

7. **Khennane, A.** Performance design of reinforced concrete slabs using commercial finite element software. *Structural Concrete*,6(4), 2005, 141–147.
8. **Malm, R.** Shear crack in concrete structures subjected to in-plane stresses. Licentiate thesis, Department of Civil and Architectural Engineering, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden. 2006
9. **Mercan, B., Schultz, A. E., & Stolarski, H. K.** Finite element modeling of prestressed concrete spandrel beams. *Engineering Structures*,32, 2010, 2804–2813.
10. **Syroka, E., Bobinski, J., & Tejchman, J.** FE analysis of reinforced concrete corbels with enhanced continuum models. *Finite Element in Analysis and Design*,47, 2011, 1066–1078.
11. **Tabatai, S. M. R., & Mosalam, K. M.** Computational platform for non-linear analysis/optimal design of reinforced concrete structures. *Engineering Computations*,18(5), 2001, 726–743.
12. **Tanimura, Y., & Sato, T.** Evaluation of shear strength of deep beams with stirrups. *Quarterly Report of Railway Technical Research Institute, Japan*,46(1), 2005, 53–56.
13. **Willam, K. J., & Warnke, E. P.** Constitutive models for the triaxial behavior of concrete. *Proceedings of International Association for Bridge and Structural Engineering*,19, 1975, 1–30.
14. **Сахно С.І., Люльченко Є.В., Білашенко К.С., Домнічев А.О.** Дослідження застосовності нелінійних математичних моделей міцності бетону для моделювання руйнування бетонних призм. *Кр.Ріг – наук. техн. зб. КНУ Гірничий вісник №107*, 2020, 68-73.

Рукопис подано до редакції 15.10.2020

УДК 681.54: 658.562.3

С. А. РУБАН, І. А. МАРИНИЧ, кандидати техн. наук, доценти, М. Є. ФЕДОРОВ, аспірант
Криворізький національний університет

АДАПТИВНЕ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСАМИ ПІДГОТОВКИ ШИХТИ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ЗАЛІЗОРУДНИХ КОТУНІВ НА БАЗІ МЕТОДІВ ТЕОРІЇ ГІПЕРСТІЙКОСТІ

Мета. Метою даної роботи є підвищення ефективності процесу дозування шихтових матеріалів для виготовлення залізородних котунів, забезпечення заданої вологості шихти шляхом формування узгодженого адаптивного керування комплексом механізмів тракту транспортування та дозування шихти.

Методи дослідження. Методи теорії автоматичного керування, зокрема теорії адаптивного керування на базі теорії гіперчутливості (для розробки структури системи керування та алгоритмів її функціонування), теорії ідентифікації систем (для вибору і обґрунтування структури математичної моделі об'єкту керування), методи імітаційного моделювання (для тестування розробленої системи на ЕОМ).

Наукова новизна. Отримав подальший розвиток метод адаптивного керування процесами транспортування та дозування компонентів шихти шляхом формування адаптивного керування на базі теорії гіперчутливості, що забезпечує інваріантність системи до дії збурень, пов'язаних зі змінами транспортного запізнення об'єкту керування внаслідок змін режимів роботи тракту шихтопідготовки та якості вхідної сировини.

Практична значимість. Вирішення завдання забезпечення заданого вмісту складових матеріалів (концентрат, вапно, бентоніт), заданої вологості та сталості складу шихти у часі дозволяє стабілізувати процес огрудкування, що позитивно відображається на якості сирих котунів, збільшенні продуктивності огрудковувачів і випалювальної машини.

Результати. Для забезпечення підвищення ефективності процесу дозування шихтових матеріалів при виготовленні залізородних котунів запропоновано використовувати для формування узгодженого адаптивного керування комплексом механізмів тракту транспортування та дозування шихти підхід на базі теорії гіперстійкості, що забезпечує високу якість процесу регулювання та адаптацію до змін транспортного запізнення об'єкту керування. Виконано комп'ютерне моделювання системи керування продуктивністю групового живильника концентрату фабрики огрудкування на базі методів теорії гіперстійкості. Аналіз результатів моделювання запропонованої системи показує, що застосування методу формування адаптивного керування на базі теорії гіперстійкості забезпечує зменшення часу перехідного процесу з 60 с до 40 с у порівнянні з системою на базі типового ПІД-регулятора, одночасно із забезпеченням аперіодичного характеру перехідного процесу із перерегулюванням в межах 25 % та може бути рекомендовано до впровадження.

Ключові слова: автоматизація, адаптивне керування, дозування, груповий дозатор, фабрика огрудкування, шихта, котуни.

doi: 10.31721/2306-5435-2020-1-108-34-39

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними задачами. Якісна підготовка шихти для виготовлення залізородних котунів на фабриці огрудкування є одним з найголовніших фак-

торів, що визначають ефективність процесу в цілому. Першочерговим завданням процесу підготовки шихти є забезпечення заданого вмісту складових матеріалів (концентрат, вапно, бентоніт), заданої вологості та сталості складу шихти у часі. Вирішення цього завдання дозволяє стабілізувати процес огрудкування, що позитивно відображається на якості сирих котунів, збільшенні продуктивності огрудковувачів і випалювальної машини в цілому.

Водночас, задача підтримки заданого вмісту компонентів шихти ускладнюється змінними характеристиками потоку матеріалів, а також розподілені в просторі характером процесів дозування, транспортування та змішування шихти, в якому приймає участь велика кількість технологічних механізмів. У зв'язку з цим постає завдання узгодженого керування процесами дозування, транспортування та змішування шихтових матеріалів для забезпечення заданих якісних характеристик (вологості, вмісту заліза, основності), що може бути вирішена за рахунок впровадження сучасної системи автоматизації процесу.

Аналіз досліджень та публікацій. Питанню автоматизації процесів дозування, транспортування та змішування шихтових матеріалів на фабриках огрудкування присвячені роботи М.М. Бережного, Ю.Г. Гончарова, М.В. Федоровського, О.В. Дрімбо, А.Д. Іщенко, С.В. Мошенського, В.В. Волкова, І.Е. Чернецької, Е.А. Ісаєва, С.М. Diniş та ін. Аналіз досліджень та публікацій показує, що на сьогодні використовуються різні схеми реалізації систем дозування шихтових матеріалів. На вітчизняних фабриках огрудкування найчастіше використовують системи автоматичного дозування компонентів шихти з з'єднанням індивідуальних дозаторів. Для дозування вапняку, бентоніту і повернення використовуються стрічкові дозатори. Кожний стрічковий дозатор має власну систему управління продуктивністю, що складається з індивідуального вимірювача ваги, на основі якого в системі реалізовано зворотній зв'язок за продуктивністю дозатора. Дозування концентрату здійснюється груповим дозатором, що складається з дискових живильників, розміщених під бункерами концентрату, які вивантажують концентрат на збірний конвеєр. Реалізація зворотного зв'язку за продуктивністю концентрату забезпечується за рахунок контролю загальної продуктивності конвеєрними вагами, розташованими за останнім дисковим дозатором.

В системі керування процесом дозування шихтових матеріалів існують транспортні запізнення, пов'язані з необхідністю транспортування матеріалу від місця вивантаження з дозатора до точки вимірювання загальної продуктивності, сигнал якої використовується в якості сигналу зворотного зв'язку для формування завдання дозаторам компонентів шихти. Також існують транспортні запізнення між окремими дозаторами (наприклад, в груповому дозаторі концентрату). При змінній необхідній продуктивності відділення огрудкування (наприклад, при змінній потребі відділення випалювання в сирих котунах) можливе змінення швидкості збірного конвеєру, що призводить до змін часу транспортного запізнення в системі керування. У зв'язку з цим виникає необхідність у змінній алгоритму формування керуючих впливів в системах керування окремими дозаторами для забезпечення сталості заданих співвідношень між компонентами шихти.

Питанням формування адаптивного керування системами з транспортним запізненням присвячені роботи А.С. Ключова, Ципкіна Я.З., Р.Т. Янушевського, В.М. Новосельцева, Ю.Ю. Громова, В.В. Ашоріна, М.З. Зауровського, О.М. Цикунова, І.Б. Фуртата, J.M. Smith, M. Kristic, S.I. Niculescu, A.M. Annaswamy та ін.

Постановка задачі. Метою даної статті є розробка та апробація методики формування адаптивного керування комплексом механізмів дозування та транспортування шихти на базі теорії гіперстійкості, що дозволить забезпечити високі якісні характеристики процесу регулювання в умовах змінення транспортного запізнення об'єкту керування.

Викладення матеріалу та результати. У якості об'єкту керування розглянемо процес дозування концентрату в умовах фабрики огрудкування Центрального ГЗК. Система реалізована на базі групового дозатору, що складається з трьох дискових живильників ДТ-200, розміщених під бункерами концентрату на відстані l один від одного. Для контролю загальної продуктивності використовуються конвеєрні терези. Структурну схему системи автоматичного дозування концентрату наведено на рис. 1, де $W_{кил}(p)$ – передаточна функція контуру швидкості дискового живильника, $W_{ож}(p)$ – передаточна функція дискового живильника при регулюванні продуктивності зміненням швидкості обертання чаші, $W_{км}(p)$ – передаточна функція

конвеєрних вагів, $W_{рег}(p)$ – передаточна функція регулятора продуктивності, t_1, t_2 – затримка часу, пов'язана з переміщенням матеріалу від бункера до місця зважування, $t_1 = l/v$, v – швидкість руху стрічки збірного конвеєра.

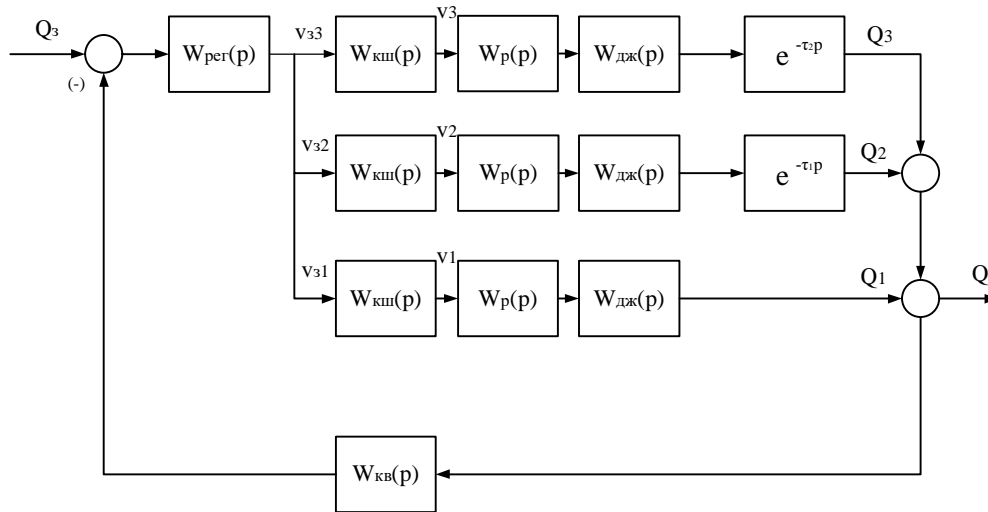


Рис. 1. Структурна схема системи автоматичного дозування концентрату

При регулюванні швидкості обертання чаші дискового живильника шляхом змінення швидкості обертання приводного двигуна, що живиться від перетворювача частоти, передаточна функція контуру регулювання частоти матиме вигляд [9]

$$W_{крч}(s) = \frac{k_{крч}}{T_M s + 1}, \quad (1)$$

де $k_{крч}$ – коефіцієнт підсилення контуру; T_M – електромеханічна стала часу електроприводу.

Коефіцієнт підсилення контуру регулювання швидкості приводного двигуна

$$k_{крч} = \frac{n_{max}}{I_{max}}, \quad (2)$$

де n_{max} – максимальна частота обертання приводного двигуна; I_{max} – максимальне значення сигналу завдання швидкості перетворювача частоти асинхронного двигуна приводу дискового живильника.

Коефіцієнт передачі редуктора

$$W_p(s) = K_p = \frac{n_{дж}}{n_d}, \quad (3)$$

де $n_{дж}$ – максимальна частота обертання дискового живильника; n_d – максимальна частота обертання приводного двигуна.

Продуктивність дискового живильника дорівнює

$$Q_{жс} = k_{жс} \times h_{жс} \times n_{жс}, \quad (4)$$

де $k_{жс}$ – коефіцієнт, що враховує властивості матеріалу та конструктивні параметри живильника; $h_{жс}$ – висота підйому шиберної заслінки; $n_{жс}$ – швидкість обертання диску.

Передаточна функція дискового живильника ДТ при регулюванні продуктивності зміненням швидкості обертання диску [9]

$$W_{джс}(s) = k_{жс} \times h_{жс}, \quad (5)$$

На основі (4) коефіцієнт підсилення дискового живильника при регулюванні продуктивності зміненням швидкості обертання чаші

$$K_{джс}(s) = \frac{Q_{\max}}{n_{\max}} \quad (6)$$

Модель групового живильника концентрату матиме вигляд, показаний на рис. 2.

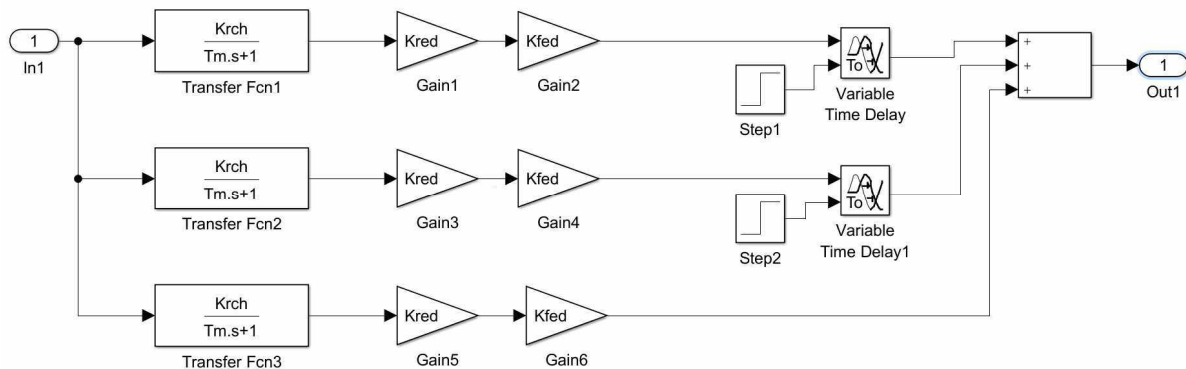


Рис. 2. Модель групового живильника концентрату

Виконаний аналіз літературних джерел показав, що з урахуванням наявності апріорної невизначеності, пов'язаної зі змінами часу транспортного запізнення в системі, для вирішення поставленого завдання доцільно використати підхід до формування адаптивного керування комплексом механізмів дозування та транспортування шихти на базі теорії гіперстійкості та додатності динамічних систем [1-3].

У відповідності з методикою формування адаптивного керування на базі теорії гіперстійкості, наведеною в [1], основний контур адаптивного керування матиме вигляд, представлений на рис. 3, де $r(t)$ – сигнал завдання, який в режимі стабілізації дорівнює $r(t) = r_{\text{ст}} \cdot 1(t)$; $y(t)$ – вихідна величина системи (сумарна витрата вологого концентрату); $e(t)$ – узагальнена похибка регулювання, що дорівнює

$$e(t) = r(t) - y_q(t) = r(t) - y(t) - \alpha q(t), \quad (7)$$

де $q(t)$ – вихід стабілізуючого пристрою у вигляді інерційної ланки першого порядку зі сталими коефіцієнтами; $y_q(t)$ – узагальнений вихід системи; α – ваговий коефіцієнт.

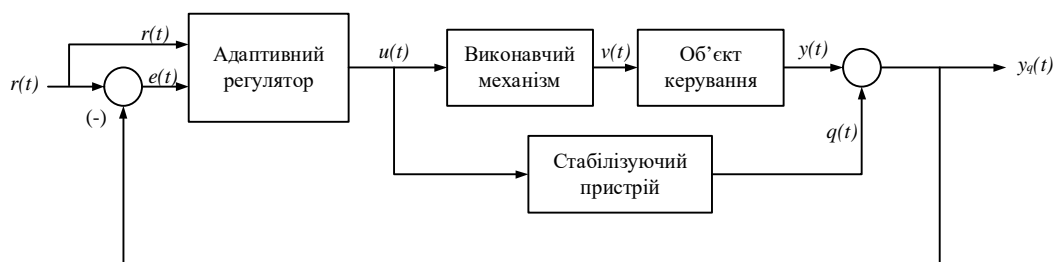


Рис. 3. Основний контур адаптивного керування системою

У відповідності з методикою адаптивного керування на базі теорії гіперстійкості [1], формування сигналу керування $u(t)$ здійснюється за формулою

$$u(s) = W_L(s) \cdot g(s), \quad (8)$$

де $W_L(s)$ уявляє собою реальну диференціюючу ланку; $g(t) = c(t) \cdot r(t)$, де параметр налаштування адаптивного регулятора $c(t)$ визначається за формулою

$$c(t) = c_i(t) + c_{II}(t) \cdot q(t); \quad (9)$$

$$q(t) = \begin{cases} 1, & |e(t)| \geq d, \\ 0, & |e(t)| < d; \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \dot{d}c_i(t) = h_1 \times e(t) \times x_{*}, \\ \dot{c}_{II}(t) = h_2 \times e(t) \times x_{*} \end{cases} \quad (11)$$

де $c_i(t)$, $c_{II}(t)$ – інтегральна та пропорційна складові параметру налаштування відповідно; h_1 , h_2 – сталі коефіцієнти.

Модель системи адаптивного керування продуктивністю групового живильника концентрату наведено на рис. 4.

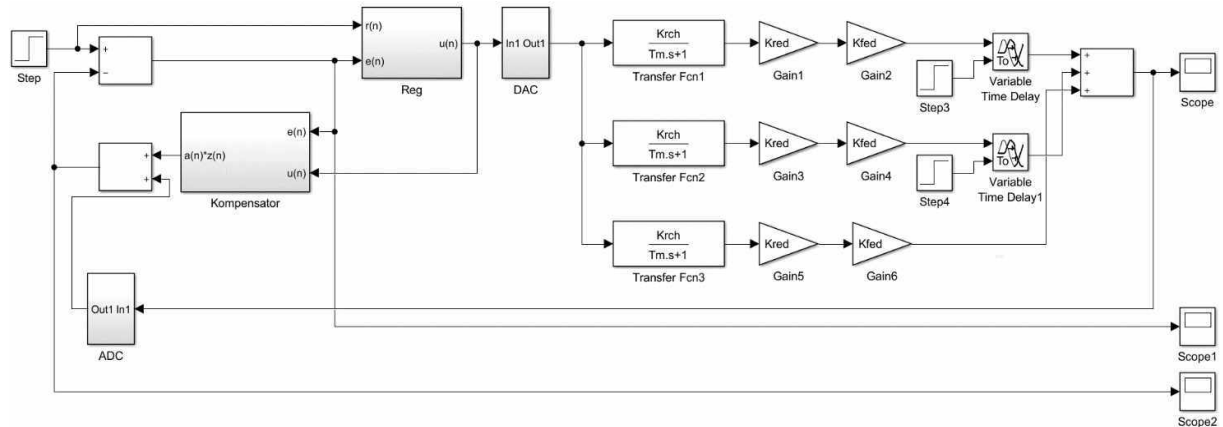


Рис. 4. Модель системи адаптивного керування продуктивністю групового живильника концентрату

Для підтвердження ефективності запропонованої методики формування адаптивного керування комплексом механізмів дозування та транспортування шихти на базі теорії гіперстійкості випробувалась модель, наведена на рис. 4. В процесі моделювання в момент часу $t = 100$ с здійснювалась імітація змінення часу транспортного запізнення з 3 с до 5 с внаслідок змінення швидкості руху збирного конвеєра. Результати порівняння графіків перехідного процесу в запропонованій системі з системою з використанням ПД-регулятора, налаштованого за методом Зіглера-Нікольса, наведено на рис. 5.

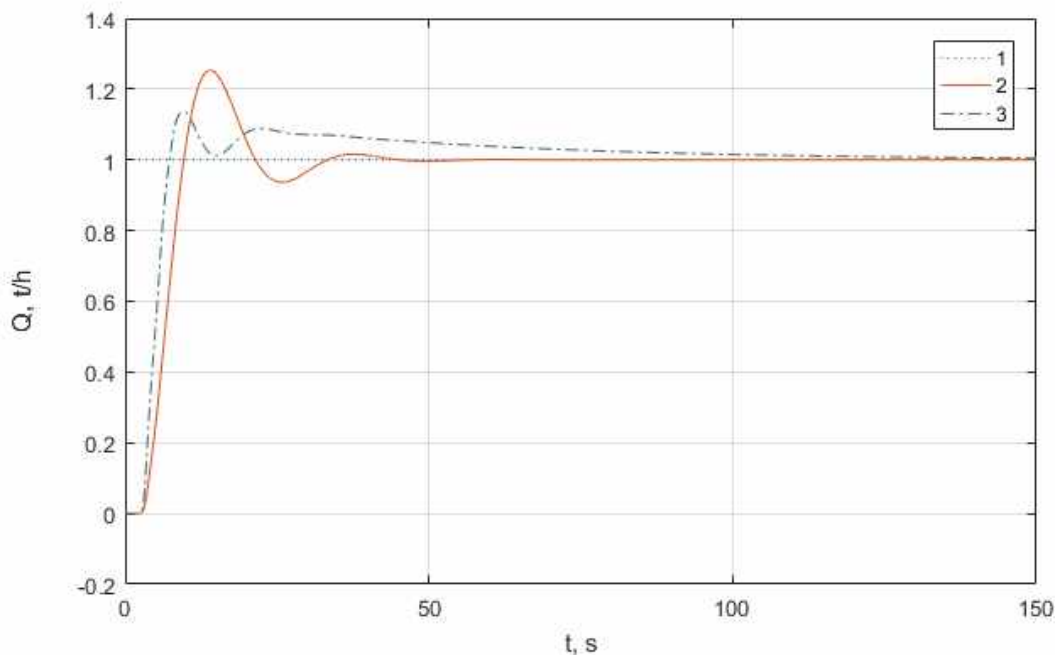


Рис. 5. Графік перехідного процесу в контурі регулювання продуктивністю групового живильника концентрату

Аналіз наведених графіків показує, що застосування методу формування адаптивного керування на базі теорії гіперстійкості для керування продуктивністю групового живильника концентрату в умовах фабрики огрудкування забезпечує зменшення часу перехідного процесу з 60 с до

40 с у порівнянні з системою на базі типового ПІД-регулятора, одночасно із забезпеченням аперіодичного характеру перехідного процесу із перерегулюванням в межах 25 %. При цьому застосування запропонованого методу забезпечує також підтримання високих якісних характеристик процесу регулювання в умовах змінення транспортного запізнення об'єкту керування.

Висновки та напрям подальших досліджень. Для забезпечення підвищення ефективності процесу дозування шихтових матеріалів при виготовленні залізородних котунів запропоновано використовувати для формування узгодженого адаптивного керування комплексом механізмів тракту транспортування та дозування шихти підхід на базі теорії гіперстійкості, що забезпечує високу якість процесу регулювання та адаптацію до змін транспортного запізнення об'єкту керування. Результати, отримані в процесі моделювання використання запропонованого методу для керування продуктивністю групового живильника концентрату, підтверджують ефективність та доцільність впровадження систем адаптивного керування на базі теорії гіперчутливості для модернізації систем автоматизації комплексів підготовки, дозування та змішування шихти на існуючих фабриках огрудкування.

Список літератури

1. Еремін Е. Л., Цыкунов А. М. Синтез адаптивных систем управления на основе критерия гиперустойчивости. – Бишкек: Илим, 1992.
2. Никифоров В. О., Фрадков А. Л. Схемы адаптивного управления с расширенной ошибкой // Автоматика и телемеханика. – 1994. - №9. – С. 3 – 22.
3. Цыкунов А. М. Квадратичный критерий абсолютной устойчивости в теории адаптивных систем. – Фрунзе: Илим, 1990. – 157 с.
4. Еремін Е. Л., Теличенко Д. А., Чепак Л. В. Синтез адаптивных систем для скалярных объектов с запаздыванием по управлению – Благовещенск: Амурской гос. ун-т, 2006. – 240 с.
5. Ксендзовский В.Р. Автоматизация процесса производства окатышей. М.:Металлургия, 1971. – 216 с.
6. Iwai Z., Mizumoto I. Robust and simple adaptive control systems // Int. J. of Control. – 1992. – V. 55. - №6. – P. 1453 – 1470
7. Palmor Z. J. Robust digital dead time compensator controller for a class of stable systems // Automatica. – 1986. – V. 22. - № 5. – p. 587 – 591.
8. Makoudi M., Radoune L. Robust decentralized adaptive control for non-minimum phase systems with unknown and/or time varying delay // Automatica. – 1999. – V. 35. – P. 1417 – 1426.
9. Гончаров Ю.Г., Дримбо А.В., Ищенко А.Д. Автоматизация процессов окискования железных руд. – М.: Металлургия, 1983. – 190 с.
10. Автоматизация фабрик окискования железных руд и концентратов / Н.В. Федоровский, В.В. Даньшин, В.И. Губанов, Р.И. Сигуа. – М.: Металлургия, 1986. – 206 с.

Рукопис подано до редакції 09.10.2020

УДК 622.7: 004.94

О.І. САВИЦЬКИЙ, канд. техн. наук, доц., М.А. ТИМОШЕНКО, О. О. ГРАММ, асистенти
Криворізький національний університет

ВИБІР СПОСОБУ АВТОМАТИЗОВАНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ МІЛКОГО ДРОБЛЕННЯ ЗАЛІЗНОЇ РУДИ ЗІ ЗМІННИМИ ПАРАМЕТРАМИ

Мета. Метою даної роботи є вибір способу регулювання продуктивності мілкої дробарки з метою удосконалення характеристик автоматизованого керування процесом дроблення в цілому та покращення показників роботи технологічного процесу. Складність, інерційність, не стаціонарність та динамічність технологічних процесів, що відбуваються на дробильній фабриці, наявність складних зв'язків між технологічними механізмами обумовлюють застосування сучасних інтелектуальних засобів автоматизованого керування і, відповідно, вибір найкращого типу регулювання.

Методи дослідження. Проведено аналіз необхідності застосування для керування процесами дроблення сучасних видів регулювання. Використано комп'ютерне моделювання для досягнення поставлених цілей.

Наукова новизна. Підтверджено можливість застосування сучасних регуляторів для автоматизованого керування технологічним процесом дроблення руди з невизначеними параметрами, а саме теоретично доведено цінність застосування нечітких та нейронних регуляторів (на базі штучного інтелекту) порівняно з класичними засобами керування.