

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

ШВЕЦЬ ДМИТРО ВАЛЕРІЙОВИЧ



УДК 681.51:622.73

**АВТОМАТИЗОВАНЕ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ПОДРІБНЕННЯ
ЗАЛІЗИСТИХ КВАРЦИТІВ З ВИЗНАЧЕННЯМ ЇХ ВЛАСТИВОСТЕЙ
ЯДЕРНОФІЗИЧНИМИ ТА МАГНІТОМЕТРИЧНИМИ МЕТОДАМИ**

Спеціальність 05.13.07 – автоматизація процесів керування

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Кривий Ріг – 2024

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Криворізькому національному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Азарян Альберт Арамаїсович,
Криворізький національний університет
Міністерства освіти і науки України,
професор кафедри моделювання
та програмного забезпечення.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Алексєєв Михайло Олександрович,
Національний технічний університет
«Дніпровська політехніка»
Міністерства освіти і науки України,
завідувач кафедри програмного
забезпечення комп'ютерних систем,

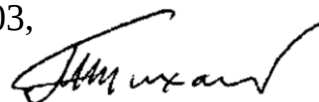
доктор технічних наук, професор
Кондратець Василь Олександрович,
Центральноукраїнський національний
технічний університет
Міністерства освіти і науки України,
професор кафедри автоматизації
виробничих процесів.

Захист відбудеться **«20» червня 2024 р. о 13:00** годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 09.052.03 у Криворізькому національному університеті за адресою: вул. В. Матусевича, 11, м. Кривий Ріг, 50027.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Криворізького національного університету за адресою: вул. Гірничих інженерів, 37, м. Кривий Ріг, 50002.

Автореферат розісланий « » травня 2024 року.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 09.052.03,
кандидат технічних наук, доцент



М. П. Тиханський

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Видобуток і переробка руд чорних металів є однією з найважливіших складових економіки України. За запасами залізної руди Україна посідає перше місце, а з виробництва залізорудної продукції – концентрату і продуктів його згрудкування – сьоме місце у світі.

У цей час конкурентоспроможною на світовому ринку вважається залізорудна продукція, яка містить щонайменше 67–68 % заліза. Аналіз конкурентоспроможності гірничо-збагачувальних комбінатів Кривбасу показує, що на більшості з них якість концентрату не досягає вимог світового ринку через недостатньо високий вміст у ньому заліза та його значне коливання. Ситуація погіршується також великою енергоємністю виробництва залізорудного концентрату, що становить близько 50 % собівартості продукції.

Високий рівень конкуренції на світових ринках збуту зумовлює необхідність підвищення якості залізорудної продукції, у зв'язку з чим тенденція до підвищення якості концентрату найближчими роками зберігатиметься.

У дисертації з метою підвищення якості концентрату та зниження втрат розглядається розроблення математичних моделей та автоматизованої системи керування технологічним процесом подрібнення залізистих кварцитів на основі визначення їхніх хіміко-мінералогічних властивостей із використанням синергії ядерно-фізичних і магнітометричних методів.

Сьогодні гостро стоять завдання контролю технологічного процесу подрібнення (ТПП) залізорудної сировини (ЗРС): зниження витрат на виробництво залізорудного концентрату, стабілізації якості вихідної сировини, мінімізації втрат заліза у хвостах збагачення, збільшення обсягів виробництва на гірничо-збагачувальних комбінатах.

Перша стадія ТПП рудозбагачувальної фабрики є складним об'єктом керування з достатньо інтенсивними інформаційними потоками. Наявність рециклів ускладнює процес контролю хіміко-мінералогічних властивостей вхідної ЗРС. Наприклад, зміни в рециклі першої стадії ТПП передаються в наступні, унаслідок чого процес збагачення руди в технологічній лінії порушується. Інерційність цієї стадії також значно впливає на процес збагачення – запізнення в часі між надходженням рудопотоку на вхід та отриманням концентрату на виході може сягати двох годин. На цей момент інформаційне забезпечення першої стадії ТПП доволі обмежене, що пов'язано зі складністю прямого контролю (за допомогою датчиків і контрольних приладів) деяких параметрів ЗРС, а саме: ступеня подрібнення, міцності, щільності, абразивності тощо. Ще одним недоліком керування та контролю цієї стадії є те, що прийняття рішень щодо переналаштування поточних характеристик приймають технологи, тобто якість рішень значною мірою визначається людським фактором, що не є гарантією оптимального керування.

Одним із можливих способів підвищення якості концентрату і зниження втрат заліза є розроблення нових методів і засобів контролю та керування ТПП на першій стадії з урахуванням стохастичності хіміко-мінералогічних властивостей вихідної ЗРС.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертацію автор виконав на кафедрі моделювання та програмного забезпечення Криворізького національного університету в межах науково-дослідних держбюджетних тем «Розробка пристрою неруйнівного контролю фізико-хімічних властивостей гірських порід в експлуатаційних свердловинах» (№ ДР 0118U000120) та «Методи і програмно-технічні комплекси контролю і управління якістю залізорудної сировини при видобутку і переробці» (№ ДР 0120U102310).

Мета і завдання дослідження.

Мета дисертації полягає в підвищенні ефективності та якості переробки ЗРС на першій стадії ТПП на основі побудови системи автоматизованого керування процесом переробки ЗРС шляхом оперативного контролю хіміко-мінералогічних властивостей руди в умовах їхньої стохастичності з використанням ядерно-фізичних і магнітометричних методів.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі завдання:

1. Проаналізувати сучасний стан питань керування ТПП ЗРС та обґрунтувати актуальність і практичну значущість розроблення автоматизованої системи керування на основі визначення хіміко-мінералогічних властивостей руди в умовах їхньої стохастичності.

2. Розробити математичну модель першої стадії ТПП ЗРС з урахуванням впливу хіміко-мінералогічних властивостей ЗРС в умовах їхньої стохастичності.

3. Розробити модель стабілізації вихідних змінних першої стадії ТПП ЗРС шляхом дії керуючих впливів на основі визначення хіміко-мінералогічних властивостей руди із застосуванням елементів нечіткої логіки.

4. Розробити автоматизовану систему керування першою стадією ТПП залістистих кварцитів на основі інформації про хіміко-мінералогічні властивості ЗРС в умовах їхньої стохастичності.

Об'єкт дослідження – процес автоматизованого керування першою стадією ТПП ЗРС рудозбагачувальної фабрики.

Предмет дослідження – моделі та методи для побудови автоматизованої системи керування першою стадією ТПП ЗРС рудозбагачувальної фабрики, яка здійснює стабілізацію вмісту заліза на виході магнітного сепаратора за рахунок керування завантаженням млина залежно від хіміко-мінералогічних характеристик руди.

Методи дослідження. Для розв'язання поставлених завдань у праці використані: аналіз вітчизняного та зарубіжного досвіду; систематизація наявних підходів і методів оптимізації ТПП ЗРС для обґрунтування актуальності, мети і завдань дослідження; методи математичної статистики для опрацювання результатів експериментів; методи системного аналізу та методи оптимального керування при розробленні алгоритмів керування ТПП ЗРС; комп'ютерні інформаційні технології для моделювання ТПП з використанням апарату нечіткої логіки.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що:

1. Уперше для оптимального керування процесом завантаження млина використовується інформація про стохастичні властивості ЗРС, яка отримується завдяки синергії ядерно-фізичних і магнітометричних методів оперативного контролю, що уможливорює вдосконалення інформаційного забезпечення першої

стадії ТПП ЗРС за рахунок зменшення часу отримання даних на 2 години порівняно з традиційними методами хімічного аналізу.

2. Отримав подальший розвиток метод оптимізації густинних режимів у млині, заснований на поданні води залежно від міцності ЗРС як функції від вмісту в ній загального заліза, що дає змогу підвищити ефективність подрібнення ЗРС та стабілізувати гранулометричний склад на виході млина.

3. На основі теоретико-ймовірнісного підходу вдосконалено математичну модель першої стадії ТПП, що названа «м'якою», яка, на відміну від наявних, дає можливість урахувати час транспортного запізнення перероблюваної ЗРС і дозволяє зменшувати або збільшувати кількість змінних, що в подальшому уможливорює додавання нових методів та приладів контролю параметрів технологічного процесу і підвищувати точність функціонування математичної моделі.

Практичне значення одержаних результатів:

1. Розроблено автоматизовану систему керування першою стадією ТПП ЗРС рудозбагачувальної фабрики шляхом застосування алгоритму програмно-технічної реалізації керування процесом переробки ЗРС на першій стадії ТПП. Створена система функціонує на основі ядерно-фізичних і магнітометричних методів контролю вмісту заліза в ЗРС з урахуванням стохастичності її хіміко-мінералогічних властивостей та забезпечує оптимальне подрібнення ЗРС у млині й розкриття рудних зерен, що дає можливість підвищити якість концентрату на 1 %.

2. Практичне значення наукових розробок підтверджено довідками щодо доцільності впровадження результатів дисертаційного дослідження на ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг». Очікуваний економічний ефект становитиме понад 290 млн грн на рік.

3. Отримані результати впроваджені і використовуються у навчальному процесі Криворізького національного університету.

Особистий внесок здобувача. Наукові результати роботи автор отримав самостійно. Здобувач є автором наукової ідеї, теоретичних та експериментальних досліджень, включаючи теоретичні результати й наукову новизну, винесені на захист.

Апробація результатів дисертації. Основні результати досліджень, представлені в дисертації, доповідалися та обговорювалися на міжнародних і всеукраїнських науково-технічних та науково-практичних конференціях: Міжнародній науково-технічній конференції «Розвиток промисловості та суспільства» (м. Кривий Ріг, 2020), V Міжнародній науково-практичній конференції «Science, society, education: topical issues and development prospects» (м. Харків, 2020), XV Міжнародній науково-практичній конференції «Modern Science And Practice» (м. Варна, Болгарія, 2020), XIII Міжнародній науково-практичній конференції здобувачів вищої освіти та молодих науковців «Наука, освіта, суспільство очима молодих» (м. Рівне, 2020), XVI Всеукраїнській науково-практичній вебконференції аспірантів, студентів та молодих вчених «Комп'ютерні інтелектуальні системи та мережі» (м. Кривий Ріг, 2023), Міжнародній науково-технічній конференції «Розвиток промисловості та суспільства» (м. Кривий Ріг, 2023).

Публікації. Основні наукові та практичні результати дисертації опубліковані у 21 друкованій роботі (з них 11 – без співавторства), зокрема 3 статтях в журналах, що входять до наукометричної бази SCOPUS, 7 статтях у спеціалізованих (фахових) наукових виданнях, 6 доповідях – у матеріалах наукових конференцій. Пріоритет основних наукових і технічних рішень, що реалізують запропоновані в дисертації принципи керування процесом подрібнення залізної руди, захищений 5 патентами України.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку літературних джерел та додатків. Обсяг дисертації – 219 сторінок, зокрема 154 сторінки основного тексту, 64 рисунки, 14 таблиць, перелік використаних джерел зі 121 найменування на 14 сторінках, додатки на 32 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано вибір теми дисертації, її актуальність, сформульовано ідею роботи, мету і завдання дослідження, визначено об'єкт, предмет і методи досліджень, сформульовано наукову новизну та основні результати дисертації, відомості про апробацію результатів та публікації досліджень, структуру дисертації.

Представлена робота присвячена розв'язанню актуального наукового завдання дослідження та розроблення моделей та методів автоматизації ТПП залізистих кварцитів на основі визначення їхніх хіміко-мінералогічних властивостей в умовах їхньої стохастичності з використанням синергії магнітометричних і ядерно-фізичних методів. Розроблений комплекс науково-технічних рішень забезпечує виконання вимог, що встановлюються для кінцевого продукту рудозбагачувальних фабрик – залізорудного концентрату, підвищення його якості шляхом зниження коливання вмісту заліза в ньому.

У першому розділі проведено аналіз сучасних методів автоматизованого керування ТПП ЗРС в умовах рудозбагачувальних фабрик.

Істотний внесок у розв'язання науково-технічних завдань керування процесами переробки ЗРС зробили вітчизняні та зарубіжні вчені: А. А. Азарян, М. О. Алексєєв, Л. М. Барський, В. О. Бунько, В. Ф. Бизов, В. І. Голово, В. В. Кармазін, Ю. Г. Качан, В. З. Козін, В. О. Кондратець, І. С. Конох, В. І. Корнієнко, Є. В. Кочура, Г. М. Куваєв, А. І. Купін, О. М. Марюта, А. М. Мацуй, Л. І. Мещеряков, І. К. Младецький, В. С. Моркун, Н. В. Моркун, В. М. Назаренко, О. В. Поркуян, В. С. Процуто, В. В. Ткачов, А. Є. Троп, В. П. Хорольський, Л. П. Шупов, В. П. Щокін, Д. Ватсон, А. Лінч, Д. Паунолл. У працях цих учених розглянуто основні принципи та критерії побудови автоматизованої системи керування ТПП, досліджено статичні та динамічні характеристики технологічних об'єктів керування, співвідношення між показниками на різних стадіях збагачення ЗРС, а також низку інших аспектів автоматизації.

Установлено, що приріст вмісту заліза на першій стадії магнітної сепарації вдвічі перевищує сумарний приріст вмісту заліза на другій і третій стадіях магнітної сепарації, також на неї припадає понад 50 % сумарних втрат заліза, що зумовлює необхідність автоматизації саме першої стадії подрібнення руди на рудозбагачувальній фабриці.

Продемонстровано, що однією з причин коливання якості залізорудного концентрату є стохастичність хіміко-мінералогічних властивостей ЗРС у живленні

першої стадії подрібнення, а також запізнення надходження інформації про стан перебігу процесу подрібнення. Отримані під час контролю вхідних хіміко-мінералогічних властивостей ЗРС дані характеризують минулий етап виробництва та не дають змоги формувати ефективні керуючі впливи з урахуванням поточних показників вхідної руди. Відсутність урахування цих факторів наявними системами автоматизованого керування не дозволяє забезпечити ефективне керування першою стадією ТПП ЗРС.

Зазначені недоліки систем автоматизованого керування ТПП ЗРС актуалізують необхідність розроблення системи, що дає можливість контролювати хіміко-мінералогічні властивості вхідної ЗРС в оперативному режимі.

У другому розділі проведено аналіз першої стадії ТПП ЗРС, показано, що за виділеними властивостями цей процес належить до складних об'єктів. Тому для керування таким процесом потрібна наявність математичної моделі, що уможливить розробку необхідного алгоритму керування. Математичне моделювання включало етап структурного синтезу у вигляді вибору мультиплікативної структури моделі, що дає можливість як адаптуватися до змінюваних умов функціонування першої стадії ТПП ЗРС, так і оперативно проводити ідентифікацію параметрів за допомогою методу найменших квадратів з урахуванням зміни стану протікання процесу, а також динаміки за допомогою транспортних запізнювань.

Структуру математичної моделі першої стадії ТПП ЗРС у скалярному вигляді задано як

$$y(t) = y_0(t) \cdot \varepsilon \cdot \prod_{i=1}^N x_i(t - \tau_i)^{a_i}, \quad (1)$$

де $y(t)$ – вихідна змінна в момент часу t ; $x_i(t - \tau_i)$ – вихідні змінні в момент часу $t - \tau_i$, $i = 1, \dots, N$; τ_i – запізнювання змінної x_i відносно вихідної змінної; $y_0(t)$, a_i , ($i = 1, 2, \dots, N$) – параметри; ε – неконтрольоване збурення.

Структура моделі (1) дозволяє скористатися неадаптивним алгоритмом ідентифікації. Завдання неадаптивної ідентифікації зводиться до вирішення системи рівнянь

$$y_0 \cdot \prod_{i=1}^N x_{im}^{a_i} = y_m, \quad (m = 1, 2, \dots, M) \quad (2)$$

шляхом мінімізації відповідного функціонала.

Ідентифікація параметрів відбувається шляхом мінімізації дії неконтрольованих збурень на основі застосування статистичного матеріалу за допомогою методу найменших квадратів.

У результаті математична модель (1) набуває вигляду

$$y(t) = y_0^* \cdot \prod_{i=1}^N x_i(t - \tau_i^*)^{a_i^*}, \quad (3)$$

де $y_0^* = e^{a_0^*}$; a_0^* , a_i^* – величини параметрів, знайдені за допомогою методу найменших квадратів, $i = 1, \dots, N$; τ_i^* – уточнені величини запізнювань, $i = 1, \dots, N$.

Отже, після ідентифікації параметрів збурення вважаються відсутніми.

Математична модель є неперервною за часом. При цьому повинен безперервно підраховуватися параметр, який характеризує стан першої стадії ТПП і тим самим враховує дію неконтрольованих збурень за формулою

$$y_0(t) = \frac{y(t)}{\prod_{i=1}^N x_i(t-\tau_i^*)^{a_i}}. \quad (4)$$

Графік функції (4) залежно від часу описує деяку неперервну траєкторію, яка визначає дрейф стану першої стадії ТПП ЗРС. Аналіз графіка функції (4) дозволяє передбачити стан першої стадії ТПП ЗРС на момент приходу керуючого впливу з урахуванням величини запізнення.

При цьому величини вмісту заліза в ЗРС і твердість ЗРС є випадковими величинами, які можна охарактеризувати диференціальною функцією розподілу

$$f(\alpha, K) \quad (5)$$

Структурний аналіз I стадії ТПП дає можливість у статичному випадку задати математичну модель I стадії ТПП в мультиплікативній формі

$$\rho_c = \rho_{c0} \cdot \alpha^{m_\alpha} \cdot K^{m_K} \cdot Q_p^{m_{Q_p}} \cdot B_M^{m_{B_M}} \cdot B_K^{m_{B_K}} \cdot \varepsilon_1, \quad (6)$$

$$\beta_{пп} = \beta_{пп0} \cdot \alpha^{n_\alpha} \cdot K^{n_K} \cdot Q_p^{n_{Q_p}} \cdot B_M^{n_{B_M}} \cdot B_K^{n_{B_K}} \cdot \varepsilon_2, \quad (7)$$

де ρ_c – густина пульпи на зливі класифікатора, кг/м³; α – вміст заліза в ЗРС (залізо загальне та магнітне), %; K – міцність ЗРС, бали; Q_p – витрати ЗРС у млин, т/год; B_M – витрати води в млин, м³/год; B_K – витрати води в жолоб класифікатора, м³/год; $m_\alpha, m_K, m_{Q_p}, m_{B_M}, m_{B_K}$ – параметри, що визначають еластичність вхідних змінних за густиною зливу класифікатора; $n_\alpha, n_K, n_{Q_p}, n_{B_M}, n_{B_K}$ – параметри, що визначають еластичність вхідних змінних за вмістом заліза в промпродукті; $\rho_{c0}, \beta_{пп0}$ – параметри, що характеризують стан перебігу I стадії ТПП за густиною зливу класифікатора та вмістом заліза в промпродукті; $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – неконтрольовані збурення.

Використання статистичного матеріалу дає змогу провести ідентифікацію параметрів моделі шляхом мінімізації відповідного функціонала, описаного вище, із застосуванням методу найменших квадратів.

Для зручності знаходження диференціальних функцій розподілу вихідних змінних (6) і (7) доцільно представити ці формули у вигляді

$$\rho_c = U_\rho \alpha^{m_\alpha} K^{m_K}, \quad (8)$$

$$\beta_{пп} = U_\beta \alpha^{n_\alpha} K^{n_K}, \quad (9)$$

де $U_\rho = \rho_{c0} Q_p^{m_{Q_p}} B_M^{m_{B_M}} B_K^{m_{B_K}}$; $U_\beta = \beta_{пп0} Q_p^{n_{Q_p}} B_M^{n_{B_M}} B_K^{n_{B_K}}$.

Тоді для густини зливу класифікатора I стадії ПК, згідно з (6) і (8), диференціальна функція розподілу набуде вигляду

$$g_\rho(\rho_c) = \frac{1}{m_K U_\rho} \int_0^\infty f \left[\alpha, \left(\frac{\rho_c}{U_\rho \alpha^{m_\alpha}} \right)^{\frac{1}{m_K}} \right] \left(\frac{\rho_c}{U_\rho \alpha^{m_\alpha}} \right)^{\frac{1}{m_K}-1} \frac{d\alpha}{\alpha^{m_\alpha}}. \quad (10)$$

Своєю чергою, для вмісту заліза в промпродукті I стадії МС, згідно з (7) і (9), диференціальна функція розподілу набуде вигляду

$$g_{\beta}(\beta_{\text{пп}}) = \frac{1}{n_K U_{\beta}} \int_0^{\infty} f \left[\alpha, \left(\frac{\beta_{\text{пп}}}{U_{\beta} \alpha^{n_{\alpha}}} \right)^{\frac{1}{n_K}} \right] \left(\frac{\beta_{\text{пп}}}{U_{\beta} \alpha^{n_{\alpha}}} \right)^{\frac{1}{n_K}-1} \frac{d\alpha}{\alpha^{n_{\alpha}}}. \quad (11)$$

Математичні сподівання густини зливу класифікатора І стадії ПК та вмісту заліза в промпродукті І стадії МС, з урахуванням (10) і (11), запишуться відповідно у вигляді

$$M[\rho_c] = \frac{1}{m_K U_{\rho}} \int_0^{\infty} \eta \left[\int_0^{\infty} f \left[\alpha, \left(\frac{\eta}{U_{\rho} \alpha^{m_{\alpha}}} \right)^{\frac{1}{m_K}} \right] \left(\frac{\eta}{U_{\rho} \alpha^{m_{\alpha}}} \right)^{\frac{1}{m_K}-1} \frac{d\alpha}{\alpha^{m_{\alpha}}} \right] d\eta, \quad (12)$$

$$M[\beta_{\text{пп}}] = \frac{1}{n_K U_{\beta}} \int_0^{\infty} \eta \left[\int_0^{\infty} f \left[\alpha, \left(\frac{\eta}{U_{\beta} \alpha^{n_{\alpha}}} \right)^{\frac{1}{n_K}} \right] \left(\frac{\eta}{U_{\beta} \alpha^{n_{\alpha}}} \right)^{\frac{1}{n_K}-1} \frac{d\alpha}{\alpha^{n_{\alpha}}} \right] d\eta. \quad (13)$$

Дисперсії густини зливу класифікатора І стадії ПК та вмісту заліза в промпродукті І стадії МС, з урахуванням (12) і (13), запишуться відповідно у вигляді

$$D[\rho_c] = \frac{1}{m_K U_{\rho}} \int_0^{\infty} (\eta - M[\rho_c])^2 \left[\int_0^{\infty} f \left[\alpha, \left(\frac{\eta}{U_{\rho} \alpha^{m_{\alpha}}} \right)^{\frac{1}{m_K}} \right] \left(\frac{\eta}{U_{\rho} \alpha^{m_{\alpha}}} \right)^{\frac{1}{m_K}-1} \frac{d\alpha}{\alpha^{m_{\alpha}}} \right] d\eta, \quad (14)$$

$$D[\beta_{\text{пп}}] = \frac{1}{n_K U_{\beta}} \int_0^{\infty} (\eta - M[\beta_{\text{пп}}])^2 \left[\int_0^{\infty} f \left[\alpha, \left(\frac{\eta}{U_{\beta} \alpha^{n_{\alpha}}} \right)^{\frac{1}{n_K}} \right] \left(\frac{\eta}{U_{\beta} \alpha^{n_{\alpha}}} \right)^{\frac{1}{n_K}-1} \frac{d\alpha}{\alpha^{n_{\alpha}}} \right] d\eta. \quad (15)$$

Отже, за формулами (12), (13), (14), (15) можна знайти числові характеристики вихідних змінних І стадії ТПП, які характеризують їх середні значення (12), (13) та розсіювання відносно середнього значення (14), (15) залежно від стохастичних властивостей ЗРС на вході І стадії ТПП – вмісту заліза та твердості.

Для розроблення керування необхідно мати модель І стадії ТПП

$$\vec{Y} = \vec{F}(\vec{X}, \vec{U}), \quad (16)$$

інформацію про вихідні змінні $\vec{X}$ і мету керування як задане значення вихідних змінних $\vec{Y}^*$.

Представлення моделі у векторному вигляді (16) є узагальненням результатів побудови моделі для кожної компоненти вектора вихідної змінної $\vec{Y}$. Крім того, у формулі (16) окремо виділено некеровані $\vec{X}$ та керовані $\vec{U}$ вихідні змінні.

Отже, ситуація, що складається в результаті керування, характеризується трійкою

$$\langle \vec{X}, \vec{Y}, \vec{Y}^* \rangle. \quad (17)$$

Досягнення мети керування $\vec{Y}^*$ зводиться до виконання цільових співвідношень, які доцільно записати в канонічній векторній формі

$$\vec{Y}^*: \begin{cases} \vec{H}(\vec{X}, \vec{Y}) \geq 0, \\ \vec{G}(\vec{X}, \vec{Y}) = 0, \\ \vec{Q}(\vec{X}, \vec{Y}) \rightarrow \min, \end{cases} \quad (18)$$

де $\vec{H}(\vec{X}, \vec{Y}) = (h_1(\vec{X}, \vec{Y}), h_2(\vec{X}, \vec{Y}), \dots, h_{k_1}(\vec{X}, \vec{Y}))$ – обмеження типу нерівностей,

$\vec{G}(\vec{X}, \vec{Y}) = (g_1(\vec{X}, \vec{Y}), g_2(\vec{X}, \vec{Y}), \dots, g_{k_2}(\vec{X}, \vec{Y}))$ – обмеження типу рівностей,

$\vec{Q}(\vec{X}, \vec{Y}) = (q_1(\vec{X}, \vec{Y}), q_2(\vec{X}, \vec{Y}), \dots, q_{k_3}(\vec{X}, \vec{Y}))$ – функція якості.

Реалізувати умови (18) можна лише за допомогою зміни вихідних змінних І стадії ТПП шляхом відповідного вибору керування $\vec{U}$. У результаті має місце екстремальне завдання

$$\min_{\vec{U} \in \Omega} \vec{Q}(\vec{X}, \vec{F}(\vec{X}, \vec{U})), \quad (19)$$

де

$$\Omega: \begin{cases} \vec{H}(\vec{X}, \vec{F}(\vec{X}, \vec{U})) \geq 0, \\ \vec{G}(\vec{X}, \vec{F}(\vec{X}, \vec{U})) = 0. \end{cases}$$

Розв'язанням задачі (19) є оптимальне керування $\vec{U}^*$.

Отже, з урахуванням того, що І стадія ТПП є квазістатичним об'єктом керування, завдання розроблення керування полягає в мінімізації функцій $q_1(\vec{X}, \vec{Y}), q_2(\vec{X}, \vec{Y}), \dots, q_{k_3}(\vec{X}, \vec{Y})$ шляхом зміни керуючих впливів $u_1, u_2, \dots, u_M$, які задовольняють обмеженням Ω .

Для оптимальної стабілізації густини зливу класифікатора з урахуванням стохастичності властивостей ЗРС необхідно мінімізувати функціонал

$$\Phi_\rho(U_\rho) = \int_0^\infty (\rho_c - \hat{\rho}_c)^2 g_\rho(\rho_c) d\rho_c \rightarrow \min_{U_\rho}, \quad (20)$$

де $\hat{\rho}_c$ – стабілізована величина густини зливу класифікатора І стадії ПК.

Своєю чергою, для оптимальної стабілізації вмісту заліза в промпродукті І стадії МС необхідно мінімізувати функціонал

$$\Phi_\beta(U_\beta) = \int_0^\infty (\beta_{\text{пп}} - \hat{\beta}_{\text{пп}})^2 g_\beta(\beta_{\text{пп}}) d\beta_{\text{пп}} \rightarrow \min_{U_\beta}, \quad (21)$$

де $\hat{\beta}_{\text{пп}}$ – стабілізована величина вмісту заліза в промпродукті І стадії МС.

Застосування теоретико-імовірнісного підходу уможливило оцінку ймовірнісних характеристик вихідних змінних першої стадії ТПП: густини зливу класифікатора першої стадії подрібнення і класифікації та вмісту заліза в промпродукті першої стадії магнітної сепарації, викликаних стохастичністю характеристик вхідної ЗРС – вмістом заліза в руді та її міцністю. Із застосуванням

результатів моделювання першої стадії ТПП сформульовано критерій стохастичної оптимальної стабілізації. В умовах наявних обмежень функціонування першої стадії ТПП ЗРС здійснено розроблення алгоритму стохастичного керування ним з урахуванням необхідних обмежень.

Для підтвердження можливості використання розробленого алгоритму керування проведено імітаційне моделювання, за результатами якого сформовано оптимальні величини керуючих впливів.

Проведено аналіз методів контролю хіміко-мінералогічних властивостей ЗРС з використанням взаємодії гамма-випромінювання з речовиною. Досліджено фактори, що впливають на вибір ядерно-фізичних методів контролю властивостей ЗРС. Показано, що ядерно-фізичні методи контролю вмісту заліза в ЗРС є ефективним способом вимірювання вмісту загального заліза в кусковій руді. Водночас магнітометричні методи контролю дають можливість визначати частку заліза в ЗРС, пов'язану з магнетитом. Синергія ядерно-фізичних і магнітометричних методів сприяє підвищенню якості контролю хіміко-мінералогічних властивостей ЗРС на першій стадії подрібнення та класифікації.

Установлено взаємозв'язок між характеристиками міцності ЗРС Криворізького басейну і вмістом загального заліза в ній. Проведені експерименти продемонстрували наявність лінійної залежності з коефіцієнтом детермінації 0,78. Отримана аналітична формула дає можливість за масовою часткою загального заліза в ЗРС оцінити її міцність

$$K = 8,51 + 0.223Fe, \quad (22)$$

що підтверджує графік на рис. 1.

Перевірка значущості залежності згідно з критерієм Фішера демонструє статистичну значущість на рівні надійності 0,95 з оцінкою 4,6. Отриманий взаємозв'язок підводить до висновку про можливість керування подачею вхідної ЗРС на першій стадії подрібнення з метою досягнення оптимального гранулометричного складу подрібненої руди.

Установлено залежність інтенсивності розсіяного та поглиненого гамма-випромінювання від вмісту заліза у ЗРС. Отримані результати демонструють доцільність використання інтенсивності розсіяного гамма-випромінювання в області низького вмісту загального заліза в ЗРС (концентрація загального заліза менше 25 %), у той час як інтенсивність поглиненого гамма-випромінювання дає змогу точніше визначати вміст загального заліза в рудах із показником вмісту заліза понад 25 %. Отримана аналітична формула уможливіє реалізацію на практиці дуального підходу до вимірювання ядерно-фізичними методами вмісту заліза в ЗРС

$$q = \begin{cases} 1739N^{-0.569} & \text{(для розсіяного гамма – випромінювання),} \\ 0,0857N^{0.637} & \text{(для поглиненого гамма – випромінювання).} \end{cases} \quad (23)$$

Відповідні графіки наведено на рис. 2.

Застосування критерію Фішера для цієї залежності демонструє статистичну значимість на рівні надійності 0,95 з оцінкою 4,96.

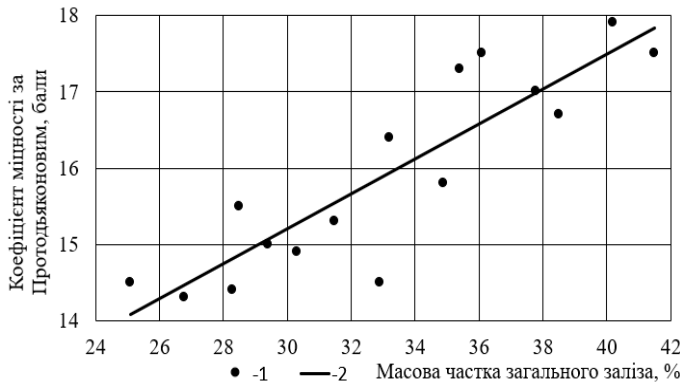


Рис. 1. Залежність коефіцієнта міцності ЗРС за Протодяконовим від масової частки загального заліза (1 – експериментальні дані, 2 – апроксимація)

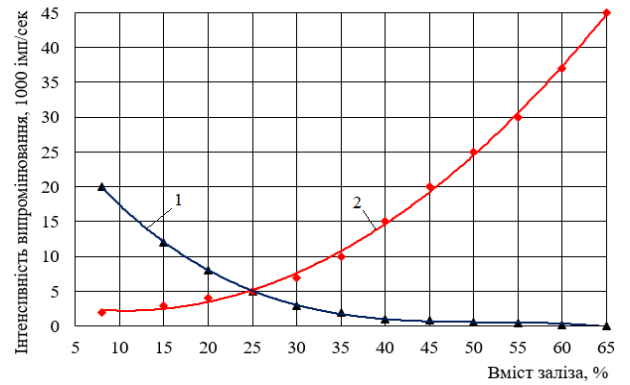


Рис. 2. Залежності інтенсивності розсіяного та поглиненого гамма-випромінювання від вмісту заліза в ЗРС (1 – розсіяне, 2 – поглинене гамма-випромінювання)

Розроблено математичну модель взаємодії гамма-випромінювання із ЗРС в умовах центральної геометрії з урахуванням коефіцієнта альbedo та геометричних параметрів: відстані між джерелом випромінювання та детектором, а також відстані між детектором і відбиваючою поверхнею (рис. 3). Отримано вираз, що дає можливість розрахувати інтенсивність розсіяного гамма-випромінювання, відбитого від поверхні:

$$N_p = 2\pi Q A \sin^2 \alpha, \quad (24)$$

де N_p – інтенсивність потоку гамма-випромінювання, відбитого від поверхні; Q – інтенсивність джерела гамма-випромінювання; A – коефіцієнт альbedo, що характеризує ступінь розсіювання потоку гамма-випромінювання від поверхні; α – кут розсіювання джерела гамма-випромінювання.

З огляду на те, що коефіцієнт альbedo розраховується згідно з виразом

$$A = \frac{N_p}{Q h N S \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{h \cdot \tan \alpha} \frac{r dr}{((r^2 + h^2)(r^2 - 2rl \sin \varphi + l^2 + H^2))^{1.5}}}, \quad (25)$$

інтенсивність потоку гамма-випромінювання, поглиненого досліджуваною поверхнею, визначається виразом

$$N_n = 2\pi Q \sin^2 \alpha \left(1 - \frac{N_p}{Q h N \cdot \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{h \cdot \tan \alpha} \frac{r dr}{((r^2 + h^2)(r^2 - 2l \cdot r \sin \varphi + l^2 + H^2))^{1.5}}} \right). \quad (26)$$

З метою порівняння величин відбитого (N_p) та поглиненого гамма-випромінювань (N_n) при опроміненні зразків в умовах центральної геометрії було застосовано теорію подібності та аналізу розмірностей, що дає змогу скоротити кількість змінних за рахунок їхнього об'єднання в безрозмірні комплекси у вигляді добутків. Отже,

$$E = \frac{N_p}{N_\pi} = \frac{A}{1-A} \frac{\hat{H} \cdot \hat{S}}{2\pi \sin^2 \alpha} \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{tg \alpha} \frac{\hat{r} d\hat{r}}{((\hat{r}^2 + 1)(\hat{r}^2 - 2\hat{r} \cdot \hat{l} \cdot \sin \varphi + \hat{l}^2 + \hat{H}^2))^{1.5}}, \quad (27)$$

де $\hat{H} = \frac{H}{h}$, $\hat{S} = \frac{S}{h^2}$, $\hat{r} = \frac{r}{h}$, $\hat{l} = \frac{l}{h}$.

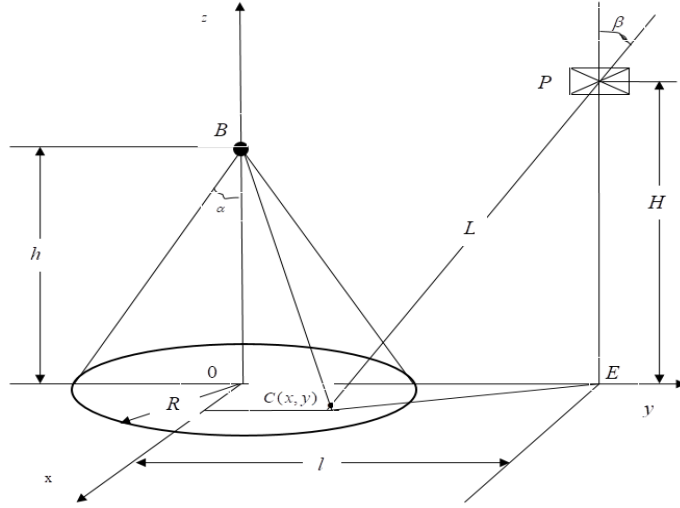


Рис. 3. Схема взаємодії гамма-випромінювання із ЗРС (B – джерело гамма-випромінювання; h – відстань від джерела гамма-випромінювання до поверхні, що опромінюється; P – детектор відбитого гамма-випромінювання; R – радіус кола поверхні опромінювання; $C(x, y)$ – точка опромінюваної поверхні; L – відстань між детектором і точкою поверхні опромінювання; H – відстань між детектором і площиною поверхні опромінювання)

Оцінка чутливості інтенсивності поглиненого потоку гамма-випромінювання щодо інтенсивності відбитого потоку гамма-випромінювання, виміряного детектором, розраховувалася за формулою

$$\frac{d\hat{N}_\pi}{d\hat{N}_p} = - \frac{2\pi \sin^2 \alpha}{\hat{H} \hat{S} \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{tg \alpha} \frac{\hat{r} d\hat{r}}{((\hat{r}^2 + 1)(\hat{r}^2 - 2\hat{l} \cdot \hat{r} \sin \varphi + \hat{l}^2 + \hat{H}^2))^{1.5}}}, \quad (28)$$

де $\hat{N}_p = \frac{N_p}{Q}$, $\hat{N}_\pi = \frac{N_\pi}{Q}$.

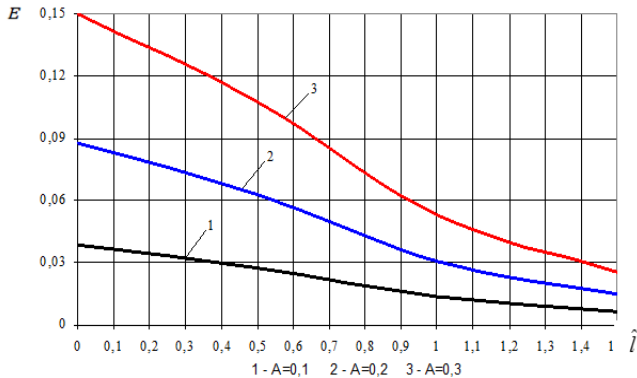


Рис. 4. Залежність відношення E від відстані $\hat{l}$ за різних величин коефіцієнта альbedo

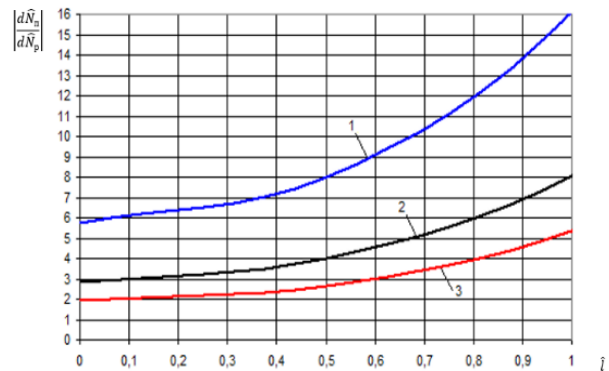


Рис. 5. Залежність чутливості від відстані $\hat{l}$
($1 - \hat{H} = 0,5$; $2 - \hat{H} = 1$; $3 - \hat{H} = 1,5$)

Отримані залежності дають можливість констатувати, що зі збільшенням відстані між джерелом випромінювання та детектором частка розсіяного гамма-випромінювання різко зменшується порівняно з поглиненим. Зі збільшенням відстані між джерелом випромінювання та детектором чутливість інтенсивності поглиненого гамма-випромінювання зростає більш ніж у 2,5 раза.

У третьому розділі описано характеристики технологічних параметрів, що впливають на процес переробки руди в першій стадії подрібнення, класифікації та магнітної сепарації. На базі розроблених математичних моделей першої стадії ТПП проведено дослідження, що уможлиблюють перехід до моделювання з використанням апарату нечіткої логіки – кожна з розроблених моделей першої стадії технологічного процесу подрібнення, класифікації та магнітної сепарації використовує регулятор на базі системи нечіткого логічного виведення, що працює за заданими правилами згідно з алгоритмом Мамдані.

Створені моделі об'єктів першої стадії ТПП ЗРС з'єднані в єдину імітаційну модель. Застосування регуляторів із нечіткою логікою дає змогу досягти оптимальних значень технологічних параметрів у заданих межах. Проведено моделювання роботи створених систем шляхом об'єднання в комплексну модель системи керування першою стадією ТПП ЗРС (рис. 6). Проведено моделювання роботи першої стадії ТПП з урахуванням витрати пісків у циклі розвантаження класифікатора, результати якого наведено на рис. 7.

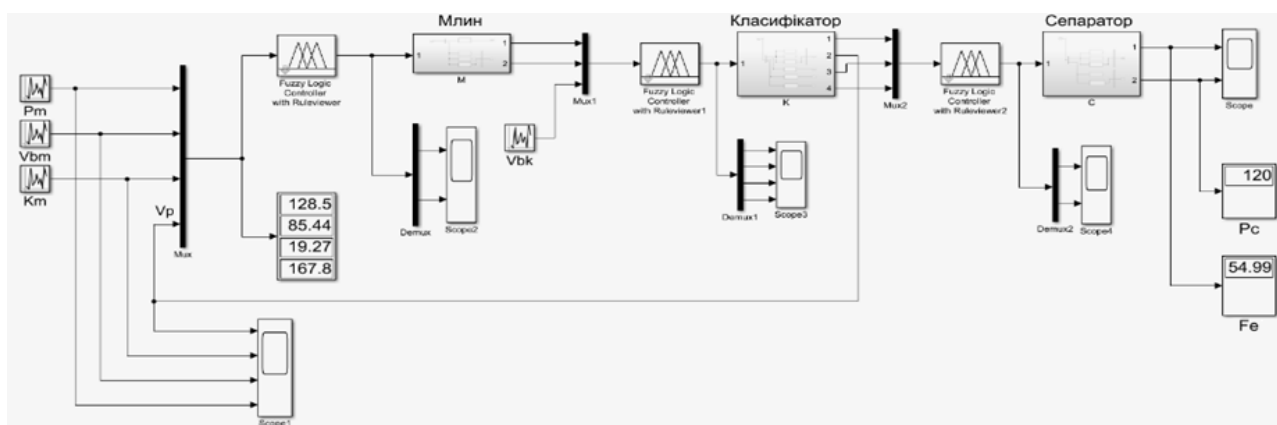


Рис. 6. Комплексна модель формування керування першою стадією ТПП ЗРС

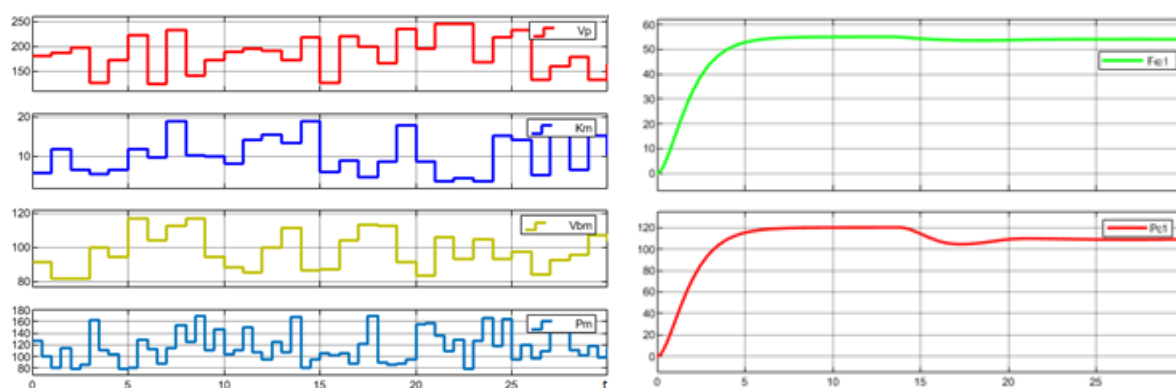


Рис. 7. Результати моделювання процесу керування першою стадією ТПП залізної руди

Як показали результати моделювання, розроблена модель системи керування першою стадією ТПП ЗРС стабілізує вміст заліза в промпродукті на рівні 55 % і продуктивність за промпродуктом на рівні 115 т/год при встановлених діапазонах вхідних параметрів, що надходять на вхід млина та класифікатора.

У четвертому розділі розглянуто функціональну схему та алгоритм інформаційно-вимірювальної системи контролю хіміко-мінералогічних властивостей ЗРС на базі ядерно-фізичних і магнітометричних методів, що базуються на використанні залежностей, отриманих у другому розділі. Розроблення вищезазначених методів забезпечує оперативність отримання інформації про якість вхідної ЗРС у живленні першої стадії подрібнення порівняно з наявними методами хімічного аналізу, а також підвищення інформативності ТПП ЗРС.

Розроблені функціональна схема системи контролю хіміко-мінералогічних властивостей ЗРС (рис. 8) та алгоритм її роботи (рис. 9) застосовуються в складі автоматизованої системи керування першою стадією ТПП ЗРС і забезпечують використання вищевказаної інформаційно-вимірювальної системи (рис. 10).

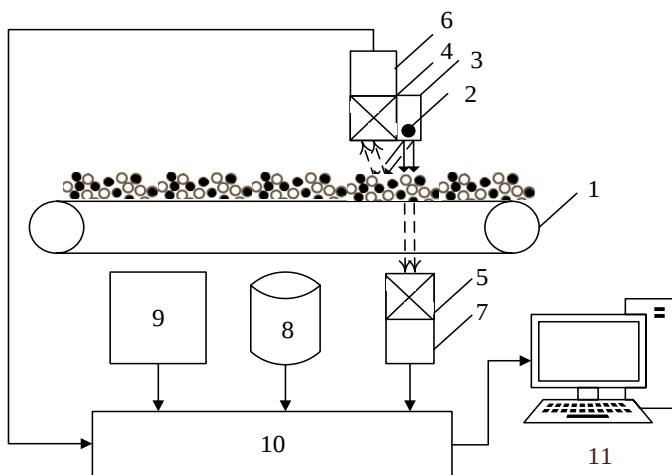


Рис. 8. Функціональна схема системи контролю хіміко-мінералогічних властивостей ЗРС:

- 1 – конвеєрна стрічка;
- 2 – джерело гамма-випромінювання; 3 – захисний свинцевий контейнер;
- 4, 5 – монокристали NaJ;
- 6, 7 – фотоелектронні помножувачі; 8 – датчик магнітної сприйнятливості;
- 9 – ваговимірювач;
- 10 – мікроконтролер;
- 11 – персональний комп'ютер

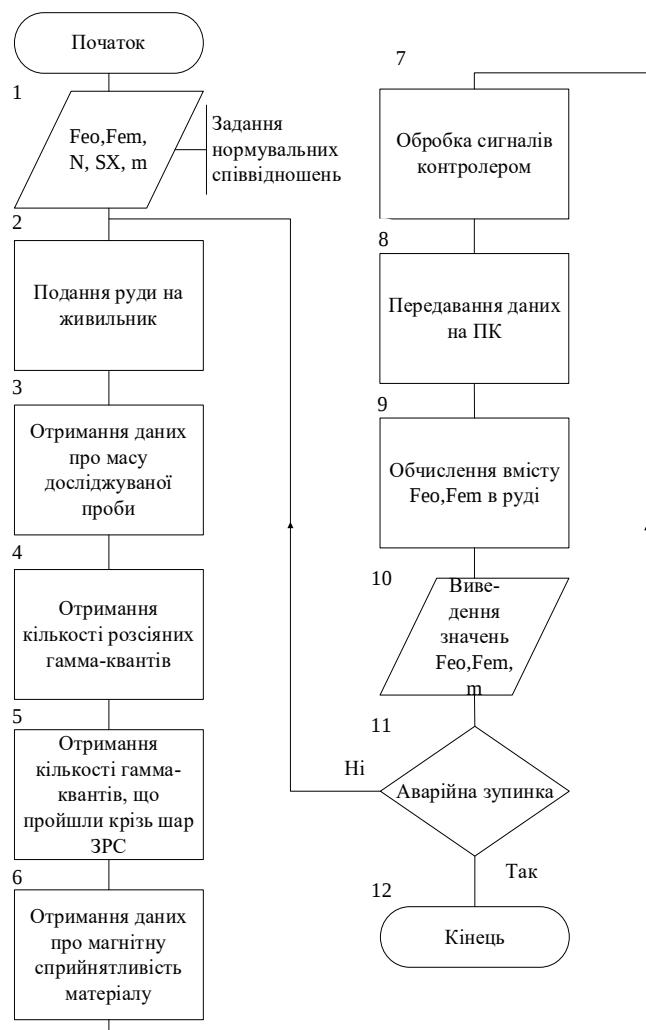


Рис. 9. Алгоритм роботи системи контролю хіміко-мінералогічних властивостей ЗРС

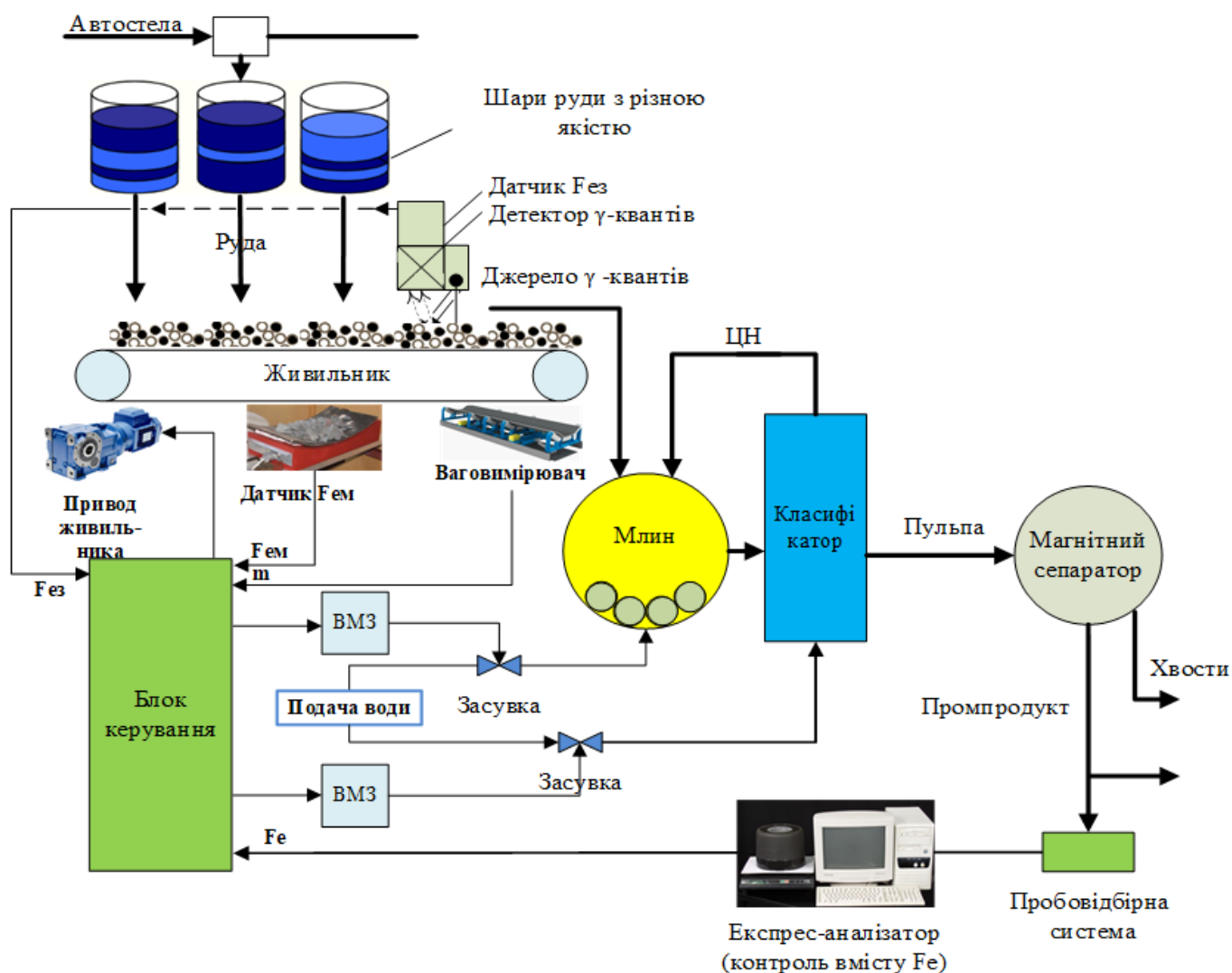


Рис. 10. Функціональна схема автоматизованої системи керування першою стадією ТПП рудозбагачувальної фабрики

Розроблена автоматизована система керування дає можливість у безперервному режимі контролювати стан ТПП ЗРС, усуваючи транспортне запізнення, що є одним із найбільш суттєвих збурюючих факторів. За допомогою магнітометричних методів здійснюється оперативний контроль магнітного заліза в ЗРС у живленні млина, що уможливорює коригування подання ЗРС до млина для стабілізації масової частки магнітного заліза на виході першої стадії ТПП ЗРС. Ядерно-фізичні методи контролю, своєю чергою, дають можливість відповідно до отриманої залежності оперативно оцінити міцність вихідної ЗРС і шляхом зміни подання води до млина керувати часом подрібнення для досягнення оптимального гранулометричного складу на виході млина. Додатковий контроль вмісту магнітного заліза в подрібненій ЗРС здійснюється на виході магнітного сепаратора першої стадії ТПП.

Шляхом комп'ютерного моделювання проведено практичну апробацію автоматизованої системи керування першою стадією ТПП ЗРС на базі розробленої математичної моделі ТПП з мультиплікативною структурою. Ефективність моделювання підтверджена на статистичному матеріалі.

Результати дисертаційних досліджень розглянув технічний відділ гірничого департаменту ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», їх рекомендовано до впровадження.

ВИСНОВКИ

Дисертація є завершеною науково-дослідною працею, у якій розв'язано актуальне наукове завдання розроблення моделей, методів та автоматизованої системи керування першою стадією ТПП залізистих кварцитів на основі нових методів, що полягають у синергії ядерно-фізичних і магнітометричних методів контролю вмісту заліза у вихідній ЗРС в умовах стохастичності її властивостей. Це дає змогу підвищити інформативність процесу подрібнення, отримати дані про характеристики міцності ЗРС у живленні першої стадії технологічного процесу подрібнення та здійснювати оптимальне керування шляхом коригування подання руди на основі інформації про вміст у ній загального та магнітного заліза.

Наукова новизна та науково-технічні рішення щодо керування процесами подрібнення I стадії ТПП ЗРС розглянув і підтвердив технічний відділ гірничого департаменту ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг».

За результатами проведених досліджень сформульовано такі наукові результати:

1. Аналіз питань автоматизації керування ТПП ЗРС в умовах рудозбагачувальних фабрик гірничо-збагачувальних комбінатів України показав, що поряд з актуальністю проблеми та досить великою кількістю досліджень і розробок у цьому напрямі на сьогодні практично відсутні працездатні системи керування ТПП, що зумовлено низькою інформативністю про вміст заліза у вихідній ЗРС, відсутністю врахування стохастичності її фізико-механічних і хіміко-мінералогічних характеристик, а також відсутністю оперативної інформації про стан I стадії ТПП. Зазначені фактори суттєво ускладнюють формування ефективних керівних впливів з урахуванням поточних характеристик вхідної ЗРС, що призводить до неякісного формування промпродукту першої стадії магнітної сепарації, та, як наслідок, втрат заліза у хвостах збагачення та зниження якості концентрату. Наявні на сьогодні розробки не забезпечують достатньо ефективного вирішення завдань оптимального керування першою стадією ТПП ЗРС в умовах рудозбагачувальних фабрик.

2. Вдосконалено математичну модель першої стадії ТПП з застосуванням теоретико-ймовірнісного апарату, що враховує стохастичність вхідних змінних. Запропоновано «м'яку» мультиплікативну структуру математичної моделі першої стадії ТПП, що дає можливість забезпечення її структурної стійкості при випадкових збуреннях змінних, видалення та додавання нових змінних при розробленні нових інформаційних засобів контролю ТПП, а також підвищення точності ідентифікації технологічних параметрів.

3. Обґрунтовано необхідність використання ядерно-фізичних методів контролю вмісту загального заліза в ЗРС на основі встановленого взаємозв'язку між міцністю руди та вмістом у ній загального заліза для сировини, що надходить в першу стадію ТПП рудозбагачувальних фабрик, який уможливорює отримання інформації про подрібнюваність матеріалу, підвищення ефективності переробки руди в першій стадії та зниження енерговитрат на процес подрібнення ЗРС у кульовому млині.

4. Встановлено залежність інтенсивності розсіяного та поглиненого гамма-випромінювання при опроміненні ЗРС джерелом гамма-квантів від вмісту загального заліза в ній. Запропоновано для оперативного контролю рудного матеріалу з концентрацією загального заліза понад 25 % проводити аналіз величини потоку гамма-випромінювання, який поглинається залізорудною сировиною, у

зв'язку з тим, що кількість поглинених гамма-квантів у результаті фотоефекту перевищує кількість розсіяних гамма-квантів при Комптон-ефекті. Це забезпечує підвищення чутливості контролю хіміко-мінералогічних властивостей залізорудної сировини (0,637 % при зміні вмісту заліза на 1 %).

5. Запропоновано комплексне використання ядерно-фізичних методів і магнітометричних методів для оперативного контролю вмісту заліза в залізорудній сировині в умовах рудозбагачувальних фабрик, що підвищує інформативність ТПП ЗРС за рахунок отримання даних про вміст і загального, і магнітного заліза в руді.

6. Обґрунтовано метод керування процесом подрібнення на основі інформації про вміст загального та магнітного заліза у вихідній ЗРС, що надходить в першу стадію ТПП, який полягає в стабілізації вмісту магнітного заліза в ЗРС у межах заданого технологічною інструкцією діапазону та коригування подання руди на основі інформації про її міцність, що дає можливість стабілізувати крупність зливу кульового млина та зменшити коливання вмісту заліза в концентраті до 3,5 %.

7. Розроблено модель системи керування першою стадією ТПП ЗРС, яка формує керуючі впливи на основі визначення хіміко-мінералогічних властивостей ЗРС з застосуванням апарату нечіткої логіки з використанням регуляторів на базі системи нечіткого логічного виведення, які працюють за заданими правилами згідно з алгоритмом Мамдані, що дає можливість стабілізувати вміст заліза в промпродукті на цільовому рівні в 55 %.

8. Сформульовано та розв'язано задачу автоматизованого керування першою стадією ТПП як завдання оптимальної стабілізації необхідного гранулометричного складу промпродукту і вмісту заліза в ньому при заданій продуктивності в умовах стохастичності властивостей ЗРС та виконання обмежень, пов'язаних з функціонуванням млина та класифікатора. Розроблено автоматизовану систему керування першою стадією ТПП РЗФ-1 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», яка дає можливість стабілізувати густинні характеристики зливу класифікатора, зменшити до 2,7 % втрати заліза у хвості збагачення на першій стадії магнітної сепарації, зменшити коливання вмісту заліза в концентраті до 3,5 %, що дає можливість підвищити якість концентрату на 1 %.

9. Розрахований очікуваний економічний ефект від упровадження автоматизованої системи на ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» становить понад 290 млн грн на рік.

10. Отримані в дисертації теоретичні та практичні результати використовуються при проведенні лекційних і практичних занять у навчальному процесі Криворізького національного університету.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові роботи, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. Azaryan A., Gritsenko A., Trachuk A., Shvets D. Development of the method to operatively control quality of iron ore raw materials at open and underground extraction. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 5, № 5(95). P. 13–19. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.144003>. (SCOPUS)

2. Azaryan A., Gritsenko A., Trachuk A., Serebrenikov V., Shvets D. Using the intensity of absorbed gamma radiation to control the content of iron in ore. *Eastern-*

European Journal of Enterprise Technologies. 2019. Vol. 3, № 5(99). P. 29–35. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.170341>. (SCOPUS)

3. Швець Д. В. Синтез математичної моделі технологічного процесу подрібнення залізорудної сировини з урахуванням її хіміко-мінералогічних характеристик на рудозбагачувальних фабриках. *Гірничий вісник*. 2020. № 107. С. 83–90. URL: <https://doi.org/10.31721/2306-5435-2020-1-107-83-90>.

4. Shvets D. V. Theoretical-probability approach to analyse the iron ore grinding process. *Гірничий вісник*. 2021. № 109. С. 111–117. URL: <https://doi.org/10.31721/2306-5435-2021-1-109-111-117>.

5. Shvets D. V. Iron ore grinding process at the concentrating plant under fuzzy and incomplete parameters. *Вісник Криворізького національного університету*. 2021. № 53. С. 163–169. URL: <https://doi.org/10.31721/2306-5451-2022-1-53-163-169>.

6. Швець Д. В. Автоматизоване керування процесами подрібнення і класифікації залізорудної сировини на основі визначення її міцності. *Гірничий вісник*. 2022. № 110. С. 146–150. URL: <https://doi.org/10.31721/2306-5435-2022-1-110-146-150>.

7. Shvets D. V. Mathematical model for controlling the classification process of crushed iron raw materials using fuzzy logic. *Вісник Криворізького національного університету*. 2022. № 55. С. 156–163. URL: <https://doi.org/10.31721/2306-5451-2022-1-55-156-163>.

Наукові роботи, що свідчать про апробацію матеріалів дисертації:

8. Азарян А. А., Швець Д. В., Карабут Н. О. Шляхи підвищення точності контролю якості мінеральної сировини гамма-гамма методом. *Розвиток промисловості та суспільства : матеріали міжнар. наук.-техн. конф., м. Кривий Ріг*. 2020. С. 256.

9. Азарян А. А., Швець Д. В., Карабут Н. О. Розробка математичної моделі технологічного процесу подрібнення залізорудної сировини на рудозбагачувальних фабриках. *Science, society, education: topical issues and development prospects : Abstracts of the 5th International scientific and practical conference*. Харків, 2020. С. 21–27.

10. Азарян А. А., Швець Д. В., Карабут Н. О., Крапивний Н. С. Підвищення точності гамма-методу для визначення хіміко-мінералогічних характеристик залізорудної сировини. *Modern Science And Practice : Abstracts of XV International Scientific and Practical Conference, Varna*. 2020. С. 274–276.

11. Швець Д. В., Карабут Н. О., Крапивний Н. С., Азарян А. А. Розробка математичної моделі взаємодії гамма-випромінювання з залізорудною сировиною для визначення її хіміко-мінералогічних характеристик. *Наука, освіта, суспільство очима молодих : XIII Міжнар. науково-практ. конф. здобувачів вищої освіти і молодих науковців, м. Рівне, 26 трав. 2020 р.* С. 299–300.

12. Швець Д. В. Формалізація структури математичної моделі першої стадії технологічного процесу переробки залізної руди з урахуванням нечітких параметрів. *Комп'ютерні інтелектуальні системи та мережі (KICM) : XVI Всеукр. науково-практ. конф., м. Кривий Ріг, 2023*. С. 240–241.

13. Shvets D. V. Analysis of operational control methods of iron ore chemical and mineralogical characteristics. *Розвиток промисловості та суспільства : матеріали міжнар. наук.-техн. конф., м. Кривий Ріг, 24–26 трав. 2023 р.* С. 250.

Наукові роботи, що додатково відображають наукові результати дисертації:

14. Azaryan A., Pikilnyak A., Shvets D. Complex automation system of iron ore preparation for beneficiation. *Metallurgical and Mining Industry*. 2015. № 8. P. 64–66. URL:

https://www.metaljournal.com.ua/assets/Journal/english-edition/MMI_2015_8/011Azaryan.pdf. (SCOPUS)

15. Швець Д. В. Розробка системи стабілізації масової долі заліза магнітного у зливні класифікатора та дослідження можливості автоматизації процесу подрібнення залізної руди та підготовки її до збагачення. *Якість мінеральної сировини*. Кривий Ріг, 2014. С. 252–264.

16. Azaryan A. A., Gritsenko A. N., Trachuk A. A., Serebrennikov V. M., Shvets D. V. Model of absorbed gamma radiation in the interaction with rock formation. *IAES International Journal of Robotics and Automation (IJRA)*. 2019. Vol. 8. №. 4. P. 269. URL: <https://doi.org/10.11591/ijra.v8i4.pp269-276>.

17. Спосіб автоматичного керування одностадійним циклом мокрого подрібнення : пат. 109981 Україна : МПК В02С 25/00. № u201601062 ; заявл. 08.02.2016 ; опубл. 26.09.2016, Бюл. № 18. 4 с.

18. Спосіб автоматичного керування одностадійним циклом мокрого подрібнення : пат. 118091 Україна : МПК В02С 25/00. № u201700121 ; заявл. 03.01.2017 ; опубл. 25.07.2017, Бюл. № 14. 4 с.

19. Спосіб автоматичного керування процесом подрібнювання магнетитових руд у залежності від їх міцності : пат. 129934 Україна : МПК В02С 25/00. № u201803495 ; заявл. 02.04.2018 ; опубл. 26.11.2018, Бюл. № 22. 2 с.

20. Пристрій оперативного контролю крупності магнетиту у пульпі : пат. 146595 Україна : МПК G01N 27/72, G01R 33/12. № u202006708 ; заявл. 19.10.2020 ; опубл. 04.03.2021, Бюл. № 9. 2 с.

21. Спосіб автоматичного керування одностадійним циклом мокрого подрібнення магнетитових руд : пат. 154013 Україна : МПК В02С 25/00. № u202301387 ; заявл. 03.04.2023 ; опубл. 28.09.2023, Бюл. № 39. 3 с.

Особистий внесок автора в працях, що опубліковані у співавторстві.

[1] – розроблення схеми установки для дослідження взаємодії гамма-випромінювання та речовини; [2] – розроблення математичної моделі взаємодії гамма-випромінювання із ЗРС, отримання залежності інтенсивності розсіяного та поглиненого гамма-випромінювання від вмісту заліза в ЗРС; [8] – обґрунтовано переваги обліку поглиненого гамма-випромінювання для визначення вмісту заліза в ЗРС; [9] – розроблено математичну модель процесу подрібнення ЗРС; [10] – опис моделі взаємодії гамма-випромінювання з опромінюваним середовищем; [11] – створено математичний опис взаємодії високоенергетичного випромінювання із ЗРС для визначення її хіміко-мінералогічних властивостей; [14] – розроблення функціональної схеми комплексної системи автоматизації процесу підготовки ЗРС до збагачення; [16] – розроблення математичного опису ядерно-фізичного методу визначення заліза в ЗРС, визначення чутливості гамма-випромінювання залежно від відстані до опромінюваної сировини; [17] – запропоновано алгоритм керування крупністю зливу класифікатора; [20] – розроблено функціональну схему пристрою.

АНОТАЦІЯ

Швець Д. В. «Автоматизоване керування процесом подрібнення залізистих кварцитів з визначенням їх властивостей ядернофізичними та магнітометричними методами». – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.07 «Автоматизація процесів керування». – Криворізький національний університет, Кривий Ріг, 2024.

Представлена робота присвячена вирішенню актуального наукового завдання дослідження та розробки методів автоматизації технологічного процесу подрібнення залізорудної сировини на основі визначення її хіміко-мінералогічних властивостей із використанням методів оперативного контролю.

Розроблено математичну модель I стадії ТПП ЗРС з урахуванням її властивостей – вмісту корисного компонента і її міцності. Проведено моделювання I стадії ТПП ЗРС із застосуванням теоретико-ймовірнісного підходу, що дало можливість оцінити ймовірнісні властивості вихідних змінних I стадії ТПП ЗРС, пов'язавши їх зі стохастичністю властивостей руди, що надходить на переробку.

Розроблено інформаційно-вимірювальну систему оперативного контролю хіміко-мінералогічних властивостей ЗРС та керування I стадією технологічного процесу подрібнення рудозбагачувальної фабрики ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», яка дає можливість стабілізувати густинні характеристики зливу класифікатора, зменшити до 2,7 % втрати заліза у хвості збагачення на першій стадії магнітної сепарації, зменшити коливання вмісту заліза в концентраті до 3,5 %, що дає можливість підвищити якість концентрату на 1 %.

Уперше запропоновано синергію ядерно-фізичних і магнітометричних методів контролю вмісту заліза у вихідній залізорудній сировині, що уможливлює отримання даних про вміст як магнітного, так і загального заліза в руді та підвищення інформативності технологічного процесу подрібнення.

Розроблений комплекс науково-технічних рішень забезпечує виконання вимог, що встановлюються до кінцевого продукту рудозбагачувальних фабрик – залізорудного концентрату, підвищує його якість за рахунок стабілізації густини зливу класифікатора та зменшує коливання вмісту заліза в промпродукті.

Ключові слова: залізорудна сировина, подрібнення, класифікація, магнітна сепарація, ядерно-фізичний метод, магнітометричний метод, нечітка логіка, система керування, оптимізація.

ABSTRACT

Shvets D.V. «Automated control of ferruginous quartzites grinding process with determination of its properties using nuclear-physical and magnetometric methods». – On the rights of the manuscript.

Thesis for a Candidate's Degree of Technical Sciences by specialty 05.13.07 – automation of control processes (technical sciences). – Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, 2024.

This research is dedicated to addressing the urgent scientific task of researching and developing methods for automating the technological process of grinding iron ore raw materials by determining its chemical and mineralogical properties based on nuclear physics and magnetometric methods of operational control. For the first time, the synergy of these methods of controlling the iron content in the initial iron ore raw material is proposed, which allows obtaining data on the content of both magnetic and total iron in the ore and increases the information value of the grinding process.

A mathematical model of the first stage of the technological process of iron ore raw materials grinding has been developed, taking into account the properties of iron ore, i.e.,

the content of a useful component and its strength. The proposed mathematical model accommodates the state of the technological process of iron ore raw materials grinding and makes it possible to take into account the time of transportation delay of the processed ore.

The correlation between the strength characteristics of iron ore raw materials of the Kryvyi Rih basin and the content of total iron in it was established. The experiments demonstrated the presence of a linear relationship with a determination coefficient of 0.78. The resulting analytical formula allows us to estimate the mass fraction of total iron in iron ore raw materials by its strength. Testing the significance of the correlation according to Fisher's criterion demonstrates statistical significance at a reliability level of 0.95 with a score of 4.6. The obtained correlation allows us to proceed to the development of mechanisms for controlling the feed of feed iron ore at the first stage of grinding in order to achieve the optimal particle size distribution of the crushed ore at the mill outlet.

Modeling of the first stage technological process of iron ore raw materials grinding using a theoretical and probabilistic approach made it possible to estimate the probabilistic properties of the output variables of the first stage technological process of iron ore raw materials grinding, linking them to the stochasticity of the properties of iron ore raw materials fed for processing. Solving the problem of minimizing the functionalities made it possible to obtain the optimal values of control influences on the water flow rates to the mill and classifier to obtain the initial values of the classifier discharge density with a mathematical expectation of 1600 kg/m^3 and the iron content with a mathematical expectation of 55.03 %.

The dependence of the scattered and absorbed gamma radiation intensity during irradiation of iron ore raw materials on total iron content in it has been established. It is proposed to analyze the value of the gamma radiation flux absorbed by iron ore raw materials for operational control of ore material with a total iron concentration above 25 % because the number of absorbed gamma quanta as a result of the photoelectric effect significantly exceeds the number of scattered gamma quanta under the Compton effect, which provides an increase in the sensitivity of control of the chemical and mineralogical properties of iron ore raw materials (0.637 % with a change in iron content by 1 %).

A model for stabilizing the output variables of the first stage of the technological process of grinding iron ore raw materials using control influences formed based on determining the chemical and mineralogical properties of iron ore raw materials with the use of a fuzzy logic apparatus using the Mamdani algorithm has been developed, which allows stabilizing the iron content in the middlings at the target level of 55 %.

Information and measuring system for operational control of chemical and mineralogical properties of iron ore raw materials and control of the first stage of the grinding process at the ore dressing plant of PJSC «ArcelorMittal Kryvyi Rih» was developed, which allows stabilizing the density characteristics of the classifier drain, reducing iron losses in the tailings at the first stage of magnetic separation by up to 2.7 %, and reducing fluctuations in the iron content in the concentrate by up to 3.5 %, which makes it possible to improve the quality of the concentrate by 1 %.

The developed set of scientific and technical solutions makes it possible to meet the requirements set for the end product of ore processing plants – iron ore concentrate – by improving its quality by stabilizing the density of the classifier drain and reducing fluctuations in the iron content of the middlings.

Keywords: iron ore raw materials, grinding, classification, magnetic separation, nuclear physical method, magnetometric method, fuzzy logic, control system, optimization.

ШВЕЦЬ Дмитро Валерійович

**АВТОМАТИЗОВАНЕ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ПОДРІБНЕННЯ
ЗАЛІЗИСТИХ КВАРЦИТІВ З ВИЗНАЧЕННЯМ ЇХ ВЛАСТИВОСТЕЙ
ЯДЕРНОФІЗИЧНИМИ ТА МАГНІТОМЕТРИЧНИМИ МЕТОДАМИ**

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук за спеціальністю
05.13.07 «Автоматизація процесів керування»

Формат 60×84/16. Ум. др. арк. – 1,22.
Авт. арк. – 0,9. Тираж – 100 пр.

Друкарня С. Г. Щербенка «Літерія»
вул. Вахи Арсанова, 5, 3, м. Кривий Ріг, 50027
097-192-20-77

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 4561 від 13.06.2013