

5. Кунгурцев А. Б. Модель реструктуризації реляційної бази даних путем денормалізації схеми / Кунгурцев А. Б., Зиноватная С. А. – Тр. Одесск. политехн. ун-та. – Одесса, 2006. – 2(26). – С. 105–111.

Надійшла 27.11.2007  
Після доробки 19.03.2008

*Рекомендується виконувати денормалізацію схеми відносин після ретельного тестування продуктивності інформаційної системи. Запропоновано імітаційну модель для тестування поведінки системи в умовах застосування різних варіантів денормалізації. На основі моделі реалізований програмний інструмент, що дозволяє дослід-*

*жувати бази даних, створені з використанням різних систем керування базами даних.*

*It is recommended to execute denormalization of relations scheme after the careful testing of the information system productivity. A simulation model for testing of the system conduct in the conditions of application of different denormalization variants is offered. On the basis of this model a program instrument is realized to allow to probe databases, created with the use of the different database management systems.*

681.51:622.788

В. Й. Лобов, С. А. Рубан

## РОЗРОБКА ПРИНЦИПІВ КЕРУВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНИМ РЕЖИМОМ ПРОЦЕСУ ВИПАЛЮВАННЯ КОТУНІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ПРОГНОЗУЮЧИХ ANFIS-МОДЕЛЕЙ

*Запропоновано принцип керування температурним режимом процесу випалювання котунів на конвеєрній машині з використанням прогнозуючої ANFIS-моделі.*

### ВСТУП

Відомим є факт, що збільшення продуктивності, підвищення якості готової продукції та зменшення питомої витрати енергоносіїв можна досягти за рахунок удосконалення автоматизованих систем управління технологічними процесами (АСУ ТП). Одним з найперспективніших напрямків розвитку АСУ ТП гірничо-збагачувальних комбінатів є використання теорії керування на основі прогнозуючих моделей (Model Predictive Control, MPC), що забезпечують високі адаптивні властивості та можливість квазіоптимального керування нелінійними об'єктами в режимі реального часу з урахуванням обмежень на керуючі і вихідні змінні [1, 2]. В базовому варіанті MPC в якості моделі об'єкту керування використовується лінійна дискретна модель у просторі станів [2]. Однак відомо, що для більшості технологічних процесів гірничо-збагачувальних комбінатів, зокрема і для процесу температурної обробки котунів на конвеєрній випалювальній машині, достатньо складно отримати адекватну математичну модель. Це пов'язано з багатомірністю та стохастичними властивостями об'єктів керування, нестационарністю, наявністю великих часових запізнь, неможливістю безперервного контролю окремих технологічних показників [3, 4]. Тому для вирішення цієї проблеми можуть бути використані нелінійні багатомірні математичні моделі, зокрема нейромережеві та нечіткі.

Так, в роботі [1] в схемі MPC використовується лінійна дискретна модель у просторі станів, яка знаходиться з наслідків нечітких правил типу Такаґі – Сугено прямим способом. В роботі [5] запропоновано для прогнозування показників процесу збагачення використовувати нейромережеві моделі NNARX (нейромережева авторегресійна модель, екзогенний тип сигналів) та NNOE (нейромережева модель помилки виходу).

Для отримання високих показників якості котунів при забезпеченні ресурсозберігаючої технології необхідно забезпечити бажаний розподіл температур уздовж випалювальної машини шляхом стабілізації температури в кожній газоповітряній камері. Регулювання температури котунів в різних зонах випалювальної машини здійснюється шляхом змінення кількості теплоносія, що фільтрується через шар. Наприклад, розглянемо зону сушки 2. В цю зону газ-теплоносії з температурою 900–1000 °С надходить прямим перетоком із зони охолодження 1. Задане значення температури на вході в шар (350–450 °С) підтримується за рахунок розбавлення теплоносія холодним повітрям із зони охолодження 2, що подається через бічні форкамери. Змінення витрати холодного повітря дозволяє також компенсувати збурення, пов'язані зі змінами висоти шару котунів, швидкості візків випалювальної машини, температури та тиску теплоносія, що надходить в зону сушки 2 із зони охолодження прямим перетоком [6].

В існуючих системах автоматизації стабілізація температури в газоповітряних камерах зони сушки 2 здійснюється шляхом змінення витрати холодного по-

вітря  $Q_{\text{хп}}$  за допомогою дроселів на основі результатів вимірювання значення температури над шаром котунів у відповідній камері  $T_{c2}$ . Як вказано в роботі [6], передаточна функція об'єкту по каналу «температура в горні зони сушки 2 – витрата холодного повітря» має вигляд

$$W(p) = \frac{T_{c2}(p)}{Q_{\text{хп}}(p)} = \frac{K \cdot e^{-\tau \cdot p}}{T \cdot p + 1}, \quad (1)$$

де коефіцієнт підсилення  $K$ , постійна часу  $T$  та величина запізнення  $\tau$  змінюються в часі під впливом діючих на об'єкт збурень. Об'єкти регулювання температури в інших технологічних зонах випалювальної машини можуть бути описані аналогічними передаточними функціями. В якості регуляторів використовуються типові ПІД-регулятори з постійними коефіцієнтами. Але з урахуванням нестационарності об'єкту подібні системи в цілому не задовольняють вимогам до точності та швидкодії керування температурним режимом.

### ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

З урахуванням вказаних особливостей технологічного процесу температурної обробки котунів на випалювальної машині автори вважають перспективним використання математичної моделі, яка реалізується на базі адаптивної нейро-нечіткої системи (ANFIS). ANFIS-системи поєднують переваги нейронних мереж та нечітких моделей – вони мають високу апроксимуючу здатність, можуть навчатися в процесі роботи, дозволяють формалізувати та включити в модель нечітку інформацію, отриману від експертів і виражену в лінгвістичній формі, дозволяють пояснити отримані результати.

Метою даної статті є розробка принципів керування температурним режимом процесу випалювання котунів на конвеєрній машині з використанням прогнозуючої ANFIS-моделі.

### РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Підвищення якості керування температурним режимом обробки котунів можна досягти за рахунок використання системи керування з прогнозуючою моделлю, реалізованою на базі адаптивної нейро-нечіткої системи. Структурна схема відповідної системи автоматичного керування температурним режимом в зоні сушки 2 наведена на рис. 1. ANFIS-модель апроксимує нелінійну залежність керованої величини (температури  $T_{c2}$  в горні зони сушки 2) від керуючої дії (витрати холодного повітря через бічні форкамери  $Q_{\text{хп}}$ ) та діючих на об'єкт координатних збурень – висоти шару котунів  $H_{\text{ш}}$ , швидкості візків випалювальної машини  $V_{\text{ом}}$ , температури  $T_{c1}$  в останній газоповітряній камері попередньої технологічної зони (зони сушки 1), температури

$T_{\text{гп}}$  та тиску  $P_{\text{гп}}$  теплоносія, що надходить в зону сушки 2 через колектор прямої течії. Використання моделі дозволяє спрогнозувати динаміку змінення температури в горні зони на певному інтервалі часу при заданих початкових умовах та певних значеннях керуючої дії. При повторенні процедури навчання ANFIS-моделі з періодом, меншим за інтервал квазістационарності об'єкту керування, забезпечується також адаптація моделі до параметричних збурень (погіршення газозічності газопроводів і колекторів тощо). Для вимірювання поточного значення температури в горні зони сушки 2 використовується вимірювач температури  $BT$ . Адаптивний регулятор здійснює змінення керуючої дії з метою підтримання екстремального значення обраного критерію керування в залежності від змін зовнішніх впливів та властивостей об'єкту. Внутрішній контур (контур витрати лівої сторони) призначений для підтримання заданої витрати повітря за результатами вимірювань її фактичного значення. Контур складається з клапана холодного повітря  $K$ , виконуючого пристрою  $ВП$ , витратоміра  $ВВ$  та регулятора витрати  $PВ$ . Контур витрати правої сторони є веденим і автоматично слідує за змінням витрати через пальник ведучої (лівої) сторони. Вигляд та параметри передаточних функцій клапана, виконуючого пристрою та витратоміру залежать від вибору технічних засобів автоматизації для реалізації системи. В якості регулятора витрати може бути використаний типовий цифровий регулятор (ПІ або ПІД), що забезпечує налаштування контуру на технічний оптимум.

Аналогічний підхід може бути використаний для реалізації контурів керування температурним режимом в газоповітряних камерах зон нагріву, випалювання та охолодження, контуру керування тепловим навантаженням у випалюванні. Для різних зон будуть відрізнятися керуючі дії та вхідні параметри прогнозуючих моделей.

Входами прогнозуючої моделі на кроці  $k + 1$  є послідовність поточного та  $m$  попередніх значень керуючої дії

$$Q_{\text{хп}}(k+1)_0^m = [Q_{\text{хп}}(k+1), Q_{\text{хп}}(k), \dots, Q_{\text{хп}}(k-m+1)],$$

послідовності  $n$  попередніх значень вимірюваних збурень

$$\begin{aligned} \{H_{\text{ш}}(k)\}_1^n &= [H_{\text{ш}}(k), H_{\text{ш}}(k-1), \dots, H_{\text{ш}}(k-n+1)], \\ \{V_{\text{ом}}(k)\}_1^n &= [V_{\text{ом}}(k), V_{\text{ом}}(k-1), \dots, V_{\text{ом}}(k-n+1)], \\ \{T_{c1}(k)\}_1^n &= [T_{c1}(k), T_{c1}(k-1), \dots, T_{c1}(k-n+1)], \\ \{T_{\text{гп}}(k)\}_1^n &= [T_{\text{гп}}(k), T_{\text{гп}}(k-1), \dots, T_{\text{гп}}(k-n+1)], \\ \{P_{\text{гп}}(k)\}_1^n &= [P_{\text{гп}}(k), P_{\text{гп}}(k-1), \dots, P_{\text{гп}}(k-n+1)] \end{aligned}$$

та послідовність  $n$  попередніх виміряних значень керованої величини об'єкту

$$\{T_{c2}(k)\}_1^n = [T_{c2}(k), T_{c2}(k-1), \dots, T_{c2}(k-n+1)].$$

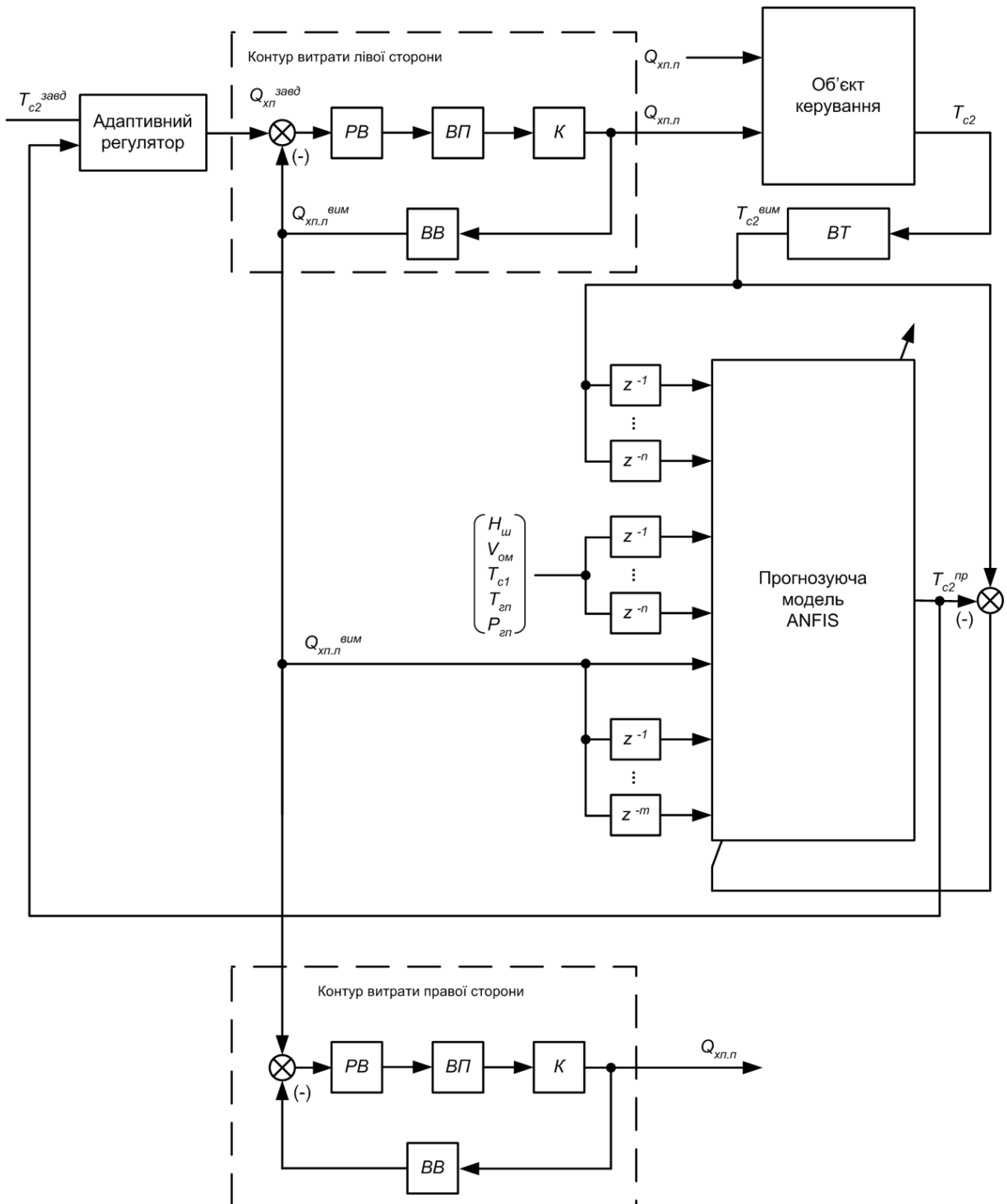


Рисунок 1 – Структурна схема системи керування температурним режимом в горні зони сушки 2 послідовності п попередніх значень вимірюваних збурень

В загальному випадку глибина затримки по кожній вхідній та вихідній змінній може бути різною.

Результат прогнозування значення температури в горні зони сушки 2 на один крок вперед визначається за формулою

$$\begin{aligned} \hat{T}_{c2}(k+1) = & \\ = NPM(\{T_{c2}(k)\}_1^n, \{H_{ш}(k)\}_1^n, \{V_{ом}(k)\}_1^n, \{T_{c1}(k)\}_1^n, & \\ \{T_{гн}(k)\}_1^n, \{P_{гн}(k)\}_1^n, \{Q_{хп}(k+1)\}_0^m), & \end{aligned} \quad (2)$$

де  $NPM(\bullet)$  – оператор нелінійного перетворення типу «вхід – вихід», яке виконується ANFIS-моделлю.

За аналогією з роботами [1, 2], при керуванні температурним режимом випалювання котунів метою керування є виконання рівностей

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} \|T(t) - T^{завд}(t)\| = 0, \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \|Q(t) - Q^{завд}(t)\| = 0, \end{aligned} \quad (3)$$

де  $T(t)$  – температура в певній газоповітряній камері,  $Q(t)$  – керуюча дія, а функції  $T^{завд}(t)$  і  $Q^{завд}$  визначають бажаний рух об'єкту.

Задача оптимального керування температурним режимом процесу випалювання може бути сформульована як пошук керуючої дії, що забезпечує досягнення заданої мети керування (3) та мінімізує обраний функціонал якості з урахуванням обмежень на вхідні та вихідні змінні.

При використанні MPC-методу модель на основі поточного стану при заданій керуючій дії дозволяє отримати прогноз траєкторії руху вихідних змінних об'єкту на інтервалі прогнозування  $P$ . На основі отриманого прогнозу адаптивний регулятор вирішує задачу про вибір оптимального керування на інтервалі  $P$ , та подає його на об'єкт на інтервалі керування  $C$ ,  $C \leq P$ . Далі процес повторюється.

Так, для оцінки якості керування температурним режимом обробки котунів в зоні сушки 2 на інтервалі прогнозування  $P$  доцільно використовувати квадратичний функціонал вигляду

$$\begin{aligned} J_k = J_k(\bar{T}_{c2}(k+1), \bar{Q}_{хп}(k+1), P) = & \\ = \sum_{j=1}^P [(\hat{T}_{c2}(k+j) - r_x(k+j)) \cdot R_{k+j} \times & \\ \times (\hat{T}_{c2}(k+j) - r_x(k+j)) + & \\ + Q_{хп}(k+j) \cdot S_{k+j} \cdot Q_{хп}(k+j)], & \end{aligned} \quad (4)$$

де  $R_{k+j}$  – вагові коефіцієнти, які оцінюють ступінь небажаності відхилення температури на кроці  $k+j$  від

заданого значення,  $S_{k+j}$  – коефіцієнти, що враховують вартість енергії керуючої дії, а

$$\begin{aligned} \bar{T}_{c2}(k+1) = [\hat{T}_{c2}(k+1), \hat{T}_{c2}(k+2), \dots, \hat{T}_{c2}(k+P)]^T, \\ \bar{Q}_{хп}(k+1) = [Q_{хп}(k+1), Q_{хп}(k+2), \dots, Q_{хп}(k+P)]^T \end{aligned}$$

– допоміжні вектори.

Авторами виконано комп'ютерне моделювання запропонованої системи керування температурним режимом обробки котунів в середовищі MATLAB 7.0. Для апроксимації залежності температури в зоні від витрати холодного повітря, яка наближено може бути описана передаточною функцією (1) зі змінними параметрами, використовувалася ANFIS-модель, входами якої було обрано поточне значення витрати  $Q_{хп}$  та послідовність з трьох попередніх вимірних значень температури над шаром котунів. Для кожної вхідної змінної були визначені по дві функції приналежності узагальненого дзвоноподібного типу. База правил ANFIS-моделі містила 16 правил типу Такагі – Сугено, які описували всі можливі комбінації функцій приналежності вхідних величин. Наступне значення температури  $T_{c2}$  визначалося за формулою

$$\begin{aligned} \hat{T}_{c2}(k+1) = & \\ = NPM(T_{c2}(k), T_{c2}(k-1), T_{c2}(k-2), Q_{хп}(k+1)). & \end{aligned} \quad (5)$$

Результати тестування ANFIS-моделі при прогнозуванні значення температури в горні зони сушки 2 на один крок вперед наведені на рис. 2. Так, на рис. 2, а наведено

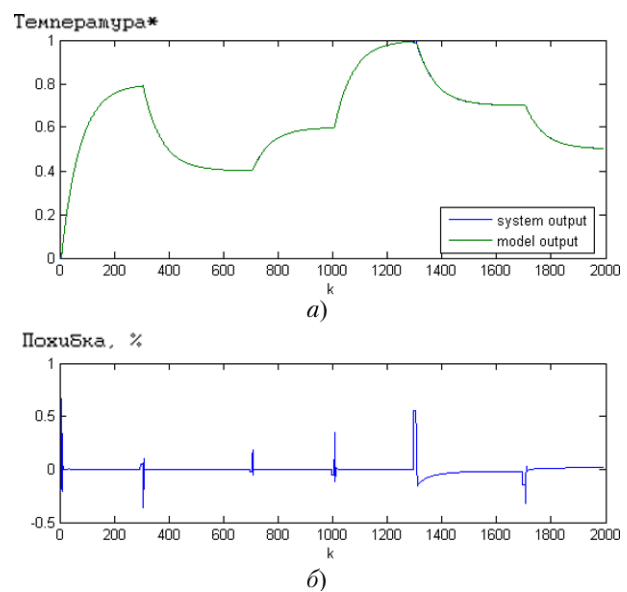


Рисунок 2 – Результати тестування ANFIS-моделі при прогнозуванні значення температури в горні зони сушки 2

графік реакції об'єкту (system output) на тестовий сигнал, а також графік змінення вихідного значення ANFIS-моделі (model output). На рис. 2, б наведено графік змінення похибки прогнозування.

Аналіз наведених графіків свідчить, що при використанні ANFIS-моделі похибка прогнозування значення температури на один крок вперед не перевищує 0,5 % абс.

Для визначення допустимого значення інтервалу прогнозування авторами було виконано дослідження можливості прогнозування температури в горні зони сушки на декілька кроків вперед. Аналіз отриманих результатів дозволяє стверджувати, що при прогнозуванні на 5–6 кроків вперед похибка не перевищує 1 % абс. Отже, при використанні ANFIS-моделі у складі системи керування температурним режимом випалювання котунів можливий інтервал прогнозування  $P$  дорівнює 5 крокам.

Задача пошуку оптимального на інтервалі  $P$  керування для прогнозуючої моделі (5) полягала у знаходженні векторної функції

$$\bar{Q}_{\text{хп}}(k+1) = [Q_{\text{хп}}(k+1), Q_{\text{хп}}(k+2), \dots, Q_{\text{хп}}(k+P)]^T,$$

що мінімізує функціонал (4)

$$J_k(\bar{T}_{c2}(k+1), \bar{Q}_{\text{хп}}(\bullet), P) \rightarrow \min_{\bar{Q} \in M}, \quad (6)$$

при обмеженнях на кожному кроці

$$Q_{\text{хп}}^{\min}(k+1) \leq Q_{\text{хп}}(k+1) \leq Q_{\text{хп}}^{\max}(k+1),$$

де  $Q_{\text{хп}}^{\min}(k+1)$ ,  $Q_{\text{хп}}^{\max}(k+1)$  – відповідно мінімальне та максимальне значення керуючої дії;  $M$  – допустима множина керувань.

Оскільки залежність (5) температури  $T_{c2}$  в горні зони сушки 2 від керуючої дії  $Q_{\text{хп}}$  є нелінійною, для знаходження розв'язку задачі оптимізації (6) використовувався метод прямого пошуку.

На рис. 3 наведені результати комп'ютерного моделювання системи керування температурним режимом випалювання котунів з використанням прогнозуючої ANFIS-моделі. Так, на рис. 3, а наведено графік перехідного процесу у вихідній системі при поданні на вхід ступінчастої дії (T2), а також графік перехідного процесу при поданні на вхід об'єкту керуючої дії, що знаходилася як розв'язок задачі (6) при горизонті прогнозування  $P = 5$  (T1). При моделюванні величина інтервалу керування дорівнювала величині інтервалу прогнозування ( $C = P$ ). Відповідний графік змінення керуючої дії (витрати повітря) наведено на рис. 3, б.

Аналіз отриманих результатів дозволяє стверджувати, що при використанні MPC-методу з прогнозуючою

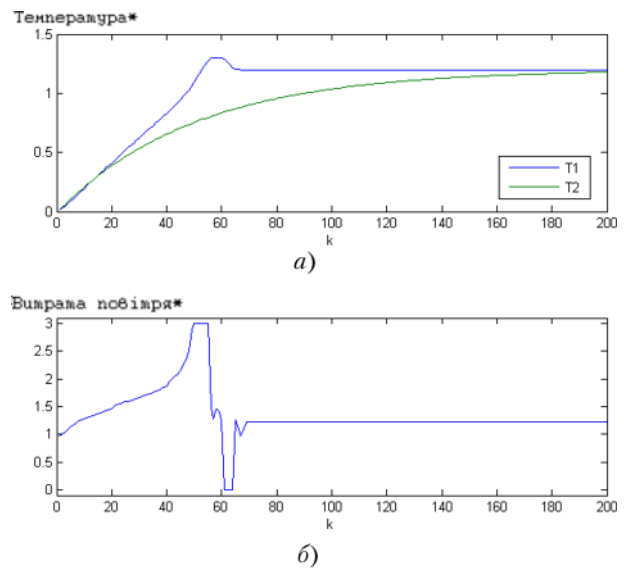


Рисунок 3 – Результати комп'ютерного моделювання системи керування температурним режимом випалювання котунів в зоні сушки 2 з використанням прогнозуючої ANFIS-моделі

ANFIS-моделлю швидкодія системи керування температурою в горні зони сушки 2 збільшується на 5–10 % при наявності перерегулювання в межах 5 %, статична похибка відсутня.

## ВИСНОВОК

Для керування температурним режимом випалювання котунів на конвеєрній машині доцільно застосовувати MPC-метод з прогнозуючою ANFIS-моделлю, що дозволяє виконувати ідентифікацію об'єкту та здійснювати в режимі реального часу оптимальне керування продуктивністю та якістю продукції при раціональному використанні енергоносіїв.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Поркуян О. В. Принципы прогнозирующего управления технологическим процессом обогащения железных руд на основе нечетких моделей // Вісник Криворізького технічного університету. – Вип. 18. – Кривий Ріг: КТУ. – 2007. – С. 178–184.
2. Веремей Е. И., Еремеев В. В., Сотникова М. В. Пособие "Model Predictive Control Toolbox" [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://matlab.exponenta.ru/modelpredict/Book1/index.php>. – Загл. с экрана.
3. Купин А. И., Рубан С. А. Исследование инверсных моделей нейроконтроллера для систем интеллектуального управления ТП горнорудных предприятий // Вісник Криворізького технічного університету. – Вип. 18. – Кривий Ріг: КТУ, 2007. – С. 157–161.
4. Рубан С. А., Лобов В. Й. Использование нечетких регуляторов для автоматизации технологического процесса обжига окатышей на конвейерных обжиговых машинах // Разраб. рудн. месторожд. – Вип. 91. – Кривий Ріг: КТУ, 2007. – С. 188–193.

5. Купин А. И. Нейросетевое прогнозирование показателей обогащения магнетитовых кварцитов // Вісник НТУ «ХПІ». – № 26. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2006. – С. 23–31.
6. Ксендзовский В. Р. Автоматизация процессов производства окатышей. – М.: Металлургия, 1971. – 216 с.

Надійшла 9.01.2008

*Предложен принцип управления температурным режимом процесса обжига окатышей на конвейерной машине с использованием прогнозирующей ANFIS-модели.*

*The control principle of temperature conditions of rolled briquettes sintering process on conveyor machine based on the predictive ANFIS model is suggested.*

УДК 681.5.015.73:621.34

В. І. Мороз

## АНАЛІЗ РАЦІОНАЛЬНОГО ПОРЯДКУ АПРОКСИМАЦІЙНОГО ПОЛІНОМА ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ ІНФОРМАЦІЇ ЗА ЇЇ ДИСКРЕТНИМИ ВІДЛІКАМИ

*З використанням частотних характеристик виконано дослідження раціонального порядку апроксимаційного полінома для відтворення сигналу за його дискретними відліками.*

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Однією з основних задач у цифрових системах керування або обробки інформації є відтворення неперервного сигналу за його дискретними відліками. Потрібно зауважити, що дана проблема може бути вирішена лише алгоритмічним шляхом у процесі формування сигналів керування, у той же час фізична реалізація можлива тільки для фіксатора нульового порядку, найпростішим варіантом якого в цифрових системах є звичайний багаторозрядний регістр. Відомо, що фіксатор нульового порядку вносить як амплітудну, так і, найголовніше, фазну похибку, що пов'язані з його півперіодним запізненням [1, 2]. Одним зі способів корекції такого запізнення в цифрових системах є використання апроксимацій сигналу вищих порядків для оцінки внесеної процесом дискретизації похибки та її компенсації.

Зрозуміло, що будь-яке відтворення сигналу за його дискретними відліками є наближенням і відображає первинний сигнал з певною похибкою. Таким чином, постає задача аналізу раціонального порядку апроксимаційного полінома, який би забезпечував необхідну точність відновлення неперервної інформації за умови найпростішого апроксимуючого виразу, тобто, за мінімальних програмно-апаратних витрат.

### АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Огляд існуючих літературних джерел [3–6] показує, що в галузі розробки математичних основ циф-

рових систем домінує класичний підхід, закладений ще його основоположниками [1, 2]. Нічого не змінилося і в розробці практичних цифрових систем, коли навіть дуже складні сучасні алгоритми керування базуються на числових методах і способах дискретизації неперервних систем, які мають щонайменше піввікову історію [3, 4], а основна увага надається системам керування верхнього рівня ієрархії, паралельним і розподіленим системам [6]. Паралельно продовжують розвиватися числово-аналітичні підходи до синтезу цифрових систем [7].

*Метою досліджень є визначення раціонального порядку апроксимаційного полінома для відтворення неперервного сигналу за його дискретними відліками та оцінка похибки, яка внесена процесом дискретизації.*

Як відомо, у дискретних системах сигнали подаються своїми відліками, що найчастіше рівномірно розподілені в часі. Їхня наявність створює одну з основних проблем, які потребують свого вирішення в процесі реалізації цифрових систем – відновлення значення сигналу в проміжках між відліками. Як правило, це здійснюється шляхом апроксимації за кількома послідовними відліками за допомогою полінома відповідного порядку з наступною, за необхідністю, інтерполяцією. При цьому мета такої операції залишається незмінною – знаходження діючого значення неперервного сигналу, який відновлено за його дискретними значеннями.

Зрозуміло, що збільшення кількості послідовних відліків для побудови апроксимаційного полінома підвищує точність процедури відновлення, проте існує розумна межа, вище якої подальше збільшення відліків не дає відчутного підвищення точності. Раціональний порядок апроксимаційного поліному для сиг-

© Мороз В. І., 2008