

Міністерство освіти і науки України  
Державний вищий навчальний заклад  
«Національний гірничий університет»

**Фаріс Самір Расмі Альхорі**

УДК 621.926:534.16

**МЕТОД АВТОМАТИЧНОГО КОНТРОЛЮ СТУПЕНЯ  
ЗАВАНТАЖЕННЯ РУДОЮ БАРАБАННИХ МЛИНІВ  
МАГНІТОЗБАГАЧУВАЛЬНИХ ФАБРИК**

Спеціальність:

05.13.07 – автоматизація процесів керування

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Дніпропетровськ – 2015

Дисертацією є рукопис.

Дисертація виконана у Державному ВНЗ «Національний гірничий університет» (м. Дніпропетровськ) Міністерства освіти і науки України на кафедрі програмного забезпечення комп'ютерних систем

**Науковий керівник:**

– доктор технічних наук, професор  
**Алексєєв Михайло Олександрович**,  
Декан факультету інформаційних технологій,  
завідувач кафедри програмного забезпечення  
комп'ютерних систем Державного ВНЗ  
«Національний гірничий університет»  
Міністерства освіти і науки України  
(м. Дніпропетровськ);

**Офіційні опоненти:**

– доктор технічних наук, професор  
**Хорольський Валентин Петрович**,  
професор кафедри електропостачання та  
енергетичного менеджменту Державного ВНЗ  
«Криворізький національний університет»  
Міністерства освіти і науки України;

– кандидат технічних наук, доцент  
**Мацуй Анатолій Миколайович**,  
доцент кафедри автоматизації виробничих  
процесів Кіровоградського національного  
технічного університету Міністерства освіти і  
науки України;

Захист відбудеться «\_\_» \_\_\_\_\_ 2015 р. о \_\_ на засіданні спеціалізованої вченої ради Д.08.080.07 Державного ВНЗ «Національний гірничий університет» (м. Дніпропетровськ) Міністерства освіти і науки України за адресою: 49005, м. Дніпропетровськ, просп. К. Маркса 19.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Державного ВНЗ «Національний гірничий університет» (м. Дніпропетровськ) Міністерства освіти і науки України за адресою: 49005, м. Дніпропетровськ, просп. К. Маркса 19.

Автореферат розіслано «\_\_» \_\_\_\_\_ 2015 г.

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

О.В. Остапчук

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність роботи.** Гірничо-збагачувальні комбінати з переробки залізних руд у високоякісний залізорудний концентрат є основою гірничо-металургійного комплексу України.

Кульові барабанні млини і млини мокрого самоподрібнення отримали широке застосування на збагачувальних фабриках залізних руд гірничо-збагачувальних комбінатів для попереднього подрібнення та розкриття руди. Ступінь завантаження млинів рудою значною мірою визначає продуктивність млинів та збагачувальних фабрик, а також якість залізорудного концентрату. При подрібненні руд зі змінними фізико-механічними властивостями оптимальний ступінь завантаження млинів рудою, при якому забезпечується найкраще розкриття руди, є величиною змінною. Наприклад, при подрібненні важкозбагачуваних руд ступінь завантаження млинів повинен бути менше, ніж при подрібненні легкозбагачуваних руд. Автоматизації процесів подрібнення і збагачення руд присвячені роботи багатьох вчених, таких як Алексєєв М.О., Бунько В.А., Воронов В.А., Гейзенблазен Б.Є., Качан Ю.Г., Кочура Є.В., Марюта А.Н., Моркун В.С., Назаренко М.В., Новицький І.В., Тихонов О.Н., Троп А.Є., Утеуш Е.В., Хорольський В.П., А. Лінч, Д. Гілберт і ін. Проте проблема автоматичного контролю оптимального ступеня завантаження млинів рудою залишилася невирішеною.

Аналіз останніх результатів досліджень і публікацій з автоматичної оптимізації ступеня завантаження барабанних млинів рудою дозволяє виділити невирішену проблему, яка полягає в автоматичному визначенні оптимального ступеня завантаження млина рудою для забезпечення найкращих показників подрібнення, розкриття і збагачення залізних руд зі змінними властивостями.

**Науковою задачею** дисертації є встановлення нових закономірностей спільного формування сигналів активної потужності електродвигунів млинів і магнітних сепараторів в технологічних комплексах магнітного збагачення залізних руд в залежності від ступеня завантаження рудою барабанних млинів з урахуванням змінних фізико-механічних властивостей руд, та розробка методу автоматичного контролю оптимального ступеня завантаження рудою барабанних млинів за критерієм максимальної продуктивності комплексу по збагаченому продукту. Вирішення цієї задачі дозволить істотно підвищити продуктивність та якість залізорудного концентрату на гірничо-збагачувальних комбінатах України. Тому тема дисертації є **актуальною**.

**Зв'язок з державними програмами, планами науково-дослідних робіт.** Робота виконана відповідно до державної програми «Розвиток і реформування гірничо-металургійного комплексу України». В основі роботи використані матеріали, які узагальнюють дослідження автора в рамках реалізації науково-дослідних та інженерінгових робіт, які виконувалися в Національному гірничому університеті відповідно до закону України № 2623-14 від 11.07.2001 «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки»,

постанов Кабінету Міністрів України «Про заходи щодо розвитку гірничо-металургійного комплексу», «Про хід виконання Програми розвитку залізорудної промисловості України», Державної комплексної програми розвитку України.

Автор дисертації брав участь як виконавець при виконанні держбюджетних науково-дослідних робіт «Розробка методів синтезу моделей корисних енергетичних, акустичних і вібраційних сигналів для ідентифікації процесів гірничого виробництва» (ДР № 0113U000402) і «Автоматизація процесів керування збагачувальними фабриками корисних копалин» (ДР № 0112U000876). Результати досліджень по цій темі, отримані ним особисто, представлені в цій роботі.

**Мета і завдання дослідження.** Метою дисертації є підвищення продуктивності технологічних комплексів магнітного збагачення залізних руд та якості концентрату на основі удосконалення методу і функціонально алгоритмічних структур систем автоматичного контролю оптимального ступеня завантаження рудою барабанних млинів за сигналами активної потужності електродвигунів млинів і магнітних сепараторів.

Сформульована мета роботи обумовила необхідність вирішення наступних завдань:

- наукове обґрунтування технічних вимог до систем автоматичного контролю оптимального ступеня завантаження рудою кульових млинів і млинів мокрого самоподрібнення;

- обґрунтування характеристик інформаційних каналів для автоматичного контролю оптимального ступеня завантаження рудою барабанних млинів;

- встановлення закономірностей спільного формування сигналів активної потужності електродвигунів барабанних млинів і магнітних сепараторів в технологічних комплексах подрібнення і магнітної сепарації;

- дослідження закономірностей процесу розкриття руди в кульових і рудногалькових млинах других стадій, послідовно з'єднаних з магнітним сепаратором, з позицій задач автоматичного контролю ступеня завантаження млинів рудою;

- розробка методу підвищення точності автоматичного контролю продуктивності пілотного магнітного сепаратора за магнітним продуктом на основі спектрального перетворення сигналу активної потужності сепаратора;

- розробка методу автоматичного контролю оптимального ступеня завантаження рудою барабанних млинів;

- розробка функціонально-алгоритмічних структур систем автоматичного контролю оптимального завантаження рудою кульових млинів з ґратами і центральним розвантаженням, млинів самоподрібнення і рудногалькових млинів.

**Об'єкт дослідження:** технологічний процес подрібнення руди в барабанних млинах.

**Предмет дослідження:** методи і моделі автоматичного контролю завантаження рудою барабанних млинів.

### **Методи дослідження:**

- аналіз інформації, вітчизняного та закордонного досвіду, систематизація відомих методів та систем автоматичного контролю завантаження барабанних млинів рудою для обґрунтування актуальності, мети і завдань дослідження;

- теоретичні методи дослідження механіки барабанних млинів, розкриття руди подрібненням, магнітного збагачення руд для побудови математичних моделей технологічних комплексів подрібнення і магнітної сепарації;

- методи теорії електроприводу, теоретичних основ електротехніки, теорії інформації для обґрунтування інформаційних каналів отримання сигналів про оптимальну ступінь завантаження барабанних млинів рудою;

- методи теорії експерименту, математичної статистики та спектрального аналізу для експериментального дослідження статичних характеристик залежності спектральної складової сигналу активної потужності електродвигуна магнітного сепаратора від сигналу активної потужності приводного електродвигуна млина;

- методи автоматизації і алгоритмізації виробничих процесів для розробки функціонально-алгоритмічних структур систем автоматичного контролю оптимального ступеня завантаження барабанних млинів рудою.

### **Наукове положення, що вноситься на захист.**

1. В технологічних комплексах подрібнення і магнітної сепарації недовантаження або перевантаження барабанного млина рудою визначається за знаком емпіричного коефіцієнта кореляції між вибірковими значеннями активної потужності електродвигунів млина та магнітного сепаратора, які працюють у одному технологічному комплексі магнітного збагачення залізних руд, що дозволяє підвищити продуктивність технологічних комплексів подрібнення і магнітної сепарації, та якість залізородного концентрату.

### **Наукові результати:**

1. Критерієм автоматичної оптимізації ступеня завантаження барабанних млинів залізною рудою зі змінними фізико-механічними властивостями є максимальна продуктивність за магнітним продуктом магнітного сепаратора послідовно з'єданого з барабанним млином, що дозволяє зменшити переподрібнення руди, підвищити витяг, вихід і якість залізородного концентрату.

2. Запропоновано новий метод автоматичного контролю ступеня завантаження залізною рудою барабанних млинів за знаком емпіричного коефіцієнта кореляції між вибірковими значеннями активної потужності електродвигунів млина та магнітного сепаратора, причому для млинів мокрого самоподрібнення, якщо цей знак позитивний, то має місце недовантаження млина рудою, а якщо цей знак негативний, то має місце перевантаження млина рудою. Для кулевих млинів навпаки, позитивний знак характеризує перевантаження млина рудою, а негативний знак – недовантаження млина рудою.

3. Науково обґрунтовано метод автоматичного контролю продуктивності за концентратом технологічного комплексу подрібнення і магнітної сепарації за спектральною складовою сигналу активної потужності приводного електродвигуна магнітного сепаратора, вимірюної на частоті пульсуючого поля магнітного сепаратора, що на відміну від відомого дозволяє підвищити точність автоматичного контролю продуктивності за концентратом.

4. Отримані нові статичні характеристики залежності сигналу активної потужності приводного електродвигуна пілотного магнітного сепаратора від сигналів активної потужності приводного електродвигуна барабанних млинів різних типів, що на відміну від статичної характеристики залежності продуктивності млина за готовим класом крупності продукту подрібнення від ступеня завантаження млина рудою, дає можливість автоматично визначати ступінь завантаження млина рудою з різними фізико-механічними властивостями.

#### **Достовірність наукових положень та результатів.**

Достовірність моделей спільного формування сигналів активної потужності приводних електродвигунів млинів і магнітних сепараторів, а також статичних характеристик підтверджується використанням апробованих залежностей у теорії і практиці збагачення залізних руд, електротехніки та електроприводу, а також результатами комп'ютерного моделювання та експериментальних досліджень, якісним збігом теоретичних і експериментальних характеристик, що одержані для різних типів млинів.

Достовірність методу автоматичного контролю оптимального ступеня завантаження рудою барабанних млинів підтверджується результатами експериментальних досліджень у промислових умовах, перевіркою результатів при впровадженні на збагачувальній фабриці Центрального гірничого збагачувального комбінату (м. Кривий Ріг) та актом практичного використання дисертаційної роботи.

Достовірність методу автоматичного контролю продуктивності за магнітним продуктом технологічного комплексу подрібнення і магнітної сепарації підтверджується зниженням наведеної похибки вимірювання продуктивності сепаратора з 13% до 4,7% у порівнянні із відомим методом.

#### **Практичні результати:**

1. Запропоновано систему автоматичного контролю оптимального ступеня завантаження залізною рудою барабанних млинів за сигналами активної потужності електродвигунів млинів і магнітних сепараторів, яка дозволяє автоматично визначати оптимальне завантаження млина рудою з різними фізико-механічними властивостями.

2. Запропоновано систему автоматичного контролю продуктивності технологічного комплексу подрібнення і магнітної сепарації за спектральною складовою сигналу активної потужності електродвигуна магнітного сепаратора, що відрізняється від відомих систем автоматичного контролю продуктивності магнітного сепаратора більш високою точністю, що дозволяє підвищити точність автоматичного контролю оптимального завантаження

барабанних млинів залізною рудою за допомогою пілотного магнітного сепаратора.

3. Розроблено принципи побудови та технічні вимоги до систем автоматичного контролю оптимального завантаження барабанних млинів рудою на основі аналізу сигналів активної потужності електродвигунів млинів і магнітних сепараторів, що дозволяє автоматично визначати оптимальну ступінь завантаження млинів рудою зі змінними фізико-механічними властивостями і підвищити продуктивність комплексів магнітного збагачення за магнітним продуктом і якість концентрату.

4. Результати роботи прийняті до впровадження ВАТ «Центральний гірничо-збагачувальний комбінат» (м. Кривий Ріг).

**Особистий внесок автора.** Всі наукові положення і результати роботи отримані автором особисто.

**Апробація результатів роботи.** Основні положення роботи доповідалися на X Міжнародній науково-практичній конференції «Ключові питання сучасної науки – 2014» (Болгарія, м. Софія, 17-25 квітня 2014), Всеукраїнській науково-практичній конференції «Інформаційні та моделюючі технології» (м. Черкаси, 29-31 травня 2014).

**Публікації.** За темою дисертації опубліковано 8 наукових праць, з них 6 статей в науково-технічних журналах та збірниках наукових праць, що входять до переліку МОН України, у тому числі 4 статті у виданнях, що входять до наукометричної бази SCOPUS, 2 – матеріали конференцій.

**Структура та обсяг дисертаційної роботи.** Дисертація містить вступ, 4 розділи, висновки, список використаних літературних джерел і додатки. Загальний обсяг роботи 175 – сторінок, з них 155 – основний текст. Дисертація містить 70 рисунків, 8 таблиць, список використаних літературних джерел із 184 найменувань на 16 сторінках, 2 додатки на 5 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** обґрунтовується актуальність роботи і проводиться постановка цілей і завдань дослідження. Наведено наукові положення і результати, наукова новизна і практична цінність роботи.

**У першому розділі** дисертації виконано аналіз відомих методів і систем автоматичного контролю та регулювання завантаження барабанних млинів рудою таких як: звукометричні методи за частотою і амплітудою шуму видаваного млином, а також з використанням вейвлет аналізу звукометричного сигналу, за сигналом активної потужності або її спектральною складовою, радіоізотопні методи та інші. Загальним недоліком відомих методів і систем автоматичного контролю та регулювання ступеня завантаження барабанних млинів рудою є неможливість автоматичного визначення оптимального ступеня завантаження млинів рудою, яка забезпечує найкращу ступінь розкриття руди зі змінними фізико-механічними властивостями, такими як твердість, крупність вкраплення

заліза та ін. На підставі аналізу технологічних схем збагачення магнітозбагачувальних фабрик і технології збагачення залізних руд розроблені технічні вимоги до систем автоматичного контролю завантаження рудою барабанних млинів.

Подрібнення залізних руд є підготовчим процесом магнітного збагачення руд. Основним процесом магнітозбагачувальних фабрик є магнітна сепарація. За таким принципом необхідно будувати і системи автоматичного контролю та регулювання ступеня завантаження рудою барабанних млинів магнітозбагачувальних фабрик. Пілотним або ведучим об'єктом автоматичного контролю ступеня завантаження млина рудою є магнітний сепаратор, а веденим – барабанний млин, завданням якого є розкриття зростків корисного мінералу з порожньою породою.

Сформульовано технічні вимоги до системи автоматичного контролю завантаження барабанних млинів рудою:

1. Критерієм оптимального ступеня завантаження барабанного млина рудою є максимальне значення сигналу активної потужності електродвигуна магнітного сепаратора, яке відповідає найкращій мірі розкриття руди.

2. Ступінь завантаження барабанних млинів рудою повинна автоматично визначатися як один з трьох можливих режимів роботи млина: «недовантаження», «перевантаження», «оптимальне завантаження».

3. Метод автоматичного контролю ступеня завантаження млинів залізною рудою повинен ґрунтуватися на аналізі двох сигналів активної потужності споживаної електродвигунами барабанного млина і магнітного сепаратора.

4. Система автоматичного контролю ступеня завантаження барабанних млинів рудою повинна бути універсальною і мати можливість застосування для контролю ступеня завантаження кульових млинів, млинів мокрого самоподрібнення і рудногалькових млинів.

5. Система автоматичного контролю ступеня завантаження барабанних млинів рудою повинна бути реалізована на стандартних вимірювальних перетворювачах активної потужності, які включаються в коло статора електродвигунів 6 кВ та 380 В через вимірювальні перетворювачі струму і напруги.

6. Система автоматичного контролю ступеня завантаження повинна включати підсистему автоматичного контролю продуктивності магнітного сепаратора за магнітним продуктом з наведеною похибкою вимірювання не більше 5%.

7. Система повинна автоматично визначати ступінь завантаження млинів залізною рудою з різними фізико-механічними властивостями.

8. Система автоматичного контролю ступеня завантаження барабанних млинів рудою повинна мати можливість роботи як в автоматизованому так і в автоматичному режимах.

З урахуванням виконаного аналізу виконана постановка мети і завдання дослідження.



У другому розділі виконані дослідження сигналу активної потужності електродвигуна магнітного сепаратора як критерія автоматичного контролю завантаження барабанних млинів рудою. Показано, що продуктивність магнітного сепаратора за магнітним продуктом визначається не всією активною потужністю, споживаною електродвигунами барабана сепаратора з мережі, а тільки тією її частиною, яка йде на покриття втрат від вихрових струмів в барабані і втрат на гістерезис в шарі концентрату.

Потужність, що йде на покриття втрат від вихрових струмів в барабані, буде дорівнювати

$$P_2 = \frac{4}{3} \gamma K_\phi^2 d^2 f^2 B_{m\phi} V_\phi, \quad (1)$$

де  $\gamma$  – питома провідність матеріалу барабана;  $K_\phi$  – коефіцієнт форми кривої Е.Р.С.;  $d$  – товщина барабана;  $f$  – частота коливань магнітного поля;  $B_{m\phi}$  – амплітуда коливань магнітної індукції в барабані магнітного сепаратора;  $V_\phi$  – обсяг частини барабана, що знаходиться в зоні дії магнітного поля сепаратора.

Втрати на гістерезис в шарі концентрату

$$P_4 = \eta f B_{mk}^2 V_k, \quad (2)$$

де  $\eta$  – коефіцієнт, що залежить від властивостей речовини;  $B_{mk}$  – амплітуда коливань магнітної індукції в шарі концентрату;  $V_k$  – об'єм шару концентрату.

При переміщенні барабана з магнітним матеріалом щодо магнітної системи в будь-якій точці на поверхні барабана в робочій зоні створюється пульсуюче магнітне поле з частотою

$$f = \frac{\omega R_2}{2S}, \quad (3)$$

де  $\omega$  – кутова швидкість обертання барабана;  $R_2$  – радіус барабана;  $S$  – крок магнітної системи сепаратора.

Вимірюючи активну потужність на частоті пульсуючого магнітного поля, можна виключити вплив складової, яка характеризує гідродинамічний опір і стан редуктора електроприводу барабана сепаратора. Це дає можливість підвищити точність вимірювання продуктивності магнітного сепаратора за магнітним продуктом за сигналом активної потужності електродвигуна барабана сепаратора, а отже і точність автоматичного контролю ступеня заповнення млинів рудою. Був виконаний спектральний інформаційний аналіз сигналу активної потужності приводного

електродвигуна магнітного сепаратора. На рис. 1 наведена типова спектральна щільність  $S(f)$  сигналу активної потужності електродвигуна магнітного сепаратора ПБМ-ПП-120/300.

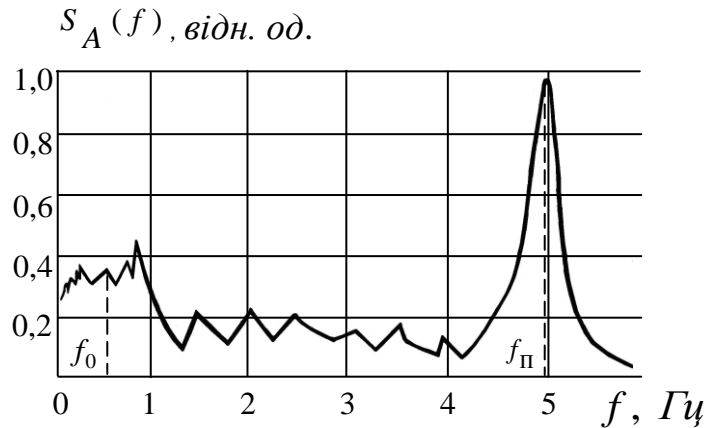


Рис. 1. Типова спектральна щільність сигналу активної потужності електродвигуна магнітного сепаратора ПБМ-ПП-120/300:

$f_0$  – оборотна частота коливань сигналу активної потужності;  $f_{\Pi}$  – частота пульсуючого магнітного поля сепаратора.

Були виконані порівняльні експериментальні дослідження методів автоматичного контролю продуктивності магнітних сепараторів за сигналом активної потужності електродвигуна сепаратора. Статичні характеристики двох методів автоматичного контролю продуктивності сепаратора наведені на рис. 2.

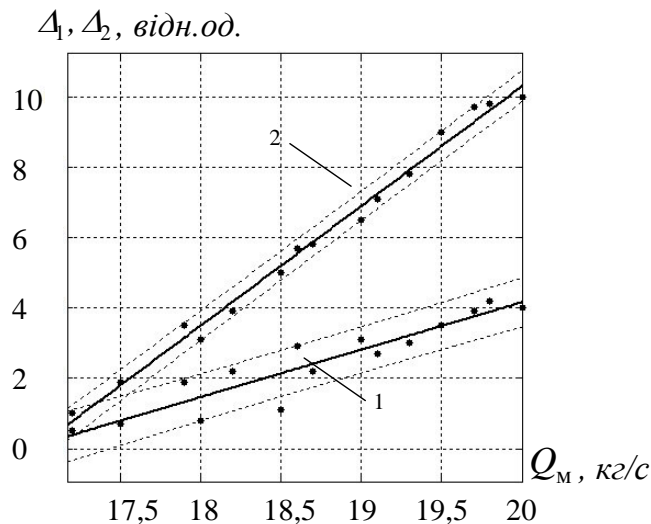


Рис. 2. Статичні характеристики двох методів вимірювання продуктивності сепаратора ПБМ-ПП-120/300 за магнітним продуктом:

1 – статична характеристика методу контролю продуктивності магнітного сепаратора за повним сигналом активної потужності  $\Delta_1$ ;

2 – статична характеристика методу вимірювання продуктивності магнітного сепаратора за сигналом динамічної складової активної потужності, яка вимірюється на частоті пульсацій магнітного поля сепаратора  $\Delta_2$ .

Аналіз статичних характеристик показує, що наведена похибка вимірювання продуктивності сепаратора за магнітним продуктом за сигналом середнього значення активної потужності становить 13%, а наведена похибка вимірювання продуктивності сепаратора за магнітним продуктом за сигналом змінної складової активної потужності електродвигуна сепаратора, виміряної на частоті пульсацій магнітного поля сепаратора складає 4,7%.

З метою дослідження чутливості методу вимірювання була використана залежність амплітуди коливань моменту двигуна від його параметрів

$$M^{\partial} = \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2\right]^2 + \left(\frac{f}{f_0}\right)^2 \frac{T_M}{T}}}, \quad (4)$$

де  $T$  – електромагнітна стала часу двигуна;  $T_M$  – електромеханічна постійна часу системи;  $f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2pM_K}{J}}$  – власна частота коливань системи;  $J$  – момент інерції барабана сепаратора з шаром концентрату;  $M_K$  – критичний момент двигуна;  $p$  – число пар полюсів двигуна.

Була досліджена залежність (4) для різних типів приводних електродвигунів барабана сепаратора, яка представлена на рис. 3.

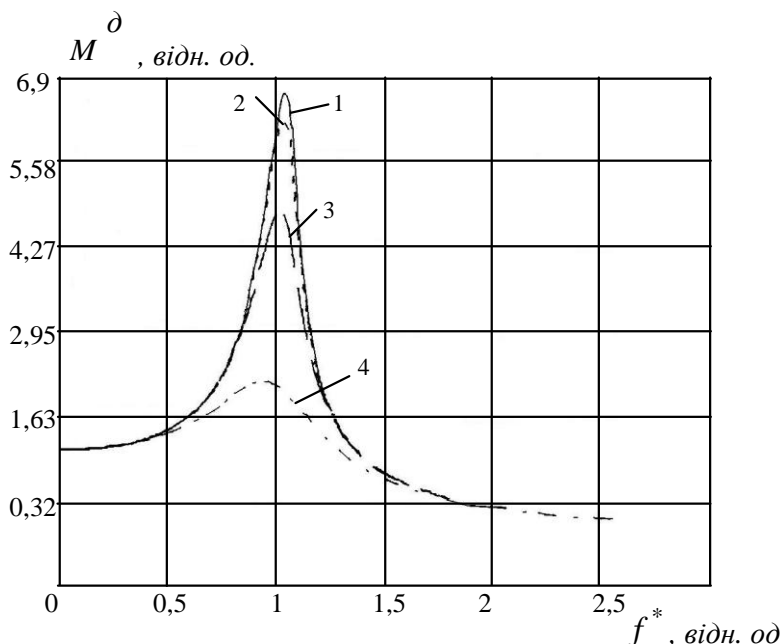


Рис. 3. Сімейство кривих для різних типів електродвигунів сепараторів:

- 1 – електродвигун АОЛ2-22-6У3 (1,1 кВт);
- 2 – електродвигун 26-СБ-4А112МА8У3 (2,2 кВт);
- 3 – електродвигун АОЛ2-42-8У3 (3 кВт);
- 4 – електродвигун 4А132S8У3 (4 кВт).

Аналіз кривих рис. 3 показує, що якщо резонансна частота системи буде близька до частоти пульсуючого магнітного поля, то малим змінам навантаження сепаратора будуть відповідати значні зміни динамічної складової споживаної активної потужності приводу.

Чутливість методу вимірювання продуктивності магнітного сепаратора за магнітним продуктом визначається співвідношенням електромагнітної і електромеханічної постійними електродвигуна сепаратора, причому при збільшенні числа пар полюсів двигуна чутливість методу вимірювання підвищується.

**Третій розділ** присвячений розробці методів автоматичного контролю ступеня завантаження барабанних млинів рудою. Були складені комплексні математичні моделі циклів подрібнення і магнітної сепарації перших і других стадій магнітозбагачувальних фабрик. Виконано математичне моделювання впливу ступеня завантаження кульового млина рудою на розкриття залізної руди і продуктивність магнітного сепаратора за магнітним продуктом в барабанних млинах різних типів: кульових, самоздрібнювання і рудногалькових. Були використані апробовані моделі процесів подрібнення Реттінгера, Тунцова-Загустіна, моделі розкриття руди Уїгла і Лі, моделі формування активної потужності споживаної барабанними млинами і магнітними сепараторами Марюти А.Н., Воронова В.А., Кочури Є.В. В результаті моделювання були отримані нові закономірності спільного формування сигналів активної потужності електродвигунів млинів і магнітних сепараторів, які представлені у вигляді статичних характеристик технологічних комплексів подрібнення і магнітної сепарації (рис. 4, 5).

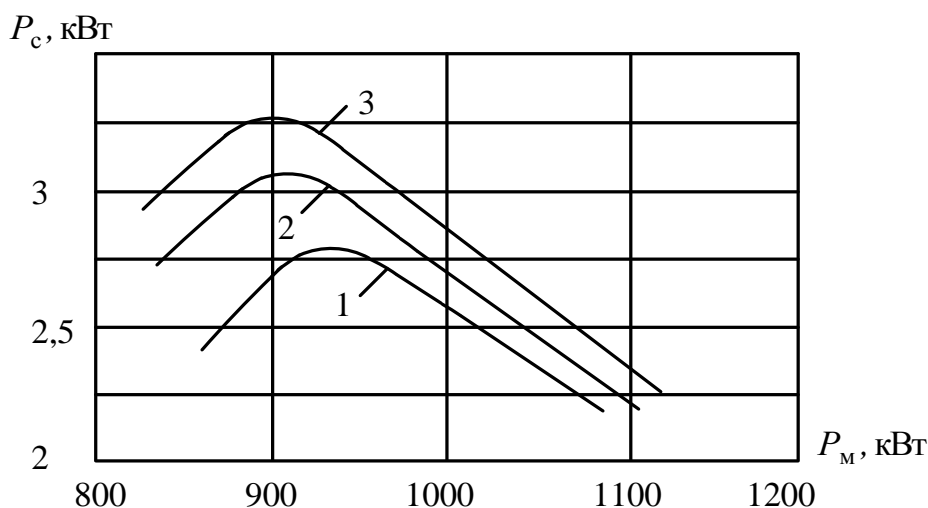


Рис. 4. Статична характеристика технологічного комплексу магнітного збагачення з кульовим млином:

1 – кульове завантаження 40 т; 2 – кульове завантаження 45 т; 3 – кульове завантаження 50 т.

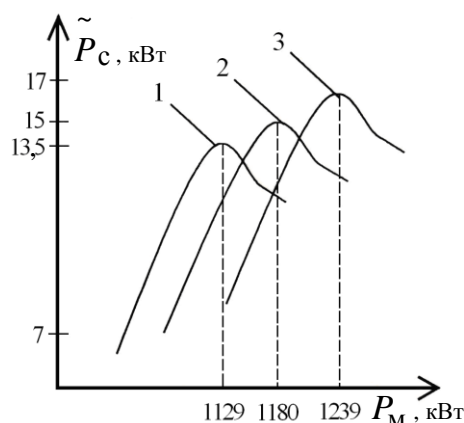


Рис. 5. Статичні характеристики рудногалькового млина при різній щільності пульпи  $\gamma_{\text{П}}$ :

$$1 - \gamma_{\text{П}} = 2,29 \text{ кг/м}^3; 2 - \gamma_{\text{П}} = 2,41 \text{ кг/м}^3; 3 - \gamma_{\text{П}} = 2,53 \text{ кг/м}^3.$$

Були виконані експериментальні дослідження статичних характеристик барабанних млинів різних типів і магнітних сепараторів як об'єктів автоматичного контролю оптимального ступеня завантаження рудою за сигналами активної потужності приводних електродвигунів млинів і сепараторів (рис. 6).

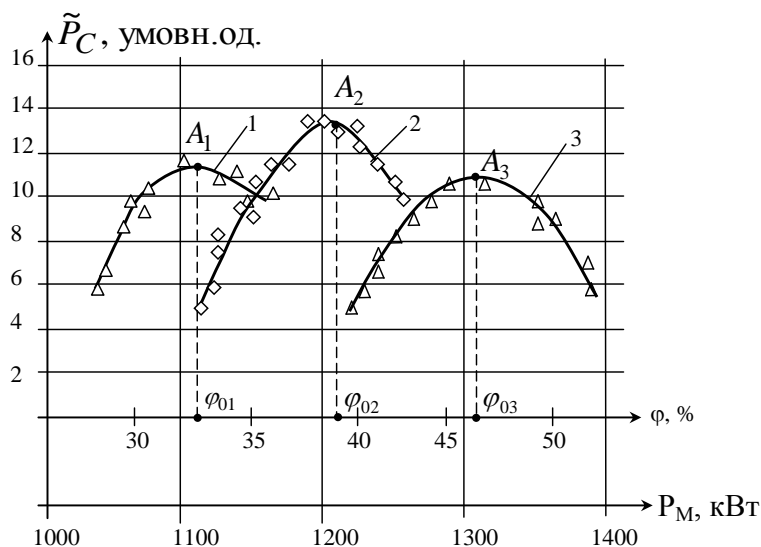


Рис. 6. Статичні характеристики системи автоматичного контролю оптимального ступеня завантаження млина мокрого самоподрібнення ММС-70-22:

$\varphi$  – ступінь заповнення млина рудою;  $P_M$  – активна потужність електродвигуна млина;  $\tilde{P}_C$  – змінна спектральна складова сигналу активної потужності, споживаної електродвигунами групи магнітних сепараторів; 1 – статичні характеристики, що відповідають легкозбагачуваній руді; 2 – статичні характеристики, що відповідають середньозбагачуваній руді; 3 – статичні характеристики, що відповідають важкозбагачуваній руді;  $\varphi_{01}, \varphi_{02}, \varphi_{03}$  – оптимальні ступені заповнення млина рудою для кожного типу руди.

Запропоновано знак похідної визначати за знаком коефіцієнта кореляції між сигналами активної потужності електродвигунів млина і магнітного сепаратора, так як об'єкт автоматичного контролю є стохастичним. У цьому випадку алгоритм системи автоматичного контролю ступеня завантаження рудою, наприклад, млинів мокрого самоподрібнення і рудногалькових млинів буде мати вигляд (5). Статична характеристика кореляційного аналізатора ступеня завантаження рудою рудногалькового млина представлена на рис. 7.

$$Q = \begin{cases} Q_0 + \Delta Q, \text{ якщо } R_{P_m P_c} \geq \delta \\ Q_0 - \Delta Q, \text{ якщо } R_{P_m P_c} \leq -\delta \\ Q_0 + 0, \text{ якщо } -\delta < R_{P_m P_c} < \delta \end{cases} \quad (5)$$

$$Q = \begin{cases} Q_0 + \Delta Q, \text{ якщо } R_{P_m P_c} \leq -\delta \\ Q_0 - \Delta Q, \text{ якщо } R_{P_m P_c} \geq +\delta \\ Q_0 + 0, \text{ якщо } -\delta < R_{P_m P_c} < +\delta \end{cases} \quad (6)$$

Алгоритм автоматичного контролю ступеня завантаження рудою кульового млина представлений системою (6). Статична характеристика кореляційного аналізатора ступеня завантаження рудою кульового млина представлена на рис. 8.

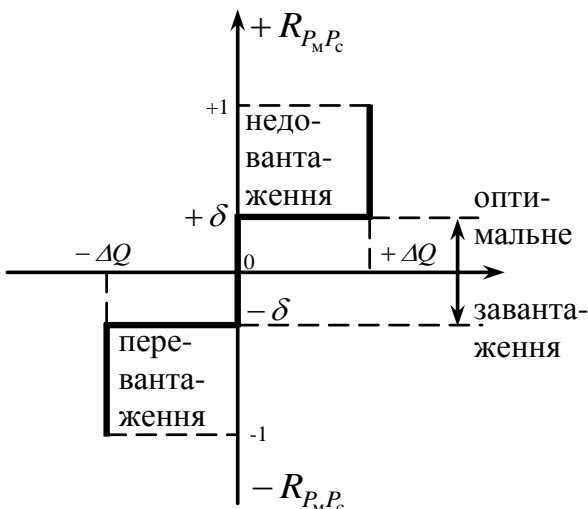


Рис. 7. Статична характеристика кореляційного аналізатора ступеня завантаження рудою рудногалькового млина і млина мокрого самоподрібнення

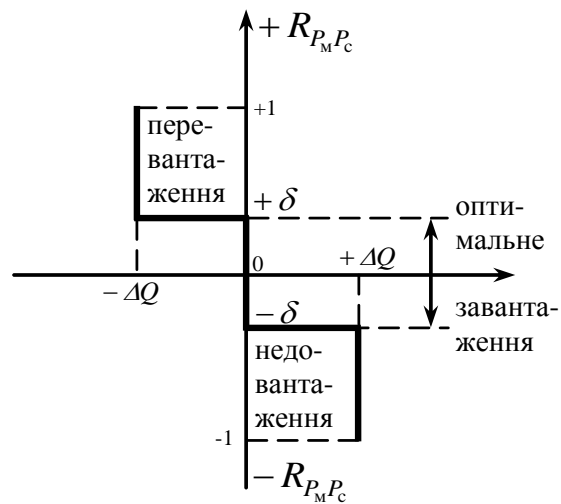


Рис. 8. Статична характеристика кореляційного аналізатора ступеня завантаження рудою кульового млина

У четвертому розділі розроблені функціональні схеми систем автоматичного контролю ступеня завантаження рудою барабаних млинів різних типів. Наприклад, для рудногалькового млина другої стадії ця схема буде мати вигляд, представлений на рис. 9.

В млин 1 рудногалькового подрібнення МРГ, який обертається електродвигуном 2, надходить руда від млина мокрого самоподрібнення (ММС) через регулюючий орган 5. Також в млин 1 надходять піски гідроциклону і вода. Розвантаження млина через бутару Б надходить на

магнітний сепаратор, барабан якого обертається електродвигуном 4. При зміні фізико-механічних властивостей руди змінюється заповнення млина рудою, що призводить до зміни активної потужності РМ електродвигуна млина, що вимірюється вимірювальним перетворювачем активної потужності 7. При зміні заповнення млина змінюються умови подрібнення і крупність помелу руди в живленні магнітного сепаратора, що призводить до зміни кількості магнітного продукту на барабані сепаратора, тобто до зміни його продуктивності за магнітним продуктом. Сигнал активної потужності змінюється. Якщо млин працює до екстремуму статичної характеристики, то знак коефіцієнта кореляції між сигналами активної потужності електродвигунів млина і сепаратора буде позитивний і загориться лампочка «недовантаження» млина. Якщо знак коефіцієнта кореляції негативний, то загоряється лампочка «перевантаження» млина. Оператор млина 13 в залежності від стану системи сигналізації змінює продуктивність по руді на вході млинів за допомогою регулюючого органу 6 на величину  $\pm \Delta Q$ .

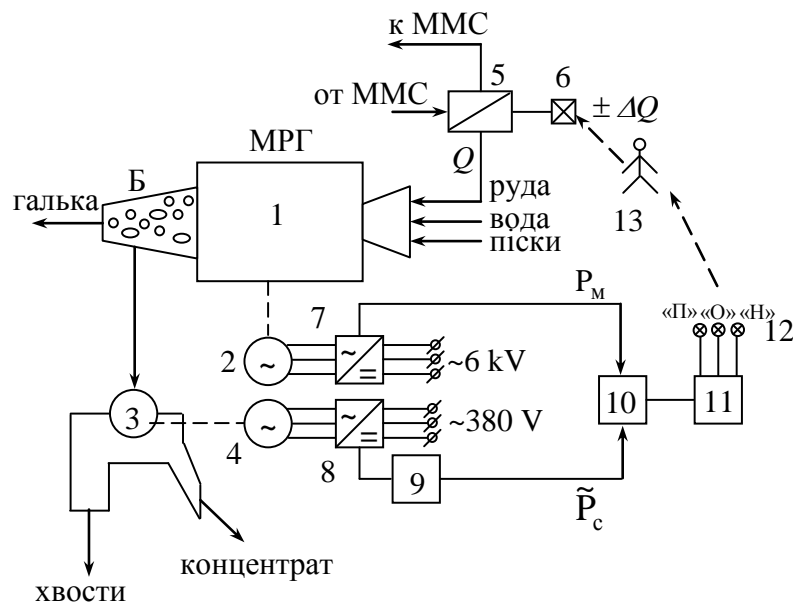


Рис. 9. Функціональна схема кореляційної системи автоматичного контролю ступеня завантаження рудою рудногалькового млина другої стадії подрібнення:

1 – рудногальковий млин МРГ; 2 – електродвигун млина; 3 – магнітний сепаратор; 4 – електродвигун сепаратора; 5 – регулюючий орган завантаженні млина рудою; 6 – виконуючий механізм; 7,8 – вимірювальні перетворювачі активної потужності; 9 – фільтр динамічної складової активної потужності; 10 – корелятор; 11 – логічний пристрій; 12 – сигнальні лампи; 13 – оператор млина;  $\pm \Delta Q$  – коригуючий вплив продуктивності за рудою  $Q$ ;  $\tilde{P}_c$  – динамічна складова сигналу активної потужності електродвигуна сепаратора;  $P_M$  – сигнал активної потужності електродвигуна млина; «П» – сигнал «перевантаження»; «О» – сигнал «оптимальне завантаження»; «Н» – сигнал «недовантаження».

Розроблені схеми алгоритмів автоматичного контролю ступеня завантаження рудою кульових і безкульових млинів секцій збагачення магнітозбагачувальних фабрик. Виконано експериментальні дослідження в промислових умовах системи автоматичного контролю ступеня завантаження рудою млина мокрого самоподрібнення.

Дослідження проводилися у двох режимах роботи. Перший режим автоматичної стабілізації заданого ступеня завантаження млина рудою шляхом корекції завдання системи автоматичного регулювання продуктивності на вході млина за показниками радіоізотопного індикатора заповнення РІЗМ. Другий режим автоматизованого контролю та регулювання ступеня завантаження рудою млина за мінімумом коефіцієнта кореляції між сигналами активної потужності електродвигунів сепаратора  $\tilde{P}_C$  и млина  $P_M$ .

Аналіз експериментальних даних показав, що при роботі кореляційної системи автоматизованого контролю та управління ступеня завантаження млина рудою середньоарифметичне значення вилучення заліза в концентрат склало:

$$\bar{\varepsilon}_1 = 0,89.$$

При роботі радіоізотопної системи автоматичного регулювання заповнення млина вилучення заліза в концентрат склало:

$$\bar{\varepsilon}_2 = 0,83.$$

Підвищення середньоарифметичного значення вилучення заліза склало:

$$\Delta \bar{\varepsilon} = \bar{\varepsilon}_1 - \bar{\varepsilon}_2 = 0,89 - 0,83 = 0,06.$$

Масова доля заліза в концентраті  $\bar{\beta}_k$  збільшилась на 2,25 %, а масова доля заліза в хвостах знизилась на 1,66 %, переробка руди збільшилася на 5%.

Отримані результати показали ефективність кореляційної системи автоматизованого контролю та регулювання ступеня завантаження млина рудою за запропонованим критерієм, оскільки підвищення вилучення заліза показує поліпшення розкриття руди, а зниження втрат заліза в хвостах характеризує зменшення переподрібнення руди.

Наводиться приклад технічної реалізації системи автоматичного контролю ступеня завантаження рудою барабаних млинів магнітозбагачувальних фабрик.

**У висновку** наводяться основні результати та висновки дисертації. Дисертація є завершеною науковою працею, в результаті виконання якої вирішена актуальна наукова задача встановлення нових закономірностей спільного формування сигналів активної потужності приводних електродвигунів барабаних млинів і магнітних сепараторів в технологічних комплексах магнітного збагачення залізних руд в залежності від ступеня завантаження рудою барабаних млинів з урахуванням руд змінних властивостей. На основі отриманих закономірностей розроблені метод і



функціонально-алгоритмічні структури систем автоматичного контролю оптимального ступеня завантаження рудою барабанних млинів різних типів за критерієм максимальної продуктивності комплексу за збагаченим продуктом.

Основними результатами дисертації є:

1. Отримано нові комплексні математичні моделі технологічних комплексів подрібнення і магнітної сепарації, що розв'язують моделі процесів подрібнення, класифікації та магнітної сепарації і моделі спільного формування сигналів активної потужності приводних електродвигунів млинів і магнітних сепараторів.

2. Отримано нові статичні характеристики залежності сигналу активної потужності електродвигуна магнітного сепаратора від сигналу активної потужності електродвигуна млина та встановлено закономірності дрейфу цих характеристик від технологічних параметрів подрібнення і фізико-механічних властивостей руди, що дозволило розробити метод автоматичного контролю ступеня завантаження барабанних млинів рудою зі змінними фізико-механічними властивостями.

3. Розроблено метод автоматичного контролю оптимального ступеня завантаження залізною рудою барабанних млинів за сигналами активної потужності електродвигунів млинів і магнітних сепараторів, який на відміну від контролю завантаження млина тільки за одним сигналом активної потужності електродвигуна млина, дозволяє автоматично визначати заповнення млина рудою з різними фізико-механічними властивостями.

4. Розроблено метод автоматичного контролю продуктивності технологічного комплексу подрібнення і магнітної сепарації за спектральною складовою сигналу активної потужності електродвигуна магнітного сепаратора, що відрізняється від відомого методу автоматичного контролю продуктивності магнітного сепаратора за загальним сигналом активної потужності сепаратора більш високою точністю, що дозволяє підвищити точність автоматичного контролю оптимального завантаження барабанних млинів залізною рудою за допомогою пілотного магнітного сепаратора.

5. Розроблено принципи побудови та технічні вимоги до систем автоматичного контролю оптимального завантаження барабанних млинів рудою на основі аналізу сигналів активної потужності електродвигунів млинів і сепараторів.

6. Розроблено функціонально-алгоритмічні структури систем автоматичного контролю ступеня завантаження рудою кульових млинів, млинів самоподрібнення і рудногалькових млинів.

7. Експериментальні дослідження системи автоматичного контролю ступеня завантаження рудою млина мокрого самоподрібнення показали, що система дозволяє підвищити продуктивність млина по переробленій руді на 5%, поліпшити розкриття руди і знизити переподрібнення руди.

Наукові положення та результати дисертації прийняті до впровадження на ВАТ «Центральний гірничо-збагачувальний комбінат» м. Кривий Ріг.

## ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Фарис Самир Расми Альхори. Моделирование процесса раскрытия руды в шаровой мельнице с позиций задач управления / Фарис Самир Расми Альхори, Е.В. Кочура // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2013. – № 1. – С. 102-107.

2. Фарис Самир Расми Альхори. Автоматический контроль производительности магнитного сепаратора на основе спектрального преобразования сигнала активной мощности электродвигателя / Фарис Самир Расми Альхори, М.А. Алексеев // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2014. – № 1. – С. 56-61.

3. Faris Sameer Rasmi Alkhori. Automated control of ore-pebble mill charge by the signal of active power of magnetic separator electric motor / Faris Sameer Rasmi Alkhori, M.O. Alekseyev // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2014. – № 3. – С. 71-76.

4. Фарис Самир Расми Альхори. Автоматизированный контроль степени заполнения барабанных мельниц рудой / Фарис Самир Расми Альхори, М.А. Алексеев // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2014. – № 4. – С. 13-19.

5. Фарис Самир Расми Альхори. Система автоматического контроля степени заполнения рудой мельницы мокрого самоизмельчения / Фарис Самир Расми Альхори // Гірнича електромеханіка та автоматика. – 2013. – № 91. – С. 54-58.

6. Фарис Самир Расми Альхори. Автоматический анализатор степени загрузки шаровой мельницы рудой по сигналам активной мощности электродвигателей магнитного сепаратора и мельницы / Фарис Самир Расми Альхори // Гірнича електромеханіка та автоматика. – 2014. – № 92. – С. 58-62.

7. Фарис Самир Расми Альхори. Автоматизированная система контроля загрузки барабанных мельниц рудой / Фарис Самир Расми Альхори // Материалы X международной научно-практической конференции [“Ключевые вопросы современной науки – 2014”], (Болгария, г. София, 17-25 апреля 2014 г.). – Бял ГРАД-БГ, 2014. – С. 15-20.

8. Фарис Самир Расми Альхори. Моделирование и управление процессом загрузки рудой барабанных мельниц / Фарис Самир Расми Альхори // Материалы всеукраинской научно-практической конференции [Інформаційні та моделюючі технології], (Черкасы, 29-31 мая 2014 г.). – ЧНУ им. Б. Хмельницкого, 2014. – С. 49-50.

В роботах, опублікованих у співавторстві, здобувачу належить: [1] – теоретичні залежності, моделі та алгоритми управління завантаженням барабаних млинів другої стадії рудою; [2] – наукове обґрунтування метода автоматичного контролю продуктивності магнітного сепаратора на основі спектрального перетворення сигналу активної потужності електродвигуна сепаратора; [3] – метод автоматизованого контролю ступеня завантаження млинів рудою за двома сигналами активної потужності електродвигунів млина і сепаратора; [4] – функціональна схема системи автоматизованого

контролю оптимального завантаження млинів рудою і результати обробки експериментальних даних.

### АНОТАЦІЯ

Фаріс Самір Расмі Альхорі. Метод автоматичного контролю ступеня завантаження рудою барабанних млинів магнітозбагачувальних фабрик. На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – Автоматизація процесів керування. Державний ВНЗ «Національний гірничий університет». Дніпропетровськ, 2015.

Дисертація присвячена вирішенню актуальної наукової задачі встановлення нових закономірностей спільного формування сигналів активної потужності електродвигунів млинів і магнітних сепараторів в технологічних комплексах магнітного збагачення залізних руд в залежності від ступеня завантаження рудою барабанних млинів з урахуванням змінних фізико-механічних властивостей руд.

Запропонований метод і системи автоматичного контролю оптимального ступеня завантаження рудою барабанних млинів дозволяють підвищити продуктивність технологічних комплексів магнітного збагачення руд та якість залізорудного концентрату.

Науково обґрунтовані метод, функціонально-алгоритмічні структури та технічні вимоги до систем автоматичного контролю оптимального ступеня завантаження рудою млинів різних типів за сигналами активної потужності електродвигунів млинів і сепараторів.

Результати роботи впроваджені на ПАТ «Центральний ГЗК» м. Кривий Ріг і можуть бути використані на магнітозбагачувальних фабриках залізних руд України та за кордоном.

**Ключові слова:** здрібнення руд, завантаження млинів, автоматичний контроль, системи та алгоритми автоматичного контролю та оптимізації.

### АННОТАЦИЯ

Фарис Самир Расми Альхори. Метод автоматического контроля степени загрузки рудой барабанных мельниц магнитообогатительных фабрик. На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.07 – Автоматизация процессов управления. ГВУЗ «Национальный горный университет». Днепропетровск, 2013.

Диссертация является законченной научной работой, в результате выполнения которой решена актуальная научная задача установления новых закономерностей совместного формирования сигналов активной мощности приводных электродвигателей барабанных мельниц и магнитных сепараторов в технологических комплексах магнитного обогащения железных руд и связи этих сигналов с загрузкой барабанных мельниц рудой. На основе полученных закономерностей разработаны метод и системы

автоматического контроля степени загрузки рудой барабанных мельниц магнитообогатительных фабрик.

Получены новые комплексные математические модели технологических комплексов измельчения и магнитной сепарации, связывающие модели процессов измельчения, классификации и магнитной сепарации и модели совместного формирования сигналов активной мощности приводных электродвигателей мельниц и магнитных сепараторов.

Получены новые статические характеристики зависимости сигнала активной мощности электродвигателя магнитного сепаратора от сигнала активной мощности электродвигателя мельницы и установлены закономерности дрейфа этих характеристик от технологических параметров измельчения и физико-механических свойств руды, что позволило разработать метод автоматического контроля степени загрузки барабанных мельниц рудой с переменными физико-механическими свойствами.

В качестве критерия оптимизации степени загрузки мельницы рудой с переменными свойствами предложено использовать максимальную производительность по магнитному продукту магнитного сепаратора, последовательно соединенного с мельницей.

Степень загрузки железной рудой барабанных мельниц определяется по знаку эмпирического коэффициента корреляции между выборочными значениями активной мощности электродвигателей мельницы и магнитного сепаратора, причем для мельниц мокрого самоизмельчения, если этот знак положительный, то мельница недогружена, а если этот знак отрицательный, то мельница перегружена. Для шаровых мельниц, наоборот, положительный знак соответствует перегрузке мельницы, а отрицательный знак соответствует недогрузке мельниц рудой.

Разработан метод автоматического контроля производительности по магнитному продукту технологического комплекса измельчения и магнитной сепарации по спектральной составляющей сигнала активной мощности электродвигателя магнитного сепаратора, отличающийся от известного метода автоматического контроля производительности магнитного сепаратора по общему сигналу активной мощности сепаратора более высокой точностью, что позволяет снизить приведенную ошибку измерения производительности комплекса с 13% до 4,7%.

Разработаны принципы построения и технические требования к системам автоматического контроля оптимальной загрузки барабанных мельниц рудой на основе анализа сигналов активной мощности электродвигателей мельниц и сепараторов.

Разработаны функционально-алгоритмические структуры систем автоматического контроля степени загрузки рудой шаровых мельниц, мельниц самоизмельчения и рудногалечных мельниц.

Экспериментальные исследования системы автоматического контроля степени загрузки рудой мельницы мокрого самоизмельчения показали, что система позволяет повысить производительность мельницы по

переработанной руде на 5%, улучшить раскрытие руды и снизить переизмельчение руды.

Научные положения и результаты диссертации приняты к внедрению на ОАО «Центральный горно-обогатительный комбинат» г. Кривой Рог.

**Ключевые слова:** измельчение руд, загрузка мельниц, автоматический контроль, системы и алгоритмы автоматического контроля и оптимизации.

## SUMMARY

Faris Samir Rasmi Alhori. Automatic control method of drum mills loading degree with ore on magnetic concentration plants. Manuscript

Thesis for obtaining a candidate of technical sciences degree, specialty 05.13.07 –Automation of control processes. State institute of higher education “National Mining University”. Dnepropetrovsk, 2015

The thesis deals with the actual scientific problem to establish new regularities in forming compatible active power signals of mill electromotor and magnetic separator in technological complexes for iron ore magnetic separation. The relation between the signals and drum mills loading degree is studied with variable physical and mechanical properties of ore taking into account.

Method and system for automatic control of drum mills optimal loading degree are developed. The method and the system allow increasing technological complexes productivity and iron ore concentrate quality.

Scientific basis is given to functional and algorithmic structures and specifications for the automatic control system by the active power signals of mill and separator motor drives.

Results of the study are implemented at JSC "Centralniy GOK", Krivoy Rog and can be used for iron ore magnetic enrichment factories in Ukraine and abroad.

**Keywords:** ore reduction, mill loading, automatic control, systems and algorithms for automatic control and optimization.

**Фаріс Самір Расмі Альхорі**

**МЕТОД АВТОМАТИЧНОГО КОНТРОЛЮ СТУПЕНЯ  
ЗАВАНТАЖЕННЯ РУДОЮ БАРАБАННИХ МЛИНІВ  
МАГНІТОЗБАГАЧУВАЛЬНИХ ФАБРИК**

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата  
технічних наук

Підписано до друку .2015. Формат 60 x 90/16.  
Папір офсетний. Ризографія. Ум. друк. арк. 0,9.  
Авт. арк. 0,9. Тираж 100 пр. Зам. № \_\_\_\_\_

Державний вищий навчальний заклад  
«Національний гірничий університет»  
49005, м. Дніпропетровськ, просп. К. Маркса, 19.