

- Cairo, Egypt, 2010. pp. 319-323. (Eng.)
8. Edelman B., Brandi W. Risk, Information, and Incentives in Online Affiliate Marketing. *Journal of Marketing Research*, 2015, no. 1, pp. 1-12. (Eng.)
 9. Snyder P., Kanich C. Characterizing fraud and its ramifications in affiliate marketing networks, *Journal of Cybersecurity*, vol. 2, no. 1, 2016, pp. 71-81. (Eng.)
 10. Hourigan M. History of Affiliate Marketing [INFOGRAPHIC]. Available at: <http://blog.shooboxed.com/history-of-affiliate-marketing-infographic/> (accessed 28 March 2017). (Eng.)
 11. Prussakov G. British Affiliate Marketing Comprises 6% of UK Internet Economy. Available at: <http://www.amnavigator.com/blog/2013/01/22/british-affiliate-marketing-comprises-6-of-uk-internet-economy/> (accessed 28 March 2017). (Eng.)
 12. Samosseiko D. The partnerka – What is it, and why should you care? *Virus Bulletin Conference*, 2009, pp. 115-120. (Eng.)

Рецензент: С.В. Гулаков
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 28.03.2017

УДК 004.451.25:[622.788:621.867]

© Лобов В.И.¹, Лобова К.В.²

НЕЧІТКЕ УПРАВЛІННЯ РЕЖИМОМ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ЗАЛІЗОРУДНИХ КОТУНІВ НА КОНВЕЄРНІЙ МАШИНИ

Встановлено, що система з нечітким контролером забезпечує зменшення в середньому на 2 м³/год споживання природного газу, більш рівномірно забезпечує газопроникність шару котунів, що призводить до збільшення швидкості фільтрації газового потоку та інтенсифікації процесу теплообміну в шарі котунів. Використання атомно-емісійної спектроскопії котунів збільшує продуктивність конвеєрної випалювальної машини на 2,5%.

Ключові слова: конвеєр, котуни, термічна обробка, нечітке управління, моделювання, результати.

Лобов В.И., Лобова К.В. Нечеткое управление режимом термической обработки железорудных окатышей на конвейерной машине. Установлено, что система с нечетким контроллером обеспечивает уменьшение в среднем на 2 м³/ч потребление природного газа, более равномерно обеспечивает газопроницаемость слоя окатышей, что приводит к увеличению скорости фильтрации газового потока и интенсификации процесса теплообмена в слое окатышей. Использование атомно-эмиссионной спектроскопии окатышей увеличивает производительность конвейерной обжиговой машины на 2,5%.

Ключевые слова: конвейер, окатыши, термическая обработка, нечеткое управление, моделирование, результаты.

V.Y. Lobov, K.V. Lobova. Fuzzy control of the iron ore pellets thermal treatment on a conveying car. The purpose of this article is to solve the problem of fuzzy control of iron ore pellets thermal treatment on a conveyor roasting machine, to build an automated control system of conveyor roasting machine and perform simulation and to present the results of research. According to the structural scheme of the fuzzy control an automated

¹ канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Криворізький національний університет», м. Кривий Ріг, lobov.vjcheslav@yandex.ua

² студент, ДВНЗ «Криворізький національний університет», м. Кривий Ріг, karinalobova409@gmail.com

control system is proposed for being modelled. This is done by using the software MATLAB. The use of atomic emission spectroscopy determines the percentage of the major elements in iron ore pellets considering the main process parameters. This article uses an automated system of fuzzy control of iron ore pellets firing on a conveyor roasting machine with the introduction of atomic emission spectroscopy of the pellets. Development and practical implementation of fuzzy control will improve their quality by taking into account the basic parameters of thermal treatment of pellets such as speed of movement of the grate trucks, gas flow rate, the height of the layer of pellets and the venting speed of the pellets layer with gas-air flow, humidity, average diameter, the basicity and the iron composition in the pellets. The expediency of the developed method of using automated fuzzy control system of iron ore pellets firing on a conveyor roasting car has been proved. The system with fuzzy controller provides a reduction on average $2 \text{ m}^3/\text{h}$, which is 0,3% of natural gas consumption as compared to the existing systems. This provides more uniform gas permeability of the layer of pellets, which leads to filtration rate increase of the gas flow and to heat exchange intensification in the layer of pellets. It makes it possible to introduce the atomic emission spectroscopy of non-burned pellets and to increase the productivity of conveyor roasting machine by 2,5%. At the same time the resistance of technological equipment (pallets) increases, due to more uniform distribution of the thermal field.

Keywords: conveyor, pellets, thermal treatment, fuzzy control, modelling, results.

Постановка проблеми. Аналіз стану автоматизації процесів термічної обробки залізородних котунів на конвеєрній випалювальній машині (КВМ) показує, що наявні системи керування не завжди дозволяють врахувати реальні потреби виробництва, зокрема не вирішуються завдання зниження питомої витрати енергоносіїв при коливаннях продуктивності КВМ, не здійснюється стабілізація температур у шарі котунів при коливаннях їх характеристик і не забезпечується потрібна продуктивність за живленням. Недостатня ефективність відомих методів керування та технічних засобів їх реалізації призводить до зниження техніко-економічних показників процесу термічної обробки залізородних котунів (ТОЗК). Враховуючи те, що впровадження сучасних технічних засобів дуже часто пов'язане зі значними фінансовими витратами, які не завжди можна вважати виправданими, особливої актуальності набувають питання вдосконалення наявних систем автоматизації шляхом застосування сучасних методів та алгоритмів керування без заміни технічних засобів автоматизації.

В умовах дії неконтрольованих збурень, під впливом яких змінюються параметри об'єкта, для досягнення екстремальних значень критеріїв якості функціонування КВМ доцільно використовувати автоматизовані системи, в яких здійснюється адаптація моделі та алгоритму керування до змін параметрів об'єкта та зовнішніх впливів. В останні роки для вирішення подібних завдань широко застосовуються сучасні методи теорії автоматичного керування, зокрема інтелектуальні методи та технології (штучні нейронні мережі, нечітка логіка, генетичні алгоритми), методи синергетичного та робастного керування. Вибір конкретної методології для вирішення завдань розробки систем керування повинен здійснюватися з урахуванням специфічних властивостей реальних систем. Тому тема статті є актуальною задачею, має наукове і практичне значення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Існує значна кількість робіт, присвячених теоретичному та експериментальному дослідженню процесів ТОЗК на КВМ. У цих роботах запропоновані математичні моделі, що описують статистику та динаміку тепло- і масообміну в шарі котунів, досліджені статичні та динамічні характеристики конкретних КВМ за різними каналами, визначені залежності якісних показників випалених котунів від режимних параметрів процесу [1-4]. Значна увага дослідників приділена питанням аналітичного моделювання процесу випалювання котунів [5-10], що дозволило розробити надійні методи розрахунку теплотехнічних параметрів КВМ. В останній час присвячується велика кількість робіт періодичному здійсненню ідентифікації об'єкта керування на основі отриманої моделі з виконанням прогнозування, використання нечіткої логіки, нейро-нечітких моделей, прогнозуючих нелінійних моделей (Nonlinear Model Predictive Control, NMPC), Adaptive Network-based Fuzzy Inference System (ANFIS-моделей) [11-15]. Методи керування з використанням прогнозуючої моделі належать

до класу алгоритмів, в яких динамічна модель використовується для прогнозування та оптимізації процесу в режимі реального часу. Перевагами цих методів є відносна простота схеми формування зворотного зв'язку та високі адаптивні властивості, що дозволяють здійснювати квазіоптимальне керування нелінійними нестационарними об'єктами зі складною структурою в режимі реального часу з урахуванням обмежень на керуючі та вихідні змінні. Позитивний досвід практичного використання методів керування з прогнозуючими моделями дозволяє розглядати їх як альтернативу використанню класичних параметричних ПІ- та ПІД-регуляторів [11]. У роботі [12] досліджується інверсна моделі нейроконтролера для системи інверсного управління технологічним процесом, а в іншій [14] – використовуються нечіткі регулятори для керування технологічним процесом ТОЗК. Для моделювання розподілу температур у шарі котунів використовуються числові методи та метод кінцевих елементів, відповідно до якого виконано декомпозицію, тобто розбиття досліджуваної ділянки шару котунів на елементарні мінімальні блоки кубічної форми, що надає можливість змодельовати процеси теплообміну всередині шару котунів [5, 15]. Розроблені принципи керування температурним режимом процесу ТОЗК з використанням прогнозуючих ANFIS-моделей надані в літературі [4, 16]. У статтях [6, 7] обговорюється методика синтезу регуляторів для багатовимірних оборотних лінійних динамічних об'єктів. У той же час, нечітка технологія завойовує все більше прихильників серед розробників систем управління. Розроблена в 1965 році професором Лотфі Заде [17] нечітка логіка в широкому асортименті з'явилися у різних пристроях: бритви, пілососи, камери, тощо та в нечітких системах [18]. Бурхливе зростання ринку нечітких систем управління вказує на доцільне використання методів штучного інтелекту, зокрема нечітких нейронних мереж FIS для автоматизації процесів керування ТОЗК на КВМ на основі спеціалізованих нечітких контролерів.

Формулювання мети роботи. Метою даної статті є розв'язати задачу побудови нечіткого управління режимом ТОЗК, побудувати автоматизовану систему керування КВМ, виконати моделювання і представити результати досліджень.

Виклад основного матеріалу. Автоматизована система з нечіткою логікою є зручними для пояснення одержуваних за їхньою допомогою висновків, але вони не можуть автоматично здобувати знання для використання їх у керуючих механізмах. Необхідність розбиття універсальних множин на окремі області, як правило, обмежує кількість вхідних змінних у таких системах невеликим значенням. Нейронна мережа прямого поширення може апроксимувати будь-яку систему, що заснована на нечітких правилах. Для налаштування нечіткої системи необхідно провести її навчання. Навчальні дані встановимо в рамках, допустимих для технологічного процесу випалу залізорудних котунів. Тому розробка бази таких нечітких правил, щоб сконструйований на їх основі модуль управління нечіткої мережі FIS при отриманні вхідних сигналів (параметрів режимів обробки) генерував коректні (що мають найменшу погрішність) вихідні сигнали (температура в вакуум-камері).

Основні параметри процесу ТОЗК – швидкість руху колосникових візків (м/с), висота шару (мм), витрати газу ($\text{н}\cdot\text{м}^3/\text{год}$), швидкість продуву (м/с), вологість (%), середній діаметр котунів (мм), основність та склад Fe в котунах (%). Ці параметри варіюються в різних діапазонах для різних вакуум-камер. Для практичної реалізації адаптивного управління процесом ТОЗК створюємо базу правил для нечіткої автоматизованої системи управління КВМ з вісьмома вхідними параметрами і одним виходом. Для цього потрібні дані для навчання системи у вигляді множин:

$$X_1(i), X_2(i), X_3(i), X_4(i), X_5(i), X_6(i), X_7(i), X_8(i); t_1(i); i = 1, 2, 3, \dots,$$

де $X_1(i)$ – швидкість руху колосникових візків, U_n ; $X_2(i)$ – висота шару, H ; $X_3(i)$ – витрати газу, C_g ; $X_4(i)$ – швидкість продуву, w ; $X_5(i)$ – вологість, m ; $X_6(i)$ – середній діаметр котунів, d ; $X_7(i)$ – основність, b ; $X_8(i)$ – склад Fe в котунах, Fe ; $t_1(i)$ – очікуване значення температури, T .

Для вирішення завдання формування нечітких правил для мережі FIS виконуємо наступні кроки: розподіляємо простір вхідних і вихідних сигналів на області, визначаємо міру приналежності для різних параметрів процесу ТОЗК, з навчальної вибірки, отриманої в наслідок експерименту, вибираємо мінімальне та максимальне значення кожного з параметрів, що необхідні для автоматизованої системи управління КВМ, і зведемо у таблицю.

Таблиця

Мінімальне і максимальне значення параметрів

Параметри процесу термічної обробки залізорудних котунів								Температура в камері, °С
Швидкість руху візків, м/с	Висота шару, мм	Витрати газу, н·м ³ /с	Швидкість продуву шару котунів, м/с	Вологість, %	Середній діаметр котунів, мм	Основність, од.	Склад Fe в котунах, %	
x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	t
0,72-2,52	100-500	740-770	0,3-1,2	4-10	8-16	0,1-1	30-70	1150-1250

Моделювання системи автоматичного керування процесом ТОЗК на КВМ проведено за допомогою пакета прикладних програм MATLAB відповідно до структурної схеми, що надана на рис. 1. Котуни потрапляють до зони сушки КВМ, де під дією температури проходять сушіння для подальшого випалу. Оскільки котуни не рівномірно розподілені, вони містять різноманітну висоту шару, густину та вологість. Для рівномірного випалу та оптимального результату витрат палива, необхідно постійно підтримувати потрібну температуру. Для регулювання температури змінюють тиск на клапанах газу або/та повітря. При переміщенні палет КВМ під час виконання технологічної операції ТОЗК у режимі реального часу здійснюють вхідний експрес-контроль якості котунів на місці їх входження на палети у КВМ шляхом атомно-емісійної спектроскопії, за допомогою якої визначається хімічний склад неспечених котунів, наявність і кількість в них певних мікроелементів: Са (кальцій), Fe (залізо), Na (натрій), Si (кремній), S (сірка) та деякі інші. При цьому додатково визначається наявність в них певних хімічних з'єднань FeO, СаО, SiO₂, тощо. Значення цих параметрів подаються на вхід блока 1.

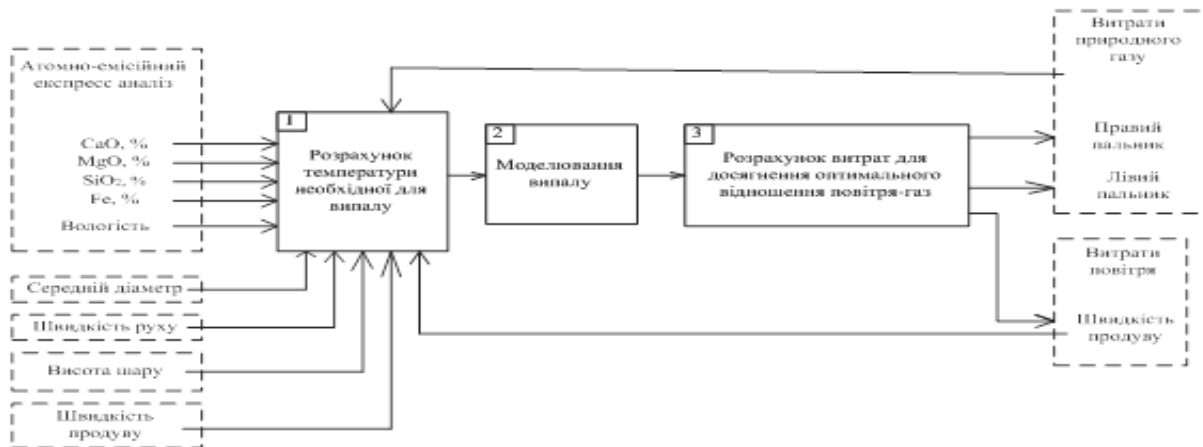


Рис. 1 – Структурна схема САК зони ТОЗК

Експрес-контроль якості котунів проводиться шляхом атомно-емісійної спектроскопії – це метод визначення хімічного складу речовини за спектром випромінювання його атомів під впливом джерела збудження (лазер), і при цьому виконують їх автоматизований збір та обробку. У методі атомно-емісійної спектроскопії збудження лазером забезпечує високий дозвіл для елементного аналізу мікроелементів у котунах за допомогою LIBS системи і раманівської спектроскопії комбінаційного розсіювання світла. Це є найпоширеніший експресний високочутливий метод ідентифікації та кількісного визначення мікроелементів домішок у котунах. Важливою перевагою такого способу в порівнянні з іншими оптичними - спектральними, а також багатьма хімічними та фізико-хімічними методами аналізу, є можливість безконтактного, експресного та кількісного визначення великої кількості елементів в широкому інтервалі концентрацій з задовільною точністю.

На вхід блоку 1 подаються дані про середній діаметр котунів, що отримуються з цеху огрудування, дані про швидкість конвеєрних палет, висоту шару та швидкість газо-повітряного продуву шару котунів на палетах КВМ. У блоку 1, що надано на рис. 1, виконується розрахунок температури, необхідної для термічної обробки котунів по математичним виразам (1) та (2), що надані в роботі [4] і пропонують процес теплообміну в шарі котунів при перехресному русі потоків газів та матеріалу описувати наступною системою диференціальних рівнянь

$$-\frac{\partial t_z}{\partial Z} \cdot \frac{1}{\eta} = t_z - t_m; \quad (1)$$

$$\frac{\partial t_m}{\partial X} \cdot \frac{1}{\xi} = t_z - t_m, \quad (2)$$

де t_z, t_m – температура газу та матеріалу, відповідно, η та ξ - безрозмірні параметри, які є функціями температури:

$$\eta = \frac{a_F \cdot (1 - \varepsilon) \cdot 6 \cdot H}{c_z \cdot m \cdot d \cdot \omega_0}; \quad \xi = \frac{a_F \cdot 6 \cdot \Delta L_i}{c_m \cdot \rho_m \cdot d_m \cdot u \cdot m}, \quad (3)$$

в яких позначено: c_z, c_m – питомі теплоємності газу та матеріалу котунів, відповідно; m – безрозмірний коефіцієнт масивності часток шару; d_m – діаметр часток матеріалу; u – швидкість руху стрічки; а через $Z = z/H$ та $X = x/\Delta L_i$ позначені безрозмірні переміщення за висотою шару та довжиною зони, відповідно (ΔL_i – довжина i -ої зони КВМ, протягом якої швидкість фільтрації теплоносія в шарі ω_{0i} стала).

Модель, що представлена математичними виразами (1) і (2), доповнюється початковими умовами, які уявляють собою функції розподілу температури котунів у шарі в початковий момент часу (на вході в зону), та граничними умовами, які уявляють собою функції розподілу температури газу на вході в шар. Таким чином, рішення диференціальних рівнянь (1) і (2) при відповідних початкових та граничних умовах дозволяє отримати розподілення температури матеріалу та газу по висоті та довжині шару [4, 9, 10].

Вхідні дані та розраховане значення температури передаються на 2 блок – моделювання випалу. За допомогою математичного пакету MATLAB моделюється процес ТОЗК. На основі даних, отриманих у результаті моделювання, у третьому блоці розраховуються значення витрат повітря та газу для досягнення необхідної для випалу температури. Розраховані значення передаються на керуючі елементи.

За допомогою пакета прикладних програм для вирішення завдань технічних обчислень MATLAB були проаналізовані результати досліджень і побудована модель системи (рис. 2). Як заявлено технологічною картою процесу, в залежності від умов ТОЗК основні показники приймають такі значення: $d = 8-16$ мм, $H = 400-500$ мм, $U_n = 43,2-151,2$ м/год, $w = 0,3-1,2$ м/с. При моделюванні ці параметри задаються за допомогою функції `gandom`. Так, на рис. 3, а представлені залежності температур на поверхні та всередині шару залізородних котунів від діаметру котунів. На першому графіку зображено зміну температури на поверхні шару (лінія 1) та в середині шару (лінія 2). На нижньому графіку показана зміна середнього діаметра залізородних котунів, що коливається в межах від 0,008 до 0,016 м. Як видно з наданого графіка, температура на поверхні шару котунів суттєво відрізняється від температури в середині шару, до $\pm 100^\circ\text{C}$, а при зменшенні діаметру котунів веде до суттєвого збільшення температури в середині шару, при діаметрі 0,008 м температура на поверхні шару досягатиме 390°C .

Інші залежності, що надані на рис. 3, б, визначають зміну температури на поверхні та вглиб шару залізородних котунів при зміні швидкості продуву шару котунів у камері. На нижньому графіку вона коливається в межах $0,7 \pm 0,4$ м/с. Як визначено, швидкість продуву шару котунів під час випалу не впливає на температуру котунів всередині шару, але змінює температуру на поверхні шару котунів у залежності: чим менша швидкість продуву, тим більша температура, так при швидкості продуву 0,3 м/с температура збільшується до 1251°C . На рис. 3, в представлені графічні залежності зміни температур на поверхні та вглиб шару залізородних

котунів при зміні швидкості руху конвеєра. На нижньому графіку показана зміна швидкості руху палет КВМ, що знаходиться в межах від 0,52 до 2,52 м/с і приводить до коливання температур як на поверхні шару, так і вглиб, що суттєво впливає на процес випалу котунів, так при швидкості 3,1 м/с температура на поверхні шару складатиме 1183°C, а в середині –1174°C.

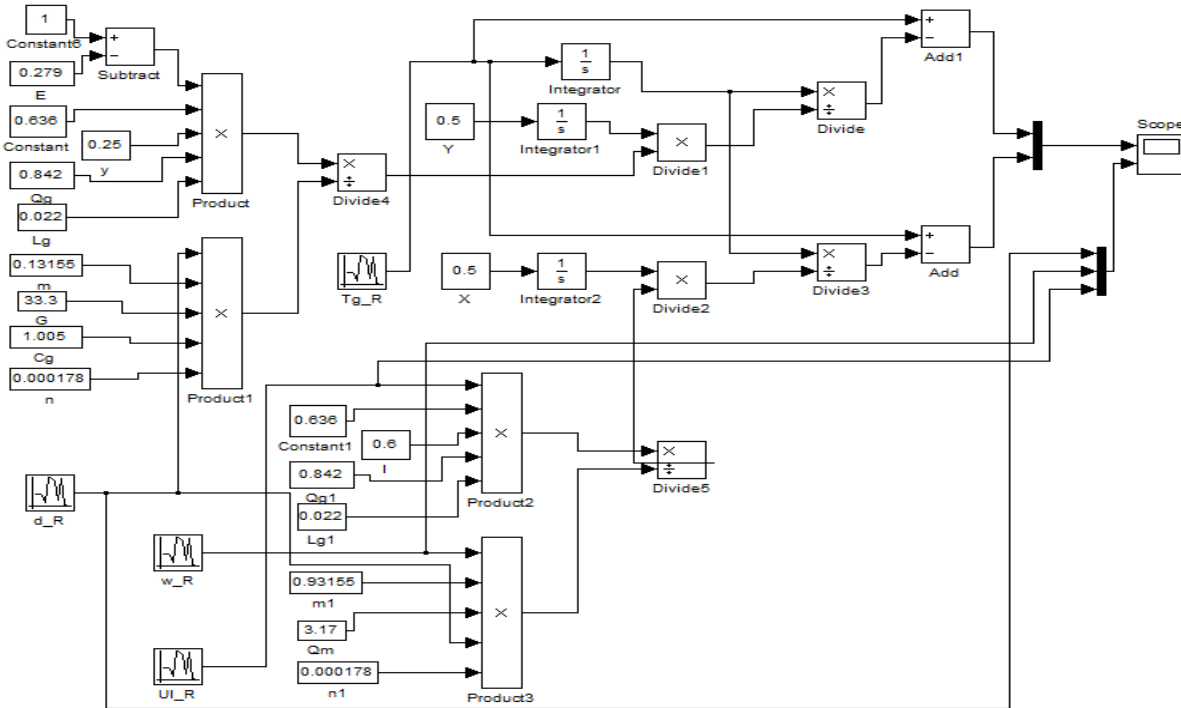


Рис. 2 – Модель процесу випалу котунів в MATLAB

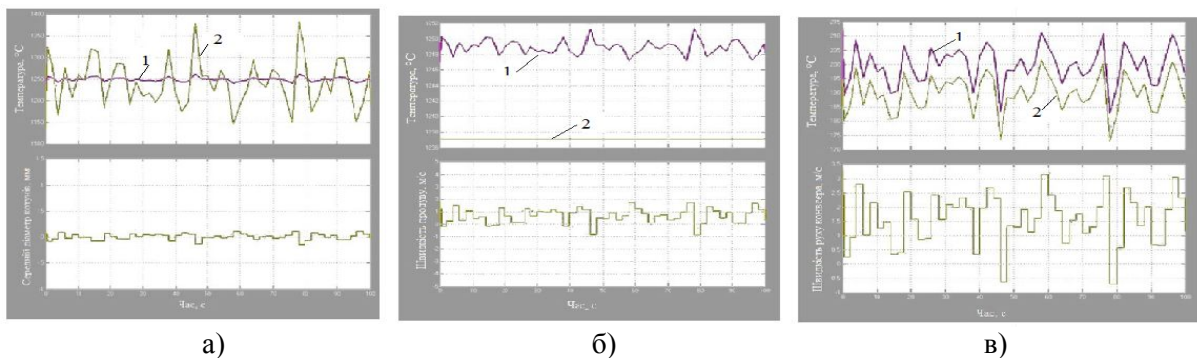


Рис. 3 – Результати моделювання процесу ТОЗК в MATLAB: залежності температури котунів від середнього їх діаметра (а), швидкості продуву (б), швидкості руху конвеєра (в)

Для урегулювання наведених вище параметрів процесу доцільно використовувати Fuzzy Logic Toolbox на основі середовища MATLAB, використовуючи дані таблиці.

Вихідна величина – температура в вакуум-камері № 10 зони ТОЗК визначена таким чином: інтервал розділено на три області (відрідки), які позначили таким чином: *low* (занизьке значення), *normal* (нормальне значення), *hight* (зависоке значення), і для кожного з них узяли трикутну функцію приналежності (рис. 4). Підставивши у формули чисельні дані, отримані внаслідок експериментів, описаних в [18], проводимо навчання системи.

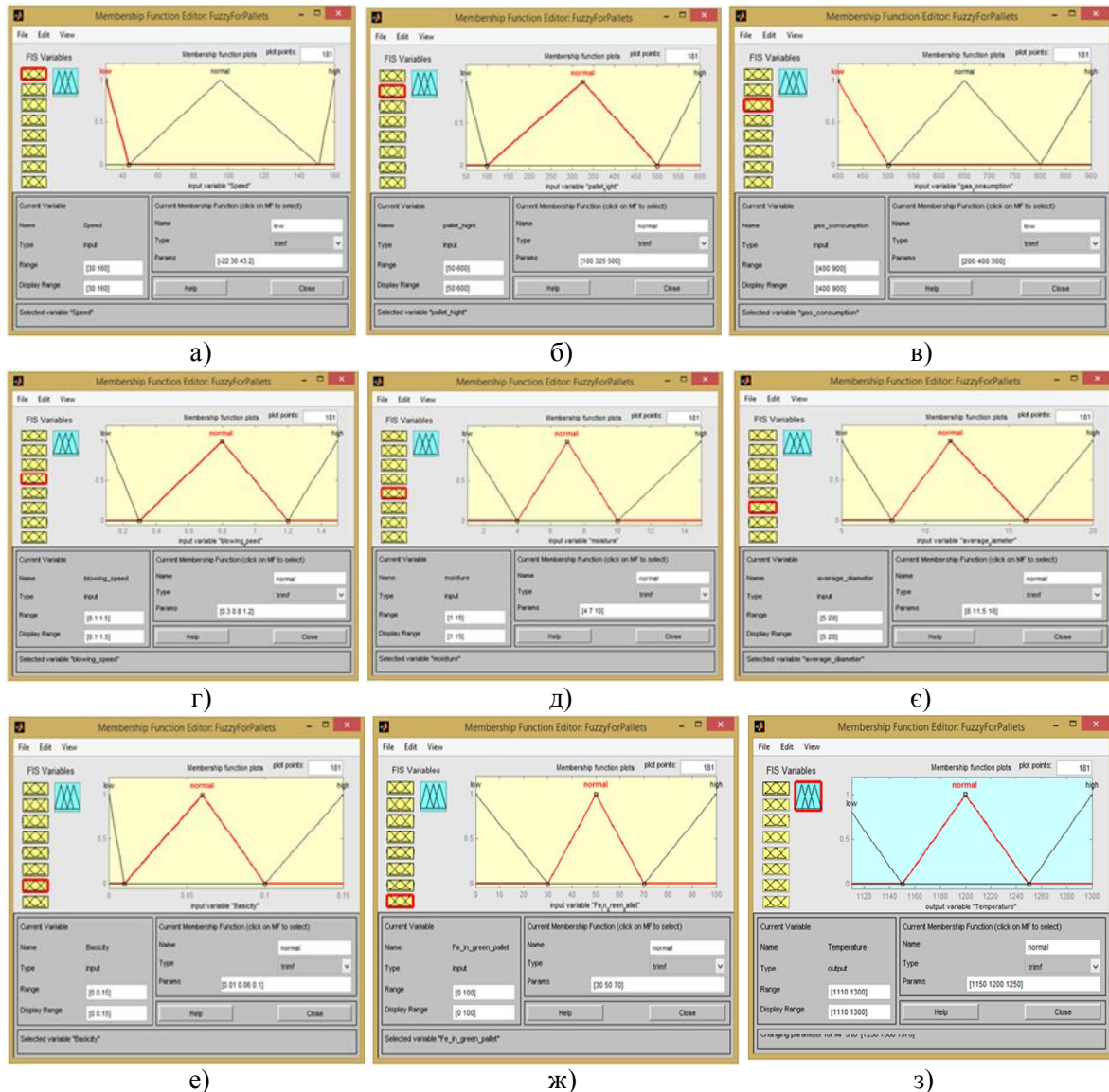


Рис. 4 – Скріншоти вікон редактора FIS: швидкість конвеєра (а), висота шару котунів (б), витрата газу (в), швидкість продуву шара котунів (г), вологість котунів (д), середній діаметр котунів (е), основність котунів (е), вміст заліза (ж) і вихідна величина – температура (з)

Висновки

При виборі варіантів режимів ТОЗК очевидно, що ті режими будуть переважними, які в найкращій мірі забезпечують поліпшення якісні показник випалених котунів при оптимальних витратах для досягнення в грошовому (вартісному) і тимчасовому аспектах (часу на обробку). При розробці автоматизованої системи нечіткого управління ТОЗК на КВМ головна увага була приділена вибору оптимального технологічного режиму та зниженню енергетичних витрат на його виконання. Для порівняння взяті дані про процес ТОЗК системи з PID регулятором, що проводив ПАТ «Центральний ГЗК», контролюючи безпосередньо температуру в камерах згідно технологічного процесу, та застосуванням запропонованого нечіткого контролера, що враховує хімічний склад котунів та інші технологічні параметри.

На верхньому графіку рис. 5 відображаються витрати газу в вакуум камері №11. За технологічною картою норма витрат газу в цій камері становить 760 м³/год. Графік 1 системи з PID регулятором, що на даний час використовується для ТОЗК на ПАТ «Центральний ГЗК». На нижньому графіку показані такі параметри, як вологість котунів, склад заліза та основність, що враховуються у запропонованій системі автоматичного керування з нейро нечітким регулято-

ром. Витрати газу в системі з використанням нечіткого контролера показані на верхньому графіку 2, з якого бачимо, що ця система використовує в середньому на $2 \text{ м}^3/\text{год}$ менше природного газу, що становить 0,3%.

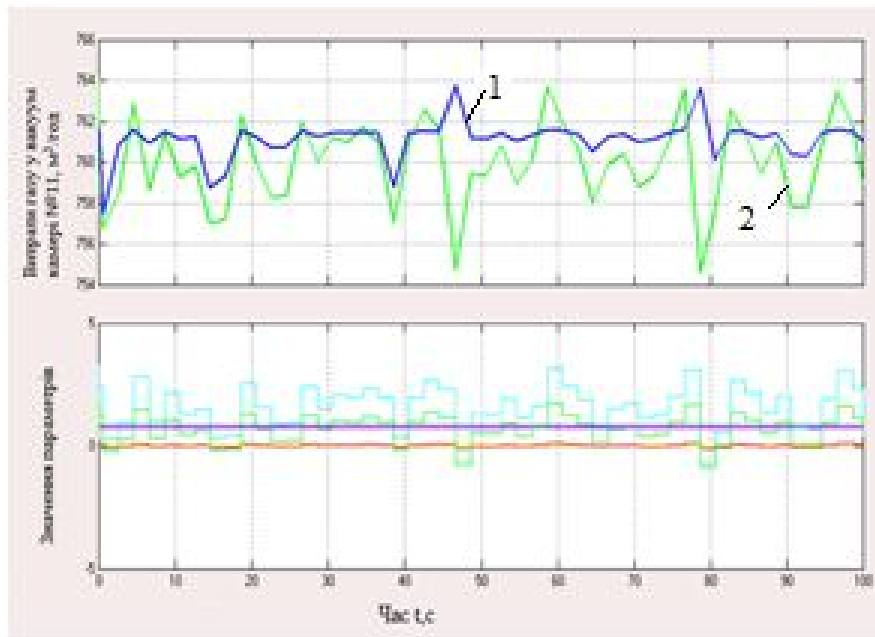


Рис. 5 – Результат розрахунку витрат газу з використанням нечіткого контролера (2) і з PID регулятором (1)

При використанні запропонованого способу встановлюється більш рівномірна газопроникність шару котунів, що призводить до збільшення швидкості фільтрації газового потоку та інтенсифікації процесу теплообміну в шарі котунів. Це дозволить разом з введенням атомно-емісійної спектроскопії невідпалених збільшити продуктивність конвеєрної випалювальної машини на 2,5%. Одночасно підвищується стійкість технологічного обладнання, наприклад, палет, за рахунок більш рівномірного розподілу теплового поля.

Перелік використаних джерел:

1. Буткарев А.А. Исследование и совершенствование процесса управления термообработкой окатышей на обжиговых конвейерных машинах / А.А. Буткарев // Сталь. – 2011 – № 5. – С. 4-8.
2. Мізерний В.М. Аналіз стаціонарних режимів теплообмінних процесів у дисперсному шарі / В.М. Мізерний, Т.А. Модебадзе // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2006. – № 4. – С. 82-102.
3. Бойко М.М. Вдосконалення технологічного режиму обпалу залізородних обкотишів з метою підвищення їх якості та зниження енерговитрат : автореф. дис. ...канд. техн. наук : 05.16.02 / М.М. Бойко; Нац. металург. акад. України. – Дніпропетровськ, 2009. – 20 с.
4. Автоматизовані системи керування процесами термічної обробки котунів на конвеєрній випалювальній машині / В.Й. Лобов [и др.]. – Кривий Ріг : Видавничий центр ДВНЗ «КНУ», 2015. – 236 с.
5. Lobov V. Investigation of temperature distribution along the height of the layer of pellets on conveyor roasting machine / V. Lobov, K. Lobova, M. Koltiar // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – № 4. – P. 34-38.
6. Neskromna M.V. Modeling of iron-ore pellet firing in a conveyor-type kiln at pelletizing plant / M.V. Neskromna // Widening our horizons. – 2016. – P. 42.
7. Лобов В.Й. Синтез модального регулятора для процесу випалу котунів у конвеєрній печі фабрики огрудкування // М.В. Нескоромна, В.Й. Лобов // Вісник криворізького національного університету. – 2016. – № 42. – С. 210-214.

8. Бережной Н.Н. Математическое моделирование температурного поля окатыша / Н.Н. Бережной, В.М. Серебренников, А.В. Зайцев // Вісник Криворізького технічного університету : Зб. наук. пр. – 2008. – Вип. 20. – С. 188-193.
9. Пирматов Д.С. Математическая модель тепловой обработки окатышей в обжиговой машине // Сборник трудов всероссийской конференции : Новые технологии в научных исследованиях, проектировании, управлении, производстве НТ-2010. – Воронеж, 2010. – С. 88-89.
10. Боковиков Б.А. Математическое моделирование динамики процесса обжига окатышей на конвейерной машине / Б.А. Боковиков, В.М. Малкин, М.И. Найдич // Metallurgical and Mining Industry. – 2002. – № 8. – С. 25-31.
11. Поркуян, О.В. Керування нелінійними динамічними об'єктами збагачувальних виробництв на основі гібридних моделей Гамерштейна : автореф. дис. ...д-ра техн. наук : 05.13.07 / О.В. Поркуян. – Криворіз. техн. ун-т. – Кривий Ріг, 2009. – 36 с.
12. Купин А.И. Исследование инверсных моделей нейроконтролера для систем интеллектуального управления ТП горнорудных предприятий / А.И. Купин, С.А. Рубан // Вісник Криворізького технічного університету. – 2007. – № 18. – С. 157-161.
13. Алгоритм синтезу модального регулятора багатовимірної системи управління / Н.Б. Репнікова [и др.] // Штучний інтелект : Наук.-теорет. журн. – 2009. – № 2. – С. 69-75.
14. Еременко Ю.И. О применении нечеткого логического контроллера в управлении процессом обжига окисленных окатышей / Ю.И. Еременко // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2003. – № 9. – С. 39-43.
15. Лобов В.Й. Дослідження термічної обробки шару котунів у газоповітряній камері обпалювальної машини конвеєрного типу / В.Й. Лобов, М.О. Котляр // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2015. – № 3. – С. 131-136.
16. Рубан С.А. Розробка принципів керування температурним режимом процесу випалювання котунів з використанням прогнозуючих ANFIS-моделей / С.А. Рубан, В.Й. Лобов // Радіоелектроніка. Інформатика. Управління. – 2008. – С. 69-74.
17. Zade L.A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning / L.A. Zade // Information Sciences, part 1, 2, 3. – 2012. – № 8. – Pp. 199-249.
18. Прикладные нечеткие системы / К. Асаи [и др.]; под ред. Т. Тэрано [и др.]; пер. с яп. Ю.Н. Чернышова. – М. : Мир, 1993. – 368 с.

References:

1. Butkarev A.A. Issledovanie i sovershenstvovanie protsessu upravleniia termoobrabotkoi okatyshei na obzhigovykh konveiernykh mashinakh [Research and improvement of the management process of heat-treating pellets by roasting conveyor machines]. *Stal' – Steel*, 2011, no. 5, pp. 4-8. (Rus.)
2. Mizerniy V.M., Modebadze T.A. Analiz statsionarnykh rezhimiv teploobminnykh protsesiv u dispersnomu shari [Analisis of the stationary regimes of heat-exchange processes in a dispersed ball]. *Visnik Vinnitskogo politekhnichnogo institutu – Visnyk of Vinnytsia Politechnical Institute*, 2006, no. 4, pp. 82-102. (Ukr.)
3. Boyko M.M. *Vdoskonalennia tekhnologichnogo rezhimu obpalu zalizorudnykh kotuniv z metoiu pidvishchennia ikh iakosti ta znizhennia energovitrat*. Avtoref. diss. kand. techn. nauk [Improvement technology fallen regime of iron ore pellets to improve their quality and reduce energy consumption. Thesis of cand. tech. sci. diss.]. Dnipropetrovsk, 2009. 20 p. (Ukr.)
4. Lobov V.Y., Yefimenko L.I., Tykhans'kyu M.P., Ruban S.A. *Avtomatyzovani systemy keruvannya protsesamy termichnoyi obrobky kotuniv na konveyerniy vypalyvaniy mashyni* [Automated process control thermal treatment of pellets on a conveyor roasting machine], Kryvyi Rih, Vydavnychyy tsentr DVNZ «KNU» Publ. 236 p. (Eng.)
5. Lobov V., Lobova K., Koltiar M. Investigation of temperature distribution along the height of the layer of pellets on conveyor roasting machine. *Metallurgical and Mining Industry*, 2015, no. 4, pp. 34-38. (Eng.)
6. Neskromna M.V. Modeling of iron-ore pellet firing in a conveyor-type kiln at pelletizing plant. *Widening our horizons*, 2016, p. 42. (Eng.)
7. Lobov V.Y., Neskromna M.V. Sintez modal'nogo regulatora dlia protsesu vipalu kotuniv u konveernii pechi fabryki orrudkuvannia [Modal regulator synthesis process for burning pellets in a

- conveyor furnace factory pelletizing]. *Visnyk Kryvoriz'koho natsional'noho universytetu – Journal of Kryvyi Rih National University*, 2016, no. 42, pp. 210-214. (Rus.)
8. Berezhnoy N.N., Serebrenykov V.M., Zaytsev A.V. Matematicheskoe modelirovanie temperatur-nogo polia okatysha [Mathematical modeling of the temperature field of pellets]. *Visnyk Kryvoriz'koho tekhnichnoho universytetu – Journal of Kryvyi Rih Technical University*, 2008, no. 20, pp. 188-193. (Rus.)
 9. Pyrmatov D.S. Matematicheskaya model' teplovoi obrabotki okatyshei v obzhigovoi mashine. *Ano-tatsii dopovidei Vseros. Conf. «Novyye tekhnologii v nauchnykh issledovaniyakh, proyektirovani, upravlenii, proizvodstve NT-2010»* [The mathematical model of heat treating the pellets in the roasting car. Abstracts of All-Russian Conf. «New technologies in scientific research, design, management, production NT-2010»]. Voronezh, 2010, pp. 88-89. (Rus.)
 10. Bokovikov B.A., Malkin V.M., Naydich M.I. Matematicheskoe modelirovanie dinamiki protsessa obzhiga okatyshei na konveiernoi mashine [Mathematical modeling of the dynamics of pellets firing on a conveyor machine]. *Metallurgicheskaya teplotekhnika – Metallurgical heat engineering*, 2002, no. 8, pp. 25-31. (Rus.)
 11. Porkuyan O.V. *Keruvannia neliniinimi dinamichnimi ob'ektami zbagachuval'nikh virobnitstv na osnovi gibridnikh modelei Gamershteina*. Avtoref. diss. dokt. techn. nauk [Management nonlinear dynamic objects enrichment plants based on hybrid models Hamershteyna. Thesis of doc. tech. sci. diss.]. Kryvyi Rih, 2009. 379 p. (Ukr.)
 12. Kupyn A.Y., Ruban S.A. Issledovanie inversnykh modelej nejrokontrolera dlja sistem intellektu-al'nogo upravlenija TP gornorudnykh predpriyatij [Investigation of inverse models of the neurocon-troller for the systems of intellectual control of TP of mining enterprises]. *Visnyk Kryvoriz'koho tekhnichnoho universytetu – Journal of Kryvyi Rih Technical University*, 2007, no. 18, pp. 157-161. (Rus.)
 13. Repnikova N.B., Pysarenko A.V., Zamurenko K.V., Zimaryev F.S. Algoritm sintezu modal'nogo regulatora bagatovimirnoi sistemi upravlinnia [Modal regulator synthesis algorithm multidimensional control system]. *Shtuchnyy intelekt – Artificial intelligence*, 2009, no. 2, pp. 69-75. (Rus.)
 14. Eremenko Yu.Y. O primenenii nechetkogo logicheskogo kontrollera v upravlenii protsessom obzhiga okislennykh okatyshei [About the application of a fuzzy logic controller in controlling the burning of oxidized pellets]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie – Mechatronics, automa-tion, control*, 2003, no. 9, pp. 39-43. (Rus.)
 15. Lobov V.Y., Kotlyar M.O. Doslidzhennia termichnoi obrobki sharu kotuniv u gazopovitrianii kameri obpaliuval'noi mashini konveernogo tipu [Research thermal processing layer of pellets in the gas chamber conveyor roasting machine]. *Naukovyy visnyk Natsional'noho hirnychoho univer-sytetu – Scientific Bulletin of National Mining University*, 2015, no. 3, pp. 131-136. (Ukr.)
 16. Ruban S.A., Lobov V.Y. Rozrobka printsipiv keruvannia temperaturnim rezhimom protsesu vipal-iuvannia kotuniv z vikoristanniam prognozuuiuchikh ANFIS-modelei [Development management principles temperature regime pellet burning process using ANFIS-forecasting models]. *Radio-elektronika. Informatyka. Upravlinnya – Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2008, no. 1 (19), pp. 69-74. (Ukr.)
 17. Zade L.A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning. *In-formation Sciences, part 1, 2, 3*, 2012, no. 8, pp. 199-249. (Eng.)
 18. Asayi K., Watada D., Ivayi S. *Prikladnye nechetkie sistemy* [Applied fuzzy system]. Moscow, Mir Publ., 1993. 368 p. (Rus.)

Рецензент: А.І. Купін

д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «Криворізький національний університет»

Стаття надійшла 14.04.2017