

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ГІРНИЧИЙ УНІВЕРСИТЕТ

КОРНІЄНКО Валерій Іванович

УДК 681.515: 519.7: 62-52

**АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ
ПРОЦЕСАМИ КРУПНОГО ДРОБЛЕННЯ
ТА САМОЗДРІБНЮВАННЯ РУД**

Спеціальність:
05.13.07 – автоматизація процесів керування

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Дніпропетровськ – 2010

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі електроніки та обчислювальної техніки Національного гірничого університету (м. Дніпропетровськ), Міністерство освіти і науки України.

Науковий консультант:

доктор технічних наук, професор, Заслужений працівник народної освіти України

Кузнецов Георгій Віталійович,

завідувач кафедри електроніки та обчислювальної техніки Національного гірничого університету (м. Дніпропетровськ), Міністерство освіти і науки України.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор

Статюха Геннадій Олексійович,

завідувач кафедри кібернетики хіміко-технологічних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», Міністерство освіти і науки України;

доктор технічних наук, професор

Ткаченко Валерій Миколайович,

завідувач відділу теорії керуючих систем Інституту прикладної математики і механіки (м. Донецьк), Національна академія наук України;

доктор технічних наук, професор, Заслужений діяч науки і техніки України

Бойко Віталій Іванович,

завідувач кафедри електроніки Дніпродзержинського державного технічного університету, Міністерство освіти і науки України.

Захист відбудеться «_21_»_червня_2010 р. о_13_ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.080.07 при Національному гірничому університеті Міністерства освіти і науки України (49027, Дніпропетровськ-27, пр. К.Маркса, 19, тел. 47-24-11).

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного гірничого університету за адресою: 49027, Дніпропетровськ-27, пр. К.Маркса, 19.

Автореферат розісланий «_12_»_травня_2010 р.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради Д 08.080.07,

кандидат технічних наук, доцент

О.О. Азюковський

КОРНІЄНКО Валерій Іванович

**АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ
ПРОЦЕСАМИ КРУПНОГО ДРОБЛЕННЯ
ТА САМОЗДРІБНЮВАННЯ РУД**

(Автореферат)

Підписано до друку 11.05.10. Формат 60x90/16.
Папір офсет. Ризографія. Ум. друк. арк. 1,9.
Обл. – вид. арк. Тираж 120. Зам № 563.

ТОВ «Барвікс»
49005, м. Дніпропетровськ, вул. Симферопольська, 17

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність проблеми. Основними завданнями гірничо-металургійного комплексу, визначеними Державною програмою розвитку та реформування галузі на період до 2011 року, є створення нових наукоємних технологій і поліпшення управління комплексом. Пріоритетом наукових досліджень в програмі визначено, зокрема, розроблення алгоритмів і створення систем автоматичного керування технологічними процесами та роботою устаткування.

Внаслідок недостатньої автоматизації і комп'ютеризації продуктивність праці на вітчизняних гірничорудних підприємствах істотно відстає від світового рівня. До 50% основних витрат у собівартості гірничо-збагачувального комбінату і 70-85% витрат на електроенергію становлять технологічні процеси дроблення і здрібнювання. Освоєння технології самоздрібнювання руд, особливістю якої є лише стадія крупного дроблення, дозволили знизити капітальні витрати на будівництво, але при цьому збільшилися питомі витрати електроенергії. Таким чином, актуальним є зниження витрат на ці процеси шляхом створення ефективних систем автоматизованого керування ними.

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

З позицій керування ці процеси є складними динамічними об'єктами з нестационарними параметрами, нелінійними залежностями і стохастичними змінними, що мають транспортні запізнювання, різні режими роботи і чутливі до якості руди.

Для керування процесами крупного дроблення і самоздрібнювання руд поширення одержали системи, що використовують або динамічні моделі керованих процесів з адаптацією параметрів, або статичну оптимізацію, які в умовах варіації збурень (якості руди) і змінних режимів роботи устаткування не можуть забезпечити ефективне керування цими нелінійними процесами. Тобто, існує невідповідність між складністю технологічних процесів та принципами і методами керування ними.

Для оперативного контролю якості руди перспективними є методи контролю крупності і міцності руди за спектральними складовими активної потужності, споживаної привідними двигунами технологічного устаткування, а також методи контролю гранулометричного складу руди за її оптичним зображенням.

Розмаїтість технологічних схем дроблення і здрібнювання та їх складність викликає необхідність використання універсальних за цілями і ефективних за результатами принципів керування, що реалізовується шляхом синтезу оптимального керування за допомогою методів аналітичного конструювання регуляторів. Однак, при їх практичному застосуванні виникають труднощі принципового характеру.

Оптимальне керування вимагає відповідної апріорної (адекватних прогнозуючих моделей) й апостеріорної (поточних вимірів і результатів обробки) інформації. Це потребує застосування маловитратних і ефективних засобів оцінювання й ідентифікації, для чого найбільш перспективним є використання інтелектуальних підходів (методів систем штучного інтелекту), зокрема, нейронних мереж і систем з нечіткою логікою, що здатні до навчання і є універсальними й ефективними апроксиматорами. Крім того, нестаціонарність і стохастичність керованих процесів потребує створення адаптивних систем керування, які ефективні в умовах варіації збурень і властивостей (режимів роботи) об'єктів керування.

Таким чином, обґрунтування принципів та розробка методів та засобів створення автоматизованих систем оптимального керування процесами крупного дроблення та самоздрібнювання руд, які підвищують ефективність керування першими стадіями дроблення та самоздрібнювання в умовах варіації режимів роботи і збуреного середовища, є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. В основу дисертаційної роботи покладені матеріали, що узагальнюють дослідження автора в рамках державних програм і науково-дослідних робіт (НДР), які виконуються в Національному гірничому університеті відповідно до Закону України від 11 липня 2001 р. №2623-14 «Про пріоритетні напрямки розвитку науки і техніки»; «Державною програмою розвитку та реформування гірничо-металургійного комплексу на період до 2011 року», прийнятою Постановою Кабінету Міністрів України від 28 липня 2004 р. № 967; напрямкам НДР Міністерства освіти і науки України 6.4.2 “Інтелектуальні системи автоматизованого керування промисловими комплексами та технологіями”.

Автор був керівником напряму та виконавцем НДР ГП-407 «Інтелектуальні комп'ютерні технології обробки даних, прогнозування та управління» (державна реєстрація 0108U000358) по замовленню МОН України (наказ № 1044 від 27 листопада 2007 р.), НДР ГП-353 «Дослідження та обґрунтування методології підвищення рівня інформаційної безпеки в комп'ютерних системах та мережах підприємств гірничо-металургійного комплексу» (державна реєстрація 0104U000506).

Мета і завдання досліджень. Метою роботи є розв'язання актуальної наукової проблеми підвищення ефективності автоматизованого керування процесами крупного дроблення і самоздрібнювання руд в умовах зміни їх параметрів і динамічних режимів роботи та збуреного середовища шляхом синтезу і реалізації оптимального керування в процесі функціонування автоматизованих систем керування на основі ідентифікації та прогнозування стану керованих процесів з контролем основних збурень.

Досягнення поставленої мети передбачає вирішення наступних задач:

- теоретично обґрунтувати принципи оптимального керування нелінійними процесами крупного дроблення та самоздрібнювання руд на стадіях

проектування і функціонування систем автоматизованого керування та визначити точність реалізації цього керування;

- розробити методику вибору параметрів дискретизації та відновлення сигналів, що забезпечують припустиму похибку апроксимації при розв'язанні задач спостереження й ідентифікації керованих процесів;

- розробити способи контролю з підвищеною точністю міцності і крупності руди та її гранулометричного складу за спектральним та оптичним методами;

- розробити адаптивний фільтр-апроксиматор для підвищення точності прогнозування й ідентифікації складних нелінійних сигналів та керованих процесів;

- запропонувати метод ідентифікації процесів крупного дроблення та самоздрібнювання руд у класі інтелектуальних прогнозуючих моделей;

- розробити адаптивні системи оптимального керування процесами крупного дроблення та самоздрібнювання руд з інтелектуальним прогнозуванням.

Об'єктом дослідження є технологічні процеси дроблення та здрібнювання руд на гірничо-збагачувальних комбінатах.

Предметом дослідження є принципи і методи створення автоматизованих систем оптимального керування процесами крупного дроблення і самоздрібнювання руд та засоби їх реалізації.

Методи дослідження. В основу досліджень покладені методи аналітичного конструювання оптимальних та агрегованих регуляторів для обґрунтування принципів та розробки алгоритмів оптимального керування; методи систем штучного інтелекту (нейронні мережі, нечітка логіка, еволюційне моделювання) для розробки прогнозуючих моделей керованих процесів; методи частотних та час-частотних (вейвлет) перетворень сигналів для розробки способів контролю крупності і міцності руди та її гранулометричного складу, а також для розробки прогнозуючого фільтра-апроксиматора; методи нелінійної динаміки для визначення характеристик керованих процесів; структурні та параметричні методи оптимізації для отримання оптимальних рішень та моделей; методи імітаційного моделювання для визначення ефективності запропонованих способів, методик та алгоритмів; статистичні методи для обробки модельних та експериментальних даних.

Основні наукові положення і результати, їх новизна. Положення:

1. Оптимальне керування процесами крупного дроблення і самоздрібнювання руд формується в процесі функціонування системи керування за принципом мінімуму узагальненої роботи та за синергетичним принципом із поточним оцінюванням стану керованого процесу і його майбутнього стану за прогнозуючими моделями з контролем основних збурень, що забезпечує, на відміну від відомого, підвищення ефективності процесів шляхом формування керування, інваріантного до збуреного середовища та нелінійності процесів.

2. Ідентифікація процесів крупного дроблення та самоздрібнювання руд здійснюється шляхом визначення режиму роботи керованого процесу та розмірності його стану, на основі чого за допомогою композиції методів глобальної і локальної оптимізації визначається структура та параметри моделі процесу, що дозволяє, на відміну від відомого, отримати інтелектуальні прогнозуючі моделі підвищеної точності зі здатністю адаптуватися під змінювані властивості керованих процесів.

3. Оптимальне керування багатозв'язним процесом самоздрібнювання руди формується шляхом поточної оцінки стану керованого процесу, його структурно-параметричної ідентифікації, прогнозування за інтелектуальною моделлю вільного руху процесу та вироблення сигналів оптимального керування, які відпрацьовуються локальними адаптивними системами автоматичного регулювання з інтелектуальним прогнозуванням, що забезпечує, на відміну від відомого, підвищення якості керування в умовах зміни режимів роботи і параметрів керованого процесу та збуреного середовища.

Результати:

1. Вперше запропоновані розв'язання задач синтезу оптимального керування процесами крупного дроблення і самоздрібнювання руд в ході функціонування системи керування за принципом мінімуму узагальненої роботи і синергетичним принципом на ковзному інтервалі керування з контролем основних збурень із залученням інформації про стан керованих процесів до нового інтервалу і їх майбутнього стану за прогнозуючими моделями, що дозволяє спростити розв'язання задач синтезу для нелінійних керованих процесів і компенсувати вплив основних збурень і, таким чином, підвищити ефективність керування цими процесами.

2. Встановлено, що особливістю реалізації оптимального керування процесами крупного дроблення і самоздрібнювання руд є необхідність зниження значень математичних очікувань похибок чисельного інтегрування вільного руху керованих процесів на інтервалі синтезу оптимального керування відносно значень математичних очікувань похибок оцінювання їх поточного стану, що дозволяє забезпечити близькість реального керування цими процесами до теоретично досяжного.

3. Вперше запропоновано ідентифікацію режимів роботи нелінійних процесів крупного дроблення та самоздрібнювання руд здійснювати за часовими реалізаціями шляхом визначення режиму функціонування керованого процесу і його розмірності (порядку), а також реконструкції моделі цього режиму шляхом настроювання параметрів його інтелектуальної моделі за обраним критерієм. Це дозволяє ідентифікувати режими функціонування процесів крупного дроблення та самоздрібнювання руд (від рівноваги до хаосу) з позицій нелінійної динаміки зі зниженням витрат на експериментальні дослідження у порівнянні з традиційними методами.

4. Запропоновано підвищити точність моделей нелінійних процесів крупного дроблення та самоздрібнювання руд шляхом їх структурно-

параметричної ідентифікації з використанням, на відміну від відомих підходів, композиції методів глобальної і локальної оптимізації інтелектуальних моделей, що дозволяє отримати прогнозуючі чіткі і нечіткі нейромережеві моделі керованих процесів зі здатністю адаптуватися під змінювані режими процесів без обмежень на їх застосування у реальному часі.

5. Визначено, що підвищення якості регулювання каналів із запізнюванням нелінійних процесів крупного дроблення та самоздрібнювання руд досягається, на відміну від відомого, шляхом безпошукового непрямого адаптивного регулювання з інтелектуальною прогнозуючою моделлю, що навчається.

6. Вперше розроблені адаптивні системи оптимального керування процесами крупного дроблення та самоздрібнювання руд, які відрізняються формуванням оптимального керування на основі поточної оцінки стану керованого процесу, його структурно-параметричної ідентифікації та інтелектуального прогнозування майбутнього стану, що дозволяє, у порівнянні з відомими підходами, підвищити якість керування цими процесами при зміні їх параметрів і режимів роботи, збуреного середовища та цілей керування.

Практичне значення одержаних результатів полягає в наступному:

1. Розроблені способи автоматичного контролю крупності та міцності вхідної руди конусної дробарки та гранулометричного складу руди в потоці, що забезпечують підвищення точності контролю шляхом відповідної обробки інформації та зниження інструментальної похибки їх технічної реалізації.

2. Розроблені методика ідентифікації процесів крупного дроблення і самоздрібнювання руд, а також методика вибору параметрів дискретизації та алгоритмів відновлення сигналів при розв'язанні задач спостереження й ідентифікації цих процесів, що дозволяють отримати інтелектуальні прогнозуючі моделі керованих процесів підвищеної точності зі зниженням витрат на експериментальні дослідження.

3. Розроблена сукупність алгоритмів адаптивного оптимального керування процесами крупного дроблення і самоздрібнювання руд, яка містить алгоритми поточного оцінювання і прогнозування стану керованих процесів, ідентифікацію їх моделей, а також їх адаптивного регулювання та оптимального керування, що дозволяє реалізувати системи, інваріантні до зміни режимів роботи і збуреного середовища, і, таким чином, підвищити ефективність керування.

4. Створений комплекс програм моделювання і розробки засобів автоматичного контролю та систем оптимального керування процесами крупного дроблення та самоздрібнювання руд, що дозволяє скоротити строки та витрати на їх проектування.

Рівень впровадження результатів дисертаційних досліджень визначається використанням розроблених способів контролю, методик ідентифікації, алгоритмів керування та комп'ютерних програм моделювання при виконанні держбюджетних науково-дослідних робіт, розробці комплексу програмних засобів проектування та проектів реконструкції розробки ВАТ ППКІ

«Металургавтоматика» та ДАТ КБ «Дніпровське», а також розробці науково-методичного забезпечення підготовки бакалаврів та магістрів спеціальності 8(7).092401.

Особистий внесок здобувача. Автором самостійно сформульовані наукова проблема, мета і задачі досліджень, наукові положення і результати, висновки і рекомендації, виконані основні теоретичні і прикладні дослідження, здійснені наукове і технічне керівництво, а також безпосередня участь в роботах із впровадження отриманих результатів.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи пройшли апробацію на: Міжнародній конференції «Форум гірників – 2009» (м. Дніпропетровськ, Національний гірничий університет, 30 вересня - 03 жовтня 2009р.); XI міжнародній науково-технічній конференції «Системний аналіз та інформаційні технології - 2009» (м. Київ, НТУУ «КПІ», 26-30 травня 2009 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Современные направления теоретических и прикладных исследований '2009» (м. Одеса, 16-27 березня 2009р.); V міжнародній науково-практичній конференції “Veda a technologie – krok do budoucnosti – 2009” (м. Прага, 27 лютого-05 березня 2009 р.); V міжнародній науково-практичній конференції «Найновите научни постижения - 2009» (м. Софія, 17-25 березня 2009 р.); IV міжнародній науково-практичній конференції «Научно пространство на Европа – 2008» (м. Софія, 15-30 квітня 2008 р.); IV міжнародній науково-практичній конференції “Strategiczne pytania swiatowej nauki – 2008” (м. Перемишль, 15-28 лютого 2008 р.).

Публікації. Основні наукові положення і результати дисертації опубліковані у 31 роботі: з них 24 у наукових фахових виданнях (11 – без співавторів) і 7 в матеріалах конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Робота складається із вступу, 6 розділів і висновків на 354 сторінках, включаючи 4 таблиці, 72 рисунки, список використаних джерел із 271 найменувань на 24 сторінках і 17 додатків на 53 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

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

В першому розділі виконаний аналіз методів створення систем автоматизованого керування процесами дроблення і здрібнювання та засобів їх реалізації, на основі чого сформульовані основні задачі досліджень.

Витрати на технологічні процеси дроблення і здрібнювання складають більше половини собівартості гірничо-збагачувального виробництва. Освоєння технології самоздрібнювання руд, особливою якої є наявність лише стадії крупного дроблення, дозволили знизити капітальні витрати на будівництво, але при цьому збільшилися питомі витрати електроенергії. Тому актуальним є

підвищення ефективності цих процесів шляхом підвищення якості автоматизованого керування ними.

Основними вихідними змінними процесу дроблення в конусних дробарках (КД) (рис. 1.а) є гранулометричний склад дробленого продукту $\gamma_{вих}$, продуктивність процесу $Q_{др}$ і споживана потужність $P_{др}$. Його керуючими впливами є продуктивність рудного постачання $Q_{вх}$, розмір розвантажувальної щілини КД і частота хитань її рухливого конусу V , а збуреннями – гранулометричний склад вхідної руди $\gamma_{вх}$ та її міцність ρ , стан футеровок ξ тощо.

Для процесу здрібнювання в барабанних млинах (БМ) (рис. 1.б) вихідними змінними є вміст готового класу крупності у вихідному продукті γ_m , продуктивність по готовому класу $Q_{гот}$ і споживана потужність P_m . Його керуючими впливами є продуктивність по вхідній руді Q_p , витрати води B_m та куль $Ш$, а збуреннями – гранулометричний склад вхідної руди γ_p , її фізико-механічні і речовинні властивості ζ , витрата пісків Π , стан футеровок і ліфтерів ξ тощо. Для процесу самоздрібнювання наразі у якості проміжної вихідної змінної додатково використовують ступінь внутрішньомлинового заповнення θ .

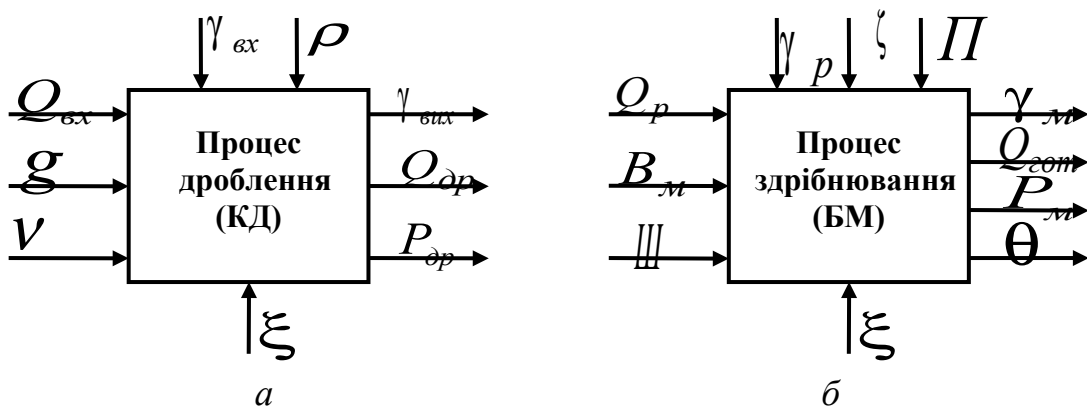


Рис. 1. Процеси дроблення в конусних дробарках (а) і здрібнювання в барабанних млинах (б) як об'єкти керування

Оскільки рудопідготовка відноситься до підготовчих процесів, то для її керування використовують технологічні критерії. Так, в роботах Качана Ю.Г. показано, що керування процесом крупного дроблення на залізорудних комбінатах доцільно здійснювати за якісним показником, наприклад, шляхом мінімізації різниці між поточним $\gamma_{вих}$ і заданим $\gamma_{вих}^{зад}$ гранулометричними складами продукту дроблення

$$\|\gamma_{вих} - \gamma_{вих}^{зад}\| \rightarrow \min \quad (1)$$

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

Для технологічного ж процесу самоздрібнювання в роботах Марюти О.М. і Новицького І.В. обґрунтовано необхідність керування ним з метою максимізації продуктивності по готовому класу

$$Q_{\text{com}} \rightarrow \max \quad (2)$$

при обмеженнях на припустиму потужність $P_m \leq P_{m\max}$, що відповідає мінімізації експлуатаційних витрат технологічної лінії збагачення.

Процеси дроблення і здрібнювання з позицій керування є динамічними, нелінійними, стохастичними об'єктами керування (ОК) зі змінними параметрами, що мають транспортні запізнювання, різні динамічні режими (змінну структуру) і чутливі до якості руди. Їх динамічні властивості в різних каналах приблизно визначаються лінійними передатними функціями аперіодичної ланки першого або другого порядку із запізнюванням. Більш точними є нелінійні моделі у вигляді кінцево-різницевого рівняння або послідовно з'єднаних лінійної динамічної і безінерційної нелінійної ланок.

Ці процеси описуються також за допомогою нелінійного відображення Ено, що описує рух частинок в умовах тертя й імпульсних впливів (зіткнень), та нелінійних дисипативних осциляторів із силовим чи параметричним збудженнями. При зміні параметрів ці моделі описують різні динамічні режими функціонування: від рівноваги, періодичних та квазіперіодичних режимів до хаосу. Цим режимам у фазовому просторі відповідають атрактори у вигляді стійкої рівноваги, граничного циклу, квазіперіодичного та хаотичного (дивного) атракторів. Зміна значень параметрів викликає втрату стійкості одного режиму функціонування та біфуркацію в інший.

Наразі для автоматизованого керування процесами дроблення і здрібнювання використовують системи керування з адаптацією параметрів або статичної оптимізації, які в умовах варіації якості руди і змінних динамічних режимів роботи устаткування мають недостатню якість керування.

Для оперативного контролю якості руди найбільш перспективними є методи контролю її крупності і міцності за спектральними складовими активної потужності, споживаної привідними двигунами технологічного устаткування, а також методи контролю гранулометричного складу руди в потоці за її оптичним зображенням.

Одна з провідних концепцій сучасної теорії автоматичного керування полягає у досягненні головної кінцевої мети на кожному етапі функціонування системи, що забезпечується шляхом оптимізації ОК у реальному масштабі часу. Це вимагає повного використання наявної апріорної інформації у вигляді моделей цього ОК і можливе при:

- оптимальному оцінюванню (фільтрації) динамічних процесів в ОК;
- ідентифікації (оптимальному оцінюванню структури і параметрів) ОК;
- синтезі оптимального керування на інтервалах функціонування системи;
- адаптації (настроюванні оптимального керування за неповної інформації).

Однак синтез оптимального керування процесами дроблення і здрібнювання за допомогою класичного методу аналітичного конструювання

оптимальних регуляторів (АКОР) Лєтова-Калмана має принципові труднощі, обумовлені нерозв'язністю основного функціонального рівняння для нелінійного ОК.

Крім того, оптимальне керування вимагає наявності відповідної апріорної (адекватних прогнозуючих моделей) й апостеріорної (поточних вимірів і результатів обробки) інформації. Це потребує застосування маловитратних і ефективних засобів оцінювання й ідентифікації, для чого найбільш перспективним є використання інтелектуальних підходів (методів систем штучного інтелекту), зокрема, нейронних мереж (НМ) і систем з нечіткою логікою, що здатні до навчання і є універсальними й ефективними апроксиматорами

Нестационарність і стохастичність ОК потребує також створення адаптивних систем керування, які ефективні в умовах варіації збурень і властивостей (режимів роботи) ОК. При цьому, для адаптації моделей та алгоритмів керування перспективними є пошукові та еволюційні методи, зокрема, генетичні алгоритми.

Другий розділ присвячений обґрунтуванню та дослідженню принципів оптимального керування нелінійними процесами дроблення і здрибнювання.

В розділі запропоновано розв'язання задачі оптимального керування за принципом мінімуму узагальненої роботи нелінійним ОК в процесі функціонування системи з узагальненою моделлю виду:

$$Y[k+1] = \Phi_Y \{Y[k], u[k], w[k], \xi[k], a[k], k\}; k = t/T, \quad (3)$$

де Φ_Y – функція перетворення; $Y[k], u[k], w[k], \xi[k], a[k]$ – відповідно, вектори (матриці) виходу процесу, його керування, збурювання, шуму і параметрів; k – такт часу; t – неперервний час; T – інтервал дискретизації.

Аргументи моделі оцінюються за допомогою каналних прогнозуючих фільтрів:

$$\hat{Z}[k] = \Phi_Z^{\text{III}} \{Z[k - n_Z + 1], \varphi(Z[k - n_Z + 1]), \xi_Z^{\text{III}}[k], a_Z^{\text{III}}[k], k\}, \quad (4)$$

де $\{Y[k], u[k], w[k]\} \subset \hat{Z}[k]$ і $\hat{Z}[k]$ – вектор (матриця) оцінки стану каналу системи; Φ_Z^{III} – функція перетворення; $Z[k - n_Z + 1], \varphi(Z[k - n_Z + 1]), \xi_Z^{\text{III}}[k], a_Z^{\text{III}}[k]$ – відповідно, вектор (матриця) вимірних значень передісторії стану каналу (до моменту часу $k - n_Z + 1$); лінійно незалежні функції, що характеризують властивості часового ряду (наприклад, автокореляційна функція, дисперсія тощо); шуми вимірювань та параметри фільтра; n_Z – запізнювання в каналі.

У якості керування використано швидкість $u^*[k] = u[k] - u[k - 1]$ (зміну значення керуючої координати на поточний такт), тоді модель ОК набуває розширеного виду з лінійно вхідним керуванням:

$$Y[k+1] = \Phi + \Psi \cdot u^*[k], \quad (5)$$

або більш компактно

$$Y[k+1] = \Phi + \Psi \cdot u^*[k], \quad (6)$$

де I – одинична матриця; $Y[k+1] = \{Y[k+1], u[k]\}^T$; $\Phi = \{\Phi_Y, u[k-1]\}^T$; $\Psi = \{0, I\}^T$.

Синтез здійснюється за дискретним стохастичним функціоналом узагальненої роботи (ФУР) з адитивними функціями витрат:

$$J_{FR} = E \left\{ V_3(Y[k_{j+1}]) + \int_{k: k_j}^{k_{j+1}-1} Q_3(Y[k], Y^{zad}[k]) + \int_{k: k_j}^{k_{j+1}-1} U_3(u^*[k]) + \int_{k: k_j}^{k_{j+1}-1} U_3^*(u_{opt}^*[k]) \right\}, \quad (7)$$

де E – математичне очікування; V_3 – термінальна функція кінцевого стану етапу керування; Q_3 , U_3 – позитивно визначені функції; U_3^* – позитивно визначена функція, що приймає мінімальне значення при шуканому оптимальному керуванні $u^* = u_{opt}^*$; Y^{zad} – задане значення виходу процесу; k_j, k_{j+1} – початкові такти послідовних етапів (інтервалів) керування.

Тоді за дискретним рівнянням Беллмана

$$V_i(Y[i]): E \left\{ Q_3(Y[i], Y^{zad}[i]) + V_{i+1}(Y[i+1]) + \frac{\partial V_{i+1}^T}{\partial Y[i+1]} \cdot \Psi^T \cdot u_{opt}^*[i] \right\}; \quad i = k_{j+1}-1, k_{j+1}-2, \dots, k_j \quad (8)$$

при граничній умові $V_{k_{j+1}}(Y[k_{j+1}]) = V_3(Y[k_{j+1}])$ і квадратичній функції витрат на керування оптимальне керування має вид:

$$u_{opt}^*[i] = -\frac{\partial V_{i+1}^T}{\partial u[i+1]}. \quad (9)$$

В розділі запропоновано також розв'язання задачі синтезу керування в процесі функціонування АСК за синергетичним принципом відповідно методу аналітичного конструювання агрегованих регуляторів. Нехай макрозмінна

$$\Psi[k+1] = K_\kappa \Psi_\kappa[k+1] + K_\delta \Psi_\delta[k+1] \quad (10)$$

є комбінацією консервативної $\Psi_\kappa[k+1]$ і дисипативної $\Psi_\delta[k+1]$ складових, де консервативна визначає природну динаміку ОК, а дисипативна вводиться для формування бажаного режиму системи, а K_κ, K_δ – коефіцієнти погодження.

Моделі ОК

$$x[k+1] = \phi(x[k]) + \psi(x[k]) \cdot u[k] + \xi[k], \quad (11)$$

відповідає еталонна модель

$$\dot{x}[k+1] = \dot{\phi}(x[k], u[k]) \quad (12)$$

і рівняння його вільного руху

$$x_c[k+1] = \phi(x[k], a[k]), \quad (13)$$

де ϕ, ψ – диференційовані функції; $\{Y[k], w[k]\} \subset x[k]$ – стан ОК; $\{Y[k], u[k], w[k]\} \subset Z[k]$.

Тоді при мінімізації похибки керування і витрат на керування рівняння бажаного режиму прийме вид:

$$\Psi[k+1] = E\{K_\delta \Psi_\delta[k+1] - K_\kappa \psi(x[k]) \cdot u[k]\} = 0 \quad (14)$$

і згідно рівнянню Ейлера-Лагранжа, що має в дискретній формі підродину стійких екстремалей

$$\Psi[k+1] \cdot \psi(x[k]) \cdot u[k] + \Psi[k+1] \cdot \phi(x[k]) + T_\delta^{-1} \cdot \phi(\Psi[k]) = 0; \quad T_\delta > 1, \quad (15)$$

оптимальне керування визначається як

$$u[k] = -(\Psi[k+1] \cdot \psi(x[k]))^{-1} \times [\Psi[k+1] \cdot \phi(x[k]) + T_\delta^{-1} \cdot \phi(\Psi[k])], \quad (16)$$

що доставляє мінімум супровідному функціоналу

$$J_{opt} = E\left\{ \sum_{k=k_0}^{k_1-1} (T_\delta^{-1})^2 \cdot \left(\Psi[k+1] \cdot \phi(x[k]) + T_\delta^{-1} \cdot \phi(\Psi[k]) \right)^2 \right\}. \quad (17)$$

Тут $\Delta \Psi[k+1]$ – перша різниця; Φ – диференційована функція, що визначає потрібну якість перехідних процесів ОК.

Таким чином, оптимальне керування процесами крупного дроблення і самоздрібнювання руд формується в процесі функціонування системи

керування за принципом мінімуму узагальненої роботи та за синергетичним принципом із поточним оцінюванням стану керованого процесу і його майбутнього стану за прогнозуючими моделями з контролем основних збурень, що забезпечує, на відміну від відомого, підвищення ефективності процесів шляхом формування керування, інваріантного до збуреного середовища та нелінійності процесів.

Узагальнено алгоритми синтезу оптимального керування мають такі етапи:

- оцінка стану ОК в моменти початку чергового інтервалу керування;
- прогнозування вільного руху ОК на інтервалі оптимізації керування;
- обчислення градієнта цільової або агрегованої функцій;
- формування сигналу оптимального керування.

В результаті досліджень за методом варіацій отримані аналітичні залежності похибок виконання етапів синтезу оптимального керування та визначено, що точність реалізації оптимального керування, перш за все, обумовлюється точністю оцінки поточного стану ОК та моделювання його вільного руху, тобто точністю розв'язання задач спостереження та ідентифікації.

Третій розділ присвячений розробці засобів контролю та прогнозування процесів крупного дроблення та самоздрібнювання руд з підвищеною точністю.

Для забезпечення припустимої похибки апроксимації сигналів при розв'язанні задач спостереження й ідентифікації неперервних технологічних процесів розроблено методику вибору значень параметрів дискретизації і алгоритмів відновлення цих сигналів. Вона базується на дослідженні та систематизації похибок дискретизації та відновлення сигналів у відповідності до теорем Котельникова-Шеннона і містить наступні етапи:

1) вибір, виходячи із вимог до задач спостереження й ідентифікації, значення припустимої сумарної похибки апроксимації сигналів;

2) визначення необхідних процедур вибору параметрів і алгоритмів відновлення, виходячи з властивостей і особливостей наявних сигналів (з обмеженим (СОС) чи необмеженим (СНС) спектром, нерівномірні відліки тощо), цілей (дискретизація, відновлення) і використовуваних базисних функцій (Фур'є, вейвлети, В-сплайни тощо);

3) вибір параметрів й алгоритмів при:

- дискретизації сигналів СОС: інтервалу спостереження, типу передфільтра і коефіцієнта запасу по частоті дискретизації, тривалості імпульсів дискретизації (часу виміру відліків);

- дискретизації сигналів СНС: періоду дискретизації та передатної функції цифрового корегуючого фільтра;

- відновленні сигналів: інтерполяції сигналів СНС, лінійної інтерполяції сигналів СОС з вибором частоти дискретизації, відновлення нерівномірно дискретизованих (у відомі моменти часу) відліків сигналів СНС, відновлення нерівномірно дискретизованих (у невідомі моменти часу) відліків сигналів СОС.

Для підвищення точності контролю крупності і міцності вхідної руди КД запропоновано спосіб демодуляції сигналу споживаної активної потужності з комплексним зсувом його спектральних складових. При цьому, на відміну від відомих підходів, не виникає паразитної спектральної складової, яка обмежує вибірковість по верхній частоті.

Пропонована демодуляція включає смугову фільтрацію сигналу активної потужності, його дискретизацію, комплексний зсув дискретного сигналу на опорну частоту, цифрову низькочастотну та смугову фільтрацію квадратурного сигналу, а також усереднення сигналів цифрової низькочастотної та смугової фільтрацій.

Визначено, що пропонований спосіб забезпечує підвищення точності контролю за рахунок покращення вибірковості інформативних складових на $-1,34$ дБ на порядок фільтра та зниження інструментальної похибки до 1-2 % при розрядності цифрових фільтрів у 16 біт та їх порядків вище 6.

Для підвищення точності контролю гранулометричного складу руди в потоці запропоновано спосіб контролю за його оптичним зображенням, що вміщує формування та попередню обробку зображення, його сегментацію, фільтрацію бінарного зображення, опис параметрів об'єктів зображення та обчислення характеристик гранулометричного складу.

Визначено, що на етапі формування та попередньої обробки зображення для компенсації його змазу, який виникає внаслідок руху руди за час експозиції, доцільно використання фільтрації Вінера, а сегментацію зображення, внаслідок неефективності градієнтних методів, необхідно здійснювати шляхом порогової бінаризації, якій передують процедура підкреслення границь об'єктів зображення. При цьому одержуване бінарне зображення через інтегральний характер порогової функції має шуми усередині елементів, для очищення яких використовуються логічні чи морфологічні алгоритми фільтрації.

Результати етапів обробки зображень руди на конвеєрі наведені на рис. 2, а на рис. 3 наведені диференціальна *Dif* та інтегральна *Int* (залишок на ситі) характеристики гранулометричного складу, що усереднені за 30 кадрами.

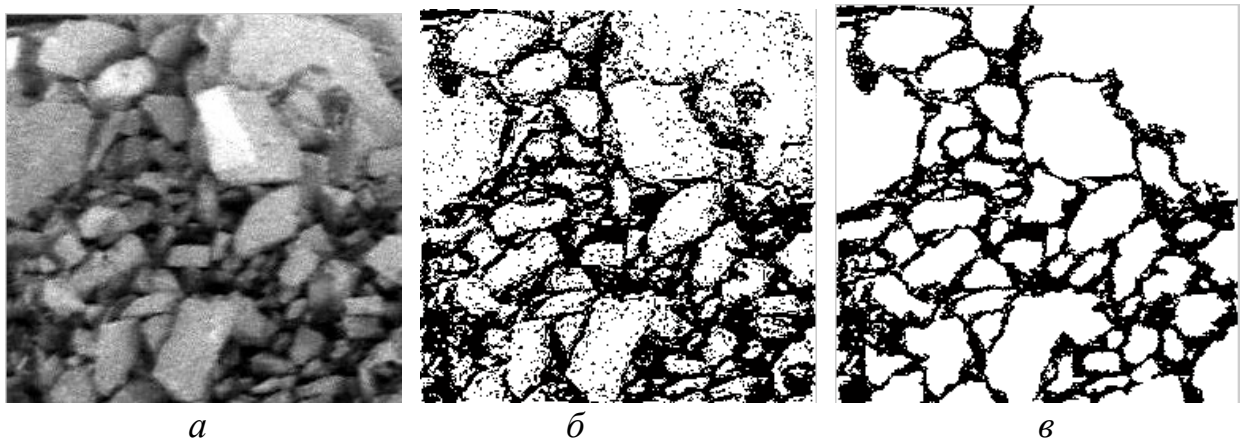


Рис. 2. Результати відновлення зображення руди (а), її порогової бінаризації (б) та логічної фільтрації (в)

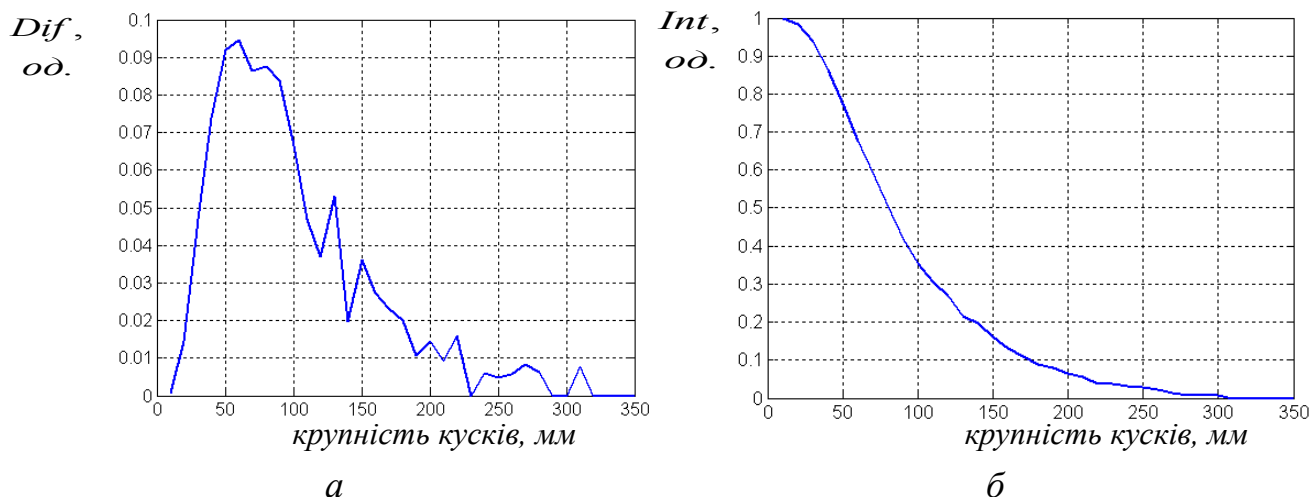


Рис. 3. Диференціальна (а) та інтегральна (б) характеристики гранулометричного складу крупнокускової руди

Визначено, що за рахунок підвищення завадостійкості обробки зображень шляхом відповідної фільтрації на етапі формування та відновлення, а також логічної фільтрації бінарних зображень, інструментальна похибка визначення площ елементів зображення складає менше 1 %.

Для прогнозування складних сигналів запропоновано адаптивний фільтр-апроксиматор (АФА) з дискретним вейвлет перетворенням спостережуваного часового сигналу, пороговим обмеженням (трешолдингом) вейвлет коефіцієнтів для придушення шуму, прогнозуванням значень коефіцієнтів за допомогою нейронної мережі (НМ) та зворотного дискретного вейвлет перетворення цих коефіцієнтів для визначення прогнозованого часового сигналу.

Для настроювання цього нейронного вейвлет (НВ) АФА до конкретних умов застосування здійснюється його навчання шляхом оптимізації параметрів за мінімумом похибки його виходу.

Визначено, що запропонований НВ АФА (з симлетами п'ятого порядку, м'яким адаптивним трешолдингом та НМ прямого поширення) для типових сигналів, породжуваних процесами дроблення і здрібнювання, перевершує по точності лінійний і нейронечіткий фільтри, за винятком прогнозування широкосмугового сигналу, коли він порівняний за точністю з нейронечітким фільтром. Він забезпечує (при припустимій похибці 10 % і відношенні сигнал/шум у 20 дБ) глибину прогнозу 6-10 тактів і потребує менше часу на навчання (більше, ніж у 5 разів у порівнянні з нейронечітким фільтром). Статистична перевірка підтвердила значимість цих результатів.

Четвертий розділ присвячений розробці методів та засобів ідентифікації нелінійних процесів крупного дроблення та самоздрібнювання руд у класі інтелектуальних прогнозуючих моделей.

Визначено, що використання запропонованого НВ АФА у якості еталонної моделі при ідентифікації типових ОК процесів дроблення і здрібнювання перевершує по точності лінійний і нейронечіткий фільтри, за винятком

ідентифікації кінцево-різницевої моделі КД, де поступається нейронечіткому фільтру, а також ідентифікації моделі БМ, де порівняний за точністю з ним.

Запропоновано метод ідентифікації нелінійних процесів крупного дроблення та самоздрібнювання руд за часовими реалізаціями, що полягає у:

1) визначенні режиму функціонування ОК шляхом аналізу час-частотних характеристик сигналу, побудови фазового портрету атрактора та обчислення кореляційної ентропії Колмогорова;

2) визначенні розмірності (порядку) ОК шляхом обчислення кореляційного інтервалу передбачуваності (глибини прогнозу), кореляційної розмірності атрактора та визначення розмірності вкладення атрактора у фазовий простір (глибини пам'яті);

3) реконструкції моделі режиму функціонування шляхом вибору базисних функцій та настроюванні моделі, що оптимальним чином за обраним критерієм відповідає часовим реалізаціям з визначеними характеристиками.

Це дозволяє ідентифікувати режими функціонування керованих процесів (від рівноваги до хаосу) з позицій нелінійної динаміки без суттєвих витрат на експериментальні дослідження у порівнянні з традиційними методами.

Запропоновано композиційний метод структурно-параметричної ідентифікації ОК при оцінці стану за допомогою фільтрів спостереження, що полягає у:

1) формуванні задачі ідентифікації із вибором методів та критеріїв структурної (глобальної) оптимізації, способів врахування обмежень, типу структури моделі, базисних функцій та методів параметричної оптимізації;

2) ідентифікації структури моделі ОК на базі композиції методів глобальної оптимізації, що вміщують генерування структур моделей-претендентів (базисних функцій), і методів локальної оптимізації для параметричного навчання базисних функцій, а також селекцію кращих моделей за критеріями структурної оптимізації;

3) ідентифікації параметрів моделі оптимальної структури шляхом її навчання методом локальної параметричної оптимізації за критерієм регулярності на всій вибірці даних.

Оцінка ефективності запропонованого методу ідентифікації за часовими реалізаціями виконувалась на прикладі обробки експериментальної послідовності значень вмісту класу +100 мм у крупнодробленій руді γ_{+100} та реалізацій відображення Ено в хаотичному режимі (ВЕХР).

Розрахунки визначили значення кореляційних ентропії і розмірності атракторів ВЕХР $K_{CE} = 0,47$ і $D_{CE} = 1,14$, а також сигналу γ_{+100} – $K_{C\gamma} = 0,39$ і $D_{C\gamma} = 3,04$. З них випливає, що процес, який породжує сигнал γ_{+100} теж знаходиться в хаотичному режимі (його кореляційна ентропія у фазовому просторі сходиться до постійної позитивної величини). При цьому інтервали точної передбачуваності складають $T_{CE} = 3,42$ такту і $T_{C\gamma} = 4,11$ такту. Із залежності кореляційної розмірності атрактора $D_{C\gamma}$ сигналу γ_{+100} від

розмірності фазового простору d_γ (рис. 4) впливає, що розмірність вкладення складає $d_\gamma \geq 4$.

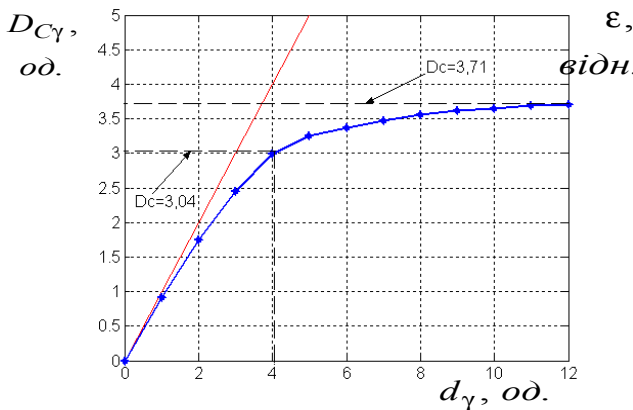


Рис. 4. Залежність розмірності атрактора від розмірності простору сигналу γ_{+100}

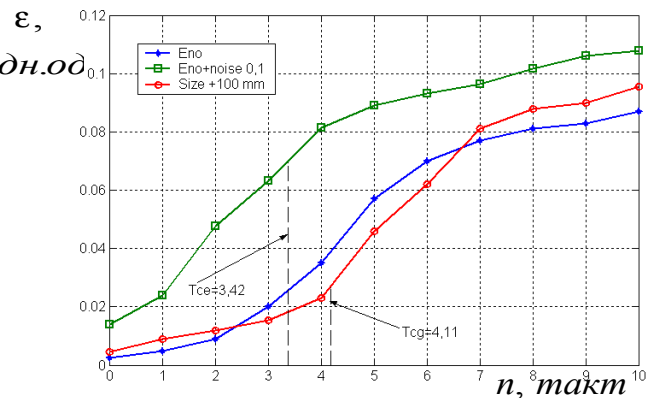


Рис. 5. Залежність відносної похибки від глибини прогнозу

Для реконструкції моделей породжуючих процесів використовували нейронечіткий фільтр з дзвіноподібною функцією належності. Визначено, що відносна похибка прогнозування ϵ (рис. 5) складає менше 10 % при глибині прогнозу $n \leq 10$ тактів та менше 3 % для інтервалів передбачуваності цих сигналів (похибка прогнозування лінійними фільтрами складає більше 20 %).

Структурно-параметрична ідентифікація виконувалась для процесу крупнокускового дроблення (ККД) за експериментальними даними, а для процесу мокрого самоздрібнювання в БМ (МСЗ) – за адекватною моделлю у вигляді послідовно з'єднаних аперіодичної ланки із запізнюванням та безінерційної квадратичної ланки (ППТ2). Похибки виміру склали 10 %, а нестационарність параметрів ОК за час спостереження – 20 %.

У якості критерію структурної оптимізації обрано комбінований критерій регулярності та незміщеності, оскільки він виявив малу чутливість до варіації шуму і глибини прогнозу.

При ідентифікації процесів ККД і МСЗ використовувалася структура моделей Вінера-Гаммерштайна (комбінація лінійних динамічних та нелінійних статичних ланок) із базисними функціями у вигляді НМ різної архітектури, а у якості глобальних методів оптимізації застосовувалися алгоритм прямого випадкового пошуку (ПВП) та генетичний алгоритм (ГА). Алгоритм ПВП мав адаптивний крок пошуку, а ГА – одноточечне схрещування, селективний вибір батьків та формування нової популяції із витисненням.

Визначено, що ці алгоритми щодо точності дали подібні результати, при цьому алгоритм ПВП виявив вищу швидкодію, а ГА – кращу збіжність.

Встановлено також, що мінімуму комбінованого критерію відповідають каскадні НМ моделі прямого поширення із логістичною функцією активації прихованого шару і лінійною функцією у вихідному шарі. Кількість нейронів у прихованому шарі для моделі процесу ККД склала 23, а для процесу МСЗ – 47.

Визначено, що точність отриманих моделей ККД і МСЗ (рис. 6) складає 0,034-0,037, що майже в 2 рази краще, ніж при використанні відомих методів.

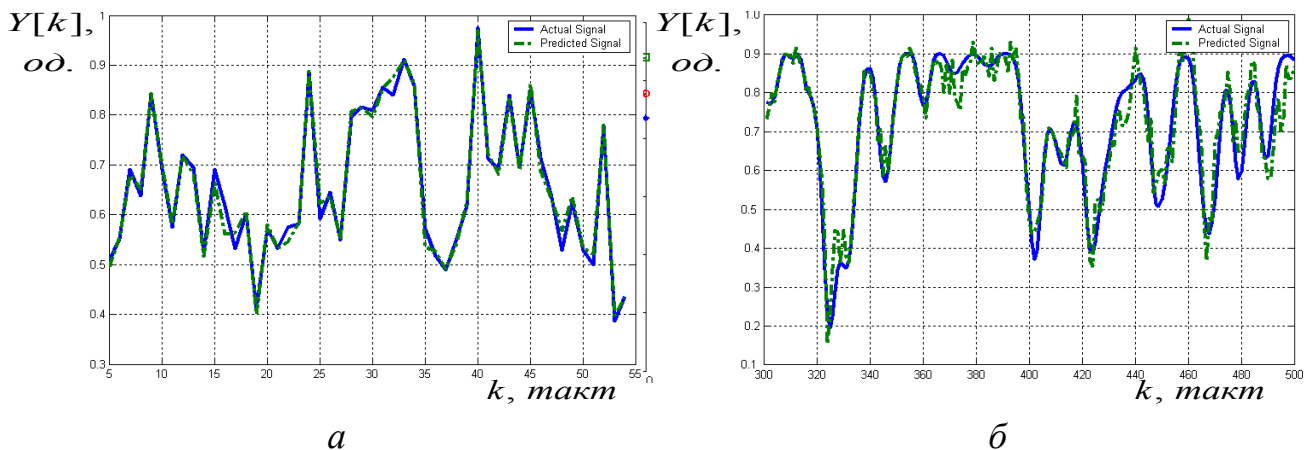


Рис. 6. Результати ідентифікації процесів ККД (а) і МСЗ (б)

Загалом час пошуку оптимальних рішень складає 5-8 хвилин, а час обчислень за отриманими моделями – менше 1 мс на інтервал прогнозу, що не вносить часових обмежень на їх застосування в системах керування процесами крупного дроблення та самодрібнювання руд.

Таким чином, ідентифікація процесів крупного дроблення та самодрібнювання руд здійснюється шляхом визначення режиму роботи керованого процесу та розмірності його стану, на основі чого за допомогою композиції методів глобальної і локальної оптимізації визначається структура та параметри моделі процесу, що дозволяє, на відміну від відомого, отримати інтелектуальні прогнозуючі моделі підвищеної точності зі здатністю адаптуватися під змінювані властивості керованих процесів у реальному масштабі часу.

П'ятий розділ присвячений розробці адаптивних систем оптимального керування процесами крупного дроблення та самодрібнювання руд з інтелектуальним прогнозуванням.

Запропоновано САР із самоналагоджувальним регулятором і прогнозуючою моделлю (СНС+АФА), структура якої наведена на рис. 7.а. Згідно класифікації це безпошукова система непрямого адаптивного керування з еталонною моделлю, що навчається.

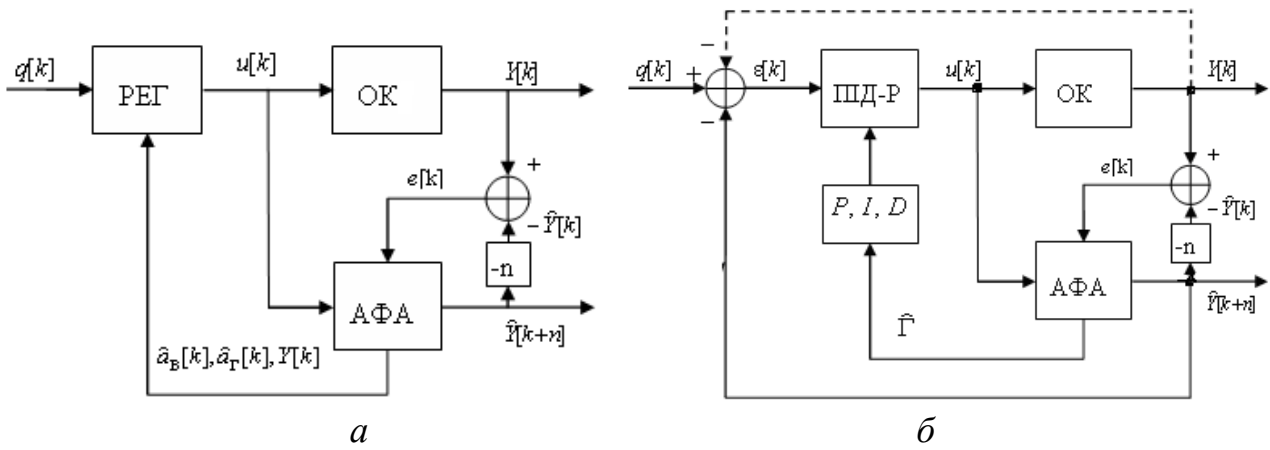


Рис. 7. САР із самоналагоджувальним (а) та ПІД (б) регуляторами і прогнозуючою моделлю

Об'єкт і регулятор (РЕГ) утворюють основний контур системи, а АФА – інформаційний. Синтез на поточному такті полягає в адаптації параметрів моделі, обчисленні прогнозу виходу ОК на n тактів:

$$\hat{Y}[k+n] = \Phi \{Y[k], u[k], \xi[k], a[k], k\}, \quad (18)$$

а також визначенні за завданням $q[k+1]$ керування $u[k]$, що відповідає мінімуму критерію похибки регулювання:

$$J_R = E\{(\varepsilon[k])^2\} = E\{(q[k+1] - \hat{Y}[k+n])^2\} \rightarrow \min. \quad (19)$$

При моделі ОК з лінійно вхідним керуванням:

$$\hat{Y}[k+n] = B \{Y[k], \vec{d}_B[k]\} + \Gamma \{Y[k], \vec{d}_\Gamma[k]\} \cdot u[k], \quad (20)$$

де B – функція частини ОК, інваріантної до керування (функція автономного руху ОК); Γ – функція чутливості керування; $\vec{d}_B[k], \vec{d}_\Gamma[k]$ – вектори настроюваних параметрів узагальнених функцій B і Γ відповідно, рівняння регулятора має вид:

$$u[k] = \frac{q[k+1] - B \{Y[k], \vec{d}_B[k]\}}{\Gamma \{Y[k], \vec{d}_\Gamma[k]\}}. \quad (21)$$

Запропоновано також адаптивну САР з ПІД-регулятором і прогнозуючою моделлю (PID+AFA), що наведена на рис. 7.б. Визначення керування

$$u[k] = u[k-1] + P[k] \cdot (\varepsilon[k] - \varepsilon[k-1]) + I[k] \cdot \varepsilon[k] + D[k] \cdot (\varepsilon[k] - 2\varepsilon[k-1] + \varepsilon[k-2]) \quad (22)$$

полягає в знаходженні значень параметрів P, I, D , які мінімізують похибку регулювання (18)-(19). При задоволенні вимог по використанню градієнтних методів для ОК з лінійно вхідним керуванням параметри визначаються як:

$$P[k] = P[k-1] + \mu_P \cdot \varepsilon[k] \cdot \Gamma \{Y[k], \vec{d}_\Gamma[k]\} \cdot (\varepsilon[k] - \varepsilon[k-1]); \quad (23)$$

$$I[k] = I[k-1] + \mu_I \cdot \varepsilon[k] \cdot \Gamma \{Y[k], \vec{d}_\Gamma[k]\} \cdot \varepsilon[k]; \quad (24)$$

$$D[k] = D[k-1] + \mu_D \cdot \varepsilon[k] \cdot \Gamma \{Y[k], \vec{d}_\Gamma[k]\} \cdot (\varepsilon[k] - 2\varepsilon[k-1] + \varepsilon[k-2]), \quad (25)$$

де μ_P, μ_I, μ_D – коефіцієнти настроювання ПІД-каналів.

Оцінка ефективності запропонованих адаптивних САР виконувалась для типових ОК процесів дроблення і здрібнювання при стрибкоподібній зміні завдання Set-point (рис. 8.а) з нестационарністю параметрів ОК у 20 % та при стрибкоподібній зміні параметрів ОК (рис. 8.б).

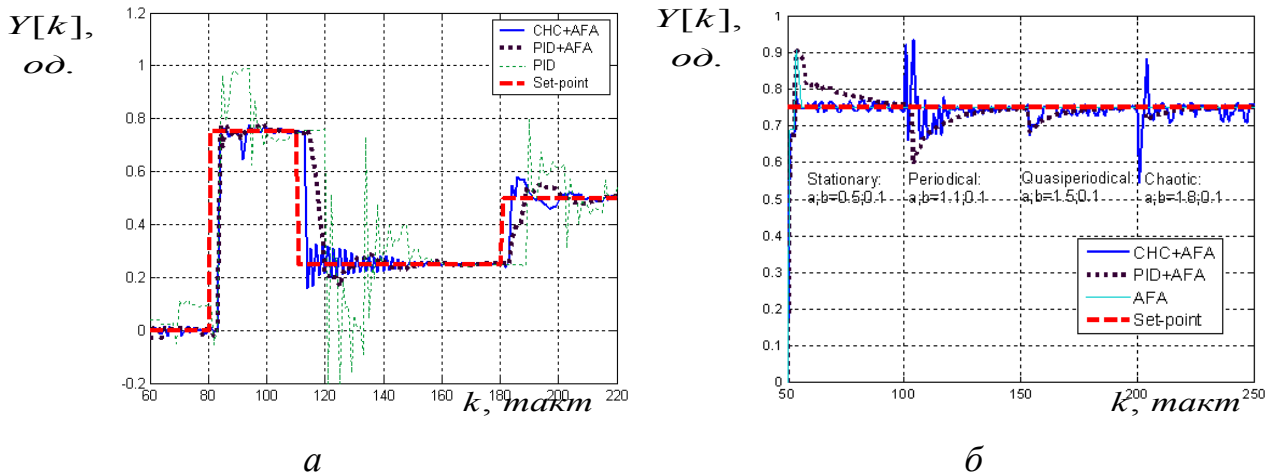


Рис. 8. Результати регулювання ОК: ПТ2 (а) та відображення Ено при біфуркації режимів (б)

Визначено, що для нелінійних ОК із запізнюванням САР з інтелектуальним прогнозуванням мають похибки регулювання на рівні 0,019-0,046, що в 3-5 разів менше похибок при використанні САР без прогнозування (PID). Час синтезу керування на один такт прогнозу складає: для СНС+АФА – 0,7-0,9 с і для PID+АФА – 1,6-2,2 с, що не вносить часових обмежень на застосування цих систем в контурах керування процесами дроблення і здрібнювання.

Запропоновано для керування процесами дроблення і здрібнювання використовувати адаптивні системи оптимального керування (АСОК), структура яких визначається принципом поділу. У них керований процес в умовах збурень \mathcal{W} спостерігається за допомогою первинних датчиків з похибками вимірів ξ . Сигнали спостереження надходять у підсистему оцінювання й ідентифікації, на виході якої формуються оцінки стану \hat{Z} , параметрів \hat{a} й структури $\hat{\Phi}$ моделі керованого процесу. Підсистема оптимального керування на основі цієї моделі, оцінки стану і функціоналу J , формує оптимальне керування u_{opt} , яке впливає на керований процес.

Розроблено АСОК процесом ККД за ФУР в КД, структура алгоритму роботи якої наведена на рис. 9.

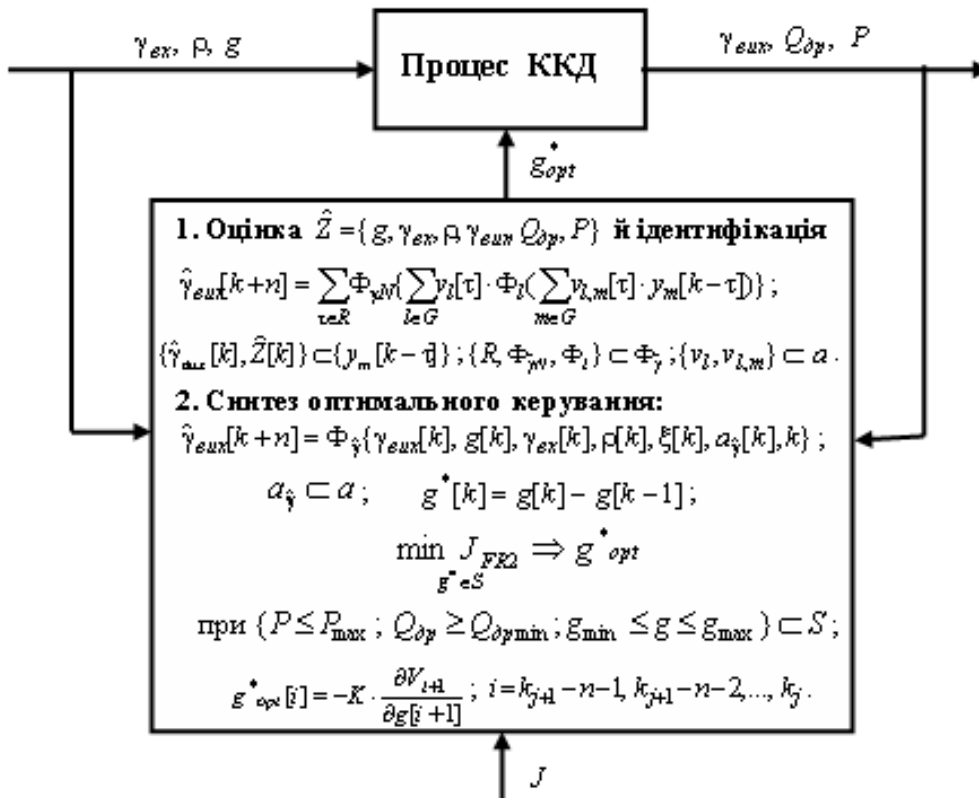


Рис. 9. Структура алгоритму роботи АСОК процесом ККД за ФУР

Прогнозуюча модель процесу має вид:

$$\hat{\gamma}_{eux}[k+n] = \Phi_{\hat{\gamma}} \{ \gamma_{eux}[k], g[k], \gamma_{ex}[k], \rho[k], \xi[k], a_{\hat{\gamma}}[k], k \}; \quad a_{\hat{\gamma}} \subset a. \quad (26)$$

Технологічному критерію керування (1) при оцінюванні та ідентифікації відповідає функція витрат

$$Q_{зГО} = \|\hat{\gamma}_{eux}[k] - \gamma_{eux}[k]\|, \quad (27)$$

а при синтезі оптимального керування –

$$Q_{зК} = \|\hat{\gamma}_{eux}[k+n] - \gamma_{eux}^{зад}[k+n]\|. \quad (28)$$

При керуванні швидкістю (зміною на поточний такт керування ширини розвантажувальної щілини дробарки $g^*[k] = g[k] - g[k-1]$) модель процесу приймає вид:

$$\vec{g}[k] = \begin{bmatrix} g_1[k] \\ g_2[k] \\ \vdots \\ g_n[k] \end{bmatrix}; \quad (29)$$

$$\gamma[k+n] = \phi + \psi \cdot g^*[k], \quad (30)$$

де $\gamma[k+n] = \{\hat{\gamma}_{вих}[k+n], g[k]\}^T$; $\phi = \{\Phi_{\gamma}, g[k-1]\}^T$; $\psi = \{0, I\}^T$.

Тоді за рівнянням Беллмана

$$V_i(\vec{\gamma}[i+n]) = E\{Q_3(\vec{\gamma}[k], \gamma_{вих}^{зад}[k]) + V_{i+1}\{\phi + \psi \cdot g^*_{opt}[i]\} - \frac{\partial V_{i+1}}{\partial g[i+1]} \cdot g^*_{opt}[i]\} \quad (31)$$

при ФУР з квадратичними функціями витрат на керування

$$J_{FUR} = E\{V_3(k_{j+1})\} = Q_3(k_{j+1}, \gamma_{вих}^{зад}(k_{j+1})) + K \left\{ \int_{k_j}^{k_{j+1}-1} (g^*[k])^2 dk + \int_{k_j}^{k_{j+1}} (g^*_{opt}[k])^2 dk \right\} \quad (32)$$

оптимальна зміна ширини розвантажувальної щілини дробарки знаходиться як похідна цільової функції по керуючій координаті:

$$g^*_{opt}[i] = -K \cdot \frac{\partial V_{i+1}}{\partial g[i+1]}, \quad (33)$$

де $i = k_{j+1} - n - 1, k_{j+1} - n - 2, \dots, k_j$ і K – позитивно визначений коефіцієнт.

Оцінка ефективності АСОК процесом ККД за ФУР виконувалась з використанням генераторів збурювань, визначених за експериментальними послідовностями, а процес моделювався нелінійним кінцево-різницевою рівнянням. Похибки виміру приймалися на рівні 10%, а нестационарність параметрів ОК – 20%.

Результати моделювання роботи процесу ККД в керованому (ККДwC) і некерованому (ККДnC) режимах наведені на рис. 10. Тут також наведені: зміна значень заданого гранулометричного складу $\gamma_{вих}^{зад}$ (Set-point), оптимальні значення ширини розвантажувальної щілини дробарки (Control) та результати поточної ідентифікації процесу (Model).

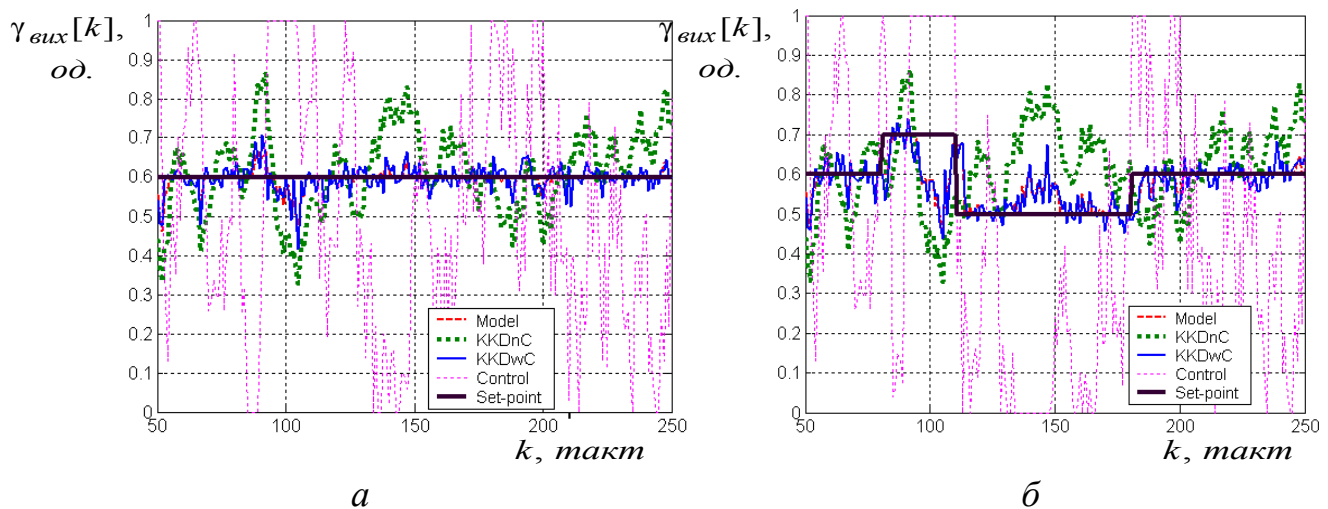


Рис. 10. Результати оптимального керування процесом ККД з постійним (а) та змінним (б) завданням

Визначено, що для процесу ККД пропонується система забезпечує у порівнянні з відомими системами зниження в 2 рази похибки керування та підвищення на 3,3 % продуктивності наступного у технологічній лінії процесу самоздрібнювання за рахунок стабілізації вмісту класу +100 мм у його вхідній руді.

Для складних багатозв'язних ОК запропоновано використовувати ієрархічну побудову АСОК, що дозволяє шляхом розкладання загальної задачі керування на підзадачі спростити рішення й забезпечити еволюцію АСК ТП з уже наявними системами регулювання. Ієрархічна система складається з підсистеми оцінювання й ідентифікації та підсистеми оптимального керування, які утворюють перший (верхній) рівень керування, та підсистеми локального регулювання – другий (нижній) рівень керування. Сигнал, формований підсистемою оптимального керування є завданням на керування $u_{opt}^{зад}$ для підсистеми локального регулювання, яка впливає v_{opt} на керований процес.

Розроблено ієрархічну АСОК процесом МСЗ за синергетичним принципом в млинах мокрого самоздрібнювання (ММС) в комплексі зі спіральним класифікатором (СК), структура алгоритму роботи якої наведена на рис. 11.

Для реалізації технологічної цілі керування (2) наразі використовуються три САР: стабілізації густини зливу класифікатора ρ_k , стабілізації відношення тверде/рідке в млині Δ_m та стабілізації ефективного значення внутрішньомлинового заповнення θ . Регулюючими впливами при цьому є подача руди Q_p та витрати води в класифікатор B_k і млин B_m .

Цілі керування (2) відповідає бажаний режим роботи:

$$\Psi [k + 1] = E\{Q_{\max} - \hat{Q}_{\text{гом}}[k + n]\} = 0, \quad (34)$$

де Q_{\max} – максимальна продуктивність процесу МСЗ по готовому класу.

Робота ієрархічної АСОК за синергетичним принципом (рис. 11) полягає в:

- оцінці поточного стану ОК на початку чергового інтервалу керування \hat{Z} ;
- ідентифікації моделі процесу у вигляді НМ $\hat{Q}_{\text{гом}}[k + n]$;
- прогнозуванні вільного руху ОК на інтервалі оптимізації керування;
- обчисленні цільової макрозмінної $\Psi [k + 1]$ для поточного стану ОК і формуванні сигналу оптимального керування $u^*[k]$;
- реалізації на ОК регулюючих впливів у відповідності із оптимальним керуванням і прогнозуючими моделями каналів регулювання.

Для оцінки ефективності ієрархічної АСОК моделювалось адаптивне керування за синергетичним принципом млином ММС та процесом МСЗ. Нестационарність параметрів ОК складала 20%, а похибки виміру – 10%.

За результатами моделювання роботи млина ММС визначено, що його продуктивність по готовому класу (в умовах варіації вмісту класу +100 мм у вхідній руді) за синергетичним керуванням підвищується в 1,25 разів, а її середньоквадратичне відхилення знижується в 5 разів.

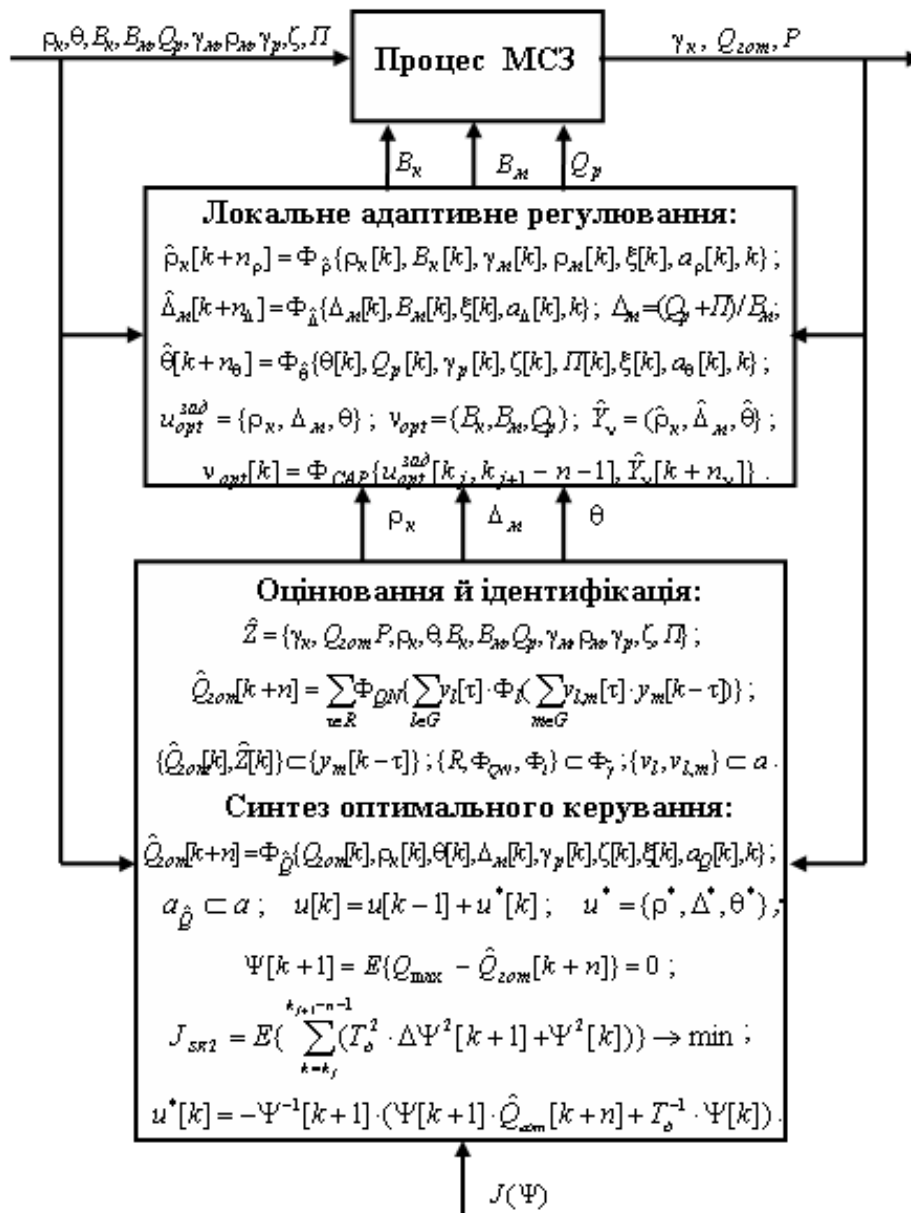


Рис. 11. Структура алгоритму роботи ієрархічної АСОК процесом МСЗ за синергетичним принципом

Визначено, що керування процесом МСЗ (рис. 12) за синергетичним принципом (МСЗwС) дозволяє у порівнянні з некерованим режимом (МСЗnС) підвищити в 1,45 разів його продуктивність по готовому класу і знизити в 2,1 рази її середньо-квадратичне відхилення, що забезпечує підвищення продуктивності млинів першої стадії самоздрібнювання на 3-15 % (при коефіцієнтах варіації якості руди від 0,1 до 0,8) зі зниженням питомих витрат електроенергії у порівнянні з існуючими системами керування.

На рис. 12.а для прикладу додатково наведені отримані оптимальні значення відношення тверде/рідке в млині Δ_M (ContrDel) та їх відпрацювання (Set-point Del) підсистемою локального регулювання (рис. 12.б) для різних моделей ОК: ВЕХР, аперіодичної ланки першого порядку із запізнюванням (PIT) та ПТ2 (PIT2).

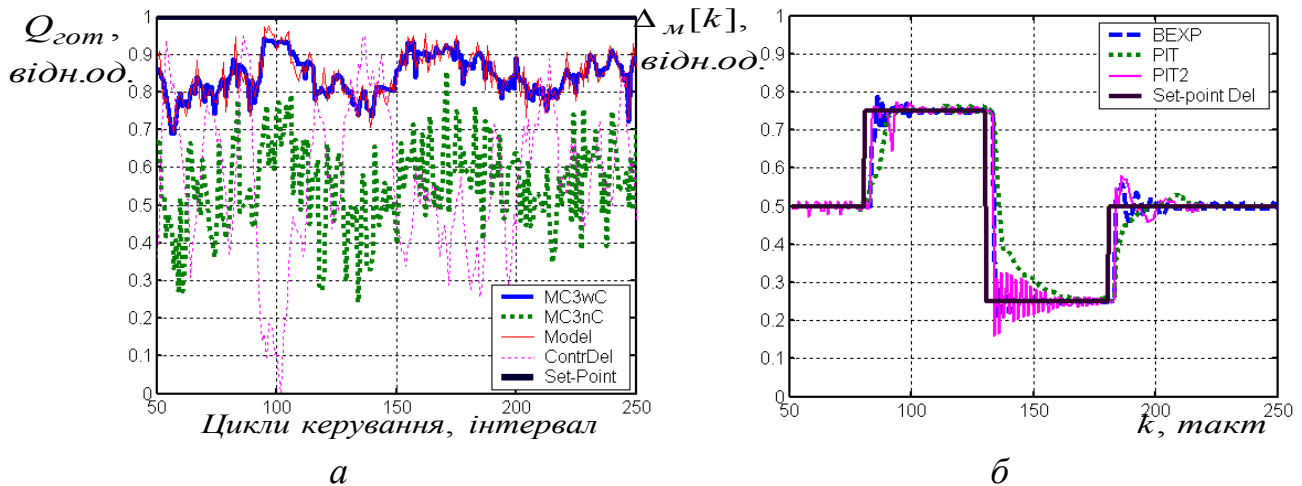


Рис. 12. Результати керування процесом МСЗ на верхньому (а) і нижньому (б) рівнях

Таким чином, оптимальне керування багатозв'язним процесом самоздрібнювання руди формується шляхом поточної оцінки стану керованого процесу, його структурно-параметричної ідентифікації, прогнозування за інтелектуальною моделлю вільного руху процесу та вироблення сигналів оптимального керування, які відпрацьовуються локальними адаптивними системами автоматичного регулювання з інтелектуальним прогнозуванням, що забезпечує, на відміну від відомого, підвищення якості керування в умовах зміни режимів роботи і параметрів керованого процесу та збуреного середовища.

В шостому розділі розглянуті питання технічної реалізації та впровадження наукових результатів дисертаційної роботи.

Запропоновано систему керування процесом ККД (рис. 13), за яким вхідна руда після дроблення в КД через бункер 1 потрапляє на конвеєр 2. Система містить пристрій 3 контролю ширини розвантажувальної щілини дробарки, перетворювач 4 споживаної активної потужності двигуна дробарки, пристрій 5 контролю крупності й міцності вхідної руди, конвеєрні ваги 6, пристрій 7 контролю гранулометричного складу дробленої руди (гранулометр), а також виконавчий механізм 8 регулювання ширини розвантажувальної щілини 9 дробарки. Ці пристрої пов'язані з керуючою системою за допомогою інформаційної шини 10.

У відповідності з алгоритмом роботи керуюча система виконує оцінку поточного стану процесу ККД до моменту початку чергового інтервалу керування. Для цього здійснюються опитування й усереднення за попередній інтервал показання пристрою 3 (g), перетворювача 4 (P), пристрою 5 (d_{ex} , ρ), вагів 6 (Q_{op}), а також гранулометра 7 (γ_{+100}).

Далі виконується ідентифікація прогнозуючої моделі процесу ККД. За оцінками і прогнозом процесу ККД визначається оптимальне керування (зміна

ширини розвантажувальної щілини дробарки) ξ_{opt}^* на наступний інтервал, яке відпрацьовується гідравлічною системою 8 регулювання щілини

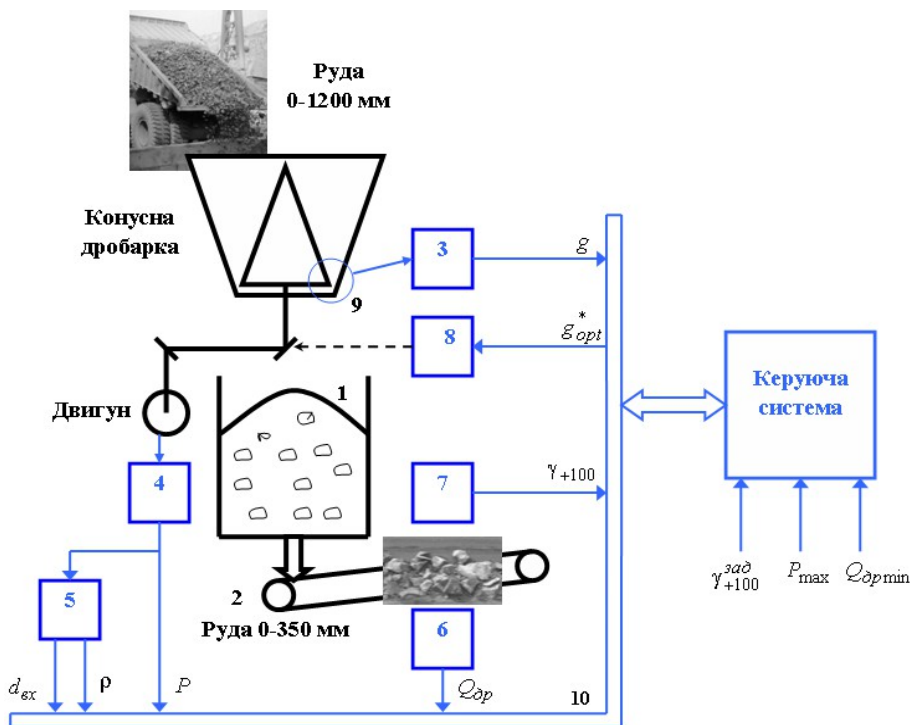


Рис. 13. Схема системи керування процесом ККД

внутрішньомлинового заповнення 10, перетворювач потужності 11, витратомір води 12 у ванну СК, густиномір 13 зливу СК і пристрій контролю продуктивності по готовому класу 14. Регулювання режимів роботи процесу МСЗ здійснюється за допомогою живильника 2 подачі руди (Q_p), вентиля 4 подачі води в БМ (B_m) і вентиля 5 подачі води у ванну СК (B_k).

Відповідно до алгоритму роботи керуюча система виконує оцінку поточного стану процесу МСЗ до початку чергового інтервалу керування. Для цього здійснюється опитування й усереднення за попередній інтервал показань вагів 6 (Q_p), гранулометра 7 (γ_{+100}), витратоміра 8 (B_m), пристроїв 9 (Π) і 10 (θ), перетворювача 11 (P), витратоміра 12 (B_k), густиноміра 13 (ρ_k) і пристрою 14 (Q_{gom}). Інформація про фізико-механічні і речовинні властивості руди ζ надходить від рудовипробувальної станції (РВС).

Далі виконується ідентифікація прогнозуючих моделей верхнього й нижнього рівнів керуючої системи процесу МСЗ. За виконаними оцінками й прогнозами визначаються оптимальні значення керуючих впливів: щільності зливу класифікатора ρ_k^{opt} , співвідношення тверде/рідке в БМ Δ_M^{opt} та внутрішньомлинового заповнення θ^{opt} .

Ці оптимальні значення є завданнями для підсистеми локального регулювання, яка на основі адаптованих моделей формує регулюючі впливи $Q_p^{зад}$, $B_m^{зад}$, $B_k^{зад}$, що відпрацьовуються відповідно виконавчим механізмом 15,

Запропоновано систему керування процесом МСЗ (рис. 14), за яким руда із бункера 1 за допомогою конвеєра 3 надходить у БМ. Система містить конвеєрні ваги 6, гранулометр 7, витратомір води 8 на вході БМ, пристрої контролю піскового навантаження 9 і

пов'язаним з живильником 2; виконавчим механізмом 16, пов'язаним з вентилем 4 і виконавчим механізмом 17, пов'язаним з вентилем 5.

Технічна реалізація способу контролю крупності і міцності вхідної руди КД здійснюється на основі цифрового сигнального процесору TMS320C55x, при

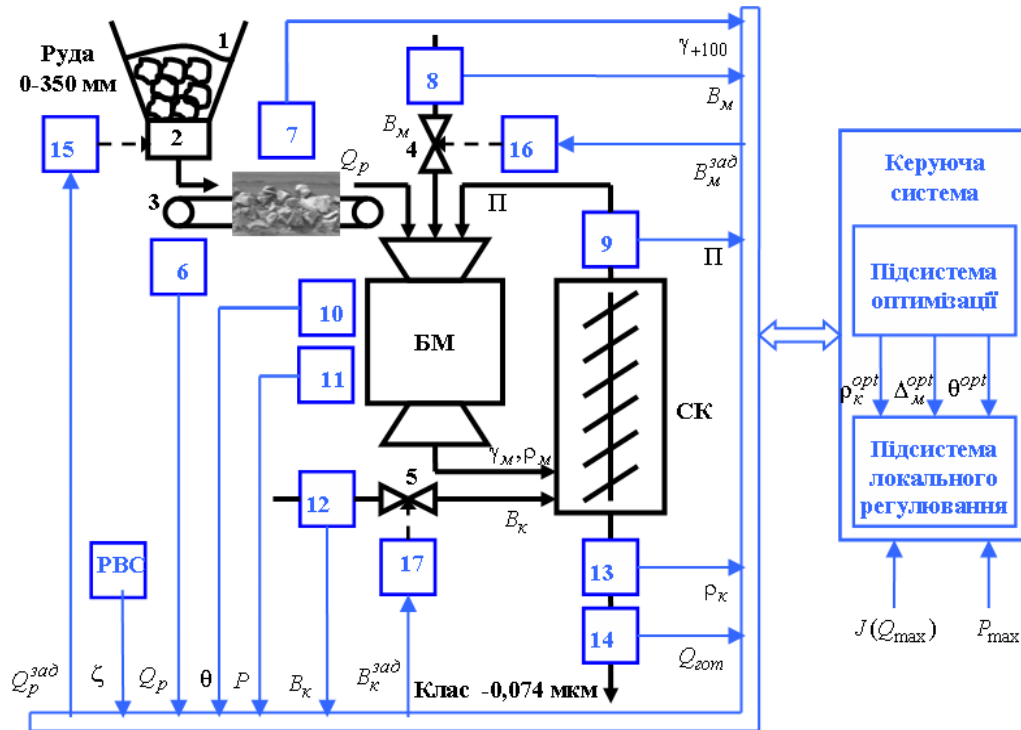


Рис. 14. Схема системи керування процесом МСЗ

цьому цифрові фільтри мають секційну структуру побудови, що забезпечує їх стійкість та інструментальну похибку на рівні 1-2 % при обмеженій розрядності процесора.

Технічна реалізація способу контролю гранулометричного складу руди в потоці здійснюється або на базі системи відеомоніторингу (за допомогою апаратури Advantech VBOX із розміром кадру зображення 320x240, інструментальною похибкою 3 % та часом обробки не більше 15 с), або у вигляді автономної системи технічного зору (за допомогою цифрового сигнального процесору TMS320C55x та матриці CMOS LM9648 із розміром кадру зображення 1312x1032, інструментальною похибкою 0,2 % та часом обробки не більше 1 с).

Результати моделювання та випробувань підтвердили ефективність технічної реалізації запропонованих способів контролю крупності і міцності вхідної руди КД та контролю гранулометричного складу руди в потоці.

Розроблені способи контролю, методики ідентифікації, алгоритми керування та комп'ютерні програми використані при виконанні держбюджетних науково-дослідних робіт, розробці комплексу програмних засобів проектування і проектів реконструкції розробки ВАТ ППКІ «Металургавтоматика» та ДАТ КБ «Дніпровське», а також при розробці

науково-методичного забезпечення підготовки бакалаврів та магістрів спеціальності 8(7).092401.

Застосування запропонованих методик, способів та систем дозволяє підвищити продуктивність процесів переробки руди (більше, ніж на 3 %) при зниженні питомого енергоспоживання шляхом підвищення точності контролю та якості керування процесами крупного дроблення та самоздрібнювання руд. Запропонований комплекс програмних засобів моделювання забезпечує скорочення термінів проектування розроблюваних АСК ТП. Розрахунковий річний економічний ефект складає 788 тис. грн. із окупністю капітальних витрат 0,61 року.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота є завершеним науковим дослідженням, в якій вирішена актуальна наукова проблема підвищення ефективності автоматизованого керування процесами крупного дроблення і самоздрібнювання руд в умовах зміни їх параметрів і динамічних режимів роботи та збуреного середовища шляхом синтезу і реалізації оптимального керування в процесі функціонування автоматизованих систем керування на основі ідентифікації та прогнозування стану керованих процесів з контролем основних збурень.

Встановлено, що:

1. Оптимальне керування процесами крупного дроблення і самоздрібнювання руд формується в процесі функціонування системи керування за принципом мінімуму узагальненої роботи та за синергетичним принципом із поточним оцінюванням стану керованого процесу і його майбутнього стану за прогнозуючими моделями з контролем основних збурень, що забезпечує, на відміну від відомого, підвищення ефективності процесів шляхом формування керування, інваріантного до збуреного середовища та нелінійності процесів.

2. Ідентифікація процесів крупного дроблення та самоздрібнювання руд здійснюється шляхом визначення режиму роботи керованого процесу та розмірності його стану, на основі чого за допомогою композиції методів глобальної і локальної оптимізації визначається структура та параметри моделі процесу, що дозволяє, на відміну від відомого, отримати інтелектуальні прогнозуючі моделі підвищеної точності зі здатністю адаптуватися під змінювані властивості керованих процесів.

3. Оптимальне керування багатозв'язним процесом самоздрібнювання руди формується шляхом поточної оцінки стану керованого процесу, його структурно-параметричної ідентифікації, прогнозування за інтелектуальною моделлю вільного руху процесу та вироблення сигналів оптимального керування, які відпрацьовуються локальними адаптивними системами автоматичного регулювання з інтелектуальним прогнозуванням, що забезпечує, на відміну від відомого, підвищення якості керування в умовах зміни режимів роботи і параметрів керованого процесу та збуреного середовища.

Основні наукові та практичні результати полягають у наступному:

1. Встановлено, що автоматизовані системи керування нелінійними процесами крупного дроблення та самоздрібнювання руд в умовах варіації їх динамічних режимів та збурень мають низьку ефективність. Підвищення якості керування цими процесами може бути досягнуто шляхом створення систем оптимального керування, які використовують прогнозуючі моделі керованих процесів з поточним контролем основних збурень.

2. Вперше для керування процесами крупного дроблення та самоздрібнювання руд обґрунтовано використання принципу мінімуму узагальненої роботи та синергетичного принципу і за ними запропоновані розв'язання задач синтезу оптимального керування цими процесами в ході функціонування систем керування на основі прогнозування стану керованого процесу та контролю основних збурень. Це дозволяє спростити розв'язання задач синтезу для нелінійних керованих процесів і компенсувати вплив основних збурень і, таким чином, підвищити ефективність керування цими процесами.

3. За допомогою аналітичних досліджень визначені залежності точності реалізації оптимального керування від похибок виконання етапів алгоритму його синтезу. Встановлено, що для забезпечення близькості реального керування до теоретично досяжного, перш за все, необхідно підвищувати точність оцінювання поточного стану керованого процесу та прогнозування його вільного руху.

4. На основі дослідження та систематизації похибок дискретизації і відновлення сигналів у відповідності із теоремами Котельникова-Шеннона розроблено методику вибору параметрів дискретизації й алгоритмів відновлення сигналів, що забезпечує їх припустиму похибку апроксимації при розв'язанні задач спостереження й ідентифікації неперервних технологічних процесів.

5. Розроблено спосіб контролю крупності та міцності вхідної руди конусної дробарки, який реалізує демодуляцію сигналів за допомогою комплексного зсуву його спектру, що дозволяє підвищити точність контролю за рахунок покращення вибірковості (на $-1,34$ дБ на порядок фільтра) та зниження інструментальної похибки до 1-2 %.

6. Розроблено оптичний спосіб автоматичного контролю гранулометричного складу кускової руди в потоці, який забезпечує підвищення точності контролю за рахунок підвищення його завадостійкості шляхом реалізації відповідної фільтрації на етапі формування та відновлення зображень, а також логічної фільтрації бінарних зображень (інструментальна похибка менше 1 %).

7. Вперше запропоновано адаптивний фільтр-апроксиматор з вейвлет перетворенням, що заснований на визначенні коефіцієнтів дискретного вейвлет перетворення за допомогою нейронних мереж та їх граничного обмеження для придушення шуму. Він забезпечує підвищення точності прогнозування та ідентифікації сигналів і ОК процесів крупного дроблення та самоздрібнювання

руд (глибина прогнозу складає 6-10 тактів при припустимій похибці 10 % і відношенні сигнал-шум 20 дБ) та зниження часу на його навчання.

8. Вперше розроблено метод ідентифікації режимів роботи нелінійних процесів крупного дроблення та самоздрібнювання руд за часовими реалізаціями, що полягає у визначенні режиму функціонування та розмірності керованих процесів, а також реконструкції моделі його режиму. Це дозволяє ідентифікувати режими функціонування керованих процесів (від рівноваги до хаосу) з позицій нелінійної динаміки без суттєвих витрат на експериментальні дослідження у порівнянні з традиційними методами. Визначено, що похибка прогнозування часових реалізацій складає менше 10 % при глибині прогнозу до 10 тактів (менше 3 % для їх інтервалів точної передбачуваності).

9. Розроблено метод структурно-параметричної ідентифікації нелінійних процесів крупного дроблення та самоздрібнювання руд, що полягає в ідентифікації структури моделі ОК за допомогою композиції методів глобальної і локальної оптимізації та селекції моделей за критеріями структурної оптимізації, а також параметричної ідентифікації моделі оптимальної структури за критерієм регулярності на всій вибірці даних. Це дозволяє ідентифікувати ОК у класі прогнозуючих чітких і нечітких нейромережних моделей, які здатні адаптуватися під змінювані режими їх функціонування і мають підвищену точність (менше 3,7 %). Час пошуку оптимальних рішень при цьому складає 5-8 хвилин, а час обчислень за отриманими моделями – менше 1 мс на інтервал прогнозу, що не вносить часових обмежень на їх застосування в системах керування цими процесами.

10. Розроблено САР, що реалізують безпошукове непряме адаптивне регулювання з інтелектуальною прогнозуючою моделлю, яка навчається. Визначено, що для нелінійних керованих процесів із запізнюванням пропонувані САР мають похибки регулювання 1,9-4,6 % (при нестаціонарності параметрів ОК 20 %), що в 3-5 разів менше похибок при використанні САР без інтелектуального прогнозування. При цьому час синтезу керування складає 0,7-2,2 с, що не вносить часових обмежень на застосування цих САР в контурах регулювання процесами крупного дроблення та самоздрібнювання руд.

11. Розроблено адаптивну систему оптимального керування процесом крупного дроблення, що реалізовує керування за принципом мінімуму узагальненої роботи на ковзному інтервалі із використанням інтелектуального прогнозування стану процесу і забезпечує зниження в 2 рази похибки керування та підвищення на 3,3 % продуктивності наступного (у технологічній лінії) процесу самоздрібнювання у порівнянні з відомими системами.

12. Розроблено ієрархічну адаптивну систему оптимального керування, яка забезпечує ефективне керування складними багатозв'язними ОК зі збуреним середовищем функціонування шляхом синтезу керування за синергетичним принципом на ковзному інтервалі із використанням інтелектуальних прогнозуючих моделей ОК. Формоване оптимальне керування являє собою завдання, що відпрацьовується на ОК локальними системами регулюванням.

Визначено, що ієрархічне керування процесом мокрого самоздрібнювання дозволяє знизити в $2,1$ рази середньоквадратичне відхилення продуктивності по готовому класу, а це дозволяє підвищити продуктивність млинів першої стадії самоздрібнювання на 3-15 % зі зниженням питомих витрат електроенергії у порівнянні з існуючими системами керування.

13. Запропоновані структурні схеми автоматизованих систем керування процесами крупного дроблення та самоздрібнювання руд, а також технічна реалізація на базі цифрових сигнальних процесорів способів контролю крупності і міцності вхідної руди конусної дробарки та гранулометричного складу руди у потоці.

14. Розроблені способи контролю, методики ідентифікації, алгоритми керування та комп'ютерні програми використані при виконанні держбюджетних науково-дослідних робіт, розробці комплексу програмних засобів проектування і проектів реконструкції розробки ВАТ ППКІ «Металургавтоматика» та ДАТ КБ «Дніпровське», а також при розробці науково-методичного забезпечення підготовки бакалаврів та магістрів спеціальності 8(7).092401.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Корнієнко В.І. Ієрархічне адаптивне керування процесами рудопідготовки за синергетичним принципом з інтелектуальним прогнозуванням / В.І. Корнієнко // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2009. – № 11. – С. 61-66.

2. Корнієнко В.І. Адаптивне керування процесами рудопідготовки за мінімумом узагальненої роботи з інтелектуальним прогнозуванням / В.І. Корнієнко // Гірничая електромеханіка та автоматика. – 2009. – Вип. 83. – С. 79-88. – ISSN 0201-7814.

3. Корнієнко В.І. Методика ідентифікації нелінійних процесів рудопідготовки / В.І. Корнієнко, О.В. Герасіна // Гірничая електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб. – 2009. – Вип. 82. – С. 77-85. – ISSN 0201-7814.

4. Бубнова Т.О. Адаптивне вейвлет-нейронне прогнозування нелінійних процесів рудопідготовки / Т.О. Бубнова, В.І. Корнієнко // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2009. – № 9. – С. 80-83.

5. Корнієнко В.І. Обробка зображень при автоматичному контролі гранулометричного складу кускового матеріалу / В.І. Корнієнко, Кручинін О.В. // Всеукр. межвед. науч.-техн. сборник ХНУРЭ. – Радиотехника. – Вып. 156. – 2009. – С. 141-149. – ISSN 0485-8972.

6. Корнієнко В.І. Підвищення точності спектральних пристроїв контролю технологічних процесів рудопідготовки / В.І. Корнієнко, Гусев О.Ю. // Збірник наукових праць НАУ. – Проблеми інформатизації та управління. – Вип. 1 (25). – 2009. – С. 75-81. – ISSN 2073-4751.

7. Корнієнко В.І. Ідентифікація нелінійних процесів по часових реалізаціях / В.І. Корнієнко, Скриль Д.Ю. // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2009. – № 3. – С. 85-89.

8. Кузнецов Г.В. Композиційна структурно-параметрична ідентифікація нелінійних динамічних об'єктів керування / Г.В. Кузнецов, В.І. Корнієнко, О.В. Герасіна // Наукові вісті НТУУ КПІ. – 2009. – № 5. – С. 69-75. – ISSN 1810-0546.

9. Корнієнко В.І. Нейронне вейвлет прогнозування та ідентифікація складних сигналів та об'єктів керування / В.І. Корнієнко, Кузнецов Г.В., Гарнак І.В. // Міжнар. наук.-техн. журнал «Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія». – ВінНТУ. – 2009. – № 2 (15). – С. 38-44. – ISSN 1999-9941.

10. Корнієнко В.І. Дискретизація сигналів у задачах спостереження й ідентифікації безперервних технологічних процесів / В.І. Корнієнко, Кузнецов Г.В. // Міжнар. наук.-техн. журнал «Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія», ВінНТУ. – 2008. – № 3 (13). – С. 18-25. – ISSN 1999-9941.

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

12. Корнієнко В.І. Дослідження точності реалізації оптимального керування безперервними технологічними процесами / В.І. Корнієнко // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2008. – № 5. – С. 40-46.

13. Корнієнко В.І. Обґрунтування принципів оптимального керування нелінійними процесами рудопідготовки з інтелектуальним прогнозуванням / В.І. Корнієнко // Збірник наукових праць Національного гірничого університету. – 2008. – № 31. – С. 87-93.

14. Корнієнко В.І. Синергетичний підхід до синтезу оптимального керування рудопідготовкою з інтелектуальним прогнозуванням / В.І. Корнієнко // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2008. – № 4. – С. 38-42.

15. Корнієнко В.І. Проблеми синтезу і реалізації оптимального керування технологічними процесами рудопідготовки / В.І. Корнієнко // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2008. – № 1. – С. 73-76.

16. Кузнецов Г.В. Интеллектуальные информационные технологии в АСУ гірничорудним підприємством / Г.В. Кузнецов, В.І. Корнієнко, О.В. Корнієнко // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2007. – № 12. – С. 83-87.

17. Видникевич Т.А. Интеллектуальная фильтрация и адаптивное регулирование процессов рудоподготовки / Т.А. Видникевич, В.И. Корниенко // Гірничя електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб. – 2007. – Вип. 79. – С. 52-58. – ISSN 0201-7814.

18. Корнієнко В.І. Інтелектуальні прогноуючі фільтри технологічних параметрів гірничорудного виробництва / В.І. Корнієнко // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2006. – № 9. – С. 81-83.

19. Корнієнко В.І. Принципи побудови оптимальних систем автоматичного керування гірничорудним виробництвом з інтелектуальним прогнозуванням / В.І. Корнієнко // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2006. – № 10. – С. 85-89.

20. Корнієнко В.І. Логічні алгоритми обробки бінарних зображень в оптичному гранулометрі дроблених матеріалів / В.І. Корнієнко // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2006. – № 11. – С. 89-90.

21. Корнієнко В.І. Адаптація в інтелектуальних прогнозуючих системах оптимального керування гірничорудним виробництвом / В.І. Корнієнко // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2006. – № 12. – С. 70-74.

22. Корниенко В.И. Фильтрация изображений в оптическом гранулометре дробленых материалов / В.И. Корниенко, В.В. Глухов // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 1992. – № 2. – С. – 66-67. – ISSN 0543-5749.

23. Корниенко В.И. Имитационная модель процесса седиментации минеральных частиц в пульпе / В.И. Корниенко, В.В. Глухов // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 1992. – № 1. – С. – 68-70. – ISSN 0543-5749.

24. Корниенко В.И. Проблемы разработки математического обеспечения для оптического гранулометра дробленых материалов / В.И. Корниенко, В.В. Глухов // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 1990. – № 2. – С. 68-71. – ISSN 0543-5749.

25. Корнієнко В.І. Адаптивне регулювання нелінійними процесами рудопідготовки з інтелектуальним прогнозуванням / В.І. Корнієнко // Матеріали міжнародної конференції «Форум гірників – 2009», т. 4, 30.09-03.10.2009. – Д.: НГУ, 2009. – С. 255-262. – ISBN 978-966-350-155-0.

26. 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.

27. Корниенко В.И. Интеллектуальное время-частотное прогнозирование нелинейных стохастических процессов / В.И. Корниенко, Т.А. Бубнова // Сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции «Современные направления теоретических и прикладных исследований '2009», т. 3 «Технические науки», 16-27 марта 2009. – Одесса: Черноморье, 2009 – С. 45-46. – ISBN 966-555-192-2.

28. Корнієнко В.І. Відновлення та сегментація зображень при контролі гранулометричного складу кускового матеріалу / В.І. Корнієнко, Т.А. Тищенко // Materialy V mezinarodni vedecko-prakticka konference “Veda a technologie – krok do budoucnosti – 2009”, Dil 14 “Matematika”, 27 unora-05 brezen 2009. – Praha: Publishing Hause “Education and Science” s.r.o., 2009. – S. 29-31. – ISBN 978-966-8736-05-6.

29. Корнієнко В.І. Дослідження ефективності спектрального пристрою контролю процесів рудопідготовки / В.І. Корнієнко, Н.А. Гуркало // Матеріали за V міжнародна научна-практична конференція «Найновітє научни постижения - 2009», т.25 «Технологии», 17-25 март 2009. – София: «БялГРАД-БГ», 2009. – С 12-14. – ISBN 978-966-8736-05-6.

30. Корниенко В.И. Обработка изображений в телекоммуникационной системе мониторинга горнорудного производства / В.И. Корниенко, А.А. Бондаренко // Материали за IV міжнародна научна практична конференція «Научно пространство на Европа – 2008», т.29 «Съвременни технологии на информации», 15-30 април 2008. – София: «БялГРАД-БГ», 2008. – С. 3-5. – ISBN 978-966-8736-05-6.

31. Корниенко В.И. Исследование нейронного прогнозирующего вейвлет-фильтра сложных сигналов / В.И. Корниенко, И.В. Гарнак // Materialy IV miedzynarodowej naukowii-praktycznej konferencji “Strategiczne pytania swiatowej nauki – 2008”, t. 10, 15-28 lutego 2008. – Przemysl: “Nauka i studia”, 2008. – S. 31-33. – ISBN 978-966-8736-05-6.

У роботах, опублікованих у співавторстві здобувачеві належить: [3, 7, 8, 10, 11, 26] – теоретичне обґрунтування та розробка методик та алгоритмів ідентифікації керованих процесів; [4, 9, 16, 17, 27, 31] – постановка задач, теоретичне обґрунтування та розробка алгоритмів (фільтрів) інтелектуального прогнозування стану керованих процесів; [5, 22-24, 28, 30] – обґрунтування та розробка оптичного способу контролю гранулометричного складу руди в потоці; [6, 29] – розробка спектрального способу контролю крупності і міцності вхідної руди конусної дробарки.

АНОТАЦІЯ

Корнієнко В.І. Автоматизовані системи оптимального керування процесами крупного дроблення та самоздрібнювання руд. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – автоматизація процесів керування. – Національний гірничий університет, Дніпропетровськ, 2010.

У дисертації вирішена актуальна наукова проблема підвищення ефективності автоматизованого керування процесами крупного дроблення і самоздрібнювання руд в умовах зміни їх динамічних режимів роботи та збуреного середовища.

Розв’язання полягає у визначенні закономірностей підвищення ефективності керування технологічними процесами шляхом синтезу і реалізації оптимального керування в ході функціонування систем керування на основі ідентифікації та прогнозування стану керованих процесів з контролем основних збурень.

Запропоновано способи контролю основних збурень (якості руди) та методи ідентифікації нелінійних керованих процесів. Розроблено адаптивні

системы оптимального керування, що забезпечують підвищення якості керування.

Ключові слова: крупне дроблення, самоздрібнювання, контроль збурень, інтелектуальне прогнозування, ідентифікація, оптимальне керування, адаптивні системи.

АННОТАЦИЯ

Корниенко В.И. Автоматизированные системы оптимального управления процессами крупного дробления и самоизмельчения руд. – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени доктора технических наук по специальности 05.13.07 – автоматизация процессов управления. – Национальный горный университет, Днепропетровск, 2010.

В диссертационной работе решена актуальная научная проблема повышения эффективности автоматизированного управления процессами крупного дробления и самоизмельчения руд в условиях изменения их параметров, динамических режимов работы и возмущающей среды.

Идея работы состоит в повышении качества управления этими технологическими процессами путем синтеза и реализации оптимального управления в ходе функционирования системы управления на основе идентификации и прогнозирования состояния управляемых процессов с контролем основных возмущений.

Впервые предложены решения задач синтеза оптимального управления процессами крупного дробления и самоизмельчения руд в ходе функционирования систем управления по принципу минимума обобщенной работы и синергическому принципу с контролем основных возмущений и прогнозированием состояния процессов, что позволяет упростить решение задач синтеза для нелинейных управляемых процессов и компенсировать влияния основных возмущений.

Впервые предложен метод идентификации режимов работы нелинейных процессов крупного дробления и самоизмельчения руд по временным реализациям путем определения их режима функционирования и его размерности (порядка), а также реконструкции модели путем настройки параметров его интеллектуальной модели по избранному критерию. Это позволяет идентифицировать режимы функционирования управляемых процессов (от равновесия до хаоса) с позиций нелинейной динамики со снижением расходов на экспериментальные исследования по сравнению с традиционными методами.

Предложено повысить точность моделей нелинейных процессов крупного дробления и самоизмельчения руд путем их структурно-параметрической идентификации с использованием, в отличие от известных подходов, композиции методов глобальной и локальной оптимизации интеллектуальных моделей, что позволяет получить прогнозирующие четкие и нечеткие

нейросетевые модели управляемых процессов со способностью адаптироваться под их изменяющиеся режимы без ограничений на их использование в реальном времени.

Определено, что повышение качества регулирования каналов с запаздыванием нелинейных управляемых процессов достигается, в отличие от известного, путем беспроискового непрямого адаптивного регулирования с обучающейся интеллектуальной прогнозирующей моделью.

Впервые разработаны адаптивные системы оптимального управления процессами крупного дробления и самоизмельчения руд, которые отличаются формированием оптимального управления на основе текущей оценки состояния управляемого процесса, его структурно-параметрической идентификации и интеллектуального прогнозирования будущего состояния, что позволяет, в сравнении с известными подходами, повысить качество управления этими процессами при изменении их параметров, режимов работы, возмущающей среды и целей управления.

Разработаны способы автоматического контроля крупности и крепости входной руды конусной дробилки и гранулометрического состава руды в потоке, которые обеспечивают повышение точности контроля путем соответствующей обработки информации и снижения инструментальной погрешности их технической реализации.

Разработан комплекс алгоритмов адаптивного оптимального управления процессами крупного дробления и самоизмельчения руд, который содержит алгоритмы текущего оценивания и прогнозирования состояния управляемых процессов, их идентификации, а также адаптивного регулирования и оптимального управления ними, что позволяет реализовать системы, инвариантные к изменению режимов работы и возмущающей среды, и, таким образом, повысить эффективность управления этими процессами.

Создан комплекс программ моделирования и разработки средств автоматического контроля и систем оптимального управления процессами крупного дробления и самоизмельчения руд, что позволяет сократить сроки и расходы на их проектирование.

Уровень внедрения полученных результатов определяется использованием разработанных способов контроля, методик идентификации, алгоритмов управления и компьютерных программ моделирования при выполнении госбюджетных научно-исследовательских работ, разработке комплекса программных средств проектирования и проектов реконструкции разработки ОАО ППКИ «Металургавтоматика» и ДАТ КБ «Днепровское», а также при разработке научно-методического обеспечения подготовки бакалавров и магистров специальности 8.092401.

Ключевые слова: крупное дробление, самоизмельчение, контроль крупности и крепости руды, интеллектуальное прогнозирование, идентификация, оптимальное управление, адаптивные системы.

ANNOTATION

Korniyenko V.I. Automated systems of optimal control of processes of ores large crushing and autogenous grinding. – Manuscript.

Dissertation for the acquiring of scientific degree of Doctor of Technical Sciences on the speciality 05.13.07 – automatization of control processes. – National Mining University, Dnipropetrovsk, 2010.

In dissertation it is decided the actual issue of effectiveness increase of the automated control of processes of ores large crushing and autogenous grinding.

The solving consists in determination of regularity of effectiveness increase control of processes by means of synthesis and realization of optimal control in the process of control system operating on basis of identification and prediction of the state of guided processes with the basic disturbances control.

It is offered the methods of control of basic indignations (qualities of ore) and methods of identification of nonlinear guided processes. It is developed the adaptive systems of optimal control that provide upgrading of control.

Keywords: large crushing, autogenous grinding, monitoring of disturbance, intellectual prediction, identification, optimal control, adaptive systems.