

АНОТАЦІЯ

Маріяш Ю.І. Модельно – прогнозує автоматичне керування режимом дуття кисневого конвертера з енергоефективним засвоєнням тепла. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2022.

Дисертація 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 дуттьового режиму з використанням модельно-прогнозуючого керування.

Об'єкт дослідження – процеси керування дуттьовим режимом киснево-конвертерної плавки.

Предмет дослідження – модельно-прогнозуюча система керування параметрами дуттьового режиму, що забезпечує підвищення ступеня допалювання CO до CO₂ в порожнині конвертера.

У роботі використовувалися методи теорії автоматичного керування, апарат передавальних функцій, модель в просторі станів, імітаційне комп'ютерне моделювання, метод оптимального параметричного синтезу, методи лінійного програмування, метод послідовних наближень, чисельні методи рішення диференціальних рівнянь.

У дисертаційній роботі вдосконалено математичну модель дуттьового 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, увівши запропоновану модель безпосередньо до контуру керування параметрами дуттьового режиму.

Вперше 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, яка дозволила одночасно керувати інтенсивністю дуття та положенням фурми при програмній зміні завдання на витрату кисню та вмісту CO_2 , а також підвищити якість керування та енергозбереження при плавці, за рахунок збільшення ступеня допалювання CO до CO_2 , що є наслідком підвищення частки металобрухту.

Подальший розвиток отримало використання замкнутих систем керування ступенем допалювання CO до CO_2 шляхом синтезу модельно-прогнозуючого регулятора з урахуванням технологічних обмежень швидкості переміщення регулюючих органів, що дозволило підвищити якість керування процесом при наявності обмежень. Запропоноване рішення дозволяє підвищити якість керування процесом в умовах технологічних обмежень.

У роботі вирішувались наступні завдання дослідження: досліджено особливості технологічного процесу режиму продувки киснево-конвертерної плавки, вплив параметрів дуття на собівартість сталі; проаналізовано існуючі підходи до керування параметрами режиму продувки киснево-конвертерної плавки; встановлено ключові фактори, що впливають на процес продувки та проведено ідентифікацію моделі дуттьового режиму; досліджено підходи до синтезу систем керування та розроблено математичну модель системи керування процесом продувки киснево-конвертерної плавки; синтезовано модельно-прогнозуючий регулятор та проведено моделювання в системі керування дуттьового режиму киснево-конвертерної плавки; запропоновано технічну реалізацію на базі сучасних засобів автоматизації.

Було розглянуто дуттєвий режим киснево-конвертерної плавки як технологічний об'єкт керування, виконано аналіз проблематики регулювання

параметрів дуття в умовах нестационарності швидкості зневуглецювання металу. Під час продувки конвертерної ванни система керування вирішує завдання синхронізації процесів рафінування та нагріву металу при надійному дуттьовому режимі, а в кінці продувки – завдання визначення моменту її припинення. Завдання на витрату дуття під час продування вибирається з гами протилежних вимог, примирити які неможливо без взаємних поступок. У традиційних способах інтенсивністю продувки керують за інформацією про початкові умови і швидкості декарбонізації або по температурі конвертерних газів. Однак дотримання цієї умови знижує продуктивність агрегату і надійність керування через перегрів елементів водоохолоджуючих конструкцій. При статичному керуванні 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. 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.

Наявні системи автоматичного керування не задовольняють в повній мірі вимогам, що висуваються до якості роботи системи при програмному керуванні параметрами режиму дуття та стабілізації збурень. У першу чергу причиною цього є складність ідентифікації об'єкту керування. Значна нестационарність швидкості зневуглецювання металу, стохастичність вимірювання технологічних параметрів, взаємопов'язаність контурів є причинами такої ситуації. Багато методів підвищення якості функціонування, що пропонуються класичною теорією автоматичного керування, не можуть забезпечити якісної роботи системи регулювання при програмному керуванні

параметрами режиму дуття та стабілізації збурень. Звідси випливає необхідність застосування удосконалених систем автоматичного регулювання, до яких відноситься модельно-прогнозуюче керування.

Порівняльне дослідження роботи модельно-прогнозуючого регулятора та комбінованої системи регулювання з ПІД-регуляторами показало, що отримані перехідні процеси системи автоматичного регулювання режиму дуття киснево-конвертерної плавки з модельно-прогнозуючого регулятора автоматичного регулювання забезпечили ІСЕ 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 1,63 рази та для контуру регулювання вмісту CO_2 у конвертерних газах у 32,5 раз; максимальне динамічне відхилення вмісту CO_2 у конвертерних газах було знижено на 16,55% у порівнянні з комбінованою системою регулювання з ПІД-регуляторами.

Розглянуто реалізацію програмно-апаратної системи керування з використанням модельно-прогнозуючого регулятора на базі програмованого логічного контролера. Для реалізації модельно-прогнозуючого регулятора було обрано провідне, незалежне від виробника програмне інтегроване середовище розробки програмного забезпечення систем автоматизації CODESYS V3.5, що стандартизоване згідно міжнародного стандарту ІЕС 61131-3. Був запрограмований функціональний блок прогнозуючої моделі, спостерігача стану об'єкту, лінійно-квадратичний функціонал та реалізований метод оптимізації Хука-Дживса на мові програмування програмованих логічних контролерів (ПЛК) структурований текст (Structured Text) та функціональна блок-схема (Function Block Diagram). Процедура імітаційного моделювання виконувалась у режимі реального часу в середовищі Matlab Simulink (модель процесу) та SoftPLC CODESYS V3.5 (модельно-прогнозуючий регулятор). Комунікація між Matlab Simulink та CODESYS

V3.5 виконується за допомогою протоколу OPC UA. Отримані результати моделювання підтвердили підвищення якості роботи системи автоматичного керування в порівнянні з комбінованою системою регулювання з ПД-регуляторами, звідки випливає доцільність застосування удосконаленої системи автоматичного регулювання з використанням модельно-прогнозуючого керування.

Розроблені в ході виконання роботи структура та алгоритми оптимального керування параметрами дугтьового режиму з використанням модельно-прогнозуючого керування забезпечать підвищення якості керування параметрами дугтя, сприятимуть зменшенню енерговитрат та підвищенню екологічності продувки за рахунок підвищення ступеня допалювання CO до CO₂, а саме зниження собівартості киснево-конвертерної сталі. Використання замкнених систем керування ступенем допалювання CO до CO₂ і окиснення заліза, шляхом врахування технологічних обмежень на частку окисів заліза в шлаку з використанням лінійно-квадратичного функціоналу, при керуванні вмісту CO₂ у конвертерних газах дозволяє підвищити якість керування параметрами дугтьового режиму. Комплексний підхід до вирішення задачі інтелектуального керування процесом продувки ванни забезпечить збільшення частки брухту під час плавки без зміни технологічного процесу, тим самим дозволить інтенсифікувати виробництво сталі та знизити її вартість. У масштабах країни це сприятиме виконанню стратегічної державної програми по енергозбереженню. Алгоритмічне забезпечення прогнозуючих регуляторів може бути передано в конвертерні цехи. Розроблені методи, структури та алгоритми керування можуть дати поштовх для подальшого розвитку теорії автоматичного керування та її прикладного застосування.

Ключові слова: модельно-прогнозуюче керування, оптимальне керування, лінійно-квадратичний функціонал, киснево-конвертерний процес, модель в просторі станів, алгоритм керування, показники якості функціонування, динамічні характеристики.

ABSTRACT

Mariiash Yurii I. A model predictive controller of the blowing mode during basic oxygen furnace process with energy-efficient heat absorption. – The manuscript.

The dissertation for a Doctor of Philosophy on the specialty 151 “Automation and computer integrated technologies” – National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, 2022.

The dissertation is aimed at the development of modern automatic control systems, which should provide high performance quality 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 oxygen-converter 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 converter cavity, by optimal control of the parameters of the duty mode using model predictive control.

The object of research is the processes of control the blowing mode during basic oxygen furnace process.

The subject of the study is a model predictive control system of the parameters of the blowing mode, which ensures an increase in the degree of afterburning of CO to CO₂ in the converter cavity.

The work used the methods of the theory of automatic control, the apparatus of transfer functions, a state space model, simulated computer modelling, the method of optimal parametric synthesis, methods of linear programming, the method of successive approximations, numerical methods of solving differential equations.

In the dissertation, the mathematical model of the blowing mode of basic oxygen furnace process was improved, taking into account the influence of the intensity of blasting on the process of decarburization of the bath, which made it possible to increase the accuracy and quality of blasting control in the conditions of changes in the oxygen consumption during purging.

For the first time, an optimal control system for the parameters of blowing mode during basic oxygen furnace process was synthesized based on the principle of feedback with model-predictive control using a linear-quadratic functional, which allowed simultaneous control of the blowing intensity and the position of the lance, as well as to improve the quality of control and energy saving during melting, due to the increase in the degree of post-burning of CO to CO₂, which is a consequence of the increase in the proportion of scrap metal.

Further development was achieved by the use of closed control systems for the degree of post-burning of CO to CO₂, through the synthesis of a model predictive controller taking into account the technological saturation of the speed of movement of regulatory bodies, which allowed to improve the quality of process control in the presence of saturation.

The following research tasks were solved in the work: the study of the technological process of the blowing mode of the basic oxygen furnace, the influence of blowing parameters on the cost of steel were investigated; the existing approaches to controlling the parameters of the purging regime of the basic oxygen furnace are analysed; the key parameters affecting the purging process were established and the model of the dust regime was identified; approaches to the synthesis of control systems were investigated and a mathematical model of the control system for the purging process of the basic oxygen furnace was developed; a model predictive controller was synthesized and simulations were carried out in the control system of the blowing mode of basic oxygen furnace.

The blowing mode of basic oxygen furnace as a technological control object was considered, and the problem of control blowing parameters in conditions of nonstationary of the metal decarburization rate was analysed. During the purging of the converter bath, the control system solves the task of synchronizing the processes of refining and heating the metal in a reliable jet mode, and at the end of the purging – the task of determining the moment of its termination. The automated control system of the technological process of basic oxygen furnace provides automated control of the object in real time according to the target criterion, which covers the

main technological and technical and economic aspects of production. During the blow-out task, the blow-out is chosen from a range of opposing demands that cannot be reconciled without mutual concessions. In traditional methods, the intensity of purging is controlled by information about the initial conditions and the rate of decarbonization or the temperature of the converter gases. The management criterion is the prevention of emissions. However, compliance with this condition reduces unit productivity and control reliability due to overheating of elements of water-cooling structures. With the static control of the smelter, they strive to ensure that the given values of the mass fraction of carbon and temperature are obtained, given by the average values of the mass fractions of carbon of the bath, which is oxidized to CO in the basic oxygen furnace cavity due to oxygen blowing, iron and manganese oxides in the final slag. The height of the lance has optimal limits. If the nozzle is positioned too high, the kinetic energy of the jets is lost on the way to meeting the bath, so the oxygen jets will not react ("surface blowing"); at an excessively low position ("hard blowing"), the emission of metal droplets with gases increases and the tuyere is damaged, the formation of slag is significantly slowed down due to a decrease in the amount of FeO in the slag.

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. First of all, the reason for this is the difficulty of identifying the control object. Significant nonstationary of the rate of metal decarburization, stochasticity of measurement of technological parameters, interconnectedness of contours are the reasons for this situation. Many methods of improving the quality of functioning offered by the classical theory of automatic control cannot ensure the high-quality operation of the control system during software control of the parameters of the blowing mode and stabilization of disturbances. This implies the need to use advanced automatic control systems, which include model predictive control.

A comparative study of the operation of the model predictive controller and the combined regulation system with PID controller showed that the obtained

transient processes of the system of automatic control of the blowing mode of the basic oxygen furnace from the model predictive controller provided ISE for the circuit of oxygen consumption - 5577 and the content of CO₂ - 43; the maximum dynamic deviation of the CO₂ content in converted gases was 0.95%. The use of a model predictive control made it possible to improve the quality of control for the oxygen consumption by 1.63 times and for the control of CO₂ content by 32.5 times; the maximum dynamic deviation of CO₂ content was reduced by 16.55% in comparison with the combined control system with PID controller.

The implementation of a software-hardware control system using a model predictive controller based on a programmable logic controller is considered. The leading, manufacturer-independent IEC 61131-3 automation software for engineering control systems CODESYS V3.5 SP18 was chosen to implement the model predictive controller. The functional block of the predictive model, the object state observer, the linear-quadratic functional and the Hooke-Jives optimization method were programmed in the programming language of programmable logic controllers (PLC), Structured Text and a Function Block Diagram. The simulation procedure was performed in real time in the MATLAB Simulink environment (process model) and Soft PLC CODESYS V3.5 SP18 (model predictive controller). Communication between MATLAB Simulink and CODESYS V3.5 SP18 is performed using the OPC UA protocol. The obtained simulation results confirmed the improvement of the quality of the automatic control system in comparison with the combined control system with PID controllers, which suggests the feasibility of using an improved automatic control system using model predictive control.

The structure and algorithms for optimal control of the parameters of the blowing mode developed during the work using model predictive control will ensure the improvement of the quality of control of the blowing parameters, contribute to the reduction of energy consumption and increase the environmental friendliness of blowing due to the increase in the degree of afterburning of CO to CO₂, namely, the reduction of the cost of basic oxygen furnace steel. The use of closed systems for controlling the degree of CO afterburning to CO₂ and iron oxidation, by taking into

account technological limitations on the share of iron oxides in slag using a linear-quadratic functional, when controlling the content of CO₂ in basic oxygen furnace gases allows to improve the quality of controlling of the blowing parameters. A comprehensive approach to solving the problem of intelligent management of the bath purging process will ensure an increase in the proportion of scrap during melting without changing the technological process, thereby allowing to intensify steel production and reduce its cost. On a national scale, this will contribute to the implementation of the strategic state program on energy conservation. The developed methods, structures and control algorithms can give impetus to the further development of the theory of automatic control and its practical application.

Keywords: model predictive control, optimal control, linear-quadratic functional, basic oxygen furnace, state space model, control algorithm, performance indicators, dynamic characteristics.