

ук. т-ва ім. Т.Г. Шевченка. - Донецьк: Сх. вид. дім - 1999. - 136 с.

3. **Нікітін І.М.** Селективна флокуляція вугільних шламів латексами / **І.М. Нікітін, П.В. Сергєєв, В.С. Білецький;** Донецьк. держ. техн. ун-т, Наук. т-во ім. Т.Г. Шевченка. – Донецьк : Сх. вид. дім, 2001. – 150 с.

Рукопис подано до редакції 19.03.13

УДК 681.5: 622.7

В.В. ТРОНЬ, асистент, ДВНЗ «Криворізький національний університет»

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ІДЕНТИФІКАЦІЇ СИСТЕМ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ ЗБАГАЧЕННЯ ЗАЛІЗОРУДНОЇ СИРОВИНИ

Наведено результати аналізу методів ідентифікації систем керування в умовах процесів збагачувальної технології. Показано можливість побудови автоматизованих систем керування технологічними процесами збагачення залізорудної сировини з використанням методів індуктивного моделювання.

Проблема та її зв'язок за науковими і практичними завданнями. Забезпечення сталого розвитку гірничорудних підприємств України в умовах ринкових відносин вимагає постійного зниження собівартості та енергоємності технологічних процесів видобутку і переробки сировини. Протягом останніх десятиліть якість залізорудної сировини має негативну динаміку. У зв'язку з цим значна її кількість не може бути перетворена у кондиційний товарний продукт. Ситуація ускладнюється високою питомою енергоємністю технологічних процесів. Зокрема, у загальному обсязі енерговитрат вітчизняних гірничорудних підприємств частка рудозбагачувальної фабрики складає близько 20 %, що є другим за величиною показником після фабрики огрудкування, частка якої - понад 50 %. Щодо витрат електроенергії, то збагачувальне відділення є найбільш енергоємним - його частка становить близько 44 %. Отже, при обґрунтуванні заходів з підвищення ефективності технологічних процесів видобутку і переробки залізорудної сировини слід звернути особливу увагу на збагачувальне відділення.

Результати досліджень [1-5] свідчать про наявність резервів підвищення ефективності технологічних процесів збагачення залізорудної сировини, що можуть бути виявлені і використані шляхом дослідження і удосконалення критеріїв, моделей, методів і засобів автоматизованого керування технологічними процесами.

Аналіз досліджень і публікацій. Процес збагачення залізорудної сировини в умовах технологічної лінії рудозбагачувальної фабрики як об'єкт автоматизованого керування представлено множиною векторів: $\bar{V} = \{v_1, v_2, v_3, \dots, v_{n_v}\}$ - вектор вхідних некерованих параметрів; $\bar{U} = \{u_1, u_2, u_3, \dots, u_{n_u}\}$ - вектор впливів керування; $\bar{Y} = \{y_1, y_2, y_3, \dots, y_{n_y}\}$ - вектор вихідних параметрів системи; n_v, n_u, n_y - відповідна кількість параметрів. При цьому, стан об'єкту керування описують виразом [1]

$$\bar{X} = \{\bar{U}, \bar{V}, \bar{Y}\} = \left\{ \begin{array}{l} \bar{V} = \{\bar{\alpha}, \bar{\xi}, \bar{\rho}, \bar{g}, d_0\} \\ \bar{U} = \{Q_0, \bar{Q}, \bar{C}, \bar{d}, \bar{P}_m, \bar{\rho}_\kappa, \bar{\rho}_c\} \\ \bar{Y} = \{\bar{\beta}_m, \bar{\beta}_{x\kappa}, \beta_\kappa, \bar{\gamma}, \gamma_\kappa, \bar{\varepsilon}, \varepsilon_\kappa\} \end{array} \right. \quad (1)$$

де $\bar{\alpha} = \{\alpha_i\}$, $i = 1 \dots N_r$ - вміст корисного компонента у вихідній руді за всіма технологічними різновидами; N_r - кількість технологічних різновидів; $\bar{\xi} = \{\xi_i\}$, $i = 1 \dots N_r$ - масова частка кожного різновиду; $\bar{\rho} = \{\rho_i\}$, $i = 1 \dots N_r$ - група показників, що характеризують фізико-хімічні властивості руди; $\bar{g} = \{g_i\}$, $i = 1 \dots N_r$ - показник, що характеризує мінералогічні та морфологічні властивості збагачуваної руди; d_0 - усереднена крупність руди перед збагаченням; Q_0 - витрата руди на першій стадії збагачення; $\bar{Q} = \{Q_j\}$, $j = 1 \dots N_s$ - переробка на виході кожної стадії; N_s - кількість стадій збагачення; $\bar{C} = \{C_j\}$, $j = 1 \dots N_s$ - циркуляційне (піскове) навантаження відповідної стадії; $\bar{d} = \{d_j\}$, $j = 1 \dots N_s$ - усереднена крупність продукту після кожної j -ї стадії збагачення; $\bar{\rho}_\kappa = \{\rho_{\kappa j}\}$, $i = 1 \dots N_s$ - щільність пульпи в процесі класифікації відповідно для j -ї

стадії; $\bar{\rho}_c = \{\rho_{c,j}\}$ $j = 1 \dots N_s$ - щільність пульпи перед магнітною сепарацією (зливів класифікатора) відповідно для j -ї стадії; $\bar{\beta}_{mn} = \{\beta_{mn,j}\} = \{\beta_j\}$ $j = 1 \dots N_s$ - вміст корисного компонента у промисловому продукті після j -ї стадії; $\bar{\beta}_{xs} = \{\beta_{xs,j}\} = \{\beta_{x,j}\}$ $j = 1 \dots N_s$ - втрати корисного компонента у хвостах після j -ї стадії; β_k - якість концентрату; $\bar{\gamma} = \{\gamma_j\}$ $j = 1 \dots N_s$ - вихід корисного компонента у промисловому продукті після j -ї стадії; γ_k - вихід корисного компонента у концентраті; $\bar{\varepsilon} = \{\varepsilon_j\}$ $j = 1 \dots N_s$ - витяг корисного компонента у промисловому продукті після j -ї стадії; ε_k - витяг корисного компонента у концентраті.

Виходячи з нелінійного, динамічного і нестационарного характеру технологічних процесів збагачення як об'єктів керування запропоновано здійснювати їх математичний опис у класі моделей Гамерштейна [2]: паралельної ортогональної моделі

$$R_{y^g y^k}(j\omega) = \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{1}{2i! \sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} y(x) G_i(x) e^{-x^2} dx \right) \cdot {}_s H_k(j\omega) \cdot R_{g_{xi} g_{yk}}(j\omega), \quad (2)$$

де $R_{y^g y^k}(j\omega)$ - кроскореляційна функція після ортогоналізації; $R_{g_{xi} g_{yk}}(j\omega)$ - автокореляційна функція після ортогоналізації; $G_k(X)$ - ортогональні поліноми Ерміта; $M[\cdot]$ - математичне сподівання; та паралельно-рекурсивної ортогональної моделі

$$R_{y^g y^k}(j\omega) = \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{1}{2i! \sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} y(x) G_i(x) e^{-x^2} dx \right) \cdot {}_s H_k(j\omega) \cdot R_{g_{yi} g_{yk}}(j\omega), \quad (4)$$

з використанням яких було виконано ідентифікацію технологічних об'єктів подрібнення, класифікації та магнітної сепарації.

У працях [3,4] запропоновано гібридну математичну модель замкнутого циклу подрібнення руди, аналітична частина якої описує рудопотоки і змінення гранулометричного складу перероблюваної руди в технологічних агрегатах, а для формування функцій розділення і подрібнення використовуються нечіткі правила Такагі-Сугено

$$\begin{cases} \dot{x} = f_a(x, u | f_b(x, u, \theta)); \\ y = g(x), \end{cases} \quad (5)$$

де f_a - аналітична частина моделі; f_b - частина моделі типу «чорна скринька», що задається вектором параметрів θ . Відзначається, що основним завданням керування роботою збагачувального обладнання, зокрема, гідроциклону, є забезпечення такого режиму функціонування, який гарантує необхідний для ефективного розкриття вкраплень корисного компонента гранулометричний склад рудного матеріалу.

При формуванні інтелектуального керування технологічний процес збагачення магнетитових кварцитів запропоновано розглядати як багатовимірну дискретну систему у матрично-векторній формі [1]

$$S: Z^P = \left\{ \bar{u}_i^T(k), \bar{y}_j^T(k), \quad k = \overline{1, T}; i = \overline{1, N}; j = \overline{1, M} (N > M) \right\} = \left. \begin{array}{l} [u_i(k), u_i(k+1), \dots, u_i(k+T), y_j(k), y_j(k+1), \dots, y_j(k+T)], \\ [u_{i+1}(k), u_{i+1}(k+1), \dots, u_{i+1}(k+T), y_{j+1}(k), y_{j+1}(k+1), \dots, y_{j+1}(k+T)] \\ [u_{i+2}(k), u_{i+2}(k+1), \dots, u_{i+2}(k+T), y_{j+2}(k), y_{j+2}(k+1), \dots, y_{j+2}(k+T)] \\ \dots \dots \dots \\ [u_{i+M}(k), u_{i+M}(k+1), \dots, u_{i+M}(k+T), y_{j+M}(k), y_{j+M}(k+1), \dots, y_{j+M}(k+T)] \\ [u_{i+M+1}(k), u_{i+M+1}(k+1), \dots, u_{i+M+1}(k+T)] \\ \dots \dots \dots \\ [u_{i+N}(k), u_{i+N}(k+1), \dots, u_{i+N}(k+T)] \end{array} \right\} \quad (6)$$

де $\bar{u}_i^T(k)$ - множина транспонованих векторів сигналів керування на вході системи; $y_j^T(k)$ - множина транспонованих векторів на виході; N - кількість сигналів (технологічних па-

раметрів) на вході; M - кількість сигналів на виході ($N > M$). Для ідентифікації технологічних процесів збагачення як багатозв'язних нелінійних динамічних об'єктів запропоновано використовувати багатовимірні аналоги нейромережових предикторів: NNARX, NNARXMAX, NNOE. При автоматизованому керуванні локальними процесами, переважно більшість яких складають одноканальні схеми, використано інверсні динамічні моделі

$$\hat{u}(k) = NC(y(k+1), y(k), \dots, y(k-l_1+1), u(k-1), \dots, u(k-l_2)), \quad (7)$$

де $NC(\cdot) = NN^{-1}(\cdot)$ - функція, що реалізує зворотне нейромережеве перетворення.

Комплексну математичну модель, що поєднує процеси переробки і збагачення залізної руди з оптимізацією режимів роботи технологічних комплексів гірничо-збагачувального комбінату запропоновано у праці [5]

$$W(z) = \frac{R_{uy}(z)}{R_{uu}(z)} = \frac{R_{uy}(0)z^2 + R_{uy}(1)z^1 + R_{uy}(2)z^0}{R_{uu}(0)z^L + R_{uu}(1)z^0 + R_{uu}(2)z^{-L}} = \frac{y(z)}{u(z)}, \quad (8)$$

де $R_{uy}(z)$, $R_{uu}(z)$ - взаємкореляційна функція між вхідною та вихідною дією та автокореляційна функція вхідної дії відповідно; $y(z)$ - зображення вихідної дії; $u(z)$ - зображення вхідної дії; z - змінна z -перетворення. Для побудови математичної моделі запропоновано використовувати обмежену кількість значень кореляційних функцій технологічних параметрів, суттєво не знижуючи при цьому точність моделі.

У основу запропонованого у праці [6] методу синтезу адаптивних ARMA-систем керування технологічними процесами покладено застосування структури різницевої моделі ADL(p, q). Адаптивні властивості таких моделей отримано за рахунок застосування розробленого методу нейроморфного настроювання вагових коефіцієнтів $\gamma_0, \gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n$ у дискретній адаптивній структурі ARMABiS

$$y[i] = \mu \sum_{j=0}^q \gamma_j x[i-j] + (1-\mu) \cdot \left(\sum_{j=1}^{p-1} (-1)^{j+1} \cdot p \cdot y[i-j] + (-1)^{p+1} \cdot y[i-p] \right) + \mu \varepsilon[i], \quad (9)$$

яка розроблена на базі визначення еталонного значення $y^*(t)$ вихідної координати об'єкта керування $y(t)$ у дискретній MA(q)-моделі з розподіленим лагом порядку ($0, q$)

$$y^*[i] = \alpha + \sum_{j=0}^q \gamma_j x[i-j] + \varepsilon[i], \quad (10)$$

і його виключення з кінцевих різниць

$$\Delta^m y[i] = \mu(1-B)^m = \mu(\Delta^{m-1} y^*[i] - \Delta^{m-1} y[i-1]), \quad i = 0 \dots n-m, \quad (11)$$

де B - лаговий оператор; μ - коефіцієнт регуляризації ARMABiS-структури. Нейроморфну адаптацію вагових коефіцієнтів $\gamma_0, \gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n$ здійснено на базі модифікованого градієнтного методу мінімізації квадратичного функціоналу.

Серед методів ідентифікації складних об'єктів керування варто виділити методи індуктивного моделювання, зокрема, метод групового урахування аргументів (МГУА) [7], що надають можливість автоматично здійснювати пошук взаємозалежностей у даних та вибір оптимальної структури математичної моделі. Даний підхід виявився ефективним при формуванні автоматизованого керування першою стадією збагачення залізної руди [8]. Отже, доцільним є дослідження можливості застосування МГУА для ідентифікації інших стадій і всього комплексу технологічних процесів збагачення залізородної сировини.

Постановка завдання. Завданням даної роботи є дослідження можливості застосування методів індуктивного моделювання для формування автоматизованого керування технологічними процесами збагачення залізородної сировини.

Викладення матеріалу і результати дослідження. У загальному вигляді задача ідентифікації полягає у формуванні за даними вибірки деякої множини моделей \mathcal{T} різної структури виду [9]

$$\hat{y}_f = f(X, \hat{\theta}_f), \quad (12)$$

де \hat{y}_f - розрахований вихідний вектор; f - модель; X - вхідна матриця даної вибірки; $\hat{\theta}_f$ - показ-

ник складності моделі; і пошуку оптимальної моделі згідно з умовою

$$f^* = \operatorname{argmin}_{f \in F} CR(y, f(X, \hat{\theta}_f)), \quad (13)$$

де f^* - оптимальна модель; $CR(\cdot)$ - критерій якості розв'язку задачі структурної ідентифікації; y - вихідний вектор даної вибірки. Оцінки параметрів у (12) для кожної моделі $f \in F$ є рішенням екстремальної задачі виду

$$\hat{\theta}_f = \operatorname{argmin}_{\theta_f \in R^m} QR(y, X, \theta_f), \quad (14)$$

де $QR(\cdot)$ - критерій якості розв'язку задачі параметричної ідентифікації для кожної часткової моделі виду (13), яка генерується у задачі структурної ідентифікації.

У МГУА переважно використовують поліноміальну базисну функцію, зокрема, функціональний ряд Вольєрра, дискретним аналогом якого є поліном Колмогорова-Габор [9]

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^M a_i x_i + \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M a_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^M a_{ijk} x_i x_j x_k, \quad (15)$$

де $X(x_1, x_2, \dots, x_M)$ - вхідний вектор; $A(a_1, a_2, \dots, a_M)$ - вектор коефіцієнтів. Компонентами вхідного вектора X можуть бути незалежні змінні, функціональні форми чи кінцеві різницеві члени. Для побудови моделі також можуть бути застосовані інші види нелінійних базисних функцій, наприклад диференціальні, логістичні, імовірнісні або гармонійні.

Серед переваг МГУА перед іншими алгоритмами структурної ідентифікації і селекції кращої регресії варто виділити такі [9]: знижені вимоги до обсягу первинної інформації; більший ступінь автоматизації процесу пошуку оптимальної моделі; автоматична адаптація складності оптимальної моделі та зовнішніх критеріїв до рівня перешкод у системі, що обумовлює робастність підходу.

Висновки і напрямки подальших досліджень. Отже, застосування індуктивного моделювання, зокрема, методу групового урахування аргументів, дозволяє отримати оптимальну структуру моделі та залежність вихідних параметрів від найбільш значимих вхідних параметрів технологічних процесів, що відкриває перспективи до збільшення точності математичних моделей і підвищення ефективності автоматизованого керування технологічними процесами збагачення залізорудної сировини.

Список літератури

1. **Купін А. І.** Узгоджене інтелектуальне керування стадіями технологічного процесу збагачення магнетитових кварцитів в умовах невизначеності: дис. ... доктора техн. наук: 05.13.07 / **Купін Андрій Іванович.** – Кривий Ріг, 2009. – 463 с.
2. **Поркуян О. В.** Керування нелінійними динамічними об'єктами збагачувальних виробництв на основі гібридних моделей Гамерштейна: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук : спец. 05.13.07 «Автоматизація процесів керування» / **О. В. Поркуян.** – Кривий Ріг, 2009. – 36 с.
3. **Моркун В. С.** Синтез гибридных нечетких моделей при формировании управления организационно-техническими системами / **В. С. Моркун, Н. В. Моркун, Н. С. Подгородецкий, Л. Ю. Инкина** // Вісник КТУ. – Кривий Ріг: КТУ. – 2010. – Вип. 25. – С. 234-238.
4. Инициализация гибридной нечеткой модели замкнутого цикла измельчения руды / **В. С. Моркун, Н. В. Моркун, Н. С. Подгородецкий, А. В. Пикильняк** // Вісник КТУ. – 2010. – Вип. 26. – С. 290-293.
5. **Назаренко М. В.** Оптимальне управління технологічним процесом залізорудного комбінату на основі прогнозу технологічних показників для підвищення прибутку підприємства : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук : спец. 05.13.07 «Автоматизація процесів керування» / **М. В. Назаренко.** - К., 2010. - 32 с.
6. **Шокін В. П.** Адаптивне керування агломераційним комплексом на основі авторегресійних структур з регуляризцією : дис. ... доктора техн. наук: 05.13.07 / **Шокін Вадим Петрович.** – Кривий Ріг, 2012. – 443 с.
7. **Ивахненко А. Г.** Долгосрочное прогнозирование и управление сложными системами. - К.: Техника, - 1975. – 312 с.
8. **Шмалый С. В.** Система управления первой стадией в АСУ ТП железорудных обогатительных фабрик: дисс. ... канд. техн. наук: 05.13.07 / **Шмалый Сергей Владимирович.** – К., 1989. – 174 с.
9. **Ивахненко А. Г.** Индуктивные методы анализа и прогнозирования сложных экономических систем [Электронный ресурс] / **А. Г. Ивахненко, Г. А. Ивахненко.** - Режим доступа: www.gmdh.net/articles/rus/ukreconr.zip

Рукопись поступила в редакцию 23.03.13