

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«НАЦІОНАЛЬНИЙ ГІРНИЧИЙ УНІВЕРСИТЕТ»

ГЕРАСІНА ОЛЕКСАНДРА ВОЛОДИМИРІВНА

УДК 681.5.015: 62-52

**ІДЕНТИФІКАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ
КРУПНОГО ДРОБЛЕННЯ І САМОЗДРІБНЮВАННЯ РУД
З ВИКОРИСТАННЯМ ВАРІАЦІЇ СТРУКТУР МОДЕЛЕЙ**

Спеціальність:
05.13.07 – автоматизація процесів керування

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дніпропетровськ – 2012

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі електроніки та обчислювальної техніки Державного вищого навчального закладу «Національний гірничий університет» (м. Дніпропетровськ) Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України.

Науковий керівник:

доктор технічних наук, доцент

Корнієнко Валерій Іванович,

Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет» (м. Дніпропетровськ) Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України, професор кафедри електроніки та обчислювальної техніки.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор

Поркуян Ольга Вікторівна,

Технологічний інститут Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля (м. Сєвєродонецьк) Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України, директор.

доктор технічних наук, професор

Сільвестров Антон Миколайович,

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України, професор кафедри теоретичної електротехніки.

Захист відбудеться «__»_____ 2012 р. о ___ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.080.07 при Державному вищому навчальному закладі «Національний гірничий університет» Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України (49027, м. Дніпропетровськ, просп. К. Маркса, 19).

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Державного вищого навчального закладу «Національний гірничий університет» за адресою: 49027, м. Дніпропетровськ, просп. К. Маркса, 19.

Автореферат розісланий «__»_____ 2012 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 08.080.07

О.В. Остапчук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність проблеми. Рудопідготовка, що включає процеси дроблення і здрібнювання, є однією з найбільш енерго- і матеріалоемних технологічних циклів збагачення руд, тому актуальним є зниження витрат на ці процеси шляхом створення систем автоматизованого керування ними підвищеної якості.

Розробці таких систем керування присвячені дослідження вчених В.О. Бунька, В.А. Воронова, Ю.Г. Качана, Є.В. Кочури, В.М. Марасанова, О.М. Марюти, В.С. Моркуна, В.М. Назаренка, О.В. Поркуян, В.О. Ульшина, В.П. Хорольського, А.Дж. Лінча, Дж.А. Хербста та багатьох інших.

Визначено, що найбільш ефективними системами керування процесами дроблення і здрібнювання руд є адаптивні системи. В них принцип керування заснований на включенні математичної моделі об'єкта в контур керування та визначенні керуючих впливів за прогнозом в реальному часі результатів процесу. Для реалізації цих систем необхідна розробка динамічних моделей керованих процесів, що здійснюється за допомогою процедури їх ідентифікації.

Розробці адаптивних систем з ідентифікацією об'єкта керування присвячені дослідження вчених О.Г. Івахненка, Л.А. Растрігіна, А.М. Сільвестрова, Я.З. Ципкіна, Л. Л'юнга, О. Неллеса та багатьох інших.

Як моделі складних процесів значний розвиток одержали нейронні мережі та системи нечіткого висновку, що є універсальними та ефективними апроксиматорами і, які здатні адаптуватися під змінювані властивості (режими роботи) керованих процесів.

Крупне дроблення і самоздрібнювання руд є початковими процесами технологічних ліній переробки і збагачення руди. Тому актуальним є підвищення якості керування цими процесами для зменшення дисперсії технологічних параметрів, що призводить до покращення якості продуктів збагачення.

Таким чином, обґрунтування, розробка та впровадження методів ідентифікації процесів крупного дроблення і самоздрібнювання руд з метою зниження похибок їх моделей, призначених для побудови адаптивних систем керування цими процесами, є актуальними.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. В основу роботи покладені матеріали, що використовують дослідження авторки у рамках реалізації науково-дослідних робіт, що виконувались в Національному гірничому університеті відповідно до закону України № 2623-14 від 11 липня 2001 р. «Про пріоритетні напрямки розвитку науки і техніки», Постанов Кабінету Міністрів України «Про заходи щодо розвитку гірничо-металургійного комплексу», «Про хід виконання Програми розвитку залізорудної промисловості України», «Державної комплексної програми розвитку України», затвердженою Постановою Кабінету Міністрів України.

Дисертаційна робота є складовою частиною досліджень, що виконувались у Національному гірничому університеті за НДР «Інтелектуальні комп'ютерні

технології обробки даних, прогнозування та управління» (державна реєстрація 0108U000358).

Мета і завдання досліджень. Метою роботи є розв'язання актуальної наукової задачі зниження похибок ідентифікації процесів крупного дроблення і самоздрібнювання руд шляхом варіації структур їх інтелектуальних прогнозуючих моделей в умовах зміни динамічних режимів роботи.

Для досягнення мети поставлені і вирішені наступні завдання:

- дослідження точності ідентифікації процесів крупного дроблення і самоздрібнювання руд при зміні їх режимів роботи;
- запропонування методу ідентифікації процесів крупного дроблення і самоздрібнювання руд, що враховує варіацію структур моделей та не призводить до суттєвого збільшення обчислювальних витрат;
- розроблення методики, алгоритмів та програмного забезпечення для розв'язання задач ідентифікації процесів крупного дроблення і самоздрібнювання руд;
- дослідження ефективності ідентифікації процесів крупного дроблення і самоздрібнювання руд у класі їх інтелектуальних прогнозуючих моделей;
- виконання оцінки ефективності керування процесами рудопідготовки із використанням розроблених інтелектуальних прогнозуючих моделей.

Об'єктом дослідження є технологічні процеси крупного дроблення і самоздрібнювання руд на гірничо-збагачувальних комбінатах.

Предметом дослідження є методи ідентифікації процесів крупного дроблення і самоздрібнювання руд як об'єктів керування.

Методи дослідження. В основу досліджень покладені методи систем штучного інтелекту (нейронні мережі, системи нечіткої логіки) для синтезу прогнозуючих моделей процесів крупного дроблення і самоздрібнювання руд; методи нелінійної динаміки для визначення характеристик керованих процесів; структурні (еволюційні, пошукові) та параметричні (градієнтні, квазіньютонівські) методи оптимізації для отримання оптимальних структури і параметрів моделей; статистичні методи обробки модельних та експериментальних даних.

Наукові положення:

1. Варіація структур інтелектуальних прогнозуючих моделей при ідентифікації процесів крупного дроблення і самоздрібнювання руд, що здійснюється шляхом визначення їх типів в умовах зміни динамічних режимів роботи керованих процесів, забезпечує вибір кращої з них для поточного режиму функціонування та дозволяє, на відміну від відомих підходів, отримати моделі зі зниженими похибками.

2. Визначення тенденції до зміни режимів функціонування процесів крупного дроблення і самоздрібнювання руд, що здійснюється шляхом аналізу параметра Херста, вказує на необхідність проведення структурно-параметричної або параметричної оптимізації інтелектуальних прогнозуючих моделей цих процесів та дозволяє, на відміну від відомого, знизити вимоги до

продуктивності обчислювальних пристроїв та зменшити обчислювальні витрати на ідентифікацію.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Вперше встановлено, що оптимальна структура моделі процесів крупного дроблення і самоздрібнювання руд для одного режиму функціонування не забезпечує припустиму похибку для інших режимів, що визначає, на відміну від відомого, необхідність проведення структурно-параметричної ідентифікації процесів при зміні їх режимів роботи.

2. Вперше обґрунтовано вибір типу структур моделей процесів крупного дроблення і самоздрібнювання руд шляхом дослідження варіації їх типів, що дозволяє, на відміну від відомого, підвищити якість ідентифікації для різних режимів функціонування із зниженням похибок інтелектуальних прогнозуючих моделей.

3. Одержав подальший розвиток композиційний метод ідентифікації процесів крупного дроблення і самоздрібнювання руд шляхом включення в нього визначення тенденції переходу цих процесів з одного режиму функціонування в інший за допомогою аналізу параметра Херста, що дозволяє знизити обчислювальні витрати на процедуру ідентифікації шляхом планування проведення структурної оптимізації моделей.

4. Вперше отримані інтелектуальні прогнозуючі моделі процесів крупного дроблення і самоздрібнювання руд, які, на відміну від відомих, мають оптимальну структуру для поточного режиму роботи, що дозволяє знизити похибки моделей і підвищити якість керування цими процесами.

Практичне значення одержаних результатів:

1. Розроблена методика ідентифікації процесів крупного дроблення і самоздрібнювання руд, яка включає процедури визначення зміни режимів роботи цих процесів та їх ідентифікацію, що дозволяє, на відміну від відомого, здійснювати її в режимі реального часу шляхом параметричної, а в пакетному режимі – структурно-параметричної оптимізації моделей цих процесів.

2. Розроблені алгоритм визначення зміни режимів роботи процесів крупного дроблення і самоздрібнювання руд, що дозволяє автоматизовано запланувати виконання їх структурно-параметричної ідентифікації у випадку, коли режим роботи вже змінився або виникла тенденція до його зміни; а також алгоритми глобальної і локальної оптимізації моделей цих процесів, що реалізують процедуру структурно-параметричної ідентифікації шляхом їх структурної та параметричної оптимізації.

3. Розроблено програмне забезпечення запропонованих методики та алгоритмів ідентифікації процесів крупного дроблення і самоздрібнювання руд, що дозволяє скоротити строки та витрати на їх проектування.

Розроблені методика, алгоритми та програми використані при виконанні держбюджетної науково-дослідної роботи, впроваджені в комплекс програмних засобів проектування і проектів реконструкції розробки ВАТ ППКІ «Металургавтоматика» та ДАТ КБ «Дніпровське», а також в навчальний процес

Державного ВНЗ «НГУ» при підготовці бакалаврів напряму 6.050903, спеціалістів і магістрів спеціальностей 8.17010201, 8(7).17010101.

Особистий внесок здобувачки. Усі наукові положення і результати, що виносяться на захист, отримані авторкою самостійно. Здобувачка брала безпосередню участь в теоретичних дослідженнях та в роботах із впровадження отриманих результатів, а також самостійно виконала прикладні дослідження.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи доповідалися на: регіональному науковому семінарі Придніпровського наукового центру НАН України «Сучасні проблеми управління і моделювання складних систем» (м. Дніпропетровськ, 2011 р.); VII міжнародній науково-практичній конференції «Найновите науки постиження – 2011» (м. Софія, 2011 р.); VII міжнародній науково-практичній конференції «Strategiczne pytania swiatowej nauki – 2011» (м. Перемишль, 2011 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития '2010» (м. Одеса, 2010 р.); XI міжнародній науково-технічній конференції «Системний аналіз та інформаційні технології – 2009» (м. Київ, 2009 р.).

Публікації. Основні результати дисертації опубліковані у 10 роботах, з них 6 у наукових фахових виданнях і 4 в матеріалах конференцій.

Структура та обсяг дисертаційної роботи. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи – 198 сторінок, із них 129 сторінок – основний текст. Дисертація містить 1 таблицю, 41 рисунок, список використаних джерел із 184 найменувань на 19 сторінках і 13 додатків на 50 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність роботи, сформульовані мета і задачі досліджень, наведений зв'язок роботи з науковими програмами і темами, викладена наукова новизна та практичне значення отриманих результатів.

У першому розділі проведений аналіз існуючих систем керування та математичних моделей процесів дроблення і здрібнювання руд, а також аналіз інтелектуальних методів ідентифікації складних технологічних процесів.

Для процесу крупнокускового дроблення (ККД) як об'єкта керування (ОК) вихідними змінними є гранулометричний склад дробленого продукту $\Gamma_{вих}$, продуктивність процесу $Q_{др}$ і споживана потужність $P_{др}$. Керуючими впливами є продуктивність рудного постачання $Q_{вх}$ та розмір розвантажувальної щілини дробарки g . До збурень відносять – гранулометричний склад вхідної руди $\Gamma_{вх}$ та її міцність ρ , стан футеровок ξ .

Ціллю керування процесом ККД є забезпечення заданого гранулометричного складу продукту дроблення:

$$\left\| \Gamma_{вих} - \Gamma_{вих}^{зад} \right\| \rightarrow \min \quad (1)$$

при обмеженнях на потужність $P_{др} \leq P_{дрmax}$ і продуктивність $Q_{др} \geq Q_{дрmin}$.

Вихідними змінними процесу мокрого самоздрібнювання (МСЗ) як ОК є вміст готового класу крупності у вихідному продукті Γ_m , продуктивність за готовим класом Q_{zom} , споживана потужність P_m і ступінь внутрішньомлинового заповнення φ . Його керуючими впливами є продуктивність за вхідною рудою Q_p і витрати води B_m , а збуреннями – гранулометричний склад вхідної руди Γ_p , її фізико-механічні і речовинні властивості q , піски Π , стан футеровок і ліфтерів ξ .

В залежності від ситуації на ринку металів ціллю керування процесом МСЗ може бути максимізація продуктивності за готовим класом:

$$Q_{zom} \rightarrow \max \quad (2)$$

при обмеженнях на потужність $P_m \leq P_{m\max}$; або

- забезпечення необхідної якості $\Gamma_m = \Gamma_m^{zad}$ при $Q_p \geq Q_p^{don}$;
- мінімізація енерговитрат $P_m/Q_{zom} \rightarrow \min$ при $\Gamma_m \leq \Gamma_m^{zad}$.

У результаті аналізу існуючих методів і алгоритмів ідентифікації процесів рудопідготовки, а також способів використання їх моделей для цілей керування визначено, що застосування параметричної ідентифікації є недостатнім з огляду на характер керованих процесів. Проведення ж структурно-параметричної ідентифікації ОК, як в роботах Марюти О.М., Новицького І.В., Поркуян О.В., Корнієнка В.І. було орієнтовано на використання певного типу структури моделі, що при зміні режимів роботи устаткування призводить до підвищення похибок ідентифікації.

Відзначено, що запропонований Корнієнком В.І. метод ідентифікації процесів ККД і МСЗ руд має недостатню точність внаслідок неоптимальності структур моделей для конкретних режимів роботи устаткування.

Таким чином, на основі виконаного аналізу сформульовано мету та задачі дисертаційної роботи.

Другий розділ присвячений обґрунтуванню комплексного методу ідентифікації процесів крупного дроблення і самоздрібнювання руд.

При ідентифікації невизначеними є умови виконання параметричної або структурно-параметричної ідентифікації для конкретного ОК, оскільки модель складного ОК, що адекватно передає динаміку одного режиму функціонування, може бути неадекватною до опису іншого режиму.

Для визначення цього були проведені дослідження точності ідентифікації різних режимів роботи моделей процесів ККД і МСЗ руд. На першому етапі досліджень виконувалась структурно-параметрична ідентифікація одного з режимів функціонування ОК: періодичного (режим 2), квазіперіодичного (режим 3) і хаосу (режим 4). При цьому режим 1 – режим рівноваги. На другому етапі для оптимальної структури одного режиму виконувалась параметрична адаптація моделі у всіх режимах функціонування (рис. 1).

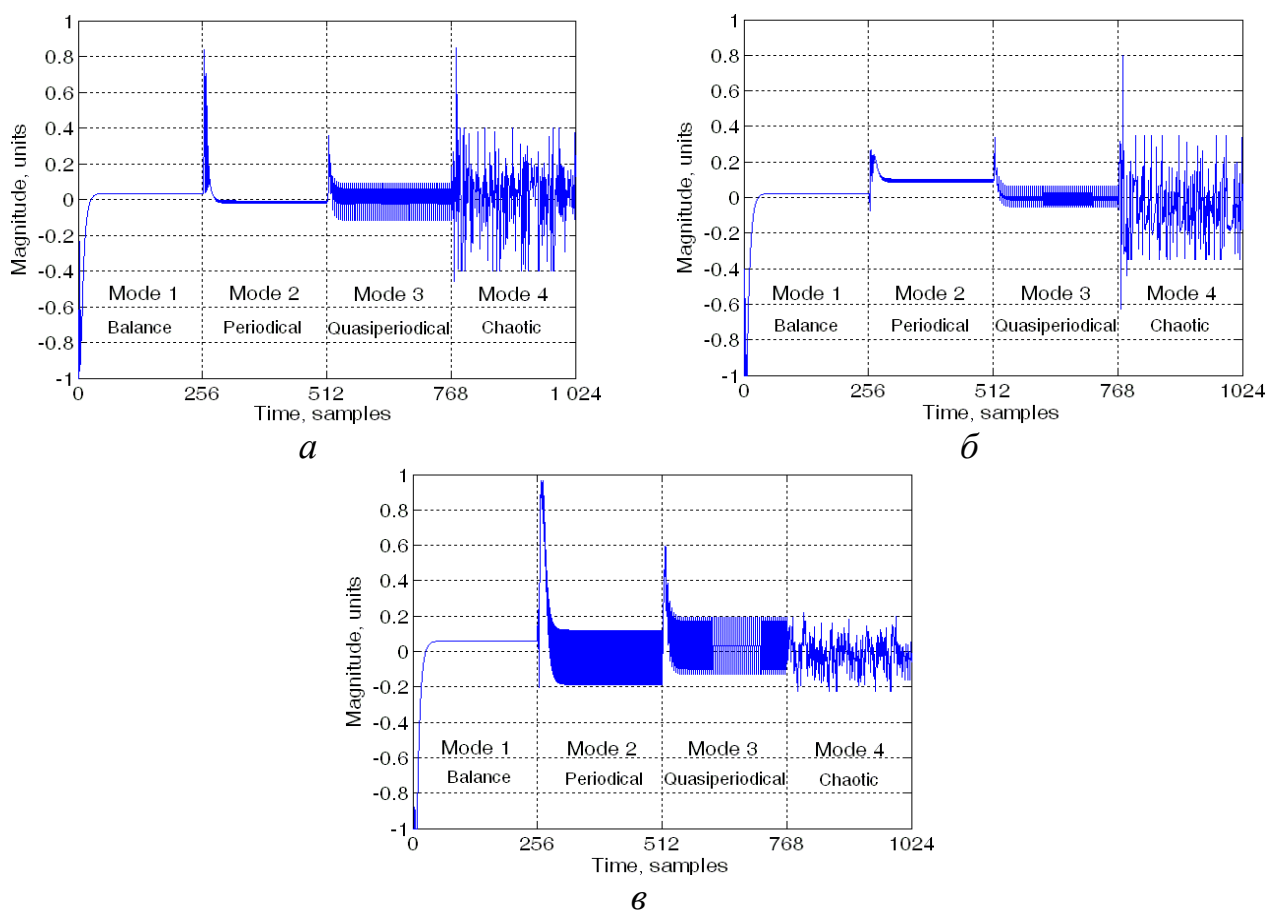


Рис. 1. Похибки моделі ОК за режимами його функціонування при його ідентифікації в режимах 2 (а), 3 (б) і 4 (в)

У результаті досліджень визначено, що оптимальна структура моделі для одного режиму функціонування ОК не забезпечує припустиму похибку для інших режимів. Тоді при зміні динамічних режимів роботи ОК необхідно проводити його структурно-параметричну ідентифікацію.

Оскільки процеси ККД і МСЗ є мультифрактальними, тобто подібними на різних масштабах крупності, то визначення тенденції до зміни їх режимів функціонування характеризує параметр Херста H :

$$R(\tau) = \frac{R_0(\tau)}{S(\tau)} = (\alpha \cdot \tau)^H, \quad (3)$$

де $R_0(\tau)$ – різниця максимального і мінімального значень (розмах) процесу $y(t)$ на інтервалі часу τ :

$$R_0(\tau) = \max_{1 \leq t \leq \tau} y(t, \tau) - \min_{1 \leq t \leq \tau} y(t, \tau); \quad (4)$$

а $S(\tau)$ – середньоквадратичне відхилення збільшень процесу на інтервалі τ :

$$S(\tau) = \sqrt{\frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} [\Delta y(t) - \bar{y}(\tau)]^2}; \quad (5)$$

та $\Delta y(t)$ – елементарне збільшення $y(t)$ на кроці t ; α – коефіцієнт пропорційності.

Параметр Херста показує на тенденцію до зміни режимів функціонування ОК, тобто в залежності від його значень доцільно проводити їх структурно-параметричну (при $H > 0,5$) або параметричну (при $H < 0,5$) ідентифікацію. Причому параметричну ідентифікацію доцільно проводити в режимі реального часу, а структурно-параметричну – планувати, тобто виконувати її в періоди невеликого навантаження на обчислювальні пристрої та розподіляти між ними, і таким чином, знизити вимоги до їх продуктивності та обчислювальні витрати.

У межах запропонованого комплексного метода ідентифікації процесів ККД і МСЗ руд визначаються параметр Херста (3), а також:

- глибина точного прогнозу шляхом обчислення кореляційного інтервалу передбачуваності:

$$T_{vg} \sim \frac{1}{K_{ng}} \ln\left(\frac{1}{\sigma}\right), \quad (6)$$

де K_{ng} – кореляційна ентропія; σ – розмір осередку покриття даної множини;

- глибини пам'яті шляхом обчислення розмірності вкладення атрактора:

$$d \geq 2D_{ng} + 1, \quad (7)$$

де D_{ng} – кореляційна розмірність.

Задача структурно-параметричної ідентифікації ОК складається з визначення структури (функції Φ) і параметрів a його моделі:

$$\hat{Y}[m+n] = \Phi\{Y[m], u[m], \chi[m], \xi[m], a[m], m\}, \quad m = \overline{1, M} \quad (8)$$

де $Y[m], u[m], \chi[m], \xi[m]$ – відповідно, вектори (матриці) виходу процесу, його керувань, збурень і шуму до поточного часу m ($m = t/T$) з відповідними глибинами пам'яті; t – безперервний час; T – період дискретизації; M – час спостереження; n – глибина прогнозу.

Як структури моделей використовувались блочно-орієнтовані моделі, наприклад, Гамерштейна-Вінера (рис. 2). В них нелінійна динамічна система представлена шляхом комбінації лінійної динамічної (ЛДЛ) та нелінійної статичної ланок. Як ЛДЛ використовуються лінії затримки T , величини яких визначаються розмірністю вхідних d_i і вихідних $d_{\hat{Y}}$ змінних, а як НСЛ – поліноми, нейронні мережі (НМ) тощо. Вхід моделей – вектори спостережень $\{z_i[m]\} \in \hat{Z}[m]$, а вихід – (8).

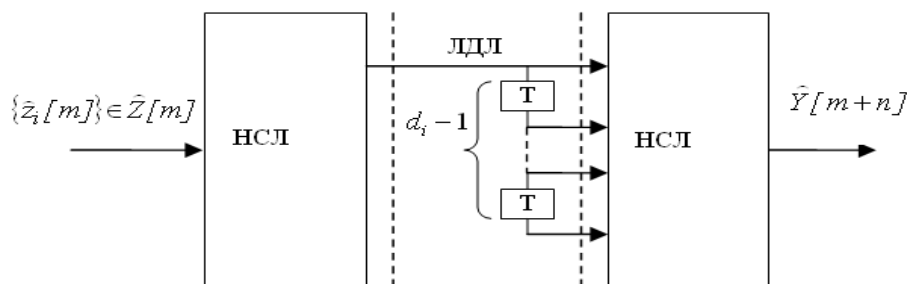


Рис. 2. Структура Гамерштейна-Вінера моделі ОК

Критерієм параметричної оптимізації було обрано критерій регулярності:

$$C_{рег} = \frac{\|Y_B^*[m+n] - \hat{Y}_B[m+n]\|}{\|Y_B^*[m+n]\|}, \quad (9)$$

а критерієм структурної оптимізації – комбінований критерій:

$$C_{комб} = 0,2 \cdot C_{рег} + 0,8 \cdot C_{зм}, \quad (10)$$

де $C_{зм}$ – критерій незміщенності (мінімуму зсуву):

$$C_{зм} = \frac{\|\hat{Y}_A[m+n] - \hat{Y}_B[m+n]\|}{\|Y^*[m+n]\|}. \quad (11)$$

Третій розділ присвячений розробці інтелектуальних прогнозуючих моделей процесів ККД і МСЗ руд.

На підставі виконаних в розділі 2 досліджень запропонована методика (рис. 3) та алгоритм визначення зміни режимів роботи (рис. 4) цих процесів.



Рис. 3. Схема ідентифікації процесів ККД і МСЗ руд

Досліджено ефективність визначення характеристик стану відповідно до запропонованої методики на прикладі експериментальних реалізацій вмісту класу +100 мм у крупнодробленій руді Γ_{+100}^1 і Γ_{+100}^2 .

У результаті розрахунків отримані значення параметра Херста для них (рис. 5): $H_1 = 0,2639 \pm 0,1879$ і $H_2 = 0,7604 \pm 0,1865$. Тобто процес, що породжує сигнал Γ_{+100}^2 має тенденцію до переходу в інший режим функціонування, а процес, що породжує сигнал Γ_{+100}^1 такої тенденції не має.

Визначено, що для процесів, які породжують сигнали Γ_{+100}^1 і Γ_{+100}^2 , глибина прогнозу складає 7 і 4 тактів, відповідно, а глибина пам'яті за різними входами – від 3 до 5 для сигналу Γ_{+100}^1 і від 4 до 8 для сигналу Γ_{+100}^2 .

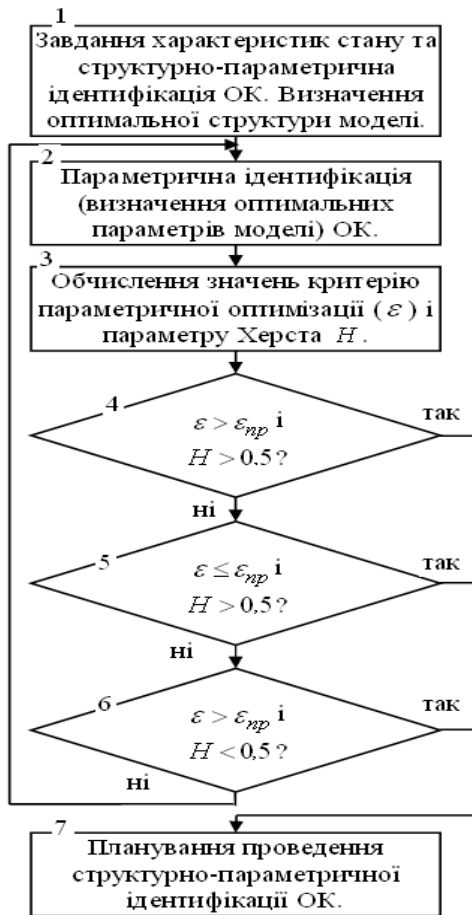


Рис. 4. Алгоритм визначення зміни режимів роботи ОК

Прогнозуюча модель процесу ККД за критерієм (1) має вигляд:

$$\hat{\Gamma}_{вих}^1[m+n] = \Phi_f\{\Gamma_{вих}^1[m], g[m], \Gamma_{вх}^1[m], \rho[m], \xi[m], a_f[m], m\}. \quad (12)$$

Досліджено точність моделей процесу ККД при варіації типів структур: Вінера, Гамерштейна, Гамерштейна-Вінера і авторегресії з додатковим вхідним сигналом (ARX) з базисними функціями у вигляді каскадної НМ прямого поширення (НМПП), вейвнета і полінома Колмогорова-Габора та встановлено, що кращою є структура Гамерштейна-Вінера (див. рис. 2), оскільки вона дає менші значення критерію (9) при різних базисних функціях – 0,0334 для вейвнета і 0,0370 для полінома Колмогорова-Габора (рис. 6.a). Для структури моделі ARX значення критерію (9) – 0,0644 для вейвнета і 0,0995 для каскадної НМ (рис. 6.б), для Вінера – 0,0644 для вейвнета (рис. 6.в), для Гамерштейна – 0,0723 для вейвнета (рис. 6.г).

Досліджено вплив різних методів глобальної (структурної) і локальної оптимізації на точність ідентифікації процесу ККД. Причому як методи структурної оптимізації розглядались: генетичні алгоритми (ГА), прямий випадковий пошук (ПВП) і метод імітації відпалу (МІВ); методи параметричної оптимізації були обмежені базисними функціями: НМПП, НМ с радіальними базисними функціями (РБФ) та гібридними НМ с нечіткою логікою (Anfis).

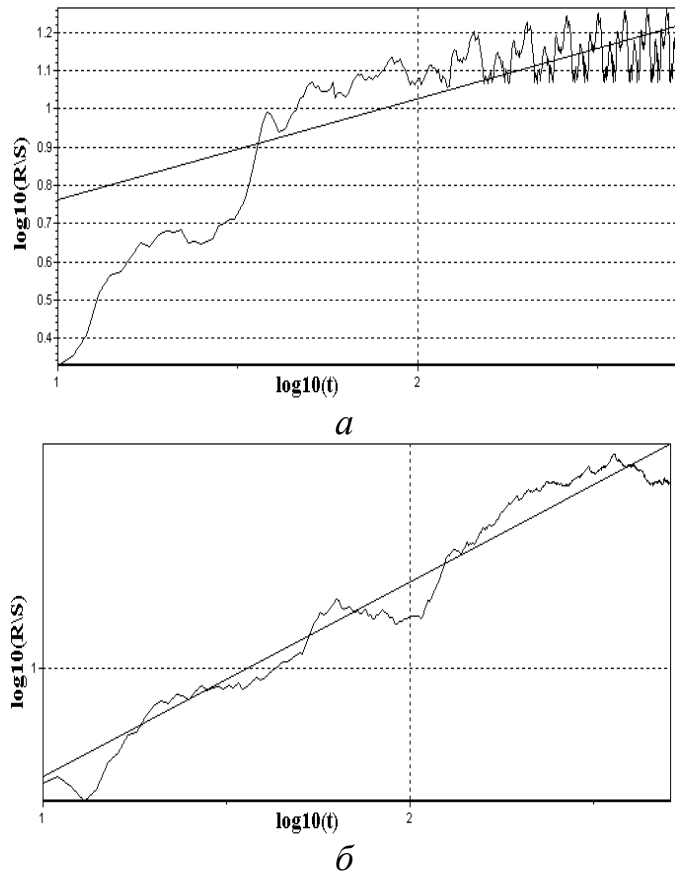


Рис. 5. Результати розрахунків параметра Херста для сигналів Γ_{+100}^1 (a) і Γ_{+100}^2 (б)

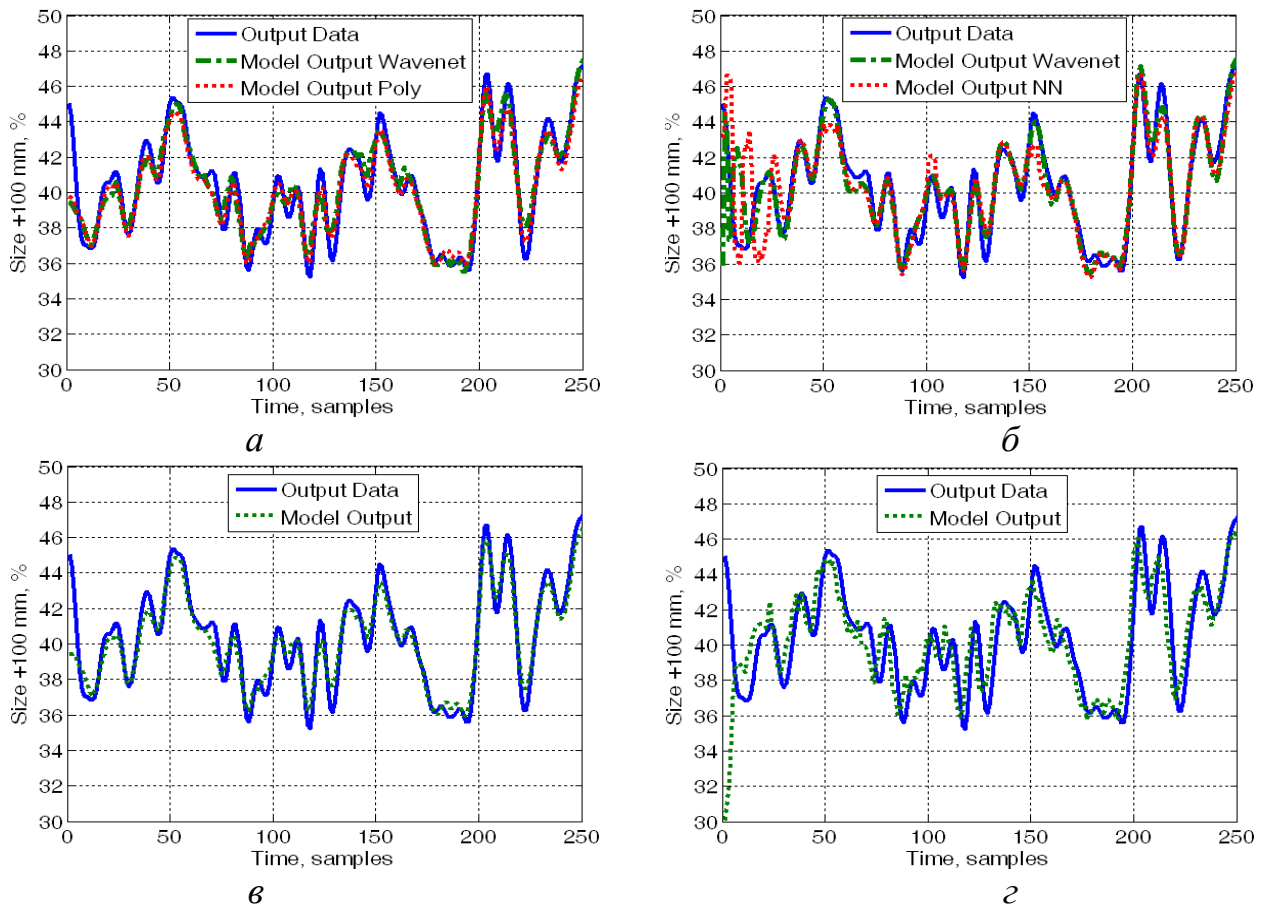


Рис. 6. Результати ідентифікації ОК для процесу ККД у вигляді моделей Гамерштейна-Вінера (а), ARX (б), Вінера (в) і Гамерштейна (з)

При глобальній оптимізації процесу ККД варіювались такі структурні характеристики моделей: тип базисної функції, кількість нейронів у прихованому шарі, тип функцій активації (належності), тип алгоритму параметричної оптимізації. У результаті досліджень встановлено, що ГА має найвищу швидкість збіжності (виходить в область оптимальних рішень на перших поколіннях, МІВ – у середньому після 5 ітерацій, а ПВП – після 15 ітерацій), МІВ виявив найвищу швидкість (0,2 с на ітерацію при 9,2 с на ітерацію в ПВП і 16 с на покоління в ГА), ПВП виявив найкращу збіжність (значення критерію (10) при його використанні склали 0,013, на відміну від 0,022 при ГА і 0,082 при МІВ).

У результаті досліджень розроблено інтелектуальну прогноуючу модель процесу ККД точність якої (значення критерію (9)) 0,0311 (рис. 7), а структурні характеристики – базисні функції у вигляді каскадної НМПП з 28 нейронами у прихованому шарі, логістичною сигмоїдальною функцією активації прихованого шару, лінійною – вихідного, алгоритмом навчання НМ – метод Флетчера-Рівса.

Прогноуюча модель ОК процесу МСЗ за критерієм (2) має вигляд:

$$\hat{Q}_{2om}[m+n] = \Phi_{\hat{Q}}\{Q_{2om}[m], \rho_{\kappa}[m], \varphi[m], \Delta_M[m], \Gamma_p[m], q[m], \xi[m], a_Q[m], m\}. \quad (13)$$

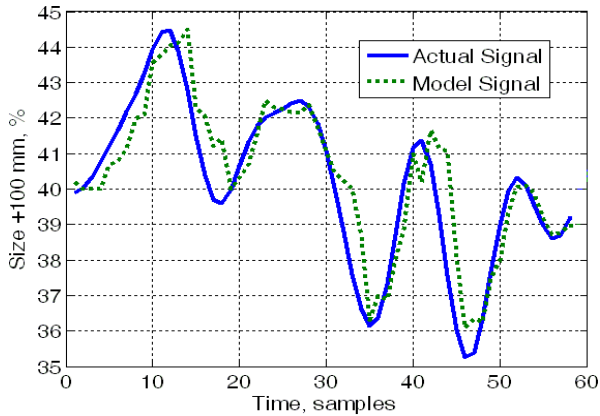
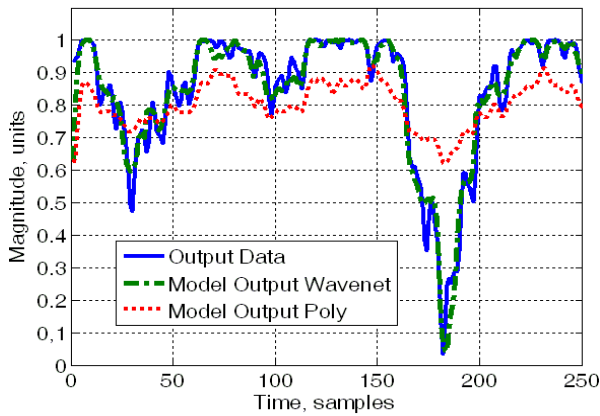
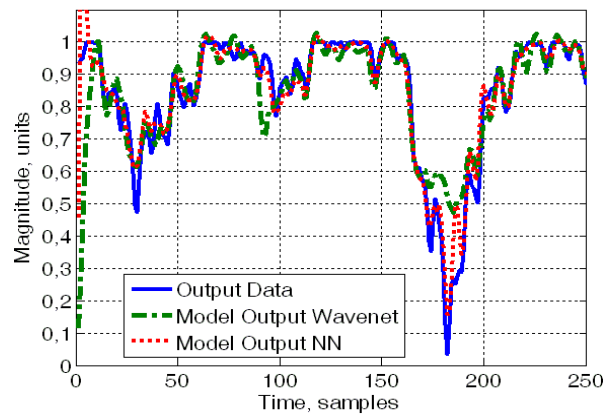


Рис. 7. Результат параметричної ідентифікації процесу ККД

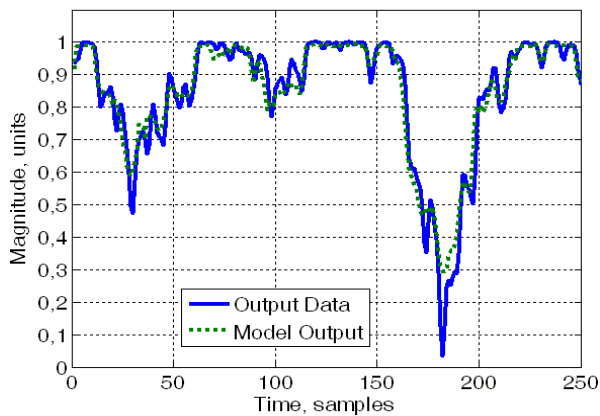
У результаті досліджень варіації типів структур моделей процесу МСЗ встановлено, що кращою є структура Гамерштейна-Вінера (див. рис. 2), оскільки вона дає менші значення критерію (9) при різних базисних функціях – 0,0862 для вейвнета і 0,1734 для полінома Колмогорова-Габора (рис. 8.а). Для структури моделі ARX значення критерію (9) склало 0,1279 для вейвнета і 0,089 для каскадної НМ (рис. 8.б), для Вінера – 0,0871 для вейвнета (рис. 8.в), для Гамерштейна – 0,1862 для вейвнета (рис. 8.г).



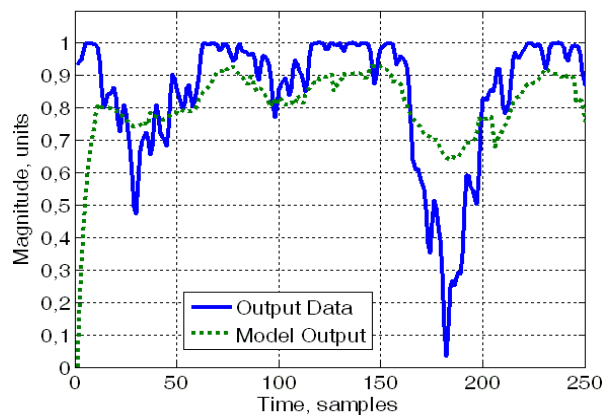
а



б



в



г

Рис. 8. Результати ідентифікації ОК для процесу МСЗ у вигляді моделей Гамерштейна-Вінера (а), ARX (б), Вінера (в) і Гамерштейна (г)

У результаті досліджень для процесу МСЗ встановлені характеристики алгоритмів глобальної оптимізації за швидкістю збіжності, швидкодією і найкращій збіжності, що аналогічні як для процесу ККД. При цьому значення

критерію (10) при використанні алгоритму ПВП склали 0,009 на відміну від 0,042 при ГА і 0,047 при МІВ.

У результаті досліджень розроблено інтелектуальну прогнозуючу модель процесу МСЗ, точність якої (значення критерію (9)) 0,0302 (рис. 9), а структурні характеристики – базисні функції у вигляді каскадної НМПП з 58 нейронами у прихованому шарі, логістичною сигмоїдальною функцією активації прихованого шару, лінійною – вихідного, алгоритмом навчання НМ – методом Біеле-Пауела.

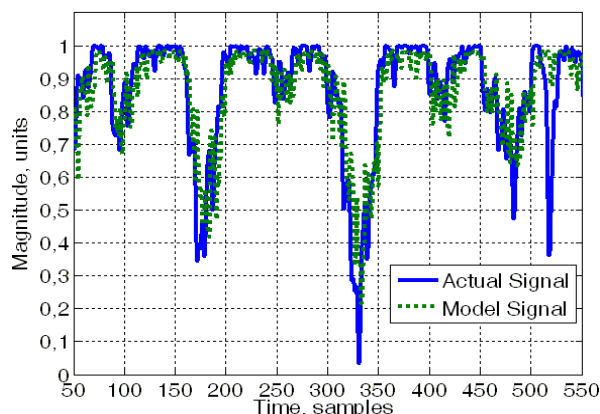


Рис. 9. Результат параметричної ідентифікації процесу МСЗ

Загальний час проведення структурно-параметричної ідентифікації для процесів ККД і МСЗ на комп'ютері з процесором Pentium IV становить 1,5...2 години, що припускає значні витрати обчислювальних ресурсів для структурно-параметричної ідентифікації в автоматизованих системах керування цими процесами. Це підтверджує недоцільність проведення структурно-параметричної ідентифікації в режимі реального часу, а доцільність планування її виконання, що здійснюється за алгоритмом (див. рис. 4).

Четвертий розділ присвячений розробці програмного забезпечення для розв'язання задач ідентифікації процесів ККД і МСЗ руд, оцінці ефективності використання отриманих моделей та впровадженню результатів досліджень.

Для проведення оцінки ефективності керування процесом ККД розглянуто існуючу адаптивну систему керування цим процесом (рис. 10), що використовує в контурі керування розроблену інтелектуальну прогнозуючу модель. В цій системі вхідна руда після дроблення в конусній дробарці (КД) через проміжний бункер (ПБ) за допомогою пластинчастих живильників надходить на конвеєр 1, далі в накопичувальний бункер (НБ), а потім – в млин самоздрібнювання (МС), готовий продукт якого в зливні спірального класифікатора (СК) подається на збагачення.

Оцінка поточного стану процесу ККД виконується керуючою системою до моменту початку чергового інтервалу керування. Для цього здійснюється опитування і усереднення за попередній інтервал показань пристрою 2 контролю ширини щілини (g), пристрою 3 контролю крупності і міцності вхідної руди (d_{ex}, ρ), конвеєрних ваг 4 (Q_{op}) та гранулометру 5 (Γ_{+100}). Після цього виконується ідентифікація процесу ККД, за оцінками і прогнозом якого визначається значення зміни ширини розвантажувальної щілини дробарки 6 g_{opt}^* на наступний інтервал, що відпрацьовується гідравлічною системою 7 регулювання щілини.

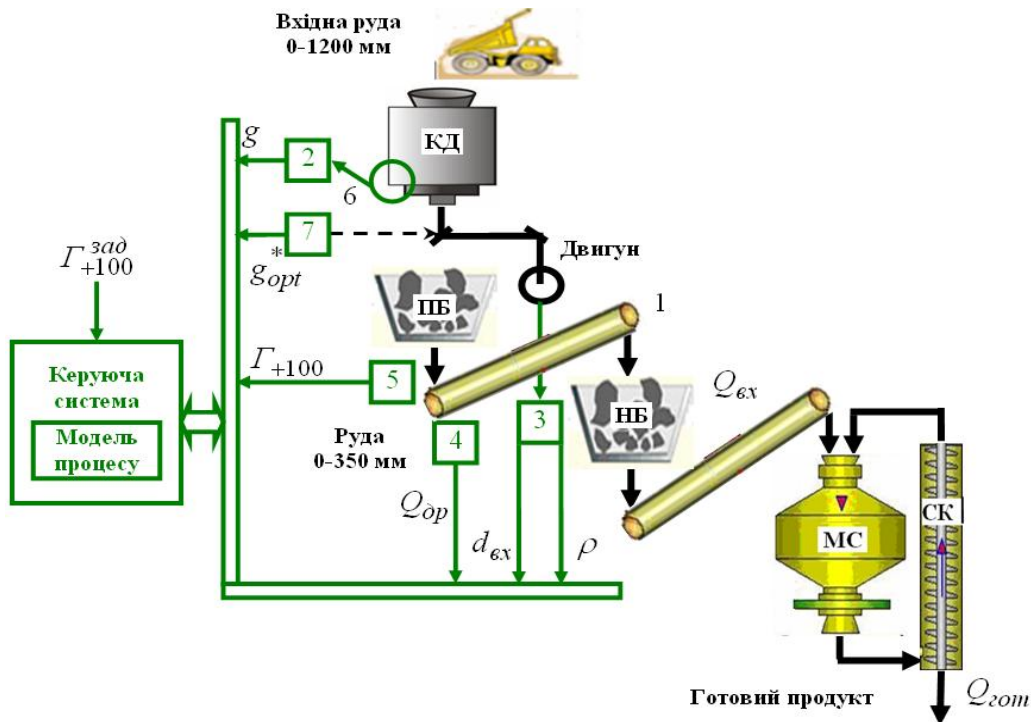


Рис. 10. Схема системи адаптивного керування процесом ККД

Результати моделювання роботи адаптивної системи керування процесом ККД на основі розробленої моделі цього процесу (ModelKKD), отриманої в розділі 3, у керованому (Control) і некерованому (notControl) режимах наведені на рис. 11. Як завдання (Γ_{+100}) використовувались значення $\Gamma_{+100}^{зад} = 57\%$, що відповідає оптимальному значенню для Лебединського гірничо-збагачувального комбінату (ГЗК) (для Інгулецького ГЗК $\Gamma_{+100}^{зад} = 42\%$).

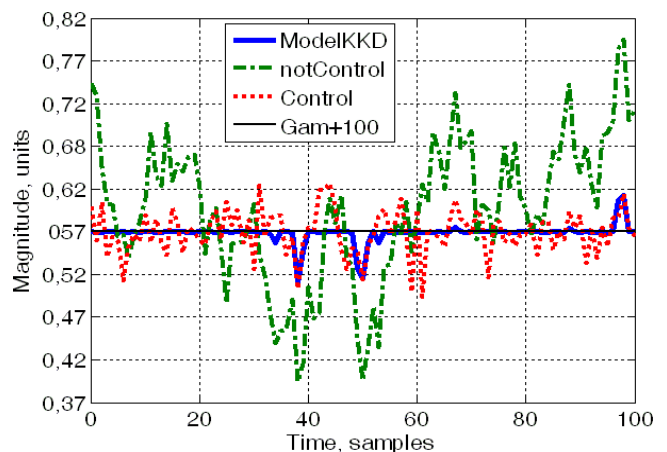


Рис. 11. Результати керування процесом ККД з розробленою інтелектуальною прогнозуючою моделлю

Значення похибок склали $\bar{\varepsilon}_{Control} = 0,036$ і $\bar{\varepsilon}_{notControl} = 0,108$, що визначає зниження середньоквадратичної похибки в керованому режимі в 3 рази. При цьому похибка прогнозуючої моделі $\bar{\varepsilon}_{ModelKKD} = 0,021$.

Отримане підвищення якості керування процесом ККД дозволяє підвищити продуктивність за вхідною рудою млинів типу ММС 70x23 на 6,45 т/г або на 5,3 % (що істотно краще, ніж у системах, що мають в контурі керування відомі моделі, де зниження похибки керування становить в 2,5 рази, а підвищення продуктивності – на 5,5 т/г.).

У додатках наведені програми моделювання, таблиці експериментальних даних, структурні характеристики і параметри отриманих інтелектуальних прогнозуючих моделей процесів ККД та МСЗ, а також акти про використання результатів дисертаційної роботи.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота є завершеною науково-дослідною роботою, у якій вирішена актуальна наукова задача зниження похибок ідентифікації процесів крупного дроблення і самоздрібнювання руд за рахунок варіації структур інтелектуальних прогнозуючих моделей в умовах зміни динамічних режимів роботи цих процесів, їх параметрів та наявності завад.

Основні наукові та практичні результати полягають у наступному:

1. Вперше досліджені різні динамічні режими роботи процесів крупного дроблення і самоздрібнювання руд, та встановлено, що оптимальна структура моделі для одного режиму функціонування не забезпечує припустиму похибку для інших режимів. Це визначає, на відміну від відомого, необхідність проведення структурно-параметричної ідентифікації керованих процесів при зміні їх режимів роботи.

2. Вперше обґрунтовано вибір типу структур моделей процесів крупного дроблення і самоздрібнювання руд шляхом дослідження варіації їх типів, та встановлено, що кращою для них в сенсі критерію регулярності є структура Гамерштейна-Вінера (встановлено, що для процесу крупного дроблення його значення становлять 0,0334 для вейвнета і 0,0370 для полінома Колмогорова-Габора, а для процесу самоздрібнювання – 0,0862 для вейвнета і 0,1734 для полінома Колмогорова-Габора). Це дозволяє, на відміну від відомого, підвищити точність ідентифікації для різних режимів функціонування із зниженням похибок інтелектуальних прогнозуючих моделей. Встановлено, що загальний час проведення структурно-параметричної ідентифікації цих процесів становить 1,5...2 години.

3. Одержав подальший розвиток композиційний метод ідентифікації процесів крупного дроблення і самоздрібнювання руд шляхом включення в нього визначення тенденції переходу цих процесів з одного режиму функціонування в інший за допомогою аналізу параметра Херста. Це дозволяє знизити обчислювальні витрати на процедуру ідентифікації шляхом планування виконання структурної оптимізації моделей.

4. Вперше отримані інтелектуальні прогнозуючі моделі процесів крупного дроблення і самоздрібнювання руд, які, на відміну від відомих, мають оптимальну структуру для поточного режиму роботи, що дозволяє знизити похибки моделей і підвищити якість керування цими процесами. Встановлено, що похибки моделей (значення критерію регулярності) процесів крупного дроблення і самоздрібнювання руд становлять 0,0311 і 0,0302, відповідно.

5. Встановлено, що система адаптивного керування процесом ККД з розробленою моделлю в контурі керування забезпечує у порівнянні з системами, що мають в контурі керування відомі моделі, зниження в 1,2 рази

похибки керування і підвищення на 0,8 % або 0,95 т/г продуктивності процесу самоздрібнювання за рахунок стабілізації змісту класу +100 мм у його вхідній руді. Прогнозований річний економічний ефект становить 210,21 тис. грн. з окупністю капітальних витрат 0,59 року.

6. Розроблена методика ідентифікації процесів крупного дроблення і самоздрібнювання руд, яка включає процедури визначення зміни режимів роботи цих процесів та обчислення їх розмірностей, а також структурно-параметричну ідентифікацію. Це дозволяє, на відміну від відомого, виконувати ідентифікацію керованих процесів в режимі реального часу шляхом параметричної, а у пакетному режимі – структурно-параметричної оптимізації їх моделей.

7. Розроблений алгоритм визначення зміни режимів роботи процесів крупного дроблення і самоздрібнювання руд, що реалізує перехід до виконання їх структурно-параметричної ідентифікації за критерієм тенденції переходу з одного режиму функціонування в інший (параметром Херста) і похибкою параметричної адаптації. Це дозволяє виконувати структурно-параметричну ідентифікацію у випадку, коли виникла тенденція до зміни режиму роботи (при $H > 0,5$) або коли він вже змінився (при $\varepsilon > 10\%$).

8. Розроблені методика, алгоритми та програми ідентифікації використані при виконанні держбюджетної науково-дослідної роботи, впроваджені в комплекс програмних засобів проектування і проектів реконструкції розробки ВАТ ППКІ «Металургавтоматика» та ДАТ КБ «Дніпровське», а також в навчальний процес Державного ВНЗ «НГУ» при підготовці бакалаврів напряму 6.050903, спеціалістів і магістрів спеціальностей 8.17010201, 8(7).17010101.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Герасина А.В. Комплексный метод идентификации нелинейных процессов крупного дробления и самоизмельчения руд / А.В. Герасина // Збірник наукових праць НГУ – 2011. – №. 36, т. 1 – С. 150-157.

2. Герасина А.В. Методика идентификации и алгоритм определения состояния нелинейных динамических объектов управления / А.В. Герасина // Системи управління, навігації та зв'язку – 2011. – № 2(18). – С. 78-82. – ISSN 2073-7394.

3. Герасина А.В. Идентификация режимов работы нелинейных процессов рудоподготовки / А.В. Герасина, В.И. Корниенко // Гірничая електромеханіка та автоматика: Наук. – техн. зб. – 2010. – Вип. 85 – С. 82-90. – ISSN 0201-7814.

4. Герасина О.В. Алгоритмы глобальной и локальной оптимизации в задаче идентификации сложных динамических систем / О.В. Герасина, В.И. Корниенко // Системи обробки інформації – 2010. – № 6(87). – С. 73-77. – ISSN 1681-7710.

5. Герасина А.В. Идентификация объектов управления в АСУТП рудоподготовки / А.В. Герасина, В.И. Корниенко // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2010. – № 10. – С. 102-106. – ISSN 2071-2227.

6. Корниенко В.И. Интеллектуальные методы структурно-параметрической идентификации технологических процессов рудоподготовки / В.И. Корниенко, А.В. Пивоварова // Гірнична електромеханіка та автоматика. – 2008. – Вип. 80. – С. 71-77. – ISSN 0201-7814.

7. Герасина А.В. Идентификация характеристик нелинейных динамических процессов рудоподготовки / А.В. Герасина // Материали за VII международна научна практична конференция «Найновите научни постижения - 2011», т. 17 «Технологии», 17-25 март 2011. – София: «Бял ГРАД-БГ», 2011. – С. 58-59. – ISBN 978-966-8736-05-6.

8. Герасина А.В. Программная реализация структурно-параметрической идентификации процессов рудоподготовки / А.В. Герасина // Materiały VII międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji «Strategiczne pytania światowej nauki – 2011», t. 13, 07-15 lutego 2011. – Przemysł: «Nauka i studia», 2011. – S. 22-23. – ISBN 978-966-8736-05-6.

9. Герасина А.В. Исследование точности идентификации объектов управления в АСУТП рудоподготовки / А.В. Герасина, В.И. Корниенко // Сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции «Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития '2010», т. 2 «Технические науки», 04-15 октября 2010. – Одесса: Черноморье, 2010. – С. 46-48. – ISBN 966-555-152-3.

10. Засоби інтелектуальної ідентифікації і прогнозування нелінійних динамічних об'єктів керування / Г.В. Кузнецов, В.І. Корнієнко, Т.О. Бубнова, О.В. Герасіна // Системний аналіз та інформаційні технології – 2009: XI міжнародна науково-технічна конференція, 26-30 травня 2009, НТУУ «КПІ». – К.: 2009. – С. 332.

У роботах, опублікованих у співавторстві здобувачці належить: [3-5, 9] – обґрунтування та модифікація методу, розробка моделей, алгоритмів і програм ідентифікації керованих процесів; [6] – дослідження інтелектуальних методів ідентифікації процесів рудопідготовки; [10] – дослідження ефективності методів ідентифікації керованих процесів.

АНОТАЦІЯ

Герасіна О.В. Ідентифікація технологічних процесів крупного дроблення і самоздрібнювання руд з використанням варіації структур моделей. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – автоматизація процесів керування. – Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет» МОНмолодьспорту України, Дніпропетровськ, 2012.

У дисертації вирішена актуальна наукова задача зниження похибок ідентифікації процесів крупного дроблення і самоздрібнювання руд шляхом

варіації структур їх інтелектуальних прогнозуючих моделей в умовах зміни динамічних режимів роботи.

Розв'язання задачі забезпечує підвищення якості керування технологічними процесами в адаптивних системах керування шляхом зниження похибок їх інтелектуальних прогнозуючих моделей, що мають структуру оптимальну для поточного режиму функціонування. Причому ідентифікацію керованих процесів запропоновано проводити в залежності від зміни їх режимів роботи, що дозволяє знизити обчислювальні витрати.

Розроблено методику, алгоритми та програми ідентифікації керованих процесів, що забезпечують підвищення якості керування ними за рахунок зниження похибок їх інтелектуальних прогнозуючих моделей.

Ключові слова: крупне дроблення, самодрібнювання, ідентифікація, адаптивні системи, блочно-орієнтовані структури моделей, режими роботи, параметр Херста.

АННОТАЦІЯ

Герасина А.В. Идентификация технологических процессов крупного дробления и самоизмельчения руд с использованием вариации структур моделей. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.07 – автоматизация процессов управления. – Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет» МОНмолодспорта Украины, Днепропетровск, 2012.

В диссертационной работе решена актуальная научная задача снижения ошибок идентификации процессов крупного дробления и самоизмельчения руд путем вариации структур их интеллектуальных прогнозирующих моделей в условиях изменения динамических режимов работы.

Решение задачи обеспечивает повышение качества управления технологическими процессами в адаптивных системах управления путем снижения ошибок их интеллектуальных прогнозирующих моделей, которые имеют структуру оптимальную для текущего режима функционирования. Причем идентификацию управляемых процессов предложено проводить в зависимости от изменения их режимов работы, что позволяет снизить вычислительные затраты.

Впервые установлено, что оптимальная структура модели процессов крупного дробления и самоизмельчения руд для одного режима функционирования не обеспечивает допустимую ошибку для других режимов, что определяет, в отличие от известного, необходимость проведения структурно-параметрической идентификации процессов при изменении их режимов работы.

Впервые обоснован выбор типа структур моделей процессов крупного дробления и самоизмельчения руд путем исследования вариации их типов, что позволяет, в отличие от известного, повысить точность идентификации для

разных режимов функционирования со снижением ошибок интеллектуальных прогнозирующих моделей.

Получил дальнейшее развитие композиционный метод идентификации процессов крупного дробления и самоизмельчения руд путем включения в него определения тенденции перехода этих процессов из одного режима функционирования в другой с помощью анализа параметра Херста, что позволяет снизить вычислительные затраты на процедуру идентификации путем планирования проведения структурной оптимизации моделей.

Впервые получены интеллектуальные прогнозирующие модели процессов крупного дробления и самоизмельчения руд, которые, в отличие от известных, имеют оптимальную структуру для текущего режима работы, что позволяет снизить ошибки моделей и повысить качество управления этими процессами.

Разработана методика идентификации процессов крупного дробления и самоизмельчения руд, которая включает процедуры определения изменения режимов работы этих процессов и их идентификацию, что позволяет, в отличие от известного, осуществлять ее в режиме реального времени путем параметрической, а в пакетном режиме – структурно-параметрической оптимизации моделей этих процессов.

Разработаны алгоритм определения изменения режимов работы процессов крупного дробления и самоизмельчения руд, который позволяет автоматизировано запланировать выполнение их структурно-параметрической идентификации в случае, когда режим работы уже изменился или возникла тенденция к его изменению; а также алгоритмы глобальной и локальной оптимизации моделей этих процессов, которые реализуют процедуру структурно-параметрической идентификации путем их структурной и параметрической оптимизации.

Разработано программное обеспечение предложенных методики и алгоритмов идентификации процессов крупного дробления и самоизмельчения руд, которое позволяет сократить сроки и затраты на их проектирование.

Разработанные методика, алгоритмы и программы использованы при выполнении госбюджетной научно-исследовательской работы, внедрены в комплекс программных средств проектирования и проектов реконструкции разработки ОАО ППКИ «Металлургавтоматика» и ГАО КБ «Днепровское», а также в учебный процесс Государственного ВУЗа «НГУ».

Ключевые слова: крупное дробление, самоизмельчение, идентификация, адаптивные системы, блочно-ориентированные структуры моделей, режимы работы, параметр Херста.

ANNOTATION

Gerasina O.V. Identification of technological processes for coarse crushing and autogenous grinding of the ores using variations of model structure. – On the rights manuscript.

Thesis for degree of Candidate of Engineering Science in the specialty 05.13.07 – automatization of control processes. – State Higher Educational Institution «National Mining Universitet», Dnipropetrovsk, 2012.

In the thesis it was solved the actual scientific problem of error reduction in identification of processes of coarse crushing and autogenous grinding of the ores using variation of structures of its intelligent predictive models in environment of change of dynamic operating conditions.

The solving of that problem provides the improving in technological process control at adaptive control systems by error identification of its intelligent predictive models, which have optimal structure for current mode of operation. Besides, it was offered to carry out the identification of controlled processes subject to changes of its mode of operation that allowed to cut down computing expenditures.

It were developed the methods, algorithms and programs for identification of controlled processes, providing the improvement in their control at the cost of error identification of its intelligent predictive models.

Keywords: coarse crushing, autogenous grinding, identification, adaptive systems, block-oriented structures of models, operating modes, Hurst parameter.

ГЕРАСІНА ОЛЕКСАНДРА ВОЛОДИМИРІВНА

**ІДЕНТИФІКАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ
КРУПНОГО ДРОБЛЕННЯ І САМОЗДРІБНЮВАННЯ РУД
З ВИКОРИСТАННЯМ ВАРІАЦІЇ СТРУКТУР МОДЕЛЕЙ**

(Автореферат)

Підписано до друку 06.03.12. Формат 60x90/16.

Папір офсет. Ризографія. Ум. друк. арк. 0,9.

Обл.-вид. арк. Тираж 120 пр. Зам. № .

Державний ВНЗ «НГУ»
49027, м. Дніпропетровськ, просп. К. Маркса, 19