. – 2015. – Vol. 2015. – Article ID 483674. – 13 p. – DOI: <https://doi.org/10.1155/2015/483674>.
 14. Богущевский В. С. АСУ ТП виробництва сталі в конвертерах / В. С. Богущевский, Н. А. Рюмшин, Н. А. Сорокин. – Київ: НПО «Промавтоматика», 1991. – 177 с.
- Access mode: <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Steel-Statistical-Yearbook-2020-concise-version.pdf?x25904> (accessed 04 October 2022).
2. (2021), *Ciny na stalelyvarnu syrovynnu prodovzhuyut' znyzhennja* [Prices for steel raw materials continue to decline]. – URL: <https://www.expert.kiev.ua/tsini-na-stalelivarnu-sirovinu-prodovzhuyut-znizhennya/> (accessed 04 October 2022).
 3. Stepanets, O. and Mariash, Yu. (2021), “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 technologies*, No. 4(10), pp. 61–66, ISSN 2079-5459 (print), <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2021.04.08>.
 4. Forbes M. G., Patwarghan Rohit S., Hamadah Hamza, Gopaluni R. Bhushan (2015), “Model Predictive Control in Industry: Challenges and Opportunities”, *IFAC-PapersOnLine*, Vol. 48, Iss. 8, pp. 531–538, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.09.022>.
 5. Cutler C. R., Ramaker B. L. (1980), “Dynamic matrix control – A computer control algorithm”, *Joint Automatic Control Conference, August 13–15, San Francisco, California*, Vol. 1, Paper WP5-B, DOI: <https://doi.org/10.1109/JACC.1980.4232009>.
 6. Richalet J., Rault A., Testud J. L., Papon J. (1978), “Model predictive heuristic control: Applications to industrial processes”, *Automatica*, Vol. 14, Iss. 5, pp. 413–428, [https://doi.org/10.1016/0005-1098\(78\)90001-8](https://doi.org/10.1016/0005-1098(78)90001-8).
 7. Stepanets O. V., Mariash Yu. I. (2021), “Model Predictive Control Toolbox Design for Nonstationary Process”, *KPI Science News*, No. 1, pp. 42–49, <https://doi.org/10.20535/kpissn.2021.1.217992>.
 8. Stepanets O., Mariash Y. (2018), “Analysis of influence of technical features of a pid-controller implementation on the dynamics of automated control system”, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 3, No. 2(93), pp. 60–69, <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.132229>.
 9. Novikov P., Shtifzon O., Bunke O., Batiuk S. (2022), “Selecting a method for the parametric adaptation of pi-controller in the control systems of boiler assemblies at thermal power stations with supercritical parameters”, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 2, No. 2(116), pp. 61–68, <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.254116>.
 10. Shin Y., Smith R., Hwang S. (2020), “Development of model predictive control system using an artificial neural network: A case study with a distillation column”, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 277, No. 124124, 14 p., <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124124>.
 11. Bogushevskiy V. S., Laryonov A. A., Buga I. D. (1997), *ASU TP konverternogo vyrobnyctva ta special'noi' elektrometallurgii* [ACS TP of converter production and special electrometallurgy], NPK “Kyiv's'kyi instytut avtomatyky”, Kiev, 288 p.
 12. Nenchev B., Panwisawas C., Yang X., Fu J., Ding Z., Tao Q., Gebelin J.-C., Dunsmore A., Dong H., Li M., Tao B., Li F., Ru J., Wang F. (2022), “Metallurgical Data Science for Steel Industry: A Case Study on Basic Oxygen Furnace”, *Steel research international*, Vol. 93, Iss. 12, No. 2100813, <https://doi.org/10.1002/srin.202100813>.
 13. Zhang J. (2015), “Optimal Control Problem of Converter Steelmaking Production Process Based on Operation Optimization Method”, *Discrete Dynamics in Nature and Society*, Vol. 2015, Article ID 483674, 13 p., <https://doi.org/10.1155/2015/483674>.
 14. Bogushevskiy V. S., Rjumshyn N. A., Sorokyn N. A. (1991), *ASU TP vyrobnyctva stali v konverterah* [ACS TP of steel production in converters], NPO “Promavtomatyka”, Kiev, 177 p.

References (transliterated)

1. Basson E. (2020), *A cross-section of steel industry statistics 2010–2019*, Word Steel Association, Brussels, Belgium, 46 p.

Надійшла (received) 15.11.2022

Відомості про авторів / About the Authors

Степанець Олександр Васильович (Stepanets Olexandr) – кандидат технічних наук, доцент, КПП ім. Ігоря Сікорського, доцент кафедри автоматизації енергетичних процесів; м. Київ; e-mail: stepanets.av@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4444-0705>.

Маріяш Юрій Ігорович (Mariash Yurii) – асистент, КПП ім. Ігоря Сікорського, кафедра автоматизації енергетичних процесів; м. Київ; тел.: (097) 613–71–84; e-mail: mariahyurii@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0812-8960>.