

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КРИВОРІЗЬКИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ПОРКУЯН ОЛЬГА ВІКТОРІВНА

УДК 621.926:534.16

**КЕРУВАННЯ НЕЛІНІЙНИМИ ДИНАМІЧНИМИ
ОБ'ЄКТАМИ ЗБАГАЧУВАЛЬНИХ ВИРОБНИЦТВ НА ОСНОВІ
ГІБРИДНИХ МОДЕЛЕЙ ГАМЕРШТЕЙНА**

Спеціальність 05.13.07 - автоматизація процесів керування

А в т о р е ф е р а т
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Кривий Ріг - 2009

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Технологічному інституті Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля (м. Сєвєродонецьк) Міністерства освіти і науки України та Криворізькому технічному університеті Міністерства освіти і науки України

Науковий консультант – доктор технічних наук, професор
Моркун Володимир Станіславович,
Криворізький технічний університет,
начальник науково-дослідної частини

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Жученко Анатолій Іванович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»,
завідувач кафедри автоматизації хімічних виробництв

доктор технічних наук, професор
Дубовой Володимир Михайлович,
Вінницький національний технічний університет,
завідувач кафедри комп'ютерних систем управління

доктор технічних наук,
старший науковий співробітник
Горелік Олександр Хаїмович,
ДП «Харківський науково-дослідний інститут комплексної автоматизації», директор;
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,
завідувач кафедри автоматизації енергосистем

Захист відбудеться 5 березня 2009 р. о 10³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 09.052.03 у Криворізькому технічному університеті за адресою: 50002, м. Кривий Ріг, вул. Пушкіна, 37.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Криворізького технічного університету за адресою: 50002, м. Кривий Ріг, вул. Пушкіна, 37.

Автореферат розіслано 4 лютого 2009 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради, к.т.н., доц.

М.П. Тиханський

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Гірничо-металургійний комплекс є найважливішою складовою економіки України. Ефективність його функціонування в значній мірі залежить від якості сировини, що надходить на металургійні підприємства. Одним з основних показників якості сировини є стабільно високий вміст корисного компонента в рудному концентраті. На сьогоднішній день якість вітчизняного залізородного концентрату не завжди відповідає світовим стандартам. Середнє значення вмісту корисного компонента в концентраті по залізородних підприємствах України становить 64-65%, в той час коли конкурентоспроможною на світовому ринку вважається залізородна продукція, що містить 67-68% заліза. Тому однією з актуальних проблем є підвищення якості концентрату без значного збільшення витрат на виробництво. Вирішення цього завдання неможливо без ефективного автоматизованого керування всіма процесами збагачення руд.

В умовах, коли зношення основних засобів виробництва на багатьох гірничо-збагачувальних комбінатах досягає 70-90%, собівартість видобутку сировини з об'єктивних причин поступово збільшується, а вміст корисних компонентів у руді, яка надходить на збагачення, знижується, удосконалювання автоматизованого керування як способу забезпечення необхідного співвідношення якості й собівартості продукції є одним з основних шляхів вирішення зазначених проблем.

Автоматизовані системи керування технологічними процесами (АСК ТП) подрібнення та сепарації залізних руд, що діють на сучасних збагачувальних підприємствах, у багатьох випадках не відповідають сучасним вимогам, не дозволяють забезпечити необхідну стабільну якість при мінімальній собівартості продукту.

Для виконання цих вимог необхідно, насамперед, забезпечити надійний, швидкий і точний контроль технологічних показників, а також розробити алгоритми ідентифікації нелінійних динамічних об'єктів збагачувальних виробництв, що дозволяють здійснювати керування процесами магнітного збагачення в умовах неповної та нечіткої інформації про властивості руди й показники технологічного процесу. Існуючі методи ідентифікації та контролю параметрів пульпи не задовольняють цим вимогам у сукупності.

Таким чином, підвищення ефективності автоматизованого керування процесами магнітного збагачення залізних руд за рахунок розробки нових моделей та методів ідентифікації нелінійних динамічних об'єктів збагачувальних виробництв та удосконалення контролю технологічних параметрів на базі більш точних ультразвукових методів є **актуальною науковою проблемою**.

Вирішення цієї проблеми особливо важливо для економіки України, оскільки в умовах гострого дефіциту енергоресурсів дозволяє на існуючих потужностях гірничих підприємств збільшити вилучення корисного компонента в концентрат, зменшити експлуатаційні витрати, а відповідно собівартість готової продукції, підвищити її конкурентоспроможність на світовому ринку.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Проблема, вирішенню якої присвячена дисертація, впливає із задач у сфері науки і техніки, сформульованих відповідно до Закону України №2623-III від 11 липня 2001 року „Про пріоритетні напрямки розвитку науки і техніки на 2002-2006 рр.” і рішення комітету Верховної Ради України та Президії НАН України від 01.11.2006 N 295 „Про забезпечення розвитку вітчизняної науки”. Науковою базою дисертації стали результати, отримані в процесі виконання науково-дослідних робіт, що здійснювалися за планами наукових досліджень Технологічного інституту Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля, Криворізького технічного університету та Міністерства освіти і науки України за відповідними фаховими напрямками.

Основні результати дисертаційної роботи отримані у ході виконання таких держбюджетних тем:

- “Дослідження й розробка теорії взаємодії електромагнітного випромінювання частотою 10^{14} - 10^{22} Гц із марганцевмісними рудами для створення енергоефективної технології збагачення” (номер держреєстрації 0103U001972);
- “Дослідження та розробка теорії розповсюдження поверхневих хвиль Лява та Лемба, некогерентного та когерентного гамма-випромінювання в інтегральному потоці для енергоефективного управління процесом збагачення окислених залізних руд” (номер держреєстрації 0106U000896).

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності автоматизованого керування процесами магнітного збагачення залізних руд за рахунок розробки теоретичних основ та побудови оптимального керування цими процесами на базі гібридних моделей Гамерштейна і методів контролю характеристик пульпи на підставі вимірюваних змін коефіцієнта загасання поверхневих хвиль Лява та об'ємних ультразвукових хвиль при наявності та відсутності магнітного поля.

Відповідно до цієї мети потрібно розв'язати такі **основні завдання**:

- розробити концепцію створення автоматизованої системи керування об'єктами збагачувальних виробництв залізних руд на основі неповної й нечіткої інформації про стан об'єкта;
- розробити й дослідити моделі (у класі моделей Гамерштейна) і методи оперативної ідентифікації процесів збагачення залізних руд як нелінійних динамічних об'єктів, з урахуванням змінюваності їх властивостей;
- адаптувати розроблені моделі й методи ідентифікації до систем, що працюють в умовах нечіткого й неповного інформаційного забезпечення;
- розробити алгоритми прогнозуючого керування процесами збагачення залізних руд на основі гібридних моделей Гамерштейна;
- дослідити особливості розповсюдження хвиль Лява по поверхнях, що контактують з гетерофазними середовищами, при наявності та відсутності магнітного поля для виявлення залежностей параметрів хвиль від характеристик пульпи;
- розробити теоретичні основи і методи ультразвукового контролю концентрації корисного компонента у твердій фазі залізородної пульпи, вмісту твердої фази й концентрації часток контрольного класу крупності в пульпі на базі вимірювань параметрів хвиль Лява й об'ємних ультразвукових хвиль;
- на основі розроблених моделей і методів синтезувати систему керування технологічними процесами магнітного збагачення залізних руд і провести випробування, у тому числі на реальних виробництвах.

Об'єктом дослідження є динамічні технологічні процеси та перетворення за наявності нечіткої та неповної інформації, що мають місце при збагаченні залізомістких руд, методи та системи автоматичного керування цими процесами.

Предметом дослідження є моделі й алгоритми ідентифікації нелінійних динамічних об'єктів, алгоритми прогнозуючого керування, алгоритми і методи контролю характеристик гетерофазних середовищ на основі вимірювання змін коефіцієнта згасання хвиль Лява, які розповсюджуються під впливом магнітного поля по контактуючій з залізородною пульпою поверхні, АСК ТП збагачення залізних руд.

Методи досліджень базуються на загальних положеннях теорії системного аналізу – для структурної та функціональної декомпозиції систем; математичного програмування – для знаходження оптимальних рішень, імітаційного моделювання - для ефективної розробки й дослідження моделей та алгоритмів; статистичних досліджень (регресійний аналіз, кореляційний аналіз) - для встановлення закономірностей і залежностей між величинами, а також для обробки результатів експериментальних досліджень; математичного моделювання - для планування, проведення й обробки результатів експериментів; нечіткої логіки й теорії нечітких множин - для побудови нечітких моделей. Для статистичної обробки результатів, визначення залежностей між параметрами моделей, для побудови моделей використовувалися стандартні пакети прикладних програм.

Наукова новизна одержаних результатів.

Основні результати і положення, що виносяться на захист, спрямовані на створення систем керування багатопараметричними нелінійними технологічними процесами гірничо-збагачувальних виробництв із застосуванням гібридних моделей Гамерштейна з нечіткою базою знань Такагі – Сугено в нелінійному блоці моделі Гамерштейна та методів вимірювання параметрів збагачення залізних руд на базі поверхневих хвиль Лява. Наукова новизна полягає в тому, що:

1. Вперше розроблено концепцію автоматизованого прогнозуючого керування процесами магнітного збагачення залізної руди, згідно до якої, на відміну від існуючих, прогноз здійснюється

на основі гібридних моделей, в яких поєднана нечітка інформація у вигляді експертної бази знань та інформація, отримана на основі вимірювань з використанням хвиль Лява, реалізація якої дозволила одержати задані показники вихідних продуктів збагачення.

2. Вперше в результаті моделювання на основі різних ортогональних функцій та аналізу адекватності і чутливості моделей, для керування нелінійними динамічними об'єктами збагачувальних виробництв сформульовані ортогональні моделі класу Гамерштейна, в яких на відміну від інших, нелінійність апроксимована трьома функціями Ерміта, що дозволило підвищити точність ідентифікації об'єктів керування (залежно від властивостей таких об'єктів відносна похибка ідентифікації змінюється в межах від 0,005 до 0,067).

3. Вперше для ідентифікації й керування в умовах неповної та нечіткої інформації об'єкти магнітного збагачення залізних руд апроксимовані гібридними моделями класу Гамерштейна, в яких, на відміну від існуючих, нелінійний блок представлений нечіткою моделлю типу Такагі-Сугено та послідовно поєднаний з динамічним блоком, побудованим на основі авторегресійних рівнянь, що дозволило врахувати інформацію різних математичних класів для здійснення адекватної структурно-параметричної ідентифікації (коефіцієнт детермінації $R^2 \geq 0,96$).

4. Набув подальшого розвитку існуючий підхід до визначення оптимальних керуючих впливів за рахунок розробки методу керування нелінійними динамічними об'єктами збагачувальних процесів, в якому на відміну від існуючого, використовується інверсія не моделі об'єкта, а лише нечіткого блоку розробленої гібридної моделі, що дозволило спростити обчислення значень керувань через прогнозування стану об'єкта на основі тільки змінних стану лінійного блоку.

5. Розроблено методи ідентифікації основних об'єктів збагачення залізних руд в режимі реального часу на основі гібридних моделей класу Гамерштейна, в яких, на відміну від існуючих, параметри моделі відображені на ряд лінійних обмежень, отриманих на основі аналізу моделі в умовах сталого режиму, що істотно спростило визначення коефіцієнтів моделі і стало основою для розробки адаптивних алгоритмів керування.

6. Вперше математично описані процеси поширення хвиль Лява при контакті шару з залізрудною пульпою, що дозволило виявити ефект виникнення під дією магнітного поля додаткових поперечних і поздовжніх хвиль, хвильові числа яких визначаються фізико-механічними параметрами пульпи, на основі якого розроблено більш точні порівняно з існуючими ультразвуковими методами методи контролю характеристик пульпи на основі вимірювань інтенсивності хвиль Лява як функції вмісту заліза у твердій фазі пульпи (похибка 0,33 % абс.), концентрації твердої фази в пульпі (похибка 0,31 % абс.) та вмісту в ній часток контрольного класу крупності (похибка 1,13 % абс.).

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що на основі теоретичних досліджень реалізовані автоматизовані системи керування технологічними процесами гірничо-збагачувальними виробництвами та системи ультразвукового контролю параметрів гетерофазних середовищ. При цьому запропоновані системи і методи дають можливість покращити ефективність виробництва і зменшити його енергоспоживання.

Практичні дослідження, викладені в дисертації, дозволяють:

- реалізувати алгоритми побудови гібридних моделей для керування нелінійними динамічними об'єктами у нечітких умовах; алгоритми керування на основі гібридних моделей; алгоритми контролю характеристик гетерофазних середовищ на основі хвиль Лява: вмісту корисного компоненту у твердій фазі пульпи, вмісту контрольного класу крупності подрібненого матеріалу в пульпі, концентрації в ній твердої фази, густини пульпи й часток подрібненого матеріалу в пульпі.
- розробити рекомендації щодо створення автоматизованих систем керування нелінійними динамічними об'єктами і приладів контролю параметрів залізомісткої пульпи;
- сформулювати вимоги і практично реалізувати автоматизоване керування нелінійними технологічними процесами гірничо-збагачувальних виробництв при наявності неповної та нечіткої інформації;
- здійснити програмно-технічну реалізацію контролю для автоматизованого управління процесом збагачення залізних руд.

Запропоновані технічні й алгоритмічні рішення знайшли застосування в інженерній прак-

тиці проектування й впровадження нових систем контролю й автоматичного керування різними технологічними процесами.

Окремі розробки дисертаційної роботи впроваджено на базі таких підприємств:

- Асоціація “Укррудпром” (гірничо-збагачувальні підприємства Кривбасу) – впроваджено алгоритми ідентифікації параметрів технологічного процесу та керування з економічним ефектом 442,8 тис. грн.

- Сєверодонецьке науково-виробниче об’єднання „Імпульс” - використані алгоритми прогнозуючого керування на базі гібридних моделей;

- Підприємство «АО «Мрія-Інвест» - упроваджено комплекс технічних засобів ультразвукового контролю якісних і кількісних характеристик технологічного процесу з економічним ефектом 441,9 тис. грн.

Теоретичні результати дисертаційної роботи також використовуються у навчальному процесі кафедри автоматизації технологічних процесів Технологічного інституту СНУ ім. Володимира Даля у рамках спеціалізації „Комп’ютерно-інтегровані системи управління” при викладанні таких дисциплін як „Автоматизоване керування технологічними процесами», «Програмно-технічні комплекси АСК ТП», „Автоматизація технологічних процесів” а також частково в інших.

Особистий внесок здобувача. Автору належать основні ідеї і розробки, спрямовані на створення математичного, алгоритмічного та інформаційного забезпечення системи керування збагачувальним виробництвом залізної руди в умовах неповної та нечіткої інформації. У наукових працях, написаних у співавторстві, дисертантові належать: математична модель, дослідження, розрахунки та висновки для хвиль Лява [1, 16]; принципівий підхід, методика, математична модель, висновки [30, 45, 47]; принцип, математична модель, методика та інтерпретація результатів [28, 32, 34, 35, 36]; принцип побудови, одержання експериментальних даних та їх інтерпретація [25, 41, 42, 43, 44, 48]; дослідження, висновки [3 - 6, 9, 10, 15, 17, 31, 42, 43].

Апробація результатів. Основні положення дисертаційної роботи представлялися на науково-технічних конференціях, зокрема: обговорювалися на засіданнях наукового семінару Технологічного інституту Східноукраїнського національного університету ім. В.Даля (1998-2008 рр.), Всеукраїнських науково-практичних конференціях «Технологія» (Сєверодонецьк, 2002-2007 рр.); Міжнародних науково-технічних конференціях «Сталий розвиток гірничо-металургійної промисловості» (Кривий Ріг, 2004-2008 рр.); Міжнародних науково-технічних конференціях «Автоматика» (Харків, 2005 р.; Севастополь, 2007; Одеса, 2008 р.); VIII-ій Міжнародній конференції «The Problems of Non-Destructive Testing» (Словенія, Потрош, 2005 р.); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Сучасні тенденції розвитку інформаційних технологій у науці, освіті та економіці» (Луганськ, Луганський національний педагогічний університет ім.Т.Шевченко, 2006 р.); наукових симпозиумах «Неделя горняка» (Москва, 2005, 2006 рр.); на Міжнародних конференціях «Стратегія якості в промисловості й освіті» (Болгарія, Варна, 2006, 2008 рр.).

Завершена дисертаційна робота пройшла апробацію на наукових семінарах: міжкафедральному науковому семінарі Харківського національного університету радіоелектроніки (18.09.2008), науковому семінарі кафедри Автоматизації хімічних виробництв Національного технічного університету України „КПІ” (24.09.2008), міжкафедральному науковому семінарі Національного університету „Львівська політехніка” (9.10.2008), науковому семінарі секції "Сучасні проблеми управління та моделювання складних систем" Придніпровського наукового центру (м. Дніпропетровськ, 22.10.2008).

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 48 наукових робіт (з них 19 самостійно), у тому числі 1 монографія, 37 статей в наукових фахових виданнях, 8 тез доповідей конференцій, 3 патенти на винаходи України.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота містить вступ, 6 розділів, висновок, список використаних джерел і одинадцять додатків. Загальний обсяг дисертації складає 379 сторінок, з яких основний зміст роботи викладений на 294 сторінках, містить 111 рисунків і 15 таблиць. Список використаних джерел складається з 314 найменувань. Додатки містять оригінальні програми розв’язання задач на комп’ютері та акти випробувань і впровадження результатів роботи.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовані мета й завдання наукових досліджень, зазначена ступінь наукової новизни одержаних результатів, розкрита їх практична значущість. Описано результати реалізації та апробації результатів досліджень.

У першому розділі досліджується стан проблеми підвищення ефективності автоматичного керування процесами збагачення залізних руд і обґрунтовуються основні напрямки її вирішення; формулюються завдання дослідження та обґрунтовуються методи їх реалізації.

Вказується, що значний внесок у вирішення науково-технічних завдань керування процесами магнітного збагачення залізних руд внесли такі вітчизняні та закордонні вчені як: Б.О.Ареф'єв, Л.М.Барський, В.О.Бунько, В.А.Воронов, І.Г.Гринман, В.В.Кармазін, В.З.Козін, Ю.Г.Качан, В.І.Козлюк, Є.В.Кочура, Г.М.Куваєв, О.М.Марюта, В.С.Моркун, В.М.Назаренко, В.А.Олевський, В.С.Процудо, Г.А.Хан, В.П.Хорольський, В.М.Чермалих, В.П.Яшин, Д.Ватсон, Л.Лінч, Д.Паунолл та інші.

Аналітичний огляд робіт з проблематики автоматичного керування процесами збагачення залізних руд показав, що в умовах, коли характеристики руди й стан технологічного устаткування змінюються, кінцеві показники роботи збагачувальної фабрики значною мірою залежать від ефективності автоматичного керування технологічними агрегатами, що, у першу чергу, визначається якістю його інформаційного та алгоритмічного забезпечення. Ефективне керування потребує постійного й швидкого надання значної кількості даних про стан об'єкта керування (вміст корисного компоненту в продукті, гранулометричний склад пульпи в різних точках процесу, концентрацію твердої фази й густину пульпи тощо), а також швидкодіючих алгоритмів їх обробки з метою ідентифікації об'єкта і визначення керуючих впливів.

Сучасний стан автоматизованих систем керування (АСК), що використовуються при збагаченні залізних руд, засвідчує, що при розробці систем управління застосовуються застарілі підходи до ідентифікації об'єктів керування і недостатнє їх інформаційне забезпечення. З огляду на тенденції сучасних досліджень, зроблено висновки про те, що для забезпечення подальшого розвитку в сфері автоматизованого керування концепція розробки системи керування повинна спиратись на такі завдання:

- розробка моделей та алгоритмів оперативної ідентифікації процесів збагачення залізної руди як нестационарних нелінійних динамічних об'єктів, що функціонують в умовах неповної та нечіткої інформації;
- синтез прогнозуючого керування процесами збагачення залізних руд на основі гібридних моделей класу Гамерштейна;
- розробка методів ультразвукового контролю концентрації твердої фази в залізорудній пульпі, вмісту в ній корисного компоненту та концентрації часток контрольного класу крупності в потоці пульпи на базі вимірювань параметрів хвиль Лява в магнітному полі та об'ємних ультразвукових коливань.

За результатами вивчення та аналізу проблеми підвищення ефективності автоматизованого керування процесами збагачення залізних руд сформульовані концепція керування й завдання дослідження.

У другому розділі розроблено теоретичні основи й методи ідентифікації технологічних процесів збагачення залізних руд на основі моделей класу Гамерштейна.

Враховуючи нелінійний, динамічний і нестационарний характер об'єктів керування процесів збагачення, запропоновано описувати їх моделями Гамерштейна. Дослідження різних типів моделей цього класу для ідентифікації об'єктів збагачувальних виробництв здійснювалося аналітичними методами і методом імітаційного моделювання. При цьому використовувалися дані про робочий стан об'єктів реальних виробництв.

Дослідження найпростішої моделі Гамерштейна, що являє собою, як відомо, послідовне з'єднання нелінійного статичного блоку, який описується поліномом типу $f(X(j\omega)) = \sum_{i=0}^{\infty} a_i \cdot X^i(j\omega)$, і

лінійного динамічного блоку, який описується функцією $H(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)}$, показали, що для більшої точності процесів збагачення вона дає значну похибку при ідентифікації. У наведених виразах $X(j\omega)$ - вхідна величина; $H(j\omega)$ - комплексний коефіцієнт передачі; $Y(j\omega)$ - вихідна величина; $j = \sqrt{-1}$; ω - кутова частота коливань вхідного сигналу. Тому були запропоновані та досліджені паралельні і рекурсивно-паралельні моделі Гамерштейна (рис. 1) з метою їх застосування для ідентифікації технологічних процесів збагачувальних підприємств.

Рис. 1. Рекурсивне включення паралельної моделі Гамерштейна в коло зворотного зв'язку.

Якщо нелінійність об'єкта керування апроксимована степеневим рядом, то в ході ідентифікації для випадкових вхідних сигналів, як відомо, виникає необхідність вирішення системи рівнянь в кореляційному вигляді (наприклад, для зворотного включення паралельної моделі):

$$\begin{bmatrix} R_{y^1x^1}(j\omega) & R_{y^2x^1}(j\omega) & \dots & R_{y^nx^1}(j\omega) \\ R_{y^1x^2}(j\omega) & R_{y^2x^2}(j\omega) & \dots & R_{y^nx^2}(j\omega) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_{y^1x^n}(j\omega) & R_{y^2x^n}(j\omega) & \dots & R_{y^nx^n}(j\omega) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \sum_{l=1}^n a_{l1} H_l(j\omega) \\ \sum_{l=1}^n a_{l2} H_l(j\omega) \\ \dots \\ \dots \\ \sum_{l=1}^n a_{ln} H_l(j\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{xx^1}(j\omega) \\ R_{xx^2}(j\omega) \\ \dots \\ \dots \\ R_{xx^n}(j\omega) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

де $R_{y^i x^k}(j\omega)$ - кроскореляційна функція вихідного і вхідного сигналів, $R_{xx^k}(j\omega)$ - автокореляційна функція вхідного сигналу, a_{li} - коефіцієнти степеневого ряду для l -ої паралельної гілки.

Ідентифікація об'єктів збагачувальних процесів на основі паралельних моделей дала дещо кращий результат, але виникали проблеми, пов'язані з неузгодженістю систем. Для того, щоб уникнути необхідності рішення систем рівнянь, запропоновано ортогоналізувати ідентифікаційні алгоритми шляхом заміни степеневого ряду ортонормованою послідовністю $y(x) = \sum_{k=0}^{\infty} a_k \cdot g_k(x)$

функцій типу

$$\int_{\min(x)}^{\max(x)} g_k(x) \cdot g_i(x) \cdot s(x) \cdot dx = \begin{cases} = 0 & \text{при } i \neq k \\ \neq 0 & \text{при } i = k \end{cases}, \quad (2)$$

де $g_k(x)$ - ортогональна функція; $a_k = \frac{\int_t^{t+T} y(t) \cdot g_k(x(t)) \cdot \frac{s(x(t))}{p(x(t))} dt}{\int_t^{t+T} g_k^2(x(t)) \cdot \frac{s(x(t))}{p(x(t))} dt}$.

Таким чином, були відібрані для ідентифікації об'єктів магнітного збагачення наступні моделі:

Паралельна ортогональна модель Гамерштейна

$$R_{y^i g_{yk}}(j\omega) = \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{1}{2i! \sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} y(x) G_i(x) e^{-x^2} dx \right) \cdot H_k(j\omega) \cdot R_{g_{xi} g_{yk}}(j\omega), \quad (3)$$

$$\text{де } \begin{cases} R_{y g_{y k}}(j\omega) = M[Y(j\omega) \cdot G_k(Y(-j\omega))] \\ R_{g_{x i} g_{y k}}(j\omega) = M[G_i(X(j\omega)) \cdot G_k(Y(-j\omega))] \end{cases}; R_{y g_{y k}}(j\omega) - \text{кроскореляційна функція після ортогоналізації}; R_{g_{x i} g_{y k}}(j\omega) - \text{автокореляційна функція після ортогоналізації}; G_k(X) - \text{ортогональні поліноми Ерміта}; M[\cdot] - \text{математичне сподівання.}$$

Паралельно-рекурсивна ортогональна модель Гамерштейна

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

$$\text{де } \begin{cases} R_{x g_{y k}}(j\omega) = M[X(j\omega) \cdot G_k(Y(-j\omega))] \\ R_{g_{y i} g_{y k}}(j\omega) = M[G_i(Y(j\omega)) \cdot G_k(Y(-j\omega))] \end{cases}$$

При збігу щільності розподілу значень вхідного випадкового процесу $p(x)$ з ваговою функцією ортогональних поліномів $s(x)$, згідно до критерію оптимальності Сверкунова, всі кореляційні функції правої частини рівнянь (3), (4), окрім однієї, виявляються нульовими. При виконанні цієї умови, а також з врахуванням заміни

$$H_k(j\omega) = \sum_{l=0}^{\infty} \frac{1}{2l! \sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} y(x) G_l(x) e^{-x^2} dx \cdot {}^g H_l(j\omega), \text{ ідентифікація зводиться до визначення}$$

коефіцієнтів моделі простим способом (наприклад, для паралельної моделі):

$$H_k(j\omega) = \frac{R_{y g_{y k}}(j\omega)}{R_{g_{x k} g_{y k}}(j\omega)}. \quad (5)$$

Відповідно до виразу (5) виконана ідентифікація технологічних об'єктів подрібнення, класифікації та магнітної сепарації. Дослідження зміни рівня характеристик цих об'єктів та їх впливу на коефіцієнти моделі Гамерштейна продемонстрували високу їх чутливість: зміни характеристик об'єктів керування на величину менше 1% привели в різних випадках до зміни значень коефіцієнтів моделі не менше ніж на 4% (рис. 2); а також показали можливість апроксимації досліджуваних об'єктів у широкому діапазоні значень їх характеристик. Ідентифікація здійснювалась при використанні ортогональних функцій Ерміта (для вхідних показників, що розподілені нормально) та Лежандра (для випадку рівномірного розподілу вхідних показників). В цих випадках похибка ідентифікації становить від 0,01 до 0,02.

Рис. 2. Залежність чутливості δ коефіцієнтів моделі від зміни параметрів ланок.

Показано, що оптимальна кількість ортогональних поліномів при ідентифікації об'єктів магнітного збагачення дорівнює трьом: відносна похибка для моделей з трьома поліномами й більше відрізняється несуттєво – наприклад, для моделі з 3-ма ($k=3$) і з 6-ма ($k=6$) поліномами різниця похибок складає менше 0,005, а процедура ідентифікації при трьох поліномах значно спрощується, отже, зменшується тривалість обчислювальних процедур.

Проаналізована також величина похибки ідентифікації при використанні різних ортогональних функцій (Чебишева, Лежандра, Лагера, Ерміта).

Мінімальна похибка досягається при використанні полінома Лагера, але його застосування для ортогоналізації значно ускладнює процедуру, тому рекомендовано поліном Ерміта, що незначно уступає поліному Лагера за зазначеним критерієм (рис. 3) і, з іншого боку, відповідає критерію оптимальності Сверкунова.

Рис. 3. Похибка ідентифікації для різних типів ортогональних поліномів: 1 – поліноми Чебишева, 2 – поліноми Лежандра, 3 – поліноми Лагера, 4 – поліноми Ерміта.

Щоб дослідити можливість застосування моделей класу Гамерштейна для ідентифікації об'єктів з різними динамічними властивостями, розглянуто основні типи динамічних ланок для апроксимації динамічного блоку моделі (наприклад, див. табл. 1). У всіх випадках відносна похибка ідентифікації не перевищила 0,067. При цьому найкращі результати отримано для об'єкта, який описується аперіодичною ланкою без запізнювання.

У розділі приведені також результати дослідження ідентифікації об'єктів керування, що мають нестационарний характер. Розглянуті випадки, коли в процесі керування змінюються структура та характеристики об'єкта. Показано, що обрані моделі адекватно відображають зміну цих властивостей.

Таблиця 1

Тип ланки	Відносна похибка розрахунку коефіцієнтів моделі H_k		
	H_k	Паралельна модель Гамерштейна	Паралельно-рекурсивна модель Гамерштейна
Аперіодична ланка 1-го порядку із запізнюванням	H_1	0,032	0,008
	H_2	0,022	0,021
	H_3	0,013	0,036

Таким чином, дослідження показали, що паралельні і паралельно-рекурсивні ортогональні моделі Гамерштейна на основі трьох функцій Ерміта дозволяють ідентифікувати основні процеси збагачення залізних руд з врахуванням їх динамічного нестационарного характеру й нелінійності.

Третій розділ присвячений синтезу керування динамічними нелінійними об'єктами збагачувального виробництва на базі моделей класу Гамерштейна в умовах нечіткої та неповної інформації про об'єкт керування. Вирішувалося завдання адаптації розроблених моделей і методів ідентифікації до умов, коли інформація про об'єкт надається в двох формах: формалізованій в чисельному вигляді та у лінгвістичній (або нечіткій).

Синтез керування системою виконаний на принципах Model Predictive Control (MPC, прогнозуючого керування з моделлю). Оптимальне програмне керування $\bar{u}_{opt}(t)$ знаходилося з умов мінімальності функціоналу якості

$$J(\bar{x}(t), \bar{u}(t), T_p, T_c) = \int_t^{t+T_c} [(\bar{x} - r_x)^T R (\bar{x} - r_x) + (\bar{u} - r_u)^T Q (\bar{u} - r_u)] d\tau, \quad (6)$$

де $\bar{x}(t)$ - вектор стану, $r_x(t)$ і $r_u(t)$ - параметри, які задають бажаний рух об'єкта на горизонті прогнозу T_p ; R і Q - позитивно визначені симетричні вагові матриці; $\bar{u}(\tau) = \bar{u}(t + T_c), \forall \tau \in [t + T_c, t + T_p], T_c \leq T_p$ - горизонт керування.

Для прогнозування в процесі керування стану нелінійних динамічних багатопараметричних об'єктів збагачення в умовах нечіткої інформації досліджувалася модель типу Такагі – Сугено. Побудова нечіткої моделі для прогнозуючого керування здійснювалася на основі автоматичного вилучення інформації про вихідні змінні з нечіткої бази знань, що відповідає моделі Такагі – Сугено. При цьому багатопараметрична система з n входами ($u(k)$) і m виходами ($y(k)$) апроксимується сукупністю дискретних нечітких моделей $F_l(\rho_l(k)), l = 1, 2, \dots, m$, тобто для l -го виходу вихідна координата $y_l(k+1)$ на кроці $k+1$ визначається моделлю: $y_l(k+1) = F_l(\rho_l(k))$. Вектор регресії $\rho_l(k)$ визначається з врахуванням всіх вхідних і вихідних координат:

$$\rho_l(k) = \left[\{y_1(k)\}_{0}^{n_{y1}}, \dots, \{y_m(k)\}_{0}^{n_{ym}}, \{u_1(k+1)\}_{n_{d1}}^{n_{u1}}, \dots, \{u_n(k+1)\}_{n_{dn}}^{n_{un}} \right]. \quad (7)$$

У такому випадку i -те нечітке правило для l -го виходу формулюється у вигляді:

$$\text{якщо } \rho_{l1}(k) \text{ це } \Lambda_{li_1} \text{ і } \dots \text{ і } \rho_{lp}(k) \text{ це } \Lambda_{li_p}$$

$$\text{то } y_{li}(k+1) = \varphi_{li} y(k) + \phi_{li} u(k) + \mathcal{G}_{li}, \quad (8)$$

де Λ_{li} - нечіткі (лінгвістичні) набори; $i = 1, 2, \dots, K_l$; K_l - кількість правил у l -тій моделі; φ і ϕ - вектори поліномів у зворотному операторі зсуву q^{-1} ; \mathcal{G} - зсув.

Для моделей Такагі – Сугено нульового порядку φ і ϕ дорівнюють нулю. Прогнозуюча модель вилучається з нечіткої бази знань на основі наступного правила:

$$y_l(k+1) = \frac{\sum_{i=1}^{K_l} \beta_{li}(x_l(k)) \cdot y_{li}(k+1)}{\sum_{i=1}^{K_l} \beta_{li}(x_l(k))}, \quad (9)$$

де $\beta_{li}(x(k))$ - ступінь виконання посилок і висновків кожного правила R_{li} , $x(k)$ - вектор станів об'єкта на k -му кроці.

Використання моделі в такому вигляді не дозволило отримати високу точність ідентифікації, тому були запропоновані та досліджені гібридні (нечітко-чіткі) моделі.

Для того щоб інтегрувати нечітку модель в алгоритми ідентифікації на основі моделі Гамерштейна, об'єкти керування розглядаються як комбінація нечіткого нелінійного блоку й чіткого лінійного динамічного блоку (рис. 4).

Рис. 4. Схема гібридної моделі Гамерштейна: СНБ – статичний нелінійний блок, який описується нечіткою моделлю; ЛДБ – лінійний динамічний блок.

Таким чином, керування формується на базі інформації різних математичних класів про об'єкт.

У запропонованій схемі інформація з нечіткої бази знань вилучається не про вихідні змінні $y(k)$, а про перетворені вхідні змінні $v(k)$.

Розглянуто випадок моделі Такагі – Сугено нульового порядку, коли наслідок h -го нечіткого правила визначається виразом $v_h = d_{h,i_1 \dots i_n}$, а посилка формулюється для кожної j -ої вхідної змінної у вигляді попередньої нечіткої множини $A_{j,i_j}(u_j)$. Вихід нечіткої моделі розраховується як середньозважена кількість наслідків нечіткого правила:

$$v_h = \frac{\sum_{i_1=1}^{M_1} \dots \sum_{i_n=1}^{M_n} \beta_{i_1, \dots, i_n}(u) d_{h,i_1 \dots i_n}}{\sum_{i_1=1}^{M_1} \dots \sum_{i_n=1}^{M_n} \beta_{i_1, \dots, i_n}(u)}, \quad (10)$$

де M_j - кількість нечітких множин в області j -го входу; ступінь виконання

$$\beta_{i_1, \dots, i_n}(u) = \prod_{j=1}^{n_u} A_{j, i_j}(u_j).$$

Для апроксимації динамічного блоку використовуються різницеві рівняння. Гібридна модель Гамерштейна на $(k+1)$ -му кроці має вигляд:

$$y(k+1) = \sum_{i=1}^{n_y} A_i y(k-i+1) + \sum_{i=1}^{n_u} B_i \sum_{i_1=1}^{M_1} \dots \sum_{i_n=1}^{M_n} \beta_{i_1 \dots i_n}(u(k-i-n_d+1)) d_{i_1 \dots i_n}, \quad (11)$$

де $y(k-i+1)$ й $u(k-i-n_d+1)$ - відповідно виходи й входи на попередніх кроках; n_y і n_u - максимальні затримки для виходів і входів; n_d - разова дискретна затримка (транспортне запізнення); A_i і B_i - матриці розмірністю $m \times m$ й $m \times n$ відповідно, які характеризують лінійний динамічний блок; d_{h_j} - параметр, що характеризує нелінійний (нечіткий) блок.

Структура моделі показана на рис. 5.

Рис. 5. Структура гібридної моделі Гамерштейна.

В основу процедури ідентифікації на базі отриманої гібридної моделі Гамерштейна покладено метод найменших квадратів. Але щоб уникнути необхідності нелінійного програмування з нелінійними обмеженнями, запропоновано відображати параметри моделі на лінійні обмеження, які отримано на основі аналізу усталеного режиму для об'єкта ідентифікації: $\sum_{i=1}^{n_u} b_i = 1 - \sum_{i=1}^{n_y} a_i$ і $[1, 1, \dots, 1] \theta_l = 1$, де $\theta_l = [a_1, \dots, a_{n_y}, b_1, \dots, b_{n_u}]^T$, a_i й b_i - параметри, що характеризують лінійний блок для спрощеного випадку системи один вхід-один вихід.

Оптимальне розв'язання θ^c , при наявності обмежень, отримано методом оптимального прогнозування параметрів $\theta(k)$ за формулою:

$$\theta^c = \theta - PQ^T \left[(Q\theta Q^T)^{-1} (Q\theta - c) \right], \quad (12)$$

де $\theta(k) = [a_1, \dots, a_{n_y}, b_{11}, \dots, b_{n_u N}]^T$ - вектор шуканих параметрів із врахуванням заміни $b_{ij} = b_i d_j$, Q і c - відповідно матриця й вектор обмежень, що накладаються на параметри узагальненої моделі θ^c , $Q\theta^c = c$.

У результаті ідентифікації з обмеженнями розраховуються параметри гібридної моделі класу Гамерштейна. Отримана модель використовується в системі прогнозуючого керування.

Пропонується схема керування з використанням інверсії нечіткого блока гібридної моделі Гамерштейна. В такій схемі комбінацію об'єкта керування й оберненої нечіткої моделі можна розглядати як лінійний блок моделі Гамерштейна. Вихідні змінні цього блоку \hat{y} порівнюються з реальними вихідними змінними y об'єкта керування. На основі розбіжностей модель - реальний об'єкт здійснюється адаптація системи керування. Такий підхід дозволяє уникнути нелінійного програмування в алгоритмі самого керування або залучення методів лінеаризації.

При цьому послідовність керувань $\{\Delta u(k+j)\}$, $j = 1, \dots, H_c$, розраховується із мінімізації оціночної функції:

$$J(H_{p1}, H_{p2}, H_c, \lambda) = \sum_{j=H_{p1}}^{H_{p2}} \left(w(k+j) - \hat{y}(k+j) \right)^2 + \lambda \sum_{j=1}^{H_c} \Delta u^2(k+j-1), \quad (13)$$

де $\hat{y}(k+j)$ - вихідні параметри процесу відповідно до моделі; $w(k+j)$ модифіковані параметри стану, які відомі заздалегідь; H_{p1} - мінімальний горизонт прогнозу; H_{p2} - максимальний горизонт прогнозу; H_c - горизонт керування; $\lambda = \lambda_0 K(u(k))^2$ - обмежуючий коефіцієнт; $K(u(k))$ - коефіцієнт нечіткої моделі Гамерштейна.

Відгук лінійної моделі на $k+j$ кроці p_j визначається на основі керуючого сигналу на попередніх кроках і величини відгуку моделі g_j :

$$p_j = \sum_{m=1}^j \sum_{i=m+1}^{N_g} g_i \Delta v(k+m-i), \quad j = 1, \dots, N_g \quad (14)$$

$$g_j = \begin{cases} 0, & \forall j \leq n_d \\ -\sum_{i=1}^j a_i g_{j-i} + \sum_{i=1}^j b_i, & j > n_d \end{cases}, \quad (15)$$

де N_g – модельний горизонт.

Всі прогнозовані виходи формуються у вектор $\hat{y} = \left[\hat{y}(k + H_{p1}), \dots, \hat{y}(k + H_{p2}) \right]$ і тоді основне рівняння алгоритму, з якого визначаються оптимальні керування $\Delta v(k)$ і потім $\Delta u(k)$, має вигляд:

$$\hat{y} = G\Delta v + p, \quad (16)$$

де G – матриця $(H_{p2} - H_{p1} + 1) \times H_l$ з нульовими компонентами для $j - i > H_{p1}$, $\Delta v = [\Delta v(k), \dots, \Delta v(k + H_c)]^T$; $p = [p_{H_{p1}}, p_{H_{p1}+1}, \dots, p_{H_{p2}}]^T$.

Оптимальне керування на першому кроці $\Delta v(k)$ визначається без врахування обмежень. Далі для отриманих прогнозуючих керувань перевіряється виконання обмежень. Якщо результат позитивний, то до системи застосовуються отримані керування. У протилежному випадку необхідна лінеаризація обмежень із наступним розрахунком оптимального керування одним з відомих методів.

При рішенні практичної оптимізаційної задачі (13) необхідно від обмежень, прийнятих для $u(k)$ і $\Delta u(k)$, перейти до $v(k)$ і $\Delta v(k)$, використовуючи залежності $v(k) = f(u(k))$ й $\Delta v(k) \approx K(u(k))\Delta u(k)$: $M\Delta v = k$, $L\Delta v \leq c$.

У цьому випадку обмежене рішення Δv^c знаходиться у вигляді:

$$\Delta v^c = \Delta v - (G^T G + \lambda_0 I)^{-1} M^T \mu - (G^T G + \lambda_0 I)^{-1} L^T \eta, \quad (17)$$

де μ й η – вектори множників Лагранжа, що відповідають обмеженням у вигляді рівностей і нерівностей, і знаходяться згідно з рівняннями:

$$\min_{\mu, \eta} \left\{ \begin{bmatrix} \mu \\ \eta \end{bmatrix}^T H \begin{bmatrix} \mu \\ \eta \end{bmatrix} + g^T \begin{bmatrix} \mu \\ \eta \end{bmatrix} \right\}, \quad H = \begin{bmatrix} M(G^T G + \lambda_0 I)^{-1} M^T & M(G^T G + \lambda_0 I)^{-1} L^T \\ L(G^T G + \lambda_0 I)^{-1} M^T & L(G^T G + \lambda_0 I)^{-1} L^T \end{bmatrix}, \quad g = \begin{bmatrix} k - M\Delta v \\ c - L\Delta v \end{bmatrix}.$$

Вектор K визначається послідовністю керувань (операційною траєкторією) $K = [K(u(k)), \dots, K(u(k + H_c))]$, для розрахунку якої запропоновані два алгоритми (основний і допоміжний). Основний алгоритм для керування процесами збагачення залізних руд на базі гібридної моделі Гамерштейна з інверсією статичної нелінійності має наступні кроки:

Крок 1. Вирішуючи $\Delta v = (G^T G + \lambda_0 I)^{-1} G(w - p)$, визначається оптимальне керування Δv без врахування обмежень.

Крок 2. Перетворюються Δv в Δu через інверсію відображення f^{-1} .

Крок 3. Перевіряється отримана послідовність керування на відповідність обмеженням.

Якщо обмеження виконуються, то отримане керування застосовується до системи відповідно до методики МРС (принцип горизонту передбачення, що віддаляється). Якщо обмеження не виконуються, то здійснюється перехід до четвертого кроку:

Крок 4. Розраховуються лінійні обмеження у вигляді нерівностей

$$\begin{pmatrix} I_{\Delta u} \\ -I_{\Delta u} \\ I_{H_c} \\ -I_{H_c} \end{pmatrix} \Delta v \leq \begin{pmatrix} v_{\max} - I_u v(k-1) \\ -v_{\min} + I_u v(k-1) \\ \Delta v_{\max} \\ -\Delta v_{\min} \end{pmatrix}, \quad (18)$$

де $v_{\min} = f(u_{\min})$, $v_{\max} = f(u_{\max})$; $\Delta \bar{v}_{\min} = \Delta v_{\min} K$; $\Delta \bar{v}_{\max} = \Delta v_{\max} K$;
 $K = [K(u(k)), \dots, K(u(k + H_c))]$.

Вектор K апроксимується щодо отриманої спочатку послідовності керувань.

Крок 5. Розраховується оптимальний прогноз Δv^c згідно з рівнянням (17).

При цьому використовуються попередньо розраховані обмеження (крок 4). Здійснюється перехід до кроку 2.

Якщо в запропонованому алгоритмі обмеження, які накладаються на керування, надто жорсткі, то використовується допоміжний алгоритм, в якому проводиться адаптація не самого керування, а обмежень, що накладаються на керування. Таким чином, на основі гібридних моделей класу Гамерштейна розроблено алгоритми адаптивного керування, які дозволяють гарантовано одержувати оптимальну траєкторію. Для забезпечення такого керування необхідна інформація про стан об'єкта керування.

Четвертий розділ присвячений теоретичним основам забезпечення процесу керування інформацією про стан об'єкта керування на основі поверхневих ультразвукових хвиль Лява. Хвиля Лява (рис. 6) – поперечна хвиля, яка поширюється в зоні контакту пружного півпростору (середовище 2) і тонкого шару товщиною h (середовище 1) і описується рівняннями:

$$U_{y1} = \frac{B}{\cos s_1 h} \cdot \cos(s_1(h+z)) \cdot e^{i(kx-\omega t)}, \quad U_{y2} = B \cdot e^{i(kx-\omega t)-s_2 z}, \quad (19)$$

де $U_{y1,2}$ - зсув часток відповідно в середовищах 1 і 2; B - константа, $s_1 = \sqrt{k_{t1}^2 - k^2}$,

$s_2 = \sqrt{k^2 - k_{t2}^2}$; $k_{t1,2} = \frac{\omega}{c_{t1,2}}$ - хвильове число поперечної хвилі; $c_{t1,2} = \sqrt{\frac{\mu_{1,2}}{\rho_{1,2}}}$ - швидкість роз-

повсюдження поперечних пружних хвиль; ρ - густина середовища; μ - коефіцієнт Ламе; ω - частота коливань (циклічна).

Рис. 6. Схема поширення хвиль Лява: 1 – шар речовини; 2 – півпростір; \bar{u} - зсув у хвилі.

На основі рівнянь (19) із врахуванням граничних умов отримано дисперсійне рівняння для

хвилі Лява: $tg \sqrt{k_{t1}^2 - k^2} h = \frac{\mu_2 \sqrt{k^2 - k_{t2}^2}}{\mu_1 \sqrt{k_{t1}^2 - k^2}}$, з якого при обмеженні $k_{t2} h \ll 1$ можна отримати

вираз для хвильового числа:

$$k = \frac{\omega}{c_{t2}} \left[1 + \frac{1}{2} (k_{t2} h)^2 \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^2 \left(1 - \frac{c_{t1}^2}{c_{t2}^2} \right)^2 \right]. \quad (20)$$

Отримані співвідношення демонструють залежність параметрів хвиль Лява від характеристик середовищ, у яких вони поширюються. Для здійснення керування технологічними процесами збагачення залізних руд необхідно контролювати характеристики залізородної пульпи, що є гетерофазним неоднорідним середовищем, тому досліджувалися закономірності розповсюдження хвиль Лява в таких середовищах. Передбачалося, що досліджуване середовище контактує з шаром,

в якому розповсюджується хвиля Лява, і що воно може розглядатися як рідина з деякими усередненими характеристиками. Отримано вираз для тензора деформацій u_{ik} і для зсувів u_{y1} у такому шарі у вигляді:

$$u_{ik} = u_{ik}^{(л)} + u_{ik}^{(н)}, \quad u_{y1} = C \left(-\frac{\mu_2 s_2}{\mu_1 s_1} \sin(s_1 z) + \cos(s_2 z) \right) e^{i\varphi} + \frac{1+\sigma}{2\pi E} \left(\frac{yz}{r^3} - \frac{(1-2\sigma)y}{r(r+z)} \right) F_z,$$

де $u_{ik}^{(л)}$ - складова, що відповідає деформаціям, викликаним пружними коливаннями середовища, $u_{ik}^{(н)}$ - складова, що відповідає деформаціям, викликаним тиском p на шар 1 досліджуваного середовища.

Виконані розрахунки показали, що випромінювання хвилі Лява в досліджуване середовище є незначним. Це пояснюється відсутністю у хвилі Лява поздовжньої складової. Для перевірки припущення про те, що магнітне поле може привести до появи поздовжньої складової в даній хвилі, було проведено дослідження впливу магнітного поля на хвилю Лява. У результаті дослідження встановлено, що магнітне поле змінює структуру поверхневої хвилі Лява й призводить до виникнення нових поперечних і поздовжніх хвиль у провідному півпросторі й шарі. Хвильове число нових хвиль у магнітному полі визначається фізико-механічними характеристиками середовища, що впливає з рівнянь (наведено для $(h_{x,y} \ll 1)$ і малої товщини шару):

$$U_x = \frac{A(h_x^{(2)} h_y^{(2)})^{1/2}}{m} \left[e^{\beta_{10} kz} - \frac{2\beta_{2l}\beta_{2t}}{2-\eta^2} e^{\beta_{20} kz} \right] e^{i(kx-\omega t)} + O\left[\left(h_x^{(2)} h_y^{(2)} \right) \right],$$

$$U_y = \frac{A}{k} \left[e^{\beta_{20} kz} + \frac{(1/4\eta^2)h_x^{(2)} - (\beta_{2l}/\beta_{2t})h_y^{(2)}}{(\beta_{2t}^2/\eta^2)h_x^{(2)} - h_y^{(2)}} e^{\beta_{2t} rz} \right] \cdot e^{i(kx-\omega t)} + O\left(\left(h_x^{(2)} h_y^{(2)} \right)^{1/2} \right),$$

$$U_z = \frac{iA(h_x^{(2)} h_y^{(2)})^{1/2}}{m} \left[-e^{\beta_{2l} kz} + \frac{2}{2-\eta^2} e^{\beta_{2t} kz} \right] e^{i(kx-\omega t)} + O\left[\left(h_x^{(2)} h_y^{(2)} \right) \right],$$

$$\text{де } \beta_{2l} = \sqrt{1 - \frac{(k_l^{(2)})^2}{k^2}}; \quad \beta_{2t} = \sqrt{1 - \frac{(k_t^{(2)})^2}{k^2}}; \quad m = \left(\frac{k_t^{(2)}}{k_l^{(2)}} \right)^2 - 1, \quad \eta = k_t^{(2)} / k_L,$$

$k = k_L(1-\alpha)$; k_L - хвильове число хвилі Лява при відсутності магнітного поля $H_0 = 0$; α - поправка, обумовлена дією магнітного поля, пропорційна $h_x^{(2)}$ і $h_y^{(2)}$.

Отримані залежності дозволили розрахувати ефекти загасання ультразвукової хвилі Лява у випадку, коли шар контактує з гетерофазним неоднорідним середовищем, що перебуває в магнітному полі. При цьому проаналізовано відповідний внесок у коефіцієнт загасання різних складових. Показано, що для деяких складових цей внесок незначний і ним можна знехтувати. У підсумку отримано наступний вираз для коефіцієнта загасання:

$$\alpha = \beta_2 (\xi_1 + A\xi_2) + \frac{\omega^2}{2\rho c^2} \left(\xi + \frac{4}{3}\eta + \lambda(c_V^{-2} - c_p^{-2}) \right) +$$

$$+ \left[(1-W) \frac{\rho_e}{\rho} + W \frac{\rho_{cp}}{\rho} \right] C_v + Q^2 \left[Q^2 + \frac{\sin^2 k_1 D}{\sin^2 (Nk_1 D)} \right]^{-1} + \quad (21)$$

$$+ \frac{\sigma \mu_M^2 H^2 \beta^2 \sin^2 \theta'}{2\rho c_0 c^2 (1 + \beta^2)}.$$

З аналізу (21) впливає, що коефіцієнт поглинання хвилі Лява є функцією напруженості ма-

гнітного поля, концентрації твердої фази в пульпі та вмісту заліза у твердій фазі пульпи.

При наявності магнітного поля напруженістю H більше 50 А/м внесок останньої складової у (21) значно зростає в порівнянні з іншими, що добре видно з рис. 7 і 8, на яких показано окремо залежності коефіцієнтів загасання магнітного й немагнітного характеру в гетерофазному середовищі від вмісту твердої фази в залізородній пульпі W .

Рис. 7. Графіки залежностей $\alpha_{\text{гф}}^{\text{HM}}$ від W при різних значеннях η : 1 - $\eta=0.1$; 2 - $\eta=0.2$; 3 - $\eta=0.3$; $\theta'=90^\circ$; $\omega=10^6$ Гц.

Рис. 8. Графіки залежностей $\alpha_{\text{гф}}^{\text{M}}$ від W при різних значеннях η (див. рис.7), $H=100$ А/м.

Показано, що для розрахунку методів контролю характеристик об'єкта керування коефіцієнт загасання визначається наступним чином: при відсутності магнітного поля (або напруженості

поля менш ніж 10 А/м) $\alpha = \left[\frac{\rho_{\text{в}} + W(\rho_{\text{ср}} - \rho_{\text{в}})}{\rho} \right] C_{\text{v}}$; при наявності магнітного поля (напруженість

поля більше 50 А/м) $\alpha = \frac{\sigma \mu_{\text{M}}^2 H^2 \beta^2 \sin^2 \theta'}{2 \rho c_0 c^2 (1 + \beta^2)}$, де $\rho_{\text{в}}$ - густина води; $\rho_{\text{ср}}$ - середня густина твердої фази; ρ - густина шару; C_{v} - величина, обумовлена фізичними характеристиками середовища;

σ - питома електропровідність досліджуваного середовища; μ_{M} - магнітна проникність речовини;

$\beta = \frac{c^2 \omega}{4 \pi \sigma \mu_{\text{M}} c_0^2}$; θ' - кут між \bar{H} і \bar{k} ; c_0 - швидкість ультразвуку у відсутності магнітного поля; c - швидкість світла.

У п'ятому розділі викладено методичні та алгоритмічні засади інформаційного забезпечення керування процесами збагачення залізної руди на основі установлених закономірностей розповсюдження хвиль Лява. Якщо припустити, що інтенсивність ультразвукових хвиль Лява при контакті шару з пульпою змінюється за законом $I = I_0 e^{-\alpha l}$, де I_0 - інтенсивність випроміненої хвилі, α - коефіцієнт загасання, l - відстань, яка пройдена хвилею, то, вимірюючи інтенсивність хвилі Лява, можна визначити характеристики пульпи, в яку випромінюється хвиля. На цій основі розроблені методи оцінки вмісту корисного компонента в твердій фазі η , вмісту твердої фази в пульпі W та концентрації часток контрольного класу крупності в пульпі ω_{-r} .

Густина і склад пульпи, з одного боку, визначають зміну інтенсивності хвиль Лява, а з іншого боку, впливають на величину магнітної проникності пульпи. Якщо вимірювати інтенсивність хвилі Лява в чистій воді: $I_{\text{в}} = I_0 e^{-\alpha_{\text{в}} l}$, а потім у пульпі: $I = I_0 e^{-\alpha l}$ при дії магнітного поля, то

величина $S = \ln \frac{I_{\text{в}}}{I} = (\alpha - \alpha_{\text{в}}) \cdot l$ визначатиметься параметрами W й η , від яких $\alpha_{\text{в}}$ не залежить.

Визначаючи магнітну проникність пульпи μ і сигнал $S = \ln \frac{I_{\text{в}}}{I}$, одержуємо систему, рішення якої дає значення параметрів W й η :

$$\begin{cases} S(W, \eta) = \left(\frac{\sigma(W, \eta) \cdot \mu^2(W, \eta) H^2 \beta^2(W, \eta)}{2 \cdot \rho_{\text{зф}}(W, \eta) \cdot \cos^2(1 + \beta^2(W, \eta))} - \alpha_{\text{в}} \right) l \\ \mu(W, \eta) = W \eta \cdot \mu_{\text{м}} + 1 \end{cases} \quad (22)$$

У ході досліджень було встановлено, що для інтенсивності можна одержати більш прості співвідношення, якщо напруженість магнітного поля перевищує 50 А/м. Запропонована схема пристрою для реалізації такого методу контролю характеристик залізородної пульпи.

У роботі запропоновано метод, що дозволяє визначити величини W й η , на основі вимірювань у потоці пульпи. Суть його полягає в тому, що інтенсивність хвилі Лява в пульпі вимірюється два рази: перший раз при відсутності магнітного поля, а другий раз при дії на систему магнітного поля. У цьому випадку сигнал $S_2 = \ln(I^*/I) = \alpha_m \cdot l$ дозволяє виключити вплив немагнітних складових на процедуру визначення характеристик пульпи. Отримано вираз для цього сигналу, що дозволяє визначити W за формулою

$$S(W) = \frac{H^2 c^2 \omega^2 l}{32\pi^2 \frac{\mu-1}{\mu_m} \sigma_m ((1-W)\rho_g + W((1-\frac{\mu-1}{\mu_m \cdot W})\rho_{nm} + \frac{\mu-1}{\mu_m \cdot W} \rho_m)) c_0^5 (1 + (\frac{c^2 \omega}{4\pi \frac{\mu-1}{\mu_m} \sigma_m \mu c_0^2})^2)}$$

Далі визначається параметр η з виразу $\mu_{me} = W\eta\mu_m$. За відомими величинами параметрів W й η , відповідно до формул $\rho_{zф} = (1-W)\rho_g + W\rho_{me}$ і $\rho_{me} = (1-\eta)\rho_{nm} + \eta\rho_m$ визначається густина пульпи й середня густина твердих часток пульпи.

Для ефективного керування процесами збагачення необхідно знати концентрацію часток контрольних класів крупності в пульпі ω_{-r} . З цією метою розроблено метод, який дозволяє оцінити цю величину. При використанні комбінованого впливу на пульпу об'ємних ультразвукових хвиль і поверхневих хвиль Лява при дії слабкого магнітного поля ($H \leq 10$ А/м), одержуємо:

- для об'ємної ультразвукової хвилі

$$S_3 = \ln \frac{I_g^{об}}{I_n^{об}} = F_3(W, \rho_{me}, \omega_{-r}), \quad (23)$$

- для поверхневої ультразвукової хвилі

$$S_4 = \ln \frac{I_g^{Л}}{I_n^{Л}} = F_4(W, \rho_{me}, \omega_{-r}), \quad (24)$$

де $I_g^{об}$ та $I_n^{об}$ - відповідно інтенсивність об'ємної хвилі в чистій воді й у пульпі, $I_g^{Л}$ та $I_n^{Л}$ - теж саме для хвиль Лява.

Їх відношення являє собою величину, яка залежить від концентрації часток контрольних класів крупності пульпи і має вигляд

$$S = \frac{S_3}{S_4} = \frac{z\rho}{l(\rho_{me} - \rho_g)} F(\omega_{-r}). \quad (25)$$

На основі проведеного аналізу сформульовані методи контролю для забезпечення процесів керування інформацією про стан технологічних процесів збагачення залізної руди.

У шостому розділі приведені результати практичної реалізації, лабораторних і промислових випробувань підсистеми інформаційного забезпечення, підсистеми ідентифікації й системи керування в цілому. На основі розроблених алгоритмів ідентифікації, контролю та керування синтезована система керування багатостадійним технологічним процесом збагачення залізної руди (рис. 9).

На схемі позначено: 1 – млин; 2 – класифікатор; 3 – магнітний сепаратор; 4 – конвеєр-живильник; 5 – бункер; 6 – приводний двигун; 7, 10 – клапани витрати води; 8, 9, 12 – регулятори; 11 – датчик витрати руди; 13 – датчик вмісту твердої фази в пульпі зливу класифікатора 2 та концентрації в ній часток контрольного класу крупності; 14 – датчик вмісту корисного компонента в твердій фазі продукту збагачення.

Рис.9. Система автоматичного керування технологічними процесами збагачувального виробництва

Ієрархічна структура керування містить три рівні. Нижні рівні системи керування відповідають локальним системам регулювання й включають: систему стабілізації подачі руди, систему регулювання співвідношення руда - вода (для подрібнювального агрегату), систему стабілізації гранулометричного складу пульпи на зливі класифікатора. Уставки локальних систем регулювання визначаються на основі оптимальних показників наступного – середнього – рівня. Середній рівень являє собою АСК ТП першої стадії збагачення, бо саме перша стадія визначає кінцеві результати всієї технологічної лінії збагачення. Верхній рівень заснований на використанні техніко-економічних критеріїв ефективності й забезпечує задані показники функціонування збагачувального виробництва в цілому.

До складу системи керування входять такі підсистеми: інформаційного забезпечення, ідентифікації на базі гібридної моделі Гамерштейна, оптимізації, формування керуючих впливів.

Підсистема інформаційного забезпечення процесу керування функціонує на основі розроблених ультразвукових методів контролю. На першій стадії збагачення здійснюється контроль вмісту часток контрольного класу крупності в пульпі на зливі класифікатора (ЗК) 2, концентрації твердої фази в пульпі на ЗК (датчик 13), вмісту магнітного заліза в проміжному продукті й хвостах першої стадії, витрати пульпи на виході магнітного сепаратора 3, витрати води в млин 1 і класифікатор 2, витрати руди в млин 1. Для керування на верхньому ієрархічному рівні підсистема інформаційного забезпечення контролює вихідні параметри магнітної сепарації останньої стадії збагачення: вміст заліза в концентраті і продуктивність по концентрату.

Лабораторні й промислові випробування підсистеми інформаційного забезпечення показали, що вона забезпечує стійке вимірювання концентрації твердої фази, вмісту корисного компонента в пульпі та вмісту часток контрольного класу крупності. Похибка вимірювання процентного вмісту заліза у твердій фазі пульпи становить не більше 0,33% абс.; концентрації твердої фази не більше 0,31% абс., вмісту часток контрольного класу крупності в пульпі становить не більше 1,13% абс.

Підсистема ідентифікації на базі отриманої інформації згідно до розроблених алгоритмів формує гібридні моделі Гамерштейна об'єктів керування з нечітким блоком на базі моделі Такагі – Сугено (ТС) і передає дані до підсистеми оптимізації. Випробування блоку ідентифікації об'єктів керування на базі гібридної моделі Гамерштейна проводилися для подрібнювального агрегату першої стадії магнітного збагачення і для магнітного сепаратора. Отримано задовільні результати, які наведені на рис. 10. Адекватність моделі згідно з критерієм (коефіцієнта детермінації) показала високий результат: $R^2 \geq 0,96$.

На основі розроблених моделей синтезовано керування процесом магнітного збагачення залізної руди. Метою керування процесом збагачення є одержання максимального економічного ефекту при додержанні технологічних обмежень на якість кінцевого продукту (вміст заліза в концентраті не менше заданого).

Тому для оптимізації на верхньому ієрархічному рівні розглядався один з відомих техніко-економічних критеріїв E , визнаний, наприклад, в роботах В.С. Процуто та інших таким, що відповідає вимогам до економічних критеріїв, а саме

$$E = \beta_k c_k Q_k - c_y - L \rightarrow \max, \quad \beta_{k_1} \leq \beta_k \leq \beta_{k_2}, \quad (26)$$

де $\beta_k c_k Q_k$ - вартість виробленого концентрату; β_k - вміст заліза в концентраті, c_k - оптова ціна за 1 т металу в концентраті, Q_k - продуктивність по концентрату; c_y - частина витрат на виробництво, яка залежить від обсягів переробки; L - умовно-постійна частина витрат.

Рис 10. Результати ідентифікації для перехідного процесу (1,2) та сталого режиму (3,4): суцільна лінія – вміст часток класу крупності -0,074мм в пульпі на ЗК, пунктирна лінія - вміст часток

Оптимальні, згідно (26), значення β_k і Q_k (вихідні змінні) використовуються для розрахунків за гібридними моделями оптимальних вхідних змінних: продуктивності за проміжним продуктом $Q_{np.onm}$, вмісту заліза в проміжному продукті $\beta_{np.onm}$ і в хвостах першої стадії

$\beta_{xв.опт}$. Ці показники є вихідними змінними для середнього рівня керування (першої стадії збагачення) і використовуються для оптимізації вже на цьому рівні.

Схема керування першою стадією збагачення залізної руди наведена на рис. 11 (позначення 1 - 9 відповідні позначенням на рис. 9). Оптимальні керування (підсистема оптимізації 11) знаходились з умов мінімальності квадратичного критерію (6) при обмеженнях: $\beta_{xв} \leq \beta_{xв.опт}$, $\beta_{пр} \geq \beta_{пр.опт}$.

В якості керуючих змінних використовувалися величини продуктивності млина 1 по руді $u_1 = Q_{1p}$ та витрата води в класифікатор 2 $u_2 = Q_{2в}$ і подрібнювальний агрегат 1 $u_3 = Q_{3в}$. Вихідними змінними на виході магнітного сепаратора 3 є $y_1 = Q_{np}$, $y_2 = \beta_{np}$, $y_3 = \beta_{xв}$.

Для апроксимації об'єкта керування використовувалася дискретна модель з нечітким нелінійним блоком 18 (підсистема ідентифікації 10, рис.11). Лінійний динамічний блок (блок 17 на рис.11) апроксимувався згідно до моделі (11), яка для випадку з трьома входами ($u_1 = Q_{1p}$, $u_2 = Q_{2в}$, $u_3 = Q_{3в}$) набуває вигляду:

$$\hat{y}(k+1) = \sum_{i=1}^{n_y} A_i \hat{y}(k-i+1) + \sum_{i=1}^{n_u} \sum_{j=1}^{N_1} \sum_{l=1}^{N_2} \sum_{p=1}^{N_3} B_i d_{jlp} \beta_{jlp} (u(k-i-n_d+1)), \quad (27)$$

де $\hat{y}(k+i)$ - вектор вихідних показників із компонентами $y_1 = Q_{np}$, $y_2 = \beta_{np}$, $y_3 = \beta_{xв}$, матриці A_i й B_i для розглянутого випадку мають розмірність 3×3 ; N - число нечітких множин для відповідного входу ($N_1=3$, $N_2=3$, $N_3=3$).

Рис.11. Схема керування першою стадією збагачення залізної руди.

В процесі керування на середньому та нижньому ієрархічних рівнях керуючі впливи формуються на базі вимірювань вмісту твердої фази й заліза магнітного в твердій фазі пульпи (датчики 13, 16) та концентрації часток контрольних класів крупності у пульпі на зливні класифікатора 2 (датчик 16), оброблених підсистемою інформаційного забезпечення 15. Показано, що прогнозує керування процесами магнітного збагачення залізних руд на основі гібридної моделі Гамерштейна, в якій нелінійний блок апроксимовано нечіткою моделлю Такагі-Сугено, забезпечує оптимальні параметри технологічного процесу та задані характеристики вихідних продуктів.

Запропонована система керування дозволила зменшити дисперсію регульованих параметрів на 6-27%, тривалість перехідних процесів у замкнених системах автоматичного регулювання на 14-22%, енерговитрати на 0,85-11%, що підтверджено актами впровадження.

Алгоритмічні рішення, засоби контролю та система керування пройшли випробування та впроваджені на підприємствах народного господарства України, в тому числі на підприємствах Криворізького залізничного басейну, що входять до складу Асоціації „Укррудпром”, а також підприємствах інших галузей (СНВО „Імпульс”, АО „Мрія-Інвест”).

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

Основні результати дисертаційної роботи полягають у створенні засад щодо побудови автоматизованих систем керування нелінійними динамічними технологічними процесами гірничо-збагачувальних виробництв в умовах неповної та нечіткої інформації на основі застосування гібридних моделей Гамерштейна - для прогнозування стану об'єкта, поверхневих хвиль Лява - для одержання вимірювальної інформації про об'єкт керування та розроблення уніфікованих методів достовірного визначення основних технологічних показників.

Результати, отримані в дисертаційній роботі, доведено до практичної реалізації та впроваджено у виробництві.

За результатами досліджень можна зробити такі висновки:

1. Об'єкти керування технологічних процесів магнітного збагачення залізних руд мають нелінійний динамічний нестационарний характер, є багатозв'язними, функціонують в умовах неповного та нечіткого інформаційного забезпечення, що створює певні проблеми при побудові сучасних систем керування. Аналіз стану автоматизації керування збагачувальними виробництвами показав, що існуючі САК не забезпечують ефективного розв'язання складних техніко-економічних завдань при збагаченні залізних руд.
2. Створена нова концепція інтелектуального автоматизованого прогнозуючого керування процесами магнітного збагачення залізних руд, що враховує нечітку інформацію про поточний стан нелінійних багатопараметричних динамічних об'єктів, та інформацію, отриману на основі вимірювань із використанням хвиль Лява. Це дозволило визначити принципи вдосконалення систем керування гірничо-збагачувальними виробництвами та поширити їх для інших галузей промисловості.
3. Вперше в результаті моделювання на основі різних ортогональних функцій та аналізу адекватності і чутливості моделей, для керування нелінійними динамічними об'єктами збагачувальних виробництв сформульовані ортогональні моделі класу Гамерштейна, в яких на відміну від інших, нелінійність апроксимована трьома функціями Ерміта, що дозволило підвищити точність ідентифікації об'єктів керування. Установлено закономірність впливу варіацій динамічних характеристик та зміни структури об'єкта керування на точність ідентифікації й чутливість моделей Гамерштейна. Показано, що в залежності від динамічних характеристик об'єкту відносна похибка ідентифікації змінюється в межах від 0,005 до 0,067, отже моделі дозволяють проводити апроксимацію об'єктів керування збагачувальних виробництв із різними динамічними властивостями.
4. Вперше для ідентифікації й керування в умовах неповної та нечіткої інформації об'єкти магнітного збагачення залізних руд апроксимовані гібридними моделями класу Гамерштейна, в яких, на відміну від існуючих, нелінійний блок представлений нечіткою моделлю типу Такагі-Сугено та послідовно поєднаний з динамічним блоком, побудованим на основі авторегресійних рівнянь, що дозволило врахувати інформацію різних математичних класів для здійснення адекватної структурно-параметричної ідентифікації (коефіцієнт детермінації $R^2 \geq 0,96$).
5. Набув подальшого розвитку існуючий підхід до визначення оптимальних керуючих впливів за рахунок розробки методу керування нелінійними динамічними об'єктами збагачувальних процесів, в якому на відміну від існуючого, використовується інверсія не моделі об'єкта, а лише нечіткого блоку розробленої гібридної моделі, що дозволило спростити обчислення значень керувань через прогнозування стану об'єкта на основі тільки змінних стану лінійного блоку.
6. Розроблено методи та алгоритми ідентифікації основних об'єктів збагачення залізних руд в режимі реального часу на основі гібридних моделей класу Гамерштейна, в яких, на відміну від існуючих, параметри моделі відображені на ряд лінійних обмежень, отриманих на основі аналізу моделі в умовах сталого режиму, що істотно спростило визначення коефіцієнтів моделі і стало основою для розробки адаптивних алгоритмів керування.
7. Вперше отримано математичні моделі процесів розповсюдження хвиль Лява в системі, яка контактує з різними середовищами (твердими, рідкими, двофазними) при наявності та відсутності магнітного поля, що дозволило виявити залежності характеристик хвиль від властивостей середовищ, в яких вони розповсюджуються, і стало науковою основою для розробки методів контролю характеристик залізородної пульпи.
8. Вперше розроблено методи контролю вмісту корисного компоненту в твердій фазі пульпи (похибка вимірювання складає не більше 0,33% абс.) та концентрації подрібненого матеріалу в пульпі (похибка вимірювання складає не більше 0,31% абс.), які засновані на вимірюванні параметрів хвиль Лява при наявності та відсутності магнітного поля, а також концентрації часток контрольованого класу крупності в пульпі (похибка вимірювання складає не більше 1,13% абс.) на базі вимірювання інтенсивності об'ємних ультразвукових коливань і хвиль Лява, що розповсюджуються по контактуючій з пульпою поверхні.
9. Підсумки досліджень, що викладені в дисертації, дозволили: запропонувати гібридні моделі, що поєднують в собі інформацію різних математичних класів, для апроксимації об'єктів магні-

тного збагачення в умовах неповної та нечіткої інформації, алгоритмічні рішення для реалізації автоматизованого адаптивного керування технологічними процесами гірничо-збагачувальних виробництв; розробити уніфіковані ультразвукові методи визначення основних параметрів залізорудної пульпи; і на основі цього синтезувати систему керування технологічними процесами магнітного збагачення.

10. Запропоновані в роботі гібридні моделі, методи та адаптивні системи керування технологічними процесами збагачення показали, що їх застосування дозволяє на збагачувальних виробництвах, а також на виробництвах інших галузей, зменшити дисперсію регульованих параметрів на 6-27%, тривалість перехідних процесів при керуванні технологічними процесами - на 14-22%, енерговитрати - на 0,85-11%.

СПИСОК ОСНОВНИХ ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографія

1. Поркуян О.В. Ультразвуковые поверхностные волны Лэмба и Лява в измерительных системах (Монографія) / В.С. Моркун, О.В. Поркуян - Кривий Ріг: Криворізький технічний університет. 2006. – 261 с.

Публікації в фахових виданнях

2. Поркуян О.В. Многоуровневая концепция моделирования гетерофазных сред / О.В. Поркуян // Вісник Криворізького технічного університету : зб. наук. праць. – № 2. – 2003. – С. 6–10.

3. Поркуян О.В. Принципы адаптивного управления на базе неформализованных данных / В.С. Моркун, А.А. Цокуренько, С.Н. Барский, О.В. Поркуян // Разработка рудных месторождений : сб. научн. трудов. – 2003. – № 84. – С.10-18.

4. Поркуян О.В. Эффект обращения волнового фронта ультразвуковых волн в задачах контроля характеристик случайно неоднородных гетерогенных сред / В.С. Моркун, О.В. Поркуян, С.Н. Барский // Вісник Криворізького технічного університету : зб. наук. праць. – № 3. – 2004. – С. 109–112.

5. Поркуян О.В. Экстремальное управление техническими объектами в условиях помех./ В.С. Моркун, А.А. Цокуренько, О.В. Поркуян та ін. // Вісник Криворізького технічного університету : зб. наук. праць. – № 4. – 2004. – С. 67–70.

6. Поркуян О.В. Математическое моделирование объекта автоматического управления на базе неполной и нечеткой информации / В.С. Моркун, А.А. Цокуренько, О.В. Поркуян, С.Н. Барский // Разработка рудных месторождений : сб. научн. трудов. - 2004. - №85. - С. 121-125.

7. Поркуян О.В. Распространение упругих волн в ферромагнитной двухкомпонентной среде/ О.В. Поркуян // Разработка рудных месторождений : сб. научн. трудов. - 2004. - №86. - С. 10-14.

8. Поркуян О.В. Определение физических характеристик двухкомпонентной гетерофазной среды / О.В. Поркуян // Разработка рудных месторождений : сб. научн. трудов. - 2004. - №87. - С. 70-75.

9. Поркуян О.В. Адаптивное управление технологическими процессами на базе обобщенного информационного обеспечения / В.С. Моркун, А.А. Цокуренько, О.В. Поркуян, С.Н. Барский // Матеріали НТК «Сталий розвиток гірничо-металургійної промисловості» : зб. допов. – 2004. – Т.2. – С. 182-192.

10. Поркуян О.В. Измерение содержания ферромагнитного компонента в потоке пульпы / В.С. Моркун, О.В. Поркуян., Т.Г. Сотникова, С.Н. Барский // Вісник Криворізького технічного університету : зб. наук. праць. – № 5. – 2004. – С. 7–11.

11. Поркуян О.В. Аналитическое описание процесса распространения волн Лява / О.В. Поркуян // Вісник Криворізького технічного університету : зб. наук. праць. – № 6. – 2005. – С. 49–52.

12. Поркуян О.В. Дисперсия волн Лява, что распространяются в зоне контакта среды и пленки / О.В. Поркуян // Вісник Криворізького технічного університету : зб. наук. праць. – № 7. – 2005. – С. 136–139.

13. Поркуян О.В. Использование поверхностных волн Лява и Лэмба для построения систем автоматического контроля основных технологических переменных процесса обогащения железных руд / О.В. Поркуян // Вісник Криворізького технічного університету : зб. наук. праць. – № 9. – 2005. – С. 83–87.
14. Поркуян О.В. Влияние характеристик пленки на интенсивность волн Лява, распространяющихся в зоне контакта, и пленки / О.В. Поркуян // Разработка рудных месторождений: сб. научн. трудов. - 2005. - №88. - С.156-159.
15. Поркуян О.В. Повышение качества математического описания объекта автоматического управления на базе неполной и нечеткой информации / В.С. Моркун, С.Н. Барский, А.А. Цокуренько, О.В. Поркуян // Збагачення корисних копалин. – 2005. - №21(62) – С.105-114.
16. Поркуян О.В. Информационное обеспечение АСУ ТП обогатительных фабрик на базе ультразвуковых поверхностных волн Лэмба и Лява / В.С. Моркун, О.В. Поркуян // Качество минерального сырья: сб.научн. трудов. – Кривой Рог, 2005. - С. 469-477.
17. Поркуян О.В. Принципы адаптивного управления технологическим процессом обогащения железных руд на неформализованных данных / В.С. Моркун, А.А. Цокуренько, О.В. Поркуян, С.Н. Барский // Вестник Национального технического университета «ХПИ». Тематический выпуск «Системный анализ, управление и информационные технологии». - 2005. - №55. - С.127-132.
18. Поркуян О.В. Распространение волн Лява при контакте слоя с технологической средой / О.В. Поркуян, Т.С. Поркуян // Вісник Криворізького технічного університету : зб. наук. праць. – № 10. – 2005. – С. 67–71.
19. Поркуян О.В. Использование волн Лява для контроля характеристик среды / О.В. Поркуян // Качество минерального сырья: сб.научн. трудов. – Кривой Рог, 2005. - С. 102-117.
20. Поркуян О.В. Распространение упругих волн Лява при действии магнитного поля / О.В. Поркуян // Вісник Криворізького технічного університету : зб. наук. праць. – № 11. – 2006. – С. 44–49.
21. Поркуян О.В. Преобразование волн Лява на доменной границе ферромагнетика / О.В. Поркуян // Вісник Криворізького технічного університету : зб. наук. праць. – № 13. – 2006. – С. 156–158.
22. Поркуян О.В. Влияние доменной структуры ферромагнитного слоя на процесс распространения волны Лява / О.В. Поркуян // Вісник Криворізького технічного університету : зб. наук. праць. – № 14. – 2006. – С. 107–111.
23. Поркуян О.В. Поглощение волн Лява при действии магнитного поля / О.В. Поркуян // Вісник Криворізького технічного університету : зб. наук. праць. – № 5(15). – 2006. – С. 112–116.
24. Поркуян О.В. Затухание волн Лява при распространении в контакте с гетерофазной средой / О.В. Поркуян // Вісник Криворізького технічного університету : зб. наук. праць. – № 16. – 2007. – С. 200–204.
25. Поркуян О.В. Контроль гранулометрического состава железорудной пульпы на базе комбинированного использования объемных УЗВ и волн Лява / В.С. Моркун, О.В. Поркуян // Вісник Криворізького технічного університету : зб. наук. праць. – № 17. – 2007. – С. 224–230.
26. Поркуян О.В. Поглощение волн Лява в магнитном поле при контакте с гетерофазной средой / О.В. Поркуян // Разработка рудных месторождений : сб. научн. трудов. - 2007. - №91. - С. 266-269.
27. Поркуян О.В. Принципы прогнозирующего управления технологическим процессом обогащения железных руд на основе нечетких моделей / О.В. Поркуян // Вісник Криворізького технічного університету : зб. наук. праць. – № 18. – 2007. – С. 178–184.
28. Поркуян О.В. Контроль характеристик среды в технологических процессах обогащения железной руды на базе ультразвуковых поверхностных волн Лява / О.В. Поркуян, Е.И. Проказа. // Вісник Східноукраїнського національного університету імені В.Даля : науковий журнал. - №4(110), Ч.2. - 2007. - С.171-176.
29. Поркуян О.В. Использование поверхностных волн Лява в АСУ ТП обогатительных фабрик / О.В. Поркуян // Вісник Східноукраїнського національного університету імені В. Даля : науковий журнал. - №5(111), Ч.2. - 2007. - С.69-74.
30. Поркуян О.В. Программное обеспечение контроля содержания полезного компонента в железорудной пульпе на базе ультразвуковых волн Лява / О.В. Поркуян, Е.И. Проказа // Вісник Схід-

ноукраїнського національного університету імені В. Даля : науковий журнал. - №11(117), Ч.2. - 2007. - С.129-133.

31. Поркуян О.В. Некоторые проблемы повышения эффективности работы АСУТП и пути их решения / А.М. Давиденко, М.Д. Кац, О.В. Поркуян, В.И. Тошинский // Восточно-европейский журнал передовых технологий : науковий журнал. - 2007. - №4/5(28). - С. 39-44.

32. Поркуян О.В. Идентификация технологических объектов обогащительного производства на основе ортогональных моделей Гаммерштейна / В.С. Моркун, О.В. Поркуян, Е.И.Проказа / Наукові праці Донецького національного технічного університету. - 2008. - №15(131). – С. 109-114.

33. Поркуян О.В. Идентификация объектов управления на основе моделей Гаммерштейна относительно к процессам магнитной сепарации / О.В. Поркуян // Вісник Криворізького технічного університету : зб. наук. праць. – № 19. – 2007. – С. 223–228.

34. Поркуян О.В. Идентификация динамических объектов различной структуры на основе параллельных моделей Гаммерштейна / О.В. Поркуян, Е.В. Кузнецова // Восточно-европейский журнал передовых технологий: науковий журнал. – 2008. - №1 / 4 (31). – С. 47-50.

35. Поркуян О.В. Управление процессом магнитной сепарации в условиях неопределенности / В.С. Моркун, О.В. Поркуян // Вісник Севастопольського національного університету ядерної енергії та промисловості: зб.наук. праць. – 2008. - №1(25). – С.153-158.

36. Поркуян О.В. Оптимальное управление магнитным обогащением на основе гибридных моделей с обращенным нечетким блоком / В.С. Моркун, О.В. Поркуян // Качество минерального сырья: сб.научн. трудов. – Кривой Рог, 2008. – С.281-288.

37. Поркуян О.В. Влияние вариаций характеристик объектов технологических процессов обогащения железной руды на результаты идентификации на базе параллельно-рекурсивной модели Гаммерштейна/ О.В. Поркуян // Вісник Криворізького технічного університету : зб. наук. праць. – № 21. – 2008. – С. 144–146

38. Поркуян О.В. Параметрична ідентифікація на основі гібридної моделі з нечітким блоком / О.В. Поркуян // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля: науковий журнал. - №12(130),Ч.1.- 2008.- С.26-31.

Патенти

39. Пат. на корисну модель 27086 Україна, МПК G 01 N 29/02. Спосіб автоматичного контролю параметрів твердої фази пульпы / Моркун В.С., Поркуян О.В.- №200708421; заявл. 23.07.07; опубл.10.10.07, Бюл.№16.

40. Пат. на корисну модель 27846 Україна, МПК G 01 N 29/02. Спосіб автоматичного контролю параметрів твердої фази рудної суспензії / Моркун В.С., Подгородецький М.С., Поркуян О.В.- №200709502; заявл. 21.08.07; опубл. 12.11.07, Бюл.№18.

41. Пат. на корисну модель 27848 Україна, МПК В 03 В 13/00. Спосіб оптимального керування процесом магнітного збагачення залізних руд / Моркун В.С., Поркуян О.В.- №200709505; заявл.21.08.07; опубл. 12.11.07, Бюл. №18.

Тези доповідей

42. Поркуян О.В. Основные закономерности процесса распространения ультразвуковых волн в железорудной пульпе при наличии магнитного поля / В.С. Моркун, О.В. Поркуян // Материалы XVI научно-технической конференции «Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления»: материалы конференции. – Москва, МГИЭМ. - май, 2004. – С.157-158.

43. Поркуян О.В. Адаптивное управление технологическим процессом обогащения железных руд на неформализованных данных / В.С. Моркун, А.А. Цокурченко, О.В. Поркуян, С.Н. Барский // Матеріали 12 міжнародної конференції з автоматичного управління «Автоматика-2005» : матеріали конференції. – Харків, 30 травня-3 червня 2005. – С.62-64.

44. Поркуян О.В. Поверхностные волны Лява в практике контроля параметров технологических процессов горно-металлургического производства / В.С. Моркун, О.В. Поркуян // Материалы II Международной конференции «Стратегия качества в промышленности и образовании»: научный журнал Технического университета. - Т.1. - Болгария, Варна, 2-9 июня 2006. - С.188-190.

45. Поркуян О.В. Ультразвуковой контроль характеристик среды в технологических процессах обогащения железной руды / О.В. Поркуян, Е.И. Проказа // Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні тенденції розвитку інформаційних технологій в науці, освіті та економіці»: матеріали конференції. - Луганськ, 11-13 грудня 2006 р. – Луганськ: «Альма-матер». - 2006. - С. 205-207.
46. Поркуян О.В. Поверхностные волны Лява и Лэмба в системах контроля АСУ ТП обогатительных фабрик / Г.Н. Дмитриенко, А.Д. Доценко, О.В. Поркуян // Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні тенденції розвитку інформаційних технологій в науці, освіті та економіці»: матеріали конференції. - Луганськ, 11-13 грудня 2006 р. – Луганськ: «Альма-матер». - 2006. - С. 158-160.
47. Поркуян О.В. Прогнозирующее управление процессом магнитной сепарации железных руд в условиях неопределенности / В.С. Моркун, О.В. Поркуян, Е.И. Проказа // Матеріали XIV Міжнародної конференції з автоматичного управління «Автоматика-2007» : матеріали конференції. - Севастополь, 10-14 вересня 2007. – С. 82-84.
48. Поркуян О.В. Управление процессами магнитного обогащения железных руд на основе гибридных моделей Гаммерштейна/ В.С. Моркун, О.В. Поркуян // Автоматика 2008 : доклады 15 международной конференции. – Одесса, 23-26 сентября 2008. – С.370-373.

АНОТАЦІЯ

Поркуян О.В. Керування нелінійними динамічними об'єктами збагачувальних виробництв на основі гібридних моделей Гамерштейна. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за фахом 05.13.07 «Автоматизація процесів керування». – Криворізький технічний університет, Кривий Ріг, 2009.

Дисертація присвячена розв'язанню актуальної наукової проблеми підвищення ефективності автоматизованого керування процесами магнітного збагачення залізних руд шляхом удосконалення моделей та методів ідентифікації нелінійних динамічних об'єктів керування та контролю технологічних параметрів.

Розроблено методи оперативної ідентифікації об'єктів збагачувального виробництва на базі гібридних моделей класу Гамерштейна, що дозволяють здійснювати керування процесами магнітного збагачення в умовах неповної та нечіткої інформації про об'єкти керування. Розроблено методи ультразвукового контролю характеристик подрібнених матеріалів, які засновані на використанні виявлених закономірностей поширення ультразвукових хвиль Лява. На основі розроблених методів побудована система керування процесами магнітного збагачення залізних руд, яка дозволила досягти оптимальних техніко-економічних показників.

Ключові слова: автоматизоване керування, збагачувальні процеси, ідентифікація, нечітка інформація, ультразвуковий контроль, ультразвукові хвилі Лява.

АННОТАЦИЯ

Поркуян О.В. Управление нелинейными динамическими объектами обогатительных производств на основе гибридных моделей Гаммерштейна. – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени доктора технических наук по специальности 05.13.07 – автоматизация процессов управления. – Криворожский технический университет, Кривой Рог, 2009.

Диссертация посвящена решению актуальной научной проблемы - повышению эффективности автоматизированного управления процессами магнитного обогащения железных руд путем совершенствования методов и алгоритмов идентификации, методов контроля технологических параметров и управления.

Разработаны модели и алгоритмы оперативной идентификации объектов обогатительного производства на базе гибридных моделей Гаммерштейна, позволяющие осуществлять управление процессами магнитного обогащения в условиях нечеткой информации о свойствах руды и показателях технологического процесса.

Теоретически и экспериментально исследованы возможности применения гибридных (нечетко-четких) моделей Гаммерштейна для идентификации и управления процессами магнитного обогащения железных руд. Выявлены закономерности влияния динамических характеристик объекта управления на точность идентификации с помощью моделей Гаммерштейна, в результате чего доказана целесообразность использования этих моделей для реальных объектов управления обогатительных производств. Исследованы полиномы различных типов для ортогонализации моделей нелинейных динамических объектов обогатительных производств, что позволило получить зависимости погрешностей модели от вида ортогонального полинома. В ходе проведенных исследований установлено, что минимальная погрешность идентификации характеристик объектов обогатительных производств обеспечивается при использовании ортогональной рекурсивно-параллельной модели Гаммерштейна на базе трех ортогональных полиномов.

Показано, что в условиях неполного и нечеткого информационного обеспечения прогнозирующее управление процессами магнитного обогащения железных руд на основе гибридной модели Гаммерштейна, в которой нелинейный блок аппроксимирован нечеткой моделью Такаги-Сугэно, а линейный динамический блок представлен авторегрессионным уравнением, обеспечивает оптимальные параметры технологического процесса и заданные характеристики выходных продуктов. Разработаны алгоритмы идентификации нелинейных динамических объектов обогатительных производств в нечетких условиях на основе гибридных моделей в режиме реального времени.

Разработаны методы контроля характеристик измельченных материалов: содержания полезного компонента в твердой фазе пульпы, содержания частиц контрольного класса крупности измельченного материала в пульпе, плотности пульпы и концентрации твердой фазы в пульпе. Методы контроля основаны на использовании выявленных закономерностей распространения ультразвуковых волн Лява по слою, который контактирует с гетерофазной средой, находящейся под действием магнитного поля. Осуществлено математическое описание процессов распространения волн Лява в системе, которая контактирует с разными средами: твердыми, жидкими, двухфазными, что позволило выявить зависимости характеристик волн от свойств сред, в которых они распространяются. Получены аналитические зависимости величины затухания волн Лява от плотности, состава и других характеристик гетерофазных сред, на основе которых были разработаны методы контроля этих характеристик.

Исследовано влияние магнитного поля на закономерности распространения и затухания волн Лява. Выявлен эффект возникновения под действием магнитного поля дополнительных поперечных и продольных колебаний в волне Лява, распространяющейся по поверхности, которая контактирует с потоком железорудной пульпы, при этом волновые числа новых волн определяются ее физико-механическими характеристиками. Это позволило разработать теоретические основы и методы ультразвукового контроля основных технологических показателей железорудной пульпы – содержания полезного компонента и твердой фазы в пульпе - на базе измерений параметров волн Лява в магнитном поле, а также метод определения концентрации частиц контрольного класса крупности в пульпе, основанный на измерении параметров объемных ультразвуковых колебаний и волн Лява, распространяющихся по поверхностям, которые контактирует с пульпой.

Синтезировано управление обогатительными процессами на основе гибридных моделей Гаммерштейна, что позволило получить стабильные заданные показатели качества продукта при заданной производительности по конечному продукту. Исследованы алгоритмы управления нелинейными динамическими объектами обогатительных линий на основе гибридных моделей Гаммерштейна при заданных ограничениях на управляющие воздействия. Построена система управления процессами магнитного обогащения железных руд, формирование управляющих воздействий в которой производится на основании полученной четкой и нечеткой информации о характеристиках объекта управления, в том числе на основе информации об изменении коэффициента поглощения волны Лява под влиянием магнитного поля и коэффициента поглощения объемной ультразвуковой волны как функций концентрации твердой фазы в пульпе, содержащего магнитного железа в твердой фазе пульпы и концентрации частиц контрольного класса крупности. Разработаны алгоритмы управления на основе нечетких и гибридных моделей.

Предложенные технические и алгоритмические решения нашли применение в инженерной практике проектирования и внедрения новых систем контроля и автоматизированного управления разными технологическими процессами.

Ключевые слова: автоматизированное управление, обогатительные процессы, идентификация, нечеткая информация, ультразвуковой контроль, ультразвуковые волны Лява.

ANNOTATION

Porkuyan O.V. Control of nonlinear dynamic objects of concentrating productions on the basis of Hammerstein hybrid models. - Manuscript.

Thesis for competition of the scientific doctor's degree of the technical science on speciality 05.13.07 "Automation of control processes". – Kryvyi Rig Technical University, Kryvyi Rig, 2009.

A thesis is devoted to solving of the urgent scientific problem of increasing efficiency of automatic control of the magnetic iron ore concentrating processes by improving methods and algorithms of identification and control of technological parameters. The methods of operative identification of objects of concentrating production are developed on the base of Hammerstein hybrid models. The methods of ultrasonic control of the characteristics of ground materials based on the use of the discovered regularities of spreading of Love ultrasonic waves. The system of control of the processes of magnetic iron ore dressing has been created. Forming the control influences in the system is performed on the basis of the received precise and imprecise information about characteristics of the object under control.

Keywords: automatic control, iron ore dressing, identification, fuzzy information, ultrasonic control, ultrasonic Love waves.