

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра "Автоматизації виробничих процесів"

"Допущено до захисту"

Зав.кафедрою АВП

к.т.н., доцент

_____ Дідик О.К.

" _____ " _____ 2025р.

ВИПУСКНА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти

на тему

" Система автоматичного керування сухим магнітним збагаченням "

" Automatic control system for dry magnetic beneficiation "

Виконав: здобувач вищої освіти

IV курсу, групи АК-22мб

ОПП «Автоматизація та

комп'ютерно-інтегровані технології»

спеціальність 151 «Автоматизація та

комп'ютерно-інтегровані технології»

_____ Гжегож ЖЕЛЕХОВСКИ

" _____ " _____ 2025р.

Керівник роботи

професор, д-р техн.наук

_____ Анатолій Мацуї

" _____ " _____ 2025р.

Рецензент _____

ЗМІСТ

ВСТУП.....	3
1 Призначення та область застосування повітряного транспортера.....	5
1.1. Опис технологічного процесу магнітної сепарації.....	5
1.2. Методи оптимізації технологічного процесу.....	9
1.3. Аналіз магнітних сепараторів для сухого збагачення залізних руд.....	11
2 Огляд існуючих рішень та обґрунтування прийнятого принципу побудови виробу.....	16
2.1 Аналіз існуючих систем автоматичного контролю і керування процесами магнітної сепарації.....	16
3 Опис та обґрунтування обраних проектних рішень та конструкцій.....	25
3.1 Математичний опис магнітного сепаратора сухого збагачення.....	25
3.2 Вибір керуючого впливу для автоматичного регулювання положення межі поділу.....	29
3.3 Розробка САК межі поділу процесу сухої магнітної сепарації.....	31
3.4 Технічне забезпечення кореляційних систем регулювання магнітними сепараторами.....	35
3.5 Обґрунтування функціональної схеми статистичного регулювання процесу сухої магнітної сепарації.....	38
3.6 Інформаційне забезпечення САК продуктивністю сепаратора.....	41
4 Розрахунки та експериментальні матеріали, що підтверджують працездатність системи.....	44

4.1 Імітаційне моделювання САРД.....	44
4.2 Дослідження диференціальної системи екстремального регулювання продуктивності магнітного сепаратора.....	49
4.3 Дослідження динаміки системи та якості перехідних процесів.....	51
4.4 Дослідження імпульсної системи регулювання межі поділу магнітного сепаратора зміною швидкості обертання його барабана.....	53
Висновки.....	56
Література.....	58

ВСТУП

Згідно з основними векторами науково-технічного розвитку, визначеними Законом України про засади державної політики у сфері науки та науково-технічної діяльності, впровадження автоматизованих технологій та раціональне використання енергоресурсів є ключовими чинниками сучасного технічного поступу.

Основою для розвитку чорної металургії в Україні слугують гірничо-збагачувальні підприємства, що спеціалізуються на випуску залізородного концентрату. Підвищення продуктивності гірничо-металургійного комплексу безпосередньо залежить від поліпшення якісних характеристик концентрату, зменшення витрат на його виробництво та ефективного використання енергоресурсів. Досягнення цих цілей є неможливим без упровадження автоматизованого контролю та управління процесом магнітного збагачення руд.

Системи автоматичного регулювання та моніторингу, які впроваджуються у процесах мокрого магнітного збагачення, зазвичай базуються на складних і недовговічних технічних засобах. Ефективність процесу усереднення руди здебільшого оцінюється шляхом лабораторного аналізу технологічних проб. Проте з огляду на сучасний рівень технологічного розвитку виникає потреба в автоматизованому контролі параметрів усереднення – як за текстурними характеристиками (твердість, фракційний склад), так і за структурними показниками, зокрема вмістом заліза. У той же час, на більшості збагачувальних підприємств майже не застосовуються автоматизовані методи технічної діагностики магнітних сепараторів – їхній стан оцінюють лише під час планових оглядів або вже після виникнення поломок.

Використання магнітного сепаратора як дослідного обладнання, що одночасно виконує інформаційні й технологічні завдання, може стати ефективним способом розв'язання зазначених проблем.

Однак на шляху реалізації цього підходу стоїть складність, пов'язана з варіативністю схем мокрого збагачення, які впроваджені на збагачувальних підприємствах. Це зумовлює необхідність створення спеціалізованих методик автоматизованого моніторингу та налаштування систем магнітної сепарації, у яких окремі пристрої з'єднуються згідно з конкретною технологічною конфігурацією.

Автоматизоване регулювання та оптимізація роботи магнітних сепараторів за параметрами електричних сигналів дозволяє ефективно вирішувати низку важливих задач для збагачувальних фабрик України. Зокрема, це сприяє покращенню керування процесами магнітного збагачення, зменшенню енергоспоживання, зниженню втрат заліза у відходах, підвищенню якості та збільшенню виходу концентрату. Отже, вибрана тема кваліфікаційної роботи дослідження є своєчасною й цілком обґрунтованою.

1 Призначення та область застосування системи керування сухим магнітним збагаченням

1.1 Опис технологічного процесу магнітної сепарації

Магнітна сепарація – це метод збагачення рудної сировини, що базується на різниці магнітних характеристик складників суміші. В основі процесу – відмінності в магнітній сприйнятливості, залишковій намагніченості, коерцитивній силі тощо. Такий спосіб застосовується для обробки мінералів та їх зростків з розмірами частинок до 150 мм у неоднорідному магнітному полі, яке може бути як постійним, так і змінним.

Магнітна сепарація ґрунтується на відмінностях у магнітній сприйнятливості мінералів: частинки з вищими магнітними властивостями притягуються до полюсів магнітної системи й транспортуються до відсіків для магнітних фракцій, тоді як немагнітні та слабомагнітні зерна залишаються під дією потоку і спрямовуються до збірників немагнітних компонентів. Такий принцип поділу застосовується як для слабомагнітних, так і для сильномагнітних руд.

Магнітне збагачення здебільшого здійснюється в постійних магнітних полях із нерівномірним розподілом сили, і є провідною технологією переробки залізовмісних і марганцевих руд – її частка в світовому масштабі становить близько 70%. Цей метод забезпечує отримання концентратів високої якості з вмістом заліза до 68% і марганцю до 43%, при цьому ефективність вилучення магнітних компонентів перевищує 90%. Окрім руд чорних металів, магнітна сепарація також знаходить застосування у збагаченні кольорових, рідкоземельних та гірничо-хімічних руд, а також сировини нерудного походження. Її використовують як завершальну стадію після гравітаційних методів обробки або для очищення матеріалів – таких як каолін, формувальні піски та подібне – від частинок, що містять залізо або металеві включення.

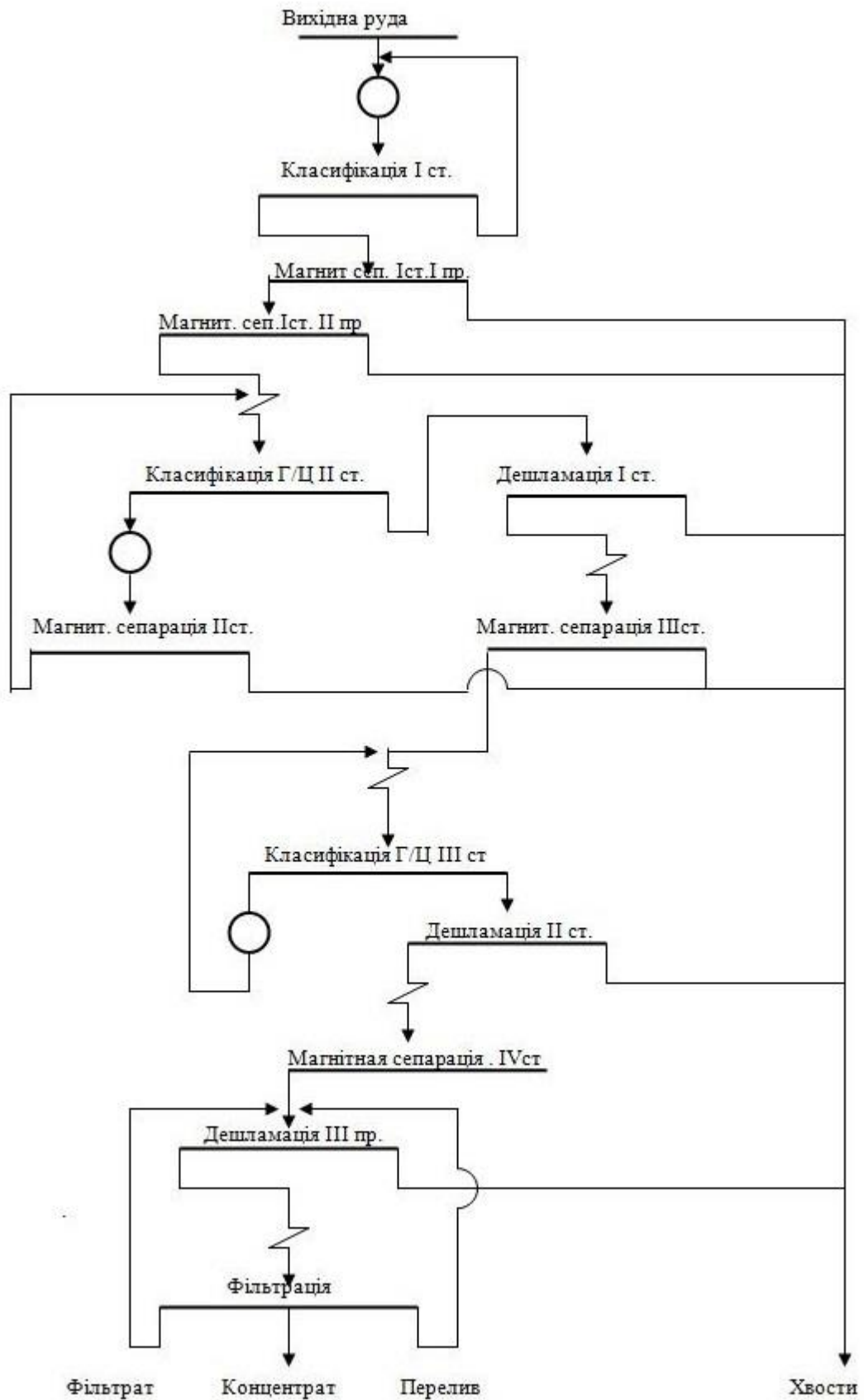


Рисунок 1.1 – Технологічна схема на прикладі ГЗК

Магнітну сепарацію класифікують залежно від величини магнітної сприйнятливості компонентів суміші: на процеси для слабомагнітних та сильномагнітних матеріалів. Крім того, розрізняють сухий та мокрий способи поділу – в залежності від агрегатного стану середовища. З метою посилення відмінностей у магнітних характеристиках між фазами, суміш може піддаватися термічній обробці: випалу в окислювальних умовах (для сідеритових, карбонатних та схожих руд) або в атмосфері, що відновлює (для руд з оксидними формами заліза).

Системи магнітної сепарації виконують функцію відділення частинок із феромагнітними властивостями від решти, що не реагують на магнітне поле.

Суху магнітну сепарацію використовують у процесах дроблення та сортування на фабриках, що займаються підготовкою залізовмісних руд до металургійної переробки. Вона також ефективна для вилучення значної частини малозалізистих компонентів і пустої породи перед наступним етапом – збагаченням магнетитової сировини за допомогою мокрої магнітної сепарації.

Основною вимогою до агломераційної сировини є стабільний рівень вмісту заліза. Оскільки руди, що надходять на суху магнітну сепарацію, мають нестійкі характеристики, для забезпечення необхідної концентрації заліза використовують систему автоматичного керування.

Деякі збагачувальні підприємства застосовують як основний метод одержання концентрату саме суху магнітну сепарацію.

Прикладом вилучення бідних рудних компонентів до початку мокрої магнітної сепарації слугує технологічний процес Полтавського гірничо-збагачувального комбінату.

На рис.1.2 зображено схему попереднього етапу сухої магнітної сепарації.

Отриманий концентрат здебільшого надходить на огрудкувальні установки комбінату для виготовлення залізорудних окатишів.

Відходи, що утворюються внаслідок сухого магнітного збагачення, можуть використовуватись як сировина в будівельній галузі.

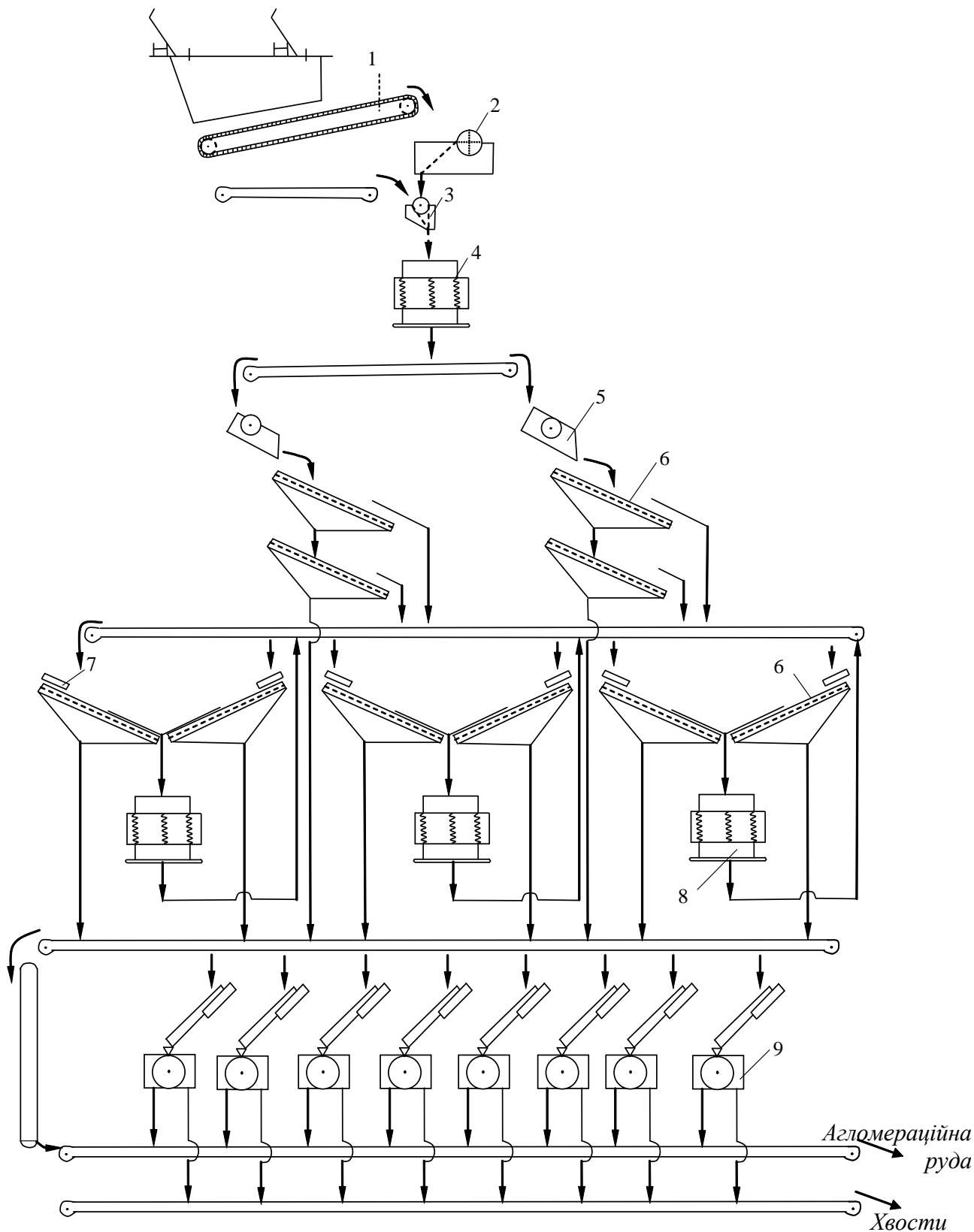


Рисунок 1.2 – Схема ланцюгів апаратів дробильно-сортувальної фабрики:

1 - пластинчастий живильник 1-24-120 (1); 2 - щоків дробарка 1500 × 2100 мм (1); 3 - ланцюговий живильник ЦП-1200 (1); 4 - конусна дробарка середнього дроблення КСД-2100 (1); 5 - барабанний живильник діаметром 1000 мм (2); 6 - інерційний грохот похилий важкого типу 155-Гр (10); 7 - лоткові

живильник 1000 × 3100 мм (6); 8 - конусна дробарка дрібного дроблення КМД-2200 (3); 9 - магнітний барабанний сепаратор для сухої сепарації, діаметр барабана 900 мм, довжина 1040 мм (8)

Розгляд технологічних схем процесів сухої магнітної сепарації як об'єктів автоматизації дає змогу визначити основну ціль управління – досягнення найвищої ефективності розділення сировини на цінні та малопродатні компоненти. Управління спрямоване на максимально повне вилучення відходів і підвищення концентрації корисного компонента.

1.2 Методи оптимізації технологічного процесу

Магнітну сепарацію вважають однією з ключових і найвідповідальніших стадій у процесі збагачення залізних руд. Її результативність суттєво впливає на загальні технологічні характеристики всього збагачувального циклу. Особливо важливою є ефективність тих етапів, що розташовані на початку схеми – саме вони формують основу для подальших процесів. Зокрема, основні операції визначають не лише якість кінцевого продукту, а й економічну доцільність виробництва.

Стан першої стадії магнітної сепарації, зокрема режим функціонування обладнання, набуває особливого значення. Це пояснюється тим, що подібну операцію зазвичай здійснюють на обмеженій кількості сепараторів (переважно двох), кожен з яких має високу одиничну продуктивність. Через це навіть незначне відхилення в роботі одного сепаратора може суттєво вплинути на стабільність і ефективність усього подальшого технологічного процесу, адже несправність одного пристрою охоплює значну частку загального потоку сировини – до половини або третини.

Одним із ключових чинників, що впливають на ефективність процесу мокрої магнітної сепарації, є режим водопостачання – тобто обсяг технічної води, яка подається під час операції.

Найчастіше причиною нестабільної або неефективної роботи установки є саме дефіцит додаткової води. Через складність візуального контролю розподілу рідини по кожному сепаратору, часто виникає нерівномірне надходження води до окремих ділянок системи.

Якщо обсяг води буде недостатнім, це негативно вплине на якість кінцевого продукту. У свою чергу, надмірне водопостачання сприяє підвищеним втратам цінних компонентів із хвостами та зменшенню ступеня вилучення.

Щоб досягти більш рівномірного зволоження у процесі мокрої магнітної сепарації, пропонується керувати подачею додаткової води на основі аналізу температури живлення кожного сепаратора та температури кінцевих продуктів (наприклад, хвостів). За умови однакового надходження сировини на всі сепаратори, втілення цього підходу не викликає особливих труднощів. Якщо вода розподіляється нерівномірно, це можна виявити через відмінності температур оброблених продуктів між окремими сепараторами.

Температура додатково введеної води зазвичай нижча за температуру пульпи. Найбільша різниця температур спостерігається тоді, коли в якості живлення подається продукт попереднього подрібнення – наприклад, матеріал після першої стадії подрібнення, хвостові продукти мокрої магнітної сепарації чи додаткова вода.

При підвищенні температури живильного потоку операції стає легше виявити нерівномірність розподілу доданої води. Для забезпечення стабільної роботи магнітної сепарації застосовується такий підхід: подачу води регулюють за допомогою зміни положення засувки (або клапанів) на трубопроводах. При цьому на сепаратори, де температура вихідного потоку більша, збільшують подачу води, а на ті, де вона нижча – зменшують. Таким чином, досягають вирівнювання температури продукту, що виходить із різних сепараторів, за рахунок оптимального розподілу додаткової води.

Отже, впровадження запропонованого методу керування й удосконалення процесу магнітної сепарації сприяє покращенню результативності роботи кожного сепаратора в технологічному ланцюгу, запобігаючи необґрунтованому

зниженню якості готової продукції або перевитратам цінного матеріалу у відходах.

Варто пам'ятати, що магнітний сепаратор являє собою складну конструкцію з неоднорідним розподілом магнітного поля в просторі. Тому конфігурація поля формується під впливом взаємодії численних різнорідних магнітних компонентів усередині системи.

Для вдосконалення конструкції магнітних сепараторів на основі постійних магнітів запропоновано застосування методу магнітного кола. Цей підхід передбачає заміну фізичної моделі сепаратора сукупністю елементів у вигляді магнітних провідників і джерел, що моделюють реальні процеси. Створені моделі заміщення ефективно враховують розсіювання магнітного потоку, встановлюється залежність між параметрами моделі та табличними характеристиками матеріалу магнітів. Також наведено рекомендації щодо врахування впливу зовнішнього магнітного поля на роботу системи.

1.3 Аналіз магнітних сепараторів для сухого збагачення залізних руд

Залежно від крупності та фізико-хімічних властивостей сировини, для її збагачення застосовують різні типи магнітних сепараторів, зокрема барабанні, валкові, дискові, стрічкові, роторні тощо. Найчастіше для обробки матеріалів із високою магнітною сприйнятливістю використовують барабанні моделі, тоді як для слабомагнітних – перевагу надають валковим і роторним. До основних конструктивних складових магнітного сепаратора належать: магнітна система, механізм подачі, ванна (в разі мокрого процесу), транспортувальні елементи (валки, ротори, барабани), жолоби, канали для розділених фракцій, привідна система та опорна рама.

У роторних магнітних сепараторах частинки, які затримуються під дією поля, під час обертання ротора поступово виходять із зони дії магнітної сили та змиваються водою до ємностей із магнітним концентратом. При цьому магнітна система залишається стаціонарною, подібно до конструкції барабанного типу.

Такі сепаратори виробляють у різних варіантах типорозмірів залежно від призначення. Їхня продуктивність визначається переважно розміром частинок, що підлягають розділенню. Для переробки руд із високими магнітними властивостями використовують апарати з барабанами діаметром до 1,5 метра та довжиною до 4 метрів. Вони можуть обробляти від 40 до 250 тонн на годину, залежно від фракції матеріалу (від 0–0,074 мм до 0–3 мм). При збагаченні слабо намагнічених руд діаметр ротора може сягати 6 метрів, а продуктивність – приблизно 300 т/год для матеріалу з розміром частинок до 0,1 мм.

Розглянемо будову та принцип дії магнітних сепараторів, що використовуються у процесах сухого збагачення корисних копалин.

Електромагнітний барабанний сепаратор типу 171А-СЕ (рис. 1.3) застосовується для збагачення руди з великим розміром фракцій, зокрема магнетитової. У цій моделі використовується електромагнітна система з полюсами у формі сталевих секторів, розташованих уздовж осі барабана з чергуванням полярності. Між полюсами встановлено котушки з охолоджувальними елементами; охолодження здійснюється за допомогою води.

Принцип работы сепаратора 171А-СЭ.

Руда з вологістю до 4–5% подається в приймальну камеру, після чого вібраційний живильник рівномірно розподіляє її по поверхні обертового барабана. Поблизу полюсів електромагнітної системи магнітні включення притягуються до барабана, далі вони переміщуються в зону зі знизеним магнітним впливом, де й вивантажуються. Немагнітні компоненти відокремлюються у верхній частині барабана і скеровуються у хвостову частину.

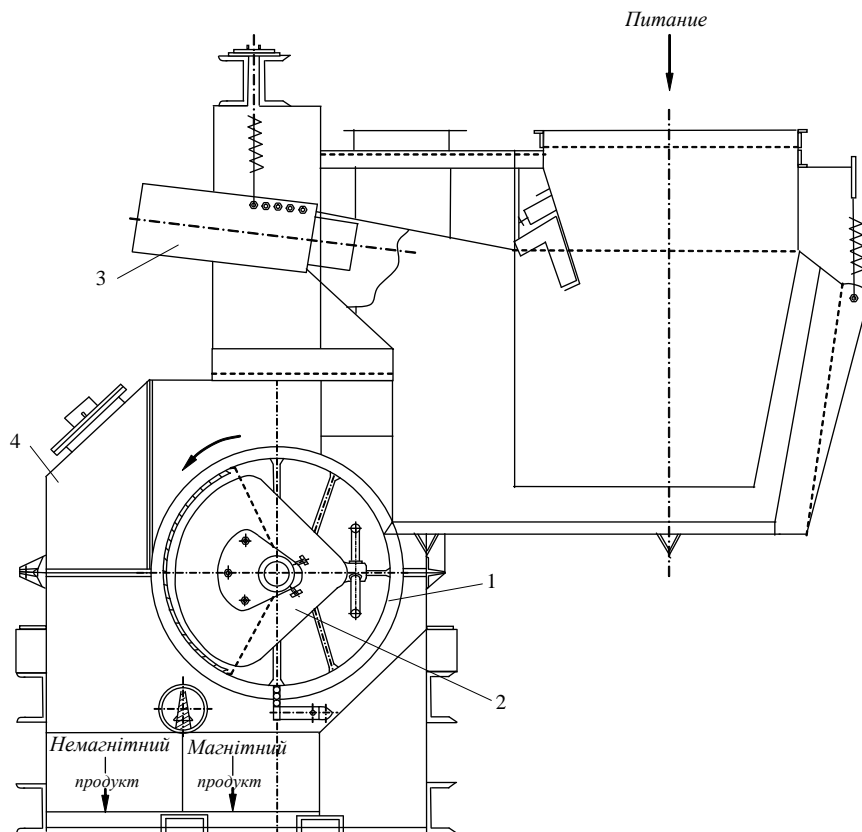


Рисунок 1.3 – Електромагнітний барабанний сепаратор 171А-СЕ:

1 - барабан; 2 - електромагнітна система; 3 - електровібраційний живильник; 4 - рама з кожухом

Магнітний барабанний сепаратор типу 189А-СЕ з подачею сировини зверху використовується для збагачення крупнозернистої руди з вмістом магнетиту.

У пристрої на двох нижніх барабанах здійснюється повторне очищення немагнітного матеріалу, який був попередньо відділений на верхніх елементах.

За своїм функціональним принципом сепаратор 189А-СЕ подібний до моделей 171А-СЕ та 168А-СЕ.

Верхні барабани сепаратора оснащені п'ятиполюсними, а нижні – триполюсними магнітними системами на основі сплаву ЮНДК-24. Полюси чергуються по колу барабана, що сприяє інтенсивному магнітному перемішуванню рудної маси. У моделі 189А-СЕ замість вбудованого вібраційного живильника, як у сепараторі 168А-СЕ, передбачено лише приймальну камеру з механізмом розподілу сировини. Цей розподільний пристрій, виконаний у вигляді металевої платформи, яка обертається за

допомогою приводу, направляє потік руди попеременно на ліву або праву сторону барабанів.

Сепаратор моделі 189А-СЕ вирізняється високою продуктивністю – до 400–500 тонн за годину при переробці руди фракцією -50 +0 мм. Це дає змогу ефективно поєднувати його з агрегатами середнього дроблення та подавати матеріал у розподільник із бункера через стрічковий транспортер або віброживильник. Верхні барабани обладнані приводом, який забезпечує регулювання швидкості обертання в діапазоні 50–100 об/хв, що впливає на якість та обсяг магнітної фракції. Нижні барабани також мають змінну частоту обертання – від 30 до 50 об/хв.

Барабанний магнітний сепаратор моделі 206б-СЕ (див. рис. 1.4) використовується для обробки дрібнозернистої руди магнетитового типу, виробництва залізних порошоків підвищеної якості та видалення заліза з різних речовин.

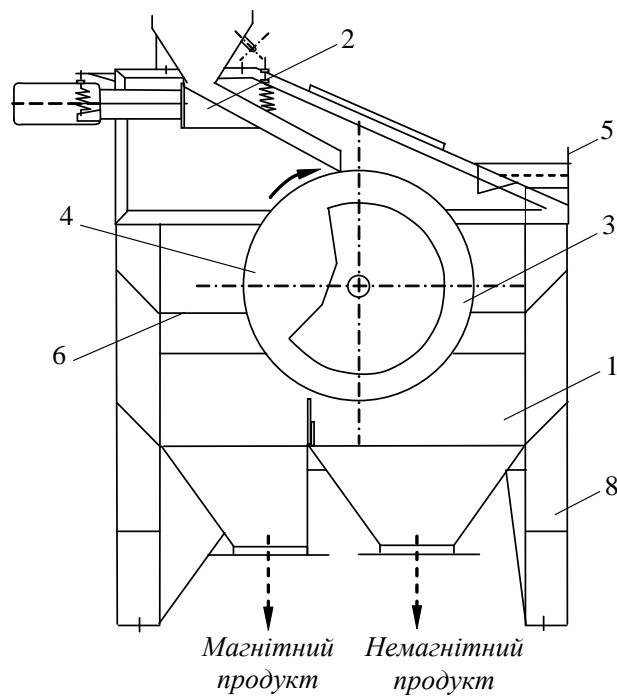


Рисунок 1.4 – Магнітний барабанний сепаратор 206б-СЕ:

- 1 - бункер; 2 - вібраційний живильник; 3 - магнітна система; 4 - барабан; 5 - патрубок для відсмоктування пилу; 6 - скребок; 7 - кожух з приймачами продуктів сепарації; 8 – рама.

Аналіз конструкцій та принципів роботи магнітних сепараторів дає змогу сформулювати такі висновки:

1. Основними вхідними керуючими параметрами в процесі магнітної сепарації виступають продуктивність за вихідною сировиною та швидкість обертання барабана пристрою.

2. Серед керованих вихідних характеристик виділяють вміст заліза в концентраті й у хвостах після обробки.

3. На ефективність процесу сухої магнітної сепарації суттєво впливають фізико-механічні властивості початкової руди. Оскільки розділення матеріалу відбувається за магнітною сприйнятливістю, її нестабільність є основним джерелом збурень.

4. Сухі магнітні сепаратори відрізняються конструкційною різноманітністю: вони можуть мати один або кілька барабанів, оснащуватись регульованим чи фіксованим приводом та системами подачі. Через це автоматизація їхньої роботи потребує адаптованих та спеціалізованих методів.

2 Огляд існуючих рішень та обґрунтування прийнятого принципу побудови виробу

2.1. Аналіз існуючих систем автоматичного контролю і керування процесами магнітної сепарації

На збагачувальних фабриках, що переробляють залізні руди, ключову роль відіграє мокра магнітна сепарація, яка є основним технологічним етапом. Саме через це більшість наукових праць і публікацій зосереджуються на питаннях автоматизації саме цього процесу. Натомість етапи попереднього зневоднення або сухої магнітної сепарації вважаються допоміжними, тому залишаються без належного автоматизованого контролю, а в джерелах майже не висвітлюється їх автоматизація.

Актуальним з наукової та прикладної точок зору є аналіз існуючих методів автоматизованого контролю під час мокрої магнітної сепарації, щоб оцінити перспективи їх впровадження для автоматизації процесів сухої сепарації. Звернемо увагу на системи керування, що забезпечують контроль параметрів магнітної сепарації.

Для автоматизованої оцінки ефективності процесу усереднення руди запропоновано метод, який ґрунтується на спільному спектральному аналізі центрованих стохастичних процесів зміни в часі сигналів активної потужності електроприводів млина, спіральних класифікаторів та магнітних сепараторів, що працюють на першому етапі збагачення. У розрахунок також беруться масова частка заліза у вихідній сировині та питома енерговитрата на подрібнення, що опосередковано відображає твердість, розмірність і текстурні характеристики рудного матеріалу. Спектральні щільності, отримані в результаті експериментальних досліджень, подані на рис. 2.1 та 2.2.

Метод автоматизованого регулювання числа магнітних сепараторів, що функціонують паралельно та формують фронт магнітної сепарації, розроблено з урахуванням характеристик розподілу сигналів активної потужності.

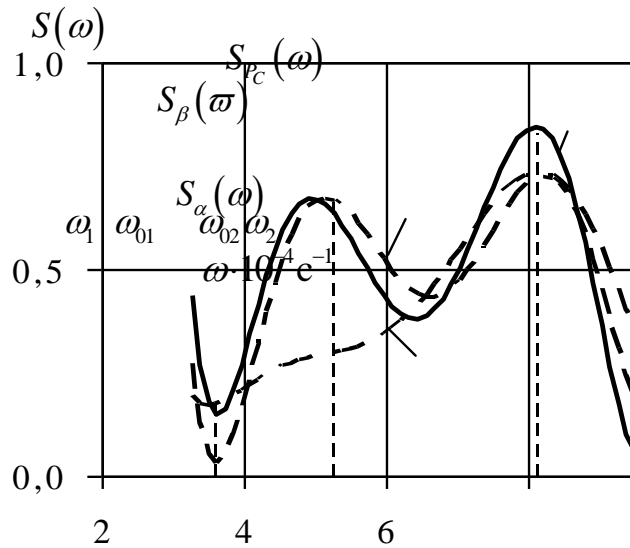


Рисунок 2.1 – Спектральні щільності інформаційних параметрів:
 $S_{\alpha}(\omega)$ -спектральна щільність центрованого випадкового процесу зміни у часі масової частини заліза у первинній руді; $S_{\beta}(\omega)$ - спектральна щільність центрованого випадкового процесу зміни у часі масової частини заліза в промпродукті сепаратора, $S_{P_C}(\omega)$ - спектральна щільність сигналів активної потужності електродвигуна магнітного сепаратора; ω_1, ω_2 - граничні частоти;
 ω_{01}, ω_{02} - резонансні частоти

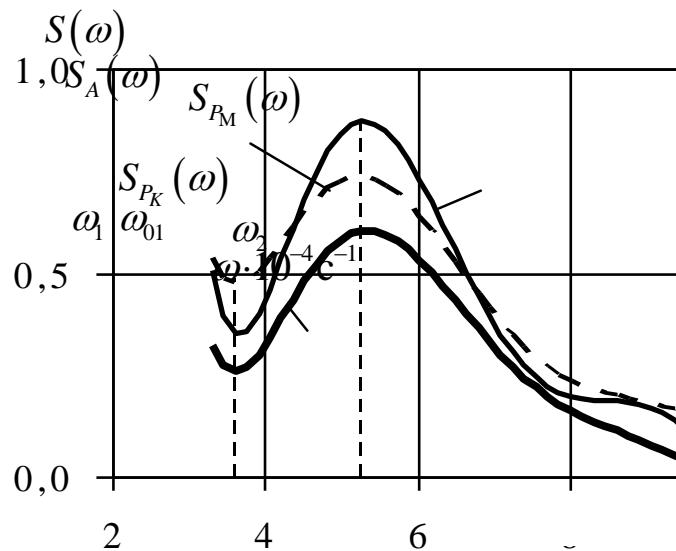


Рисунок 2.2 – Спектральні щільності інформаційних параметрів:
 $S_A(\omega)$ - спектральна щільність центрованого випадкового процесу зміни у часі питомої роботи подрібнення руди; $S_{P_M}(\omega), S_{P_K}(\omega)$ - відповідно спектральна щільність сигналів активної потужності приводних електродвигунів млина і

класифікатора; ω_{01} - резонансна частота; ω_1, ω_2 - граничні частоти

Визначено доцільні межі перемикання кількості сепараторів, базуючись на зменшенні ризику прийняття управлінських рішень з урахуванням рівня їхнього споживання активної потужності. Наприклад, за умови постійної роботи одного сепаратора і максимальної кількості в три одиниці, оптимальним значенням межі для перемикання є:

$$P_{02} = \frac{\delta^2}{m_2 - m_3} \ln \frac{a_2 C_2}{a_3 C_3} + \frac{m_2 + m_3}{2}, \quad (2.1)$$

де δ - середньоквадратичне відхилення сигналу активної потужності; m_2 і m_3 - математичні очікування сигналів активної потужності відповідно при двох і трьох включених сепараторах; a_2 і a_3 - відповідно ймовірності роботи двох і трьох працюючих сепараторів; C_2 і C_3 - відповідно вартість втрат від помилкового включення та відключення сепаратора.

Число одночасно задіяних у процесі збагачення магнітних сепараторів автоматично коригується залежно від величини активної потужності, яку споживають електродвигуни з мережі. Це зумовлено обсягом магнітного продукту, що проходить через сепаратори.

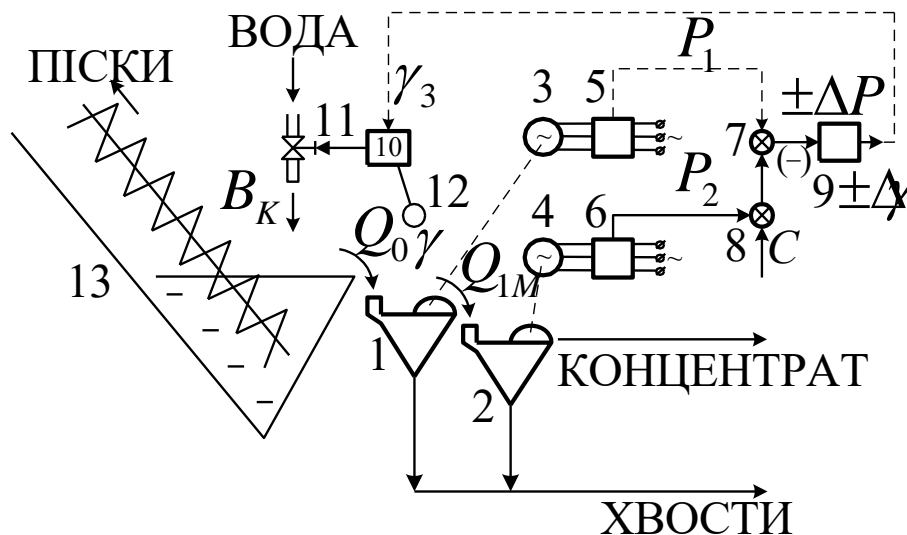


Рисунок 2.3 – Функціональна схема системи автоматичної оптимізації

1, 2 - магнітні сепаратори; 3, 4 - електродвигуни; 5, 6 - вимірювальні перетворювачі активної потужності; 7, 8 - суматори; 9 - релейний блок; 10 - регулятор густини зливу; 11 - клапан витрати води; 12 - густиномір; 13 -

класифікатор; B_K - витрата води у класифікатор; Q_0 - продуктивність твердої фази пульпи класифікатора; $\pm\Delta\gamma$ - сигнал зміни густини зливу класифікатора; Q_{1M} - продуктивність за магнітним продуктом сепараторів першого прийому; P_1, P_2 - вихідні токові сигнали вимірювальних перетворювачів активної потужності; C - постійний зсув; γ_3 - завдання регулятора густини зливу.

Розроблено метод автоматизованого визначення вмісту заліза шляхом вимірювання напруженості магнітного поля в зоні дії сепаратора [1].

На рис.2.4 зображено функціональну схему системи контролю концентрації магнітних компонентів у продукті, що виходить із барабанного сепаратора.

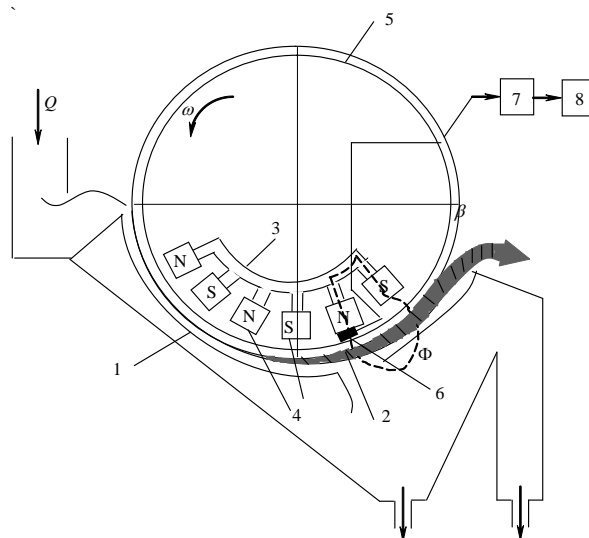


Рисунок 2.4 – Функціональна схема системи автоматичного контролю вмісту магнітних фракцій:

1-ванна сепаратора; 2-магнітний продукт; 3-ядро; 4-постійні магніти; 6-датчик; 7-підсилювально-перетворювальний блок; 5-барабан; 8-вторинний прилад

Рудна пульпа з постійною продуктивністю Q , що відповідає оптимальним умовам функціонування сепаратора, подається до його ванни 1. Під дією магнітного поля, яке створюється магнітною системою з ядра 3 та постійних магнітів 4, з пульпи вилучається магнітний компонент 2. Цей компонент накопичується на поверхні барабана 5 – робочого елемента сепаратора, який обертається з заданою швидкістю. Зміни у вмісті магнітних частинок

впливають на параметри магнітного поля, зокрема на магнітний потік Φ . Для контролю напруженості магнітного поля використовується датчик 6, який фіксує відповідне значення. Отриманий сигнал посилюється і обробляється блоком 7, після чого надходить до вторинного вимірювального приладу 8 для подальшого аналізу.

Існує метод і систему для моніторингу вмісту заліза в промисловому продукті магнітного сепаратора шляхом вимірювання нормальної складової напруженості магнітного поля в його робочій області. Структурну схему запропонованої системи наведено на рис.2.5.

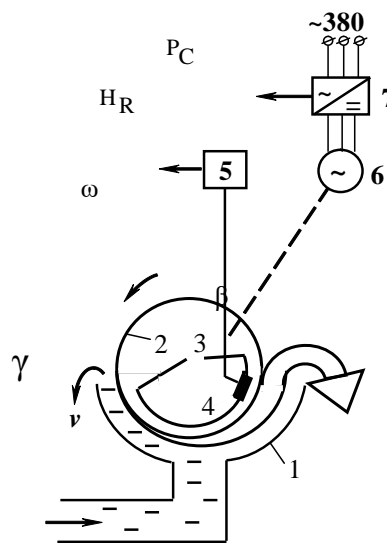


Рисунок 2.5 – Схема контролю процесу магнітної сепарації, побудована за змінним електротехнічним параметром, відображає взаємозв'язки між елементами системи автоматизації.

1-ванна сепаратора; 2-барабан; 3-магнітна система; 4-магнітний резистор; 5- підсилювачно-перетворювальний блок; 6-електродвигун барабана; 7- вимірювальний перетворювач активної потужності, споживаної електродвигуном барабана

Залежність нормальної складової напруженості магнітного поля сепаратора H_R від масової частки заліза в промпродукті представлена на рис.2.6. Досліджено залежність активної потужності приводного електродвигуна P_C барабана магнітного сепаратора від продуктивності сепаратора по магнітному залізу Q_M [2], представлена на рис. 2.7.

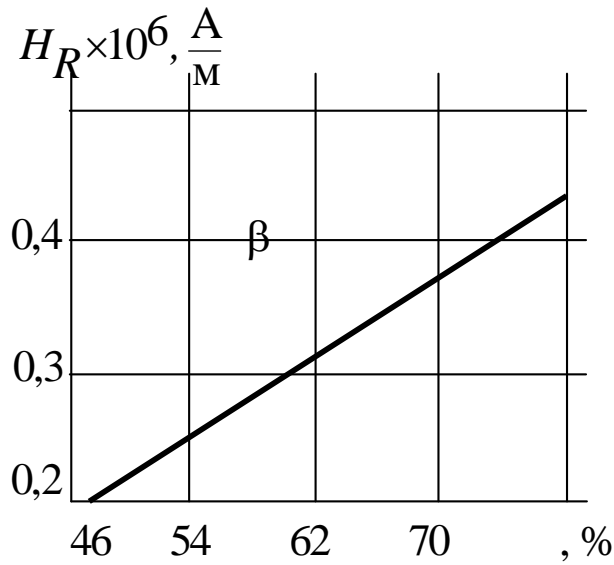


Рисунок 2.6 – Вплив вмісту заліза на величину нормальної компоненти магнітної напруженості в активній зоні дії сепаратора.

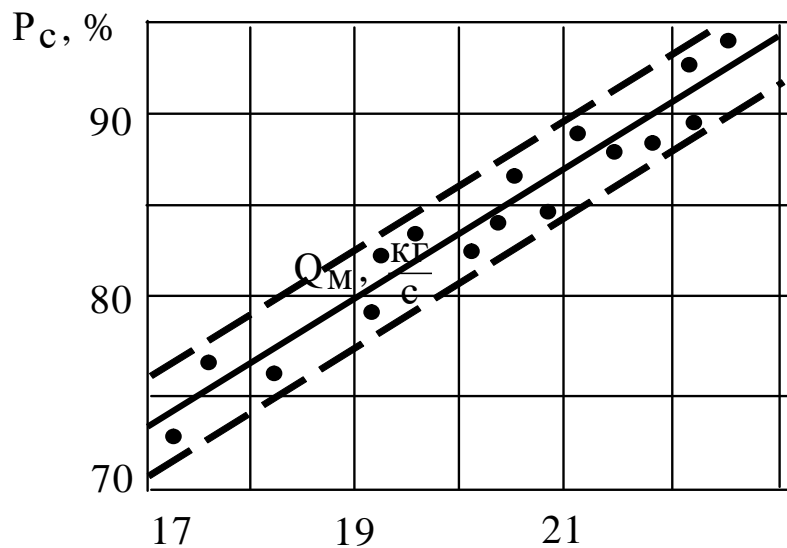


Рисунок 2.7 – Залежність активної потужності, споживаної сепаратором від його продуктивності по магнітному залізу

З аналізу статичних характеристик магнітного сепаратора видно, що для забезпечення максимальної ефективності вилучення магнітного заліза слід автоматизовано підтримувати оптимальну густину зливу класифікатора. Саме за цієї умови досягається пікове значення активної потужності, яку споживає електропривод барабана сепаратора [3].

У роботі [4] розглянуто систему екстремального регулювання для керування вмістом заліза у хвостах магнітного сепаратора. На рис. 2.8 наведено функціональну схему цієї СЕР. Рис.2.9 ілюструє статичну характеристику сепаратора, розглянутого як об'єкта екстремального регулювання.

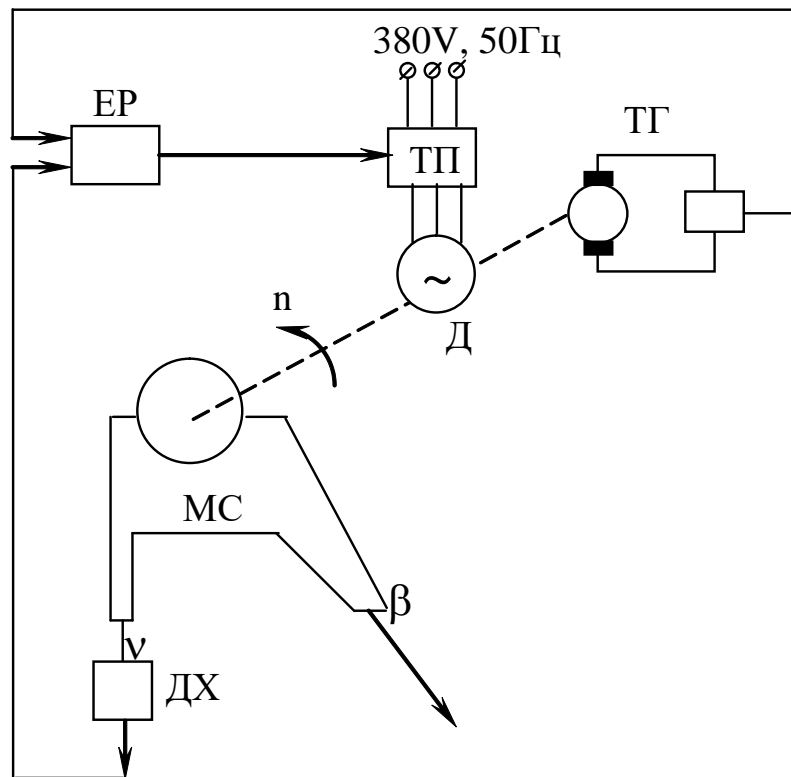


Рисунок 2.8 – Функціональна схема СЕР масової частки заліза в хвостах: МС - магнітний сепаратор; Д - електродвигун барабана сепаратора; ТГ - тахогенератор; ЕР - екстремальний регулятор; ТП - тиристорний перетворювач; n - швидкість обертання барабана; ДХ - датчик масової частки заліза в хвостах; v , β – масова частка заліза в хвостах і концентраті.

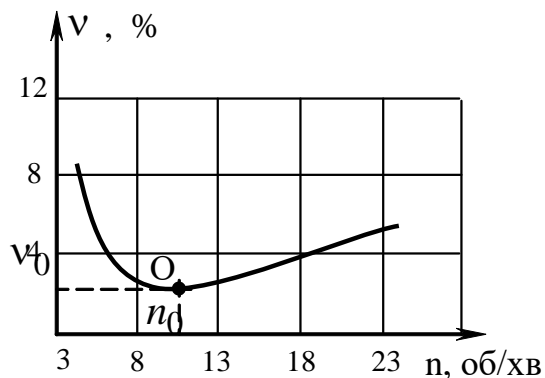


Рисунок 2.9 – Графік залежності масової частки заліза в хвостах,% від швидкості обертання барабана сепаратора n , об /хв .:

О - точка оптимуму; n - оптимальне значення швидкості обертання барабана сепаратора; v_0 - мінімальне значення масової частки заліза в хвостах.

На рис.2.10 наведено функціональну схему системи диспетчеризації, що здійснює керування процесом сухого магнітного розділення матеріалів [5].

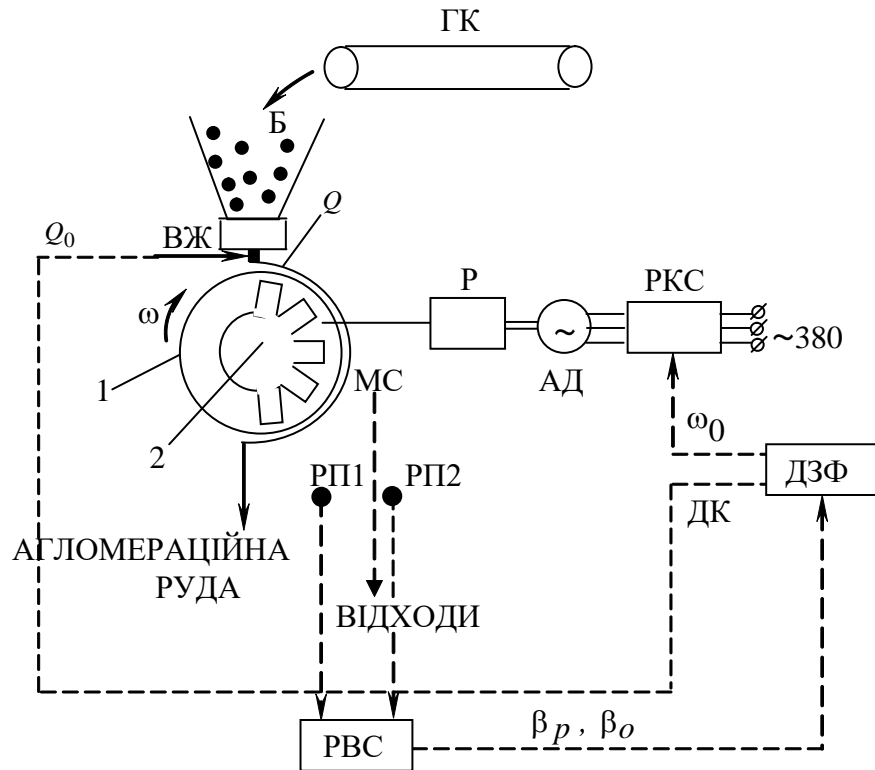


Рисунок 2.10 – Функціональна схема системи диспетчерського управління процесом сухої магнітної сепарації: ГК - головний конвеєр з рудою, що надходить на збагачувальну фабрику; Б - бункер з рудою; ВЖ - віброживильники; МС - магнітний сепаратор; 1 - барабан сепаратора; 2 - магнітна система сепаратора; Р - редуктор; ω - кутова швидкість обертання; Q - продуктивність віброживильника по вихідній руді; АД - асинхронний двигун барабана сепаратора; РКС - релейно-контакторная схема перемикання пар полюсів; РП1, РП2 - точки ручного відбору проб руди і відходів; РВС – рудовипробувальна станція; ДЗФ - диспетчер збагачувальної фабрики; β_p, β_o - масова частка заліза в агломераційній руді і відходах; ДК - канали дистанційного керування.

Беручи до уваги викладене вище, сформулюємо основні завдання дослідження, спрямовані на розробку ефективних підходів до автоматизованого контролю та регулювання процесів сухої магнітної сепарації.

Для побудови математичної моделі процесу як об'єкта автоматичного керування доцільно:

- Провести теоретичний аналіз рівнянь, що описують масоперенесення у робочій зоні сепаратора при сухому збагаченні.

- Оцінити динамічні та статичні властивості магнітних сепараторів, які застосовуються у процесах сухого збагачення.

- Здійснити підбір оптимальних параметрів регулювання, зокрема меж розподілу матеріалу та показників крутизни сепараційних характеристик.

3 Опис та обґрунтування обраних проектних рішень та конструкцій

3.1 Математичний опис магнітного сепаратора сухого збагачення

Перейдемо до опису характеристик магнітного сепаратора.

Вихід твердої кінцевої фракції або концентрату в межах окремої операції чи загальної схеми збагачення визначається як відношення маси (або продуктивності) твердої речовини в концентраті до її кількості у вихідному матеріалі.

Сепараційна характеристика магнітного сепаратора – це неперервна залежність, що описує, як змінюється ступінь вилучення окремих фракцій у концентрат залежно від їхніх фізичних властивостей.

Тому для двокомпонентних систем і сепараторів достатньо знати лише один із параметрів, оскільки інший можна визначити за рівняннями рівноваги.

Ідеальна сепараційна характеристика має ступінчастий вигляд (рис. 3.1).

$$\varepsilon_{уд}(\chi) = 1(\chi - \chi_p) = \begin{cases} 0 & \text{для } \chi < \chi_p; \\ 0,5 & \text{для } \chi = \chi_p; \\ 1 & \text{для } \chi > \chi_p; \end{cases}$$

У цьому випадку використано символ одиничної ступінчастої функції для скорочення запису; константа визначає момент стрибка значення на одиницю.

Сепараційна характеристика в реальних умовах не має ідеальної форми – вона змінюється поступово в межах від 0 до 1 (рис. 3.1).

Границя поділу відповідає такій фракції, яка рівною мірою потрапляє як у концентрат, так і в хвостову частину.

Її положення можна визначити, використовуючи формулу: χ_p .

Під час графічного аналізу достатньо накреслити горизонталь на рівні 0,5, після чого з точки її перетину з кривою (точка А) слід опустити вертикальну лінію.

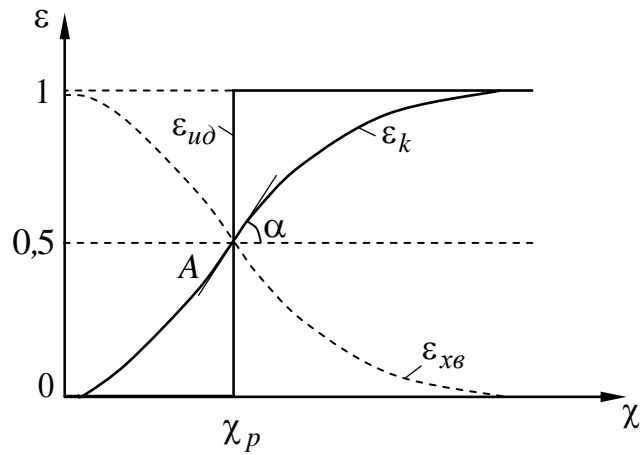


Рисунок 3.1 – Ідеальна $\varepsilon_{ид}$ та неідеальна ε_k і $\varepsilon_{хв}$ сепараційні характеристики

Руда, проходячи крізь магнітне поле сепаратора, зазнає дії як магнітних, так і механічних сил. Залежно від способу подачі матеріалу та траєкторії його руху в зоні поділу, сепаратори поділяють на два основні типи: з верхньою подачею (руда рухається по складній траєкторії) та з нижнім живленням (рух може бути як прямолінійним, так і криволінійним).

До першої категорії належать валкові й барабанні пристрої, а до другої – дискові, стрічкові, а також окремі види тих самих барабанних і валкових сепараторів.

Оцінити ефективність процесу магнітного поділу можна, зокрема, за крутизною кривої сепараційної характеристики в точці А, що позначає межу між поділюваними компонентами.

Розглянемо процес переміщення руди в барабанних сепараторах сухого збагачення з подачею зверху та криволінійною траєкторією руху. Матеріал подається на обертову поверхню барабана (рис. 3.2), яка транспортує його через зону дії магнітного поля. Оскільки магнітні включення потрапляють на барабан разом з немагнітними та щільно утримуються на його поверхні, не ковзаючи по ній, для вилучення сильно намагнічених частинок потрібна певна питома магнітна сила, яка визначається за [6]

$$f_M = \frac{v^2}{R_0} - g \cos \theta, \quad (3.1)$$

де v - швидкість обертання барабана; R_{σ} - радіус барабана; g - прискорення сили тяжіння; θ - кут, що визначає положення магнітної частини на поверхні барабана.

При збагаченні крупнокускової руди (розмір частиц d); коли відношення $\frac{d}{R_{\sigma}} > 0,05$, рівність (3.1) прийме вид

$$f_M = \frac{v^2 (R_{\sigma} + 0,5d)}{R_{\sigma}^2} - g \cos \theta \quad (3.2)$$

Формулу використовують для розрахунку частоти обертання барабана, яка відповідає заданому куту відриву магнітних елементів

$$v = \sqrt{R_{\sigma} (\chi_0 H \text{ grad } H + g \cos \theta_M)} \quad (3.3)$$

Кут θ_M відриву магнітних частинок від поверхні барабану при заданій швидкості його обертання визначається за формулою

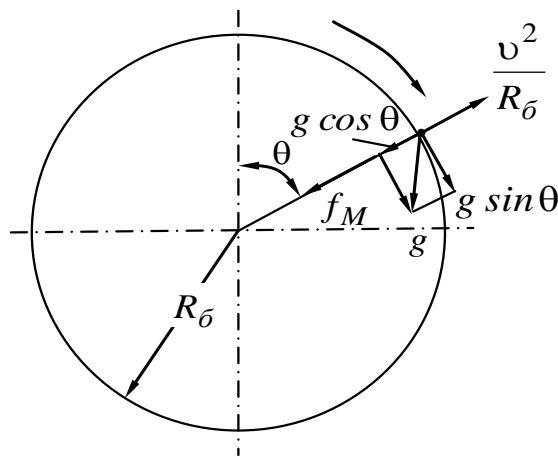


Рисунок 3.2 – Сили, що діють на частку руди в сепараторах з верхнім живленням

Під час збагачення сильномагнітних руд на барабанному сепараторі з рухомим високочастотним полем, магнітні флокули не лише обертаються разом із барабаном, а й здійснюють додаткове обертання навколо одного зі своїх кінців. У результаті цього центр мас флокули довжиною a , см переміщується по дузі з певною лінійною швидкістю відносно осі обертання.

$$v_{\Phi} = \frac{2\pi a_{\Phi}}{T_{\Phi}} = \frac{\pi a_{\Phi} v}{S} = 2\pi a_{\Phi} f \quad (3.4)$$

де T_{ϕ} - період обертання флокули; f - частота поля.

Критичну частоту обертання барабана, за якої флокули або магнітні частинки з певною магнітною сприйнятливістю починають відриватися від його поверхні, визначають за формулою:

$$v_{кр} = \sqrt{\frac{R_{\phi} S^2 (\chi_0 H_{grad} H + g \cos \theta)}{S^2 + \pi^2 a_{\phi} R_{\phi}}} \quad (3.5)$$

Після відриву від барабана, флокула рухається поруч із ним, не торкаючись його поверхні, обертаючись навколо власного центру мас до моменту, поки знову не впаде під дією гравітації та магнітного поля. У процесі такого обертання флокула руйнується, вивільняючи немагнітні домішки, що були в ній утримані.

Розглянемо переміщення рудної маси в сепараторах сухого збагачення з подачею знизу. Сировина надходить за допомогою вібраційних жолобів, транспортерних стрічок або під дією сили тяжіння (рис. 3.3).

У сепараторах із подачею матеріалу знизу застосовують три способи переміщення руди та магнітної фракції крізь робочу частину пристрою [7]:

- обидва компоненти – руда й магнітний концентрат – рухаються по прямій траєкторії (рис. 3.3, а);
- руда переміщується лінійно, тоді як магнітна складова відхиляється за вигнутою траєкторією (рис. 3.3, б);
- руда, і магнітний продукт змінюють напрям руху відповідно до криволінійних шляхів (рис. 3.3, в).

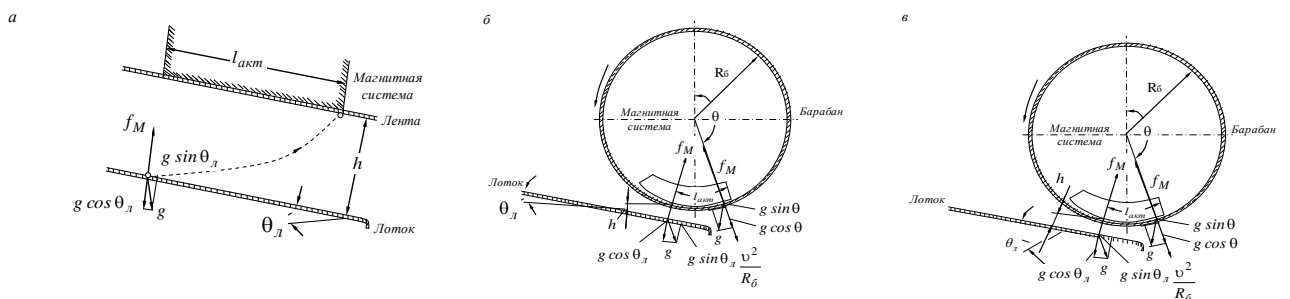


Рисунок 3.3 – Сили, що діють на частинку руди в сепараторах з нижнім живленням:

а - руда і магнітний продукт переміщуються прямолінійно; б - руда переміщується прямолінійно, а магнітний продукт - по криволінійній траєкторії; в - руда і магнітний продукт переміщуються по криволінійних траєкторіях

Теоретично можлива швидкість транспортування руди через сепаратор у випадку її прямолінійного руху по слабо нахиленій або горизонтальній траєкторії визначається за формулою

$$v_{p.кр} = l_{акт} \sqrt{\frac{\chi_0 H \text{ grad } H - g}{2h}} \quad (3.6)$$

У випадку, коли руда переміщується по прямій, а магнітний продукт – по криволінійній траєкторії (як, наприклад, у деяких вальцевих або барабанних сепараторах, рис. 3.3, б), рух магнітних частинок можна умовно розділити на два етапи. Перший етап – це підйом частинок та їх притягнення до поверхні барабана чи валка. Другий – це безпосереднє переміщення (транспортування) магнітного матеріалу вздовж робочої поверхні.

Під час переміщення магнітного продукту та руди по криволінійній траєкторії (рис. 3.3, в), що характерно для деяких конструкцій валкових сепараторів, матеріал потрапляє у зону дії магнітного поля самопливом по нахиленому жолобу. Далі частинки рухаються по напрямку до валка, уздовж його магнітного полюсу.

3.2 Вибір керуючого впливу для автоматичного регулювання положення межі поділу

Щоб забезпечити стабільність межі поділу в магнітному сепараторі, необхідно підтримувати сталий рівень магнітної проникності в зоні дії поля, де відбувається розділення рудного матеріалу. Саме цей параметр є ключовим для ефективного функціонування системи автоматичного регулювання.

Магнітна індукція у робочій зоні

$$B_p = \mu_0 \mu_p H, \quad (3.7)$$

де: μ_0 - магнітна проникність вакууму; H - напруга магнітної системи сепаратора.

Значення магнітної індукції у шарі концентрату визначається як вмістом заліза в рудній масі, так і товщиною самого шару. За сталої частоти обертання барабана, товщина цього шару обумовлюється винятково кількістю сировини, що надходить до магнітного сепаратора.

Виведено залежність між продуктивністю сепаратора та товщиною шару руди на його барабані.

Розрахункова модель розміщення рудної маси на поверхні барабана сепаратора зображена на рис.3.4.

Обсяг шару руди на поверхні барабана сепаратора

$$V_c = \frac{\varphi \pi L}{360} (R^2 - r^2) \quad (3.8)$$

Час руху об'єму шару руди

$$t = \frac{l}{v},$$

де l - довжина дуги слою; v - лінійна швидкість

$$l = \frac{2\pi \delta \varphi}{360}; \quad v = \frac{2\pi n \delta}{60},$$

де $\delta = R - r$.

Час руху обсягу шару руди по дузі довжиною l

$$t = \frac{l \cdot 60}{2\pi n \cdot \delta} = \frac{\varphi}{6 \cdot n} \quad (3.9)$$

Продуктивність по руді

$$Q = \frac{V_c}{t} = \frac{\varphi \pi L (R^2 - r^2) 6n}{360 \varphi} = \frac{\pi}{60} L \cdot n (R^2 - r^2) \quad (3.10)$$

З елементарної геометрії відомо, що

$$(R^2 - r^2) = \delta(2r + \delta).$$

З урахуванням цього продуктивність по руді буде

$$Q = \frac{\pi}{60} L \cdot n \delta (2r + \delta) \quad (3.11)$$

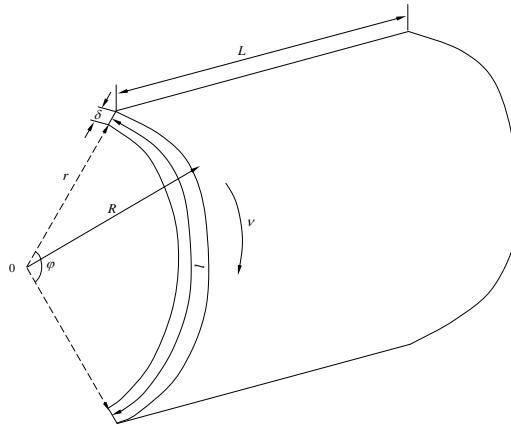


Рисунок 2.4 – Розрахункова схема шару руди на поверхні барабана сепаратора: R - зовнішній радіус шару руди на барабані; r - внутрішній радіус шару руди; δ - товщина шару руди; L - довжина барабана магнітного сепаратора; v - лінійна швидкість сепаратора; φ - центральний кут магнітної системи.

Розгляд останньої формули свідчить, що за незмінної частоти обертання барабана товщина шару руди у зоні дії, а відповідно й рівень магнітної індукції, визначається обсягом подачі вихідної сировини.

Таким чином, для стабілізації межі розділення в сухому магнітному сепараторі за сталої швидкості обертання барабана потрібно регулювати саме продуктивність подачі руди.

3.3 Розробка САК межі поділу процесу сухої магнітної сепарації

На сьогодні більшість процесів сухої магнітної сепарації залишаються неавтоматизованими, хоча в окремих моделях сепараторів передбачене регулювання швидкості обертання в кілька етапів. При зміні властивостей вихідної сировини оператори-технологи змушені вручну коригувати частоту обертання барабана. Зазвичай цю швидкість задають один раз під час початкового налаштування обладнання, орієнтуючись на руду середньої якості. Внаслідок цього цінна руда потрапляє у відходи, а вміст пустої породи або малозбагаченої руди зростає в концентраті. Щоб підвищити точність

розділення матеріалу на цінні та непридатні фракції, обґрунтовується необхідність автоматичного регулювання продуктивності та швидкості роботи магнітного сепаратора з урахуванням аналізу його характеристик сепарації. На рис. 3.5 представлено конструкцію барабанного сепаратора, що використовується для сухого магнітного збагачення.

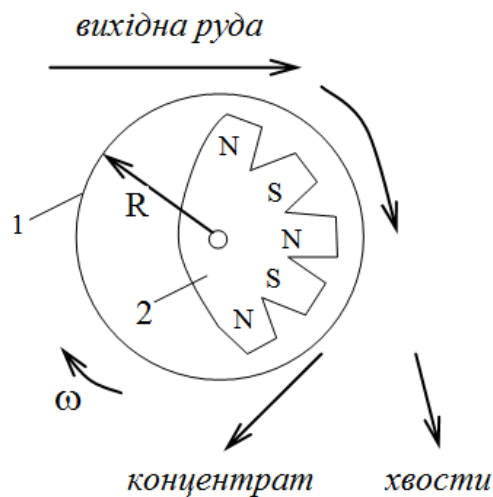


Рисунок 3.5 – Схема барабанного сепаратора для сухого магнітного збагачення: 1 - барабан; 2 - магнітна система; ω - кутова швидкість обертання барабана сепаратора; R - радіус барабана сепаратора; N, S - полюси магнітної системи.

Магнітні сепаратори здійснюють розділення частинок залежно від їхньої магнітної сприйнятливості та густини. У випадку барабанного типу сепаратора, за умови вільного руху частинок у робочій області, домінуючими силами в рівнянні силового балансу є магнітна сила, що залежить від напруженості магнітного поля H , а також відцентрова сила.

Показану на рис. 3.6 межу визначає конфігурація силового поля, в якому частинки рухаються у протилежних напрямках. Для цієї рівноваги сил характерна сепараційна крива зі стрибкоподібною формою: різкий перехід від значення 0 до 1 відбувається саме вздовж цієї межі.

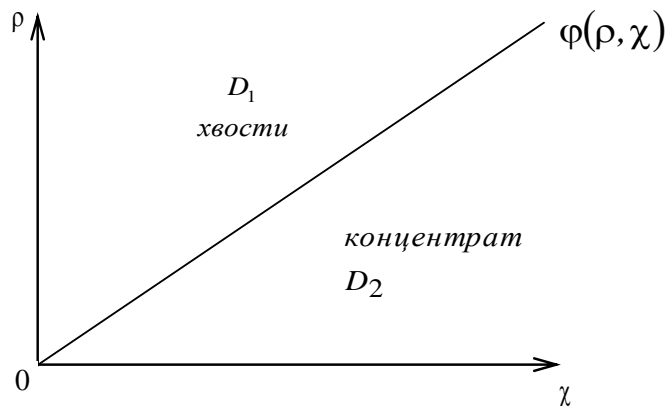


Рисунок 3.6 – Межа розподілу:

$\varphi(\rho, \chi)$ - межа розподілу; χ - магнітна сприйнятливість руди; ρ - щільність руди; D_1 – зона видалення хвостів; D_2 – зона видалення концентрату.

Рівняння, що описує сепараційну характеристику барабанного магнітного сепаратора, призначеного для сухого збагачення, можна подати у такій формі:

$$\varepsilon(\rho, \chi) = \begin{cases} 1 \text{ для } D_1 \\ 0 \text{ для } D_2 \end{cases} \quad (3.12)$$

де $\varepsilon(\rho, \chi)$ - витяг магнітного заліза.

Під час збагачення руд із непостійними характеристиками, можна зробити висновок про застосування автоматизованого методу керування процесом сухої магнітної сепарації. Його суть полягає в тому, що швидкість обертання барабана сепаратора змінюється відповідно до різниці між фактичною та заданою магнітною сприйнятливістю руди.

У цьому випадку структурна схема системи автоматичного контролю межі розділення при сухій магнітній сепарації зображена на рис.3.7.

За сталої напруженості магнітного поля сепаратора H та його градієнта, датчик D , виконаний у вигляді лінійного магнітрезистора, розміщений на магнітній системі пристрою, реєструє магнітну сприйнятливість у зоні дії поля.

Регулятор P визначає різницю між заданим і фактичним значенням параметра χ_p , після чого формує керуючий сигнал U . Цей сигнал надходить до тиристорного перетворювача ТП, який регулює частоту обертання електродвигуна D до досягнення необхідного значення.

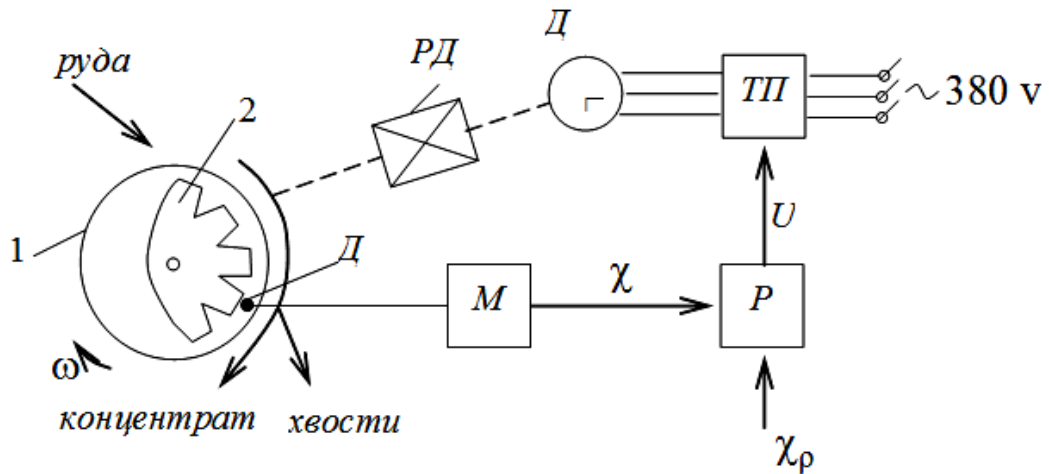


Рисунок 3.7 – Функціональна схема автоматичного регулювання межі поділу процесу сухої магнітної сепарації

Д - датчик магнітної індукції; М - вміст постійного струму; РД - редуктор двигуна барабана сепаратора; Д - електродвигун барабана сепаратора; ТП - тиристорний перетворювач; Р - регулятор; U - керуючий сигнал.

Швидкість обертання барабана магнітного сепаратора при сухому збагаченні повинна змінюватися пропорційно до квадратного кореня з середнього значення магнітної сприйнятливості матеріалу, що перебуває в зоні дії пристрою. З цього випливають такі висновки:

1. У процесі магнітного збагачення залізовмісних руд, що характеризуються варіативною магнітною сприйнятливістю, досягнення якісного поділу на концентрат і хвосты відповідно до заданих технологічних критеріїв можливе лише за умови адаптивного коригування частоти обертання барабана сепаратора сухого типу. Це регулювання здійснюється з урахуванням відхилень середнього значення магнітної сприйнятливості матеріалу в зоні дії магнітного поля від попередньо встановленого рівня.

2. У разі застосування регулювання за збуренням, частота обертання барабана магнітного сепаратора змінюється пропорційно до квадратного кореня з середньої магнітної сприйнятливості рудного матеріалу, що перебуває в активній зоні впливу магнітного поля.

3.4 Технічне забезпечення кореляційних систем регулювання магнітними сепараторами

Магнітні сепаратори, які використовуються при сухому збагаченні, розглядаються в автоматизованих системах як об'єкти, що математично моделюються через сепараційні характеристики. Ці характеристики за своєю природою мають статичний характер і слугують основою для налаштування технологічних режимів збагачення залежно від виду оброблюваної руди. Відомі автоматизовані системи керування процесами магнітної сепарації [8] зазвичай трактують сепаратор як об'єкт із незмінними фізико-механічними властивостями вихідної сировини.

Під час збагачення руд із різними фізико-хімічними властивостями у зоні дії сепаратора постійно відбувається їх розподіл, що має індивідуальні особливості для кожного виду сировини. Результати цього процесу значною мірою залежать від рівня керування ним, адже саме це впливає на підсумкову ефективність та економічну доцільність збагачення.

Потрібно проаналізувати особливості перебігу сепараційних процесів у зоні дії магнітного поля сепаратора, що використовується для сухого збагачення. Варто запропонувати метод автоматизованого контролю магнітної сепарації, який забезпечить стабільно високу ефективність збагачення сировини зі змінними фізико-хімічними характеристиками. Також доцільно встановити взаємозв'язок між керованими параметрами процесу та кінцевими показниками якості збагачення.

Процес магнітного збагачення загалом є складним та стохастично змінним. Його основні закономірності можна описати через поєднання статичних та динамічних параметрів. Для сепаратора, що працює за принципом сухого збагачення, характеристика поділу представлена у такій формі:

$$\varepsilon(\chi) = \begin{cases} 1, & \text{для } \chi > \chi_p \\ 0, & \text{для } \chi < \chi_p \end{cases}, \quad (3.13)$$

де χ – магнітна сприйнятливість збагачувати руди; χ_p – магнітна сприйнятливість поділу є граничною характеристикою розшарування руди в робочій зоні при часу закінчення процесу розшарування t_k .

Кінетика процесу збагачення представлена на рис. 3.8.

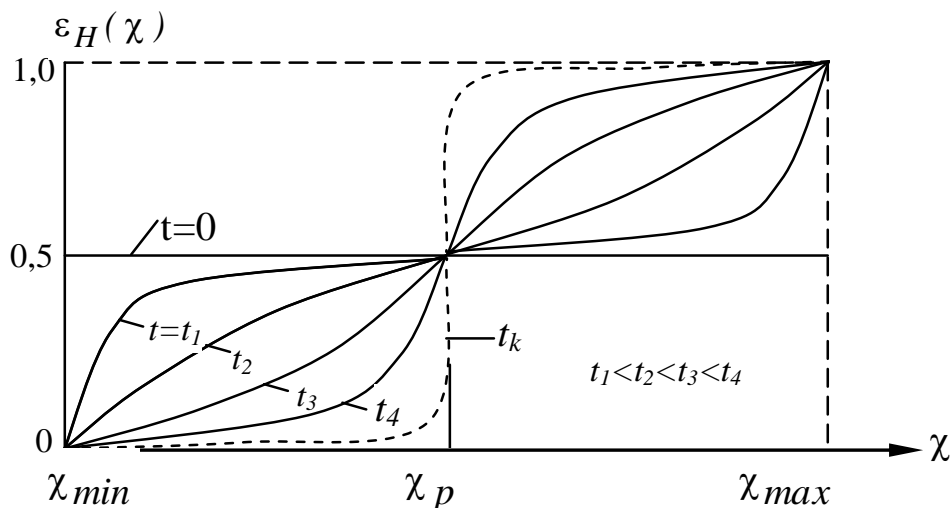


Рисунок 3.8 – Зміна $\varepsilon_H(\chi)$ з плином часу

Криві дозволяють кількісно описати критерії оптимізації процесу магнітного розділення. Узагальнено, вимоги до ідеального процесу можна подати так:

1. трансформація кривої від початкового стану до фінального має здійснюватися за мінімальний проміжок часу;

2. фінальна конфігурація повинна максимально наближатися до умовного еталону на рис.3.8, що відповідає найкращому розподілу за магнітною сприйнятливістю.

Однак ключовою умовою є завершення магнітного розділення, тобто поділ початкової рудної маси на збагачену та збіднену частини.

Оскільки процес магнітної сепарації має стохастичний характер, орієнтовну тривалість його перебігу можна визначити через максимум взаємкореляційної функції, що описує зв'язок між масовими частками феромагнітного матеріалу на вході та виході сепаратора. На рис.3.9 зображено приблизну форму цієї функції.

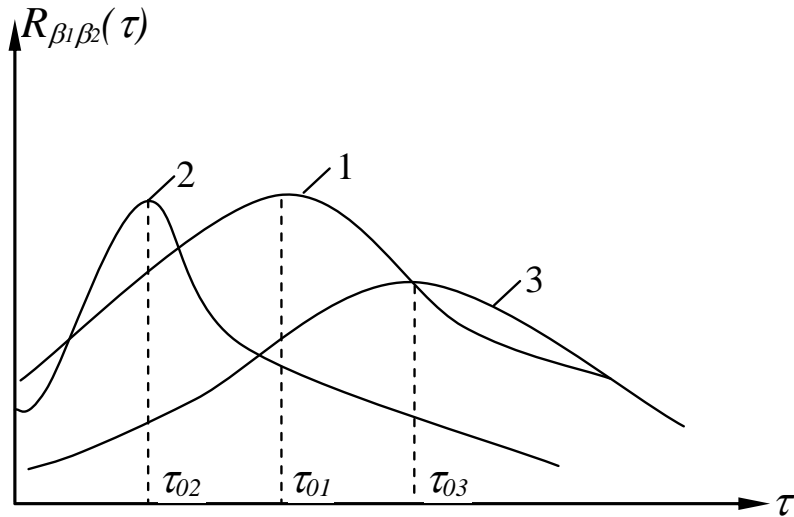


Рисунок 3.9 – Взаємокореляційні функції між масовими частками заліза на вході β_1 і виході β_2 процесу магнітної сепарації при різних властивостях руди

Час завершення процесу магнітного розділення залежить від типу руди. Щоб реалізувати поставлену задачу керування, доцільно використати кореляційно-екстремальну систему, яка автоматично визначає найкращий час перебігу процесу сепарації та обчислює відповідну оптимальну продуктивність за заданою формулою $Q_0 = \tau_0 \cdot M$.

Передавальна функція магнітного сепаратора сухого збагачення буде:

$$\frac{\beta_2(p)}{\beta_1(p)} = \frac{K}{T_p + 1}, \quad (3.14)$$

де K – статичний коефіцієнт передачі, а T – постійна часу магнітного сепаратора, p – оператор Лапласа.

Щоб досягти максимальної ефективності керування процесами розшарування під час магнітної сепарації залізної руди у робочій зоні сепаратора сухого збагачення, необхідно автоматично підтримувати найбільше можливе значення взаємної кореляції між вмістом заліза у вихідній сировині та готовому концентраті.

Для стабільної роботи зони поділу магнітного сепаратора важливо правильно підібрати та налаштувати швидкість обертання його барабана.

Оптимальна продуктивність магнітного сепаратора з багат шаровою зоною залежить від моменту часу, що відповідає максимуму

взаємкореляційної функції випадкових коливань концентрації заліза на вході та виході пристрою.

3.5 Обґрунтування функціональної схеми статистичного регулювання процесу сухої магнітної сепарації

Руди, які надходять на етап сухої магнітної сепарації, характеризуються варіативним вмістом заліза. Магнітна фракція, тобто концентрат, повинна відповідати встановленим технологічним параметрам. Одним з основних критеріїв ефективності збагачення є стабільність концентрації заліза у кінцевому продукті. У випадку магнетитових руд вміст заліза безпосередньо залежить від кількості магнетиту. На сьогодні контроль та керування процесами сухої магнітної сепарації зазвичай виконуються вручну. Для оцінки якості магнітного концентрату використовують відбір технологічних проб з подальшим лабораторним аналізом. Регулювання продуктивності системи подачі сировини здійснюється вручну за допомогою поетапної зміни параметрів вібраційного живильника. Враховуючи постійні коливання властивостей сировини, виникає потреба у впровадженні автоматизованої системи керування процесом, що дозволить забезпечити сталість якості концентрату. Наукові розробки в цій галузі переважно зосереджені на виборі оптимальних конструкцій і параметрів роботи сепараторів для сухого магнітного збагачення.

Підтримання стабільності межі поділу у процесі сухої магнітної сепарації потребує збереження незмінного рівня магнітної сприйнятливості або, що еквівалентно, сталої концентрації заліза в активній зоні дії сепаратора. Для реалізації цього завдання використовують релейні автомати статистичної дії (САРД), які забезпечують необхідний режим керування.

Статистичні дані, що характеризують перебіг процесу сухого магнітного розділення, які відображено на рис.3.10.

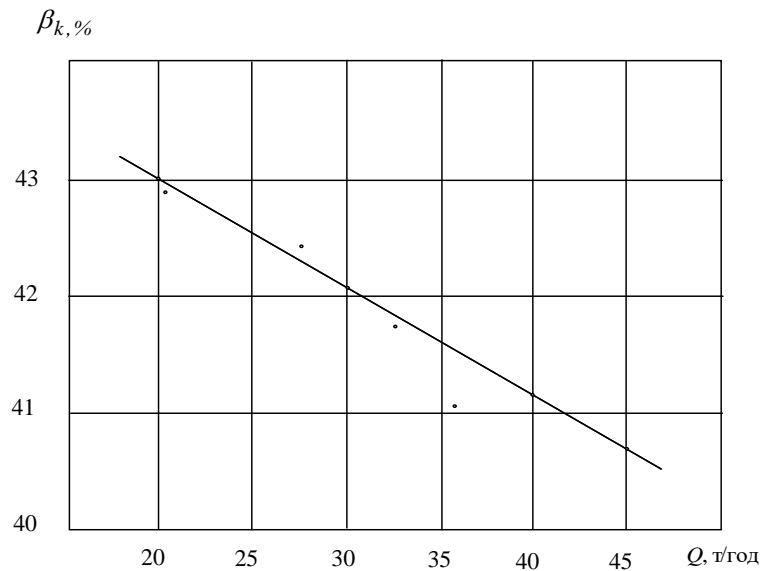


Рисунок 3.10 – Статистична характеристика магнітного сепаратора сухого збагачення ПБСУ-63/200: Q - продуктивність сепаратора по вихідному живленню, β_k - масова частка заліза - магнетиту в концентраті

Дана характеристика придатна для застосування як регулювальна у контурі автоматичного керування вмістом заліза в концентраті.

Продуктивність сепаратора за обсягом вихідної руди може виступати одним із параметрів регулювання.

У джерелі [9] наведено математичне рівняння, що дозволяє здійснити обчислення продуктивності сухого магнітного сепаратора залежно від кількості оброблюваної руди

$$Q = 3,6 \cdot 10^{-5} a_{\mu} \gamma_p v_p \delta_p n d' b, \text{ [т/год]}, \quad (3.15)$$

де a_{μ} - коефіцієнт, що враховує вміст у вихідній руді магнітних частинок; γ_p - коефіцієнт заповнення шару руди; d - верхня межа крупності живлення; v_p - швидкість транспортування руди по жолобу живильника; δ_p - густина руди; n - число шарів, залежне від крупності руди; b - ширина шару живлення.

Формула (3.15) свідчить, що головними факторами, які впливають на продуктивність сепаратора, є швидкість подачі руди та товщина її шару. Ці параметри встановлюються за допомогою віброживильників. Кількість руди, що надходить на вхід обладнання, виконує функцію регулятора процесу.

Одна з керованих змінних – це нормальна складова магнітної напруженості поля в робочій зоні, яка вказує на вміст магнітного заліза у концентраті, що осідає на поверхні барабана.

З метою забезпечення стабільної якості продукції впроваджуються методи статистичного керування, а системи автоматичного контролю такого типу називають статистичними автоматами з релейною характеристикою (САРД).

Статистичне керування й регулювання вмісту заліза в магнітному концентраті, отриманому під час сухого магнітного збагачення, є доцільним через значну інерційність сепаратора (десятки секунд) у порівнянні з повільними змінами характеристик рудної сировини, які відбуваються протягом кількох годин. На рис.3.11 зображено функціональну схему системи автоматичного регулювання з використанням статистичного автомата релейної дії (САРД), яка дозволяє стабілізувати масову частку магнітного заліза в кінцевому продукті.

Сировина з бункера (поз. 1) подається на барабан сепаратора (поз. 3) через жолоб (поз. 2) за допомогою вібраційного живильника. Під дією магнітного поля, сформованого постійними магнітами (поз. 5), рудний потік розділяється на магнітну фракцію (М) і немагнітну (Н). Вміст заліза в магнітній фракції контролюється за допомогою датчика (поз. 6), який передає дані на вхід САРД (поз. 7), реалізованого на основі мікропроцесорного контролера промислового класу.

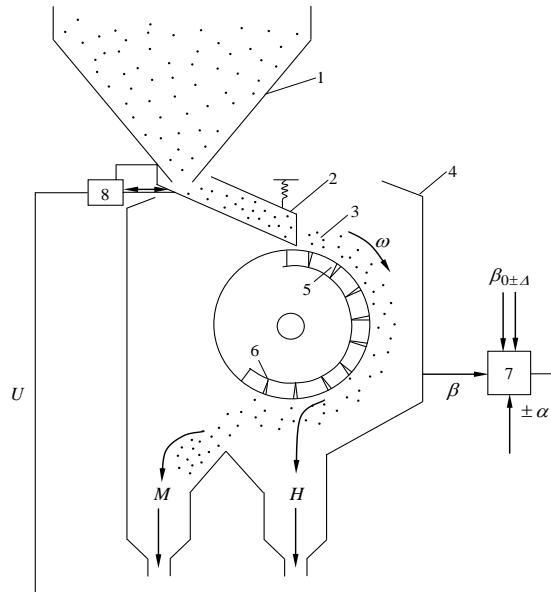


Рисунок 3.11 – Функціональна схема системи статичного регулювання якості магнітного продукту сепаратора сухого збагачення: 1 – бункер з рудою; 2 - похилий жолоб віброживильника; 3 - барабан сепаратора і швидкість обертання барабана; 4 - корпус; 5 - постійні магніти; 6 - датчик напруженості магнітного поля; $\pm \Delta$ - допуски на показники якості; 7 - САРД; M - магнітний продукт; H - немагнітний продукт; $-U$ керуючий вплив; Q - продуктивність віброживильника по руді; 8 - віброживильники; β - масова частка заліза в магнітному продукті; β_0 - задане значення; $\pm \alpha$ - крок корекції продуктивності Q .

3.6 Інформаційне забезпечення САК продуктивністю сепаратора

Регульовальна характеристика магнітного сепаратора дозволяє сформулювати алгоритм функціонування системи автоматичного регулювання дискретного типу, який можна представити наступним чином

$$u = \begin{cases} 0, & \text{якщо } \beta_0 - \Delta \leq \bar{\beta} \leq \beta_0 + \Delta \\ +a, & \text{якщо } \bar{\beta} > \beta_0 + \Delta \\ -a, & \text{якщо } \bar{\beta} < \beta_0 - \Delta \end{cases}, \quad (3.16)$$

де $\bar{\beta}$ - регулярна складова випадкового процесу зміни масової частки заліза в

магнітному продукті.

Показником ефективності функціонування подібної системи виступає забезпечення найбільшого виходу магнітного концентрату встановленого рівня якості.

$$T = 100 \int_{\beta_0 - \Delta}^{\beta_0 + \Delta} f(\beta) d\beta \rightarrow 100\% \quad , \quad (3.17)$$

де $f(\beta)$ - диференціальна функція розподілу масової частки заліза в магнітному продукті.

На рис. 3.12 наведено узагальнену алгоритмічну схему, що описує процес статистичного контролю якості магнітного продукту під час роботи сепаратора для сухого магнітного збагачення.



Рисунок 3.12 – Схема алгоритму статистичного регулювання якості магнітного продукту сепаратора сухого збагачення

4 Розрахунки та експериментальні матеріали, що підтверджують працездатність системи

4.1 Імітаційне моделювання САРД

З метою оцінки ефективності роботи системи було проведено імітаційне моделювання саморегульованого автоматичного регулятора.

Відповідна структурна модель для цього моделювання наведена на рис.4.1.

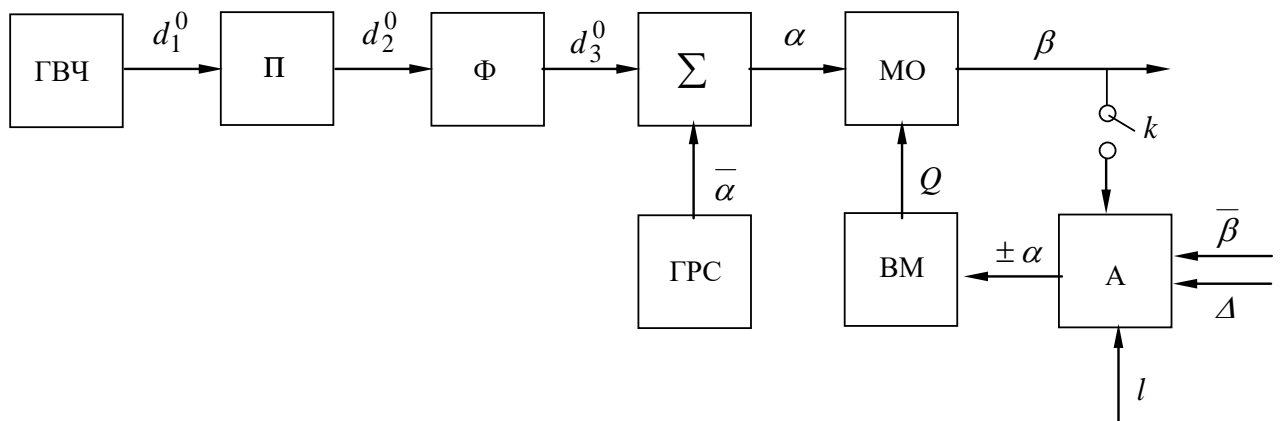


Рисунок 4.1 – Функціональна схема імітаційного моделювання САРД:

ГВЧ - генератор випадкових чисел a_1^0 з рівномірним законом розподілу в інтервалі від 0 до 1; П - перетворювач закону розподілу; a_2^0 - випадкові числа, що мають такий же закон розподілу що і реальні значення масової частки заліза у вихідній руді; Ф - формуючий фільтр, який служить для отримання кореляційних чисел a_3^0 , що мають таку ж автокореляційну функцію, що і випадковий процес коливань масової частки заліза у вихідній руді; ГРС - генератор регулярної складової зміни масової частки заліза у вихідній руді; Σ - суматор; a - випадкові числа імітують процес зміни масової частки заліза у вихідній руді; МО - математична модель магнітного сепаратора, відповідна характеристиці рис. 2.17; А - аналізатор, який регулює алгоритм; ВМ - виконавчий механізм, що виробляє алгебраїчне підсумовування коригувальних

сигналів $\pm a$ і видає завдання системі регулювання продуктивності по руді; К - ключ, замкнутий, коли досліджується керований режим збагачення, розімкнений, коли досліджується некерований режим збагачення; β - випадкові числа, що імітують процес зміни масової частки заліза в концентраті.

Ключовим параметром налаштування САРД виступає значення коригувального кроку. Його визначають шляхом імітаційного моделювання з метою досягнення найбільшого значення обраного критерію якості функціонування системи

$$T = \int_{\beta_0 - \Delta}^{\beta_0 + \Delta} f(\beta) d\beta \rightarrow 1, \quad (4.1)$$

Що характеризує максимально можливий питомий вміст концентрату, який відповідає технічним вимогам, у загальному обсязі його виробництва, прийнятому за одиницю.

Для досягнення похибки не більше 5% потрібно виконати приблизно 410 імітацій, тож обрано $N=450$, що відповідає довірчому рівню $P=0,95$.

Розрахуємо межі регулювання параметрів для сухого магнітного сепаратора типу ПБСУ 163/200.

Допуск на відхилення вмісту заліза в агломераційній руді становить $\pm 2\%$, а граничне значення масової частки відходів не має перевищувати 20%.

Для досягнення необхідної точності слід забезпечити, щоб попереджувальні межі регулювання були математично пов'язані із середньоквадратичним відхиленням масової частки заліза

$$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-3}^{+3} e^{-\frac{(\bar{\beta}-\theta)^2}{2\sigma^2}} d\bar{\beta} = 0,9, \quad (4.2)$$

Використовуючи рівняння і задаючи θ різні значення, будемо залежність від $\sigma = f(\theta)$ (рис. 4.2).

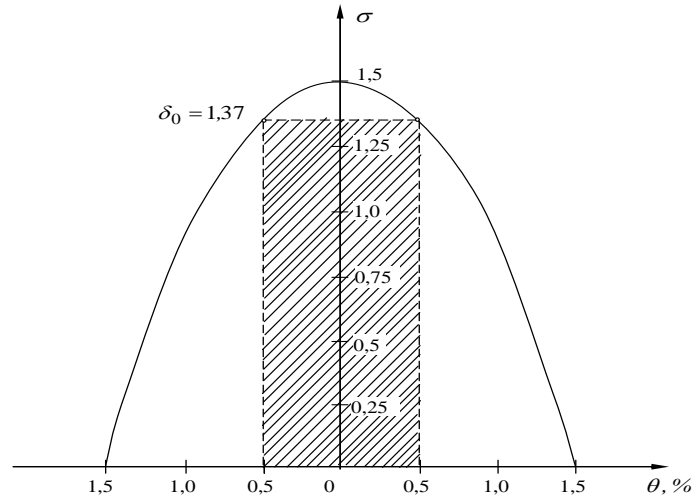


Рисунок 4.2 – Виділення зони номінальних режимів роботи системи автоматичного регулювання магнітного сепаратора для сухого збагачення

Як видно з рис.4.2, обране граничне значення відповідає допустимому відхиленню центру розподілу. На рис.4.3 заштрихована область ілюструє типові робочі режими системи автоматичного керування, що забезпечує регулювання процесу сухого магнітного збагачення.

Кількість отриманих під час експерименту вимірювань становить від 40 до 50. Такий діапазон значень підтверджує правильність висновків і свідчить про достовірність отриманих результатів.

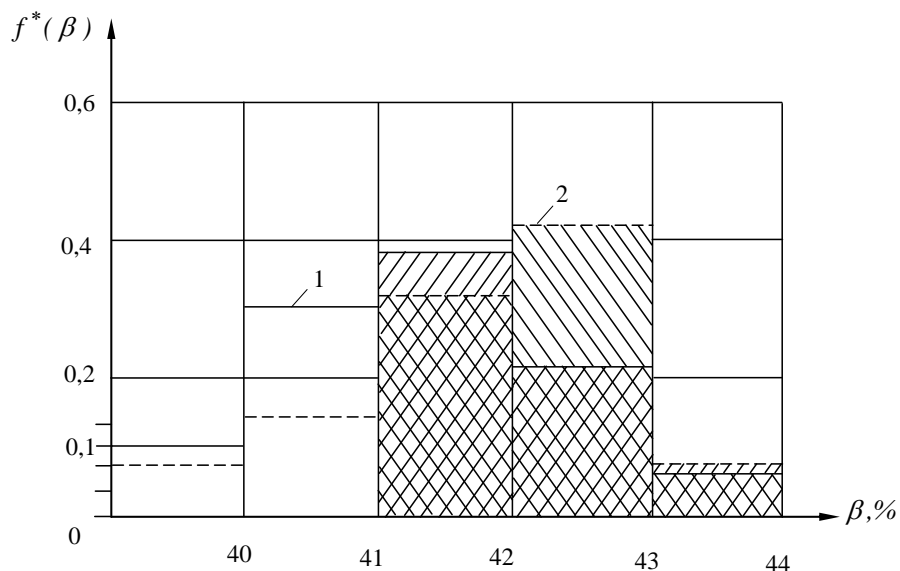


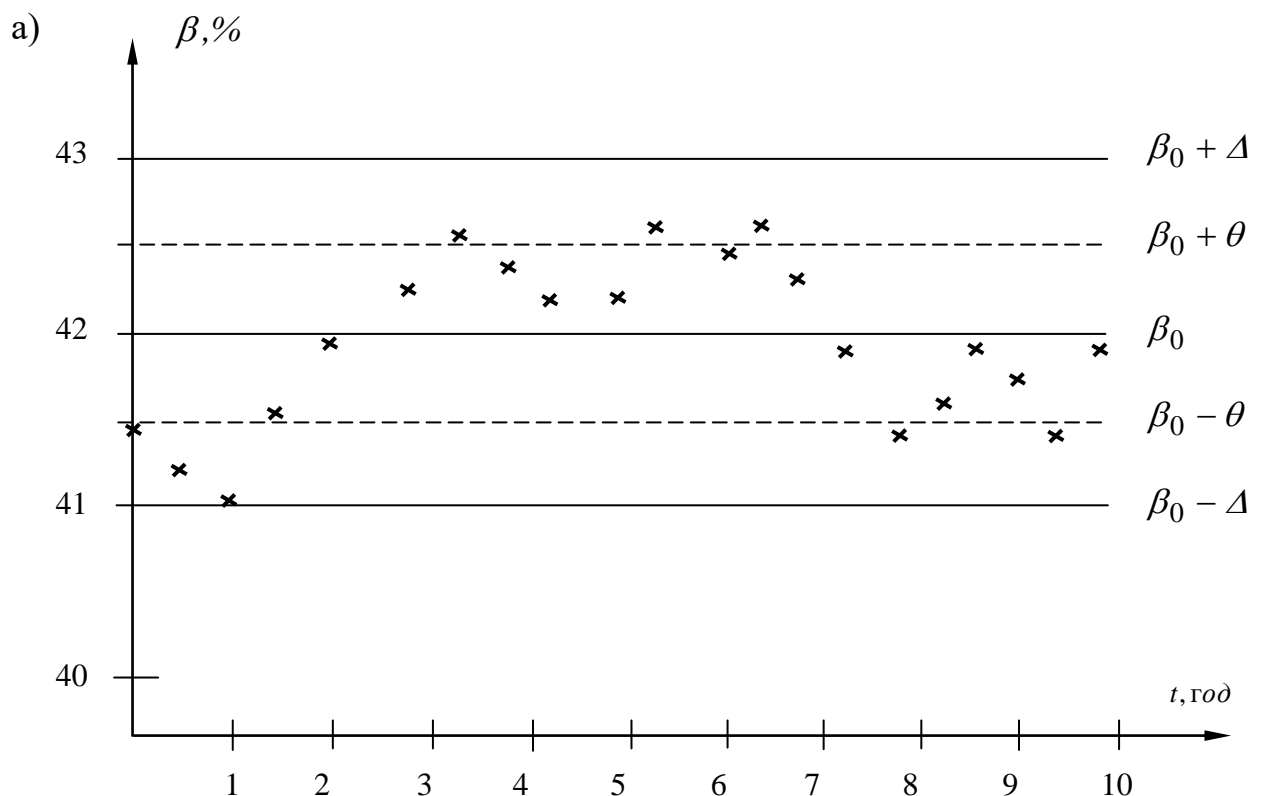
Рисунок 4.3 – Результати імітаційного моделювання системи регулювання якості магнітного продукту сепаратора сухого збагачення:

тут $f^*(\beta)$ - відносні частоти появи в магнітному продукті частинок руди з масовою часткою заліза в заданих діапазонах її зміни; 1 - гістограма розподілу масової частки заліза в магнітному продукті некерованого процесу магнітної сепарації; 2 - гістограма розподілу масової частки заліза в керованому магнітному продукті сепаратора.

Було здійснено моделювання САРД у режимі імітації з метою оцінки ефективності функціонування запропонованої системи.

Процес моделювання враховував специфіку технологічного процесу. Графічні результати моделювання наведено на рис.4.4 та 4.5 у вигляді фрагментів тимчасових діаграм.

Імітаційне моделювання засвідчило, що впровадження автоматизованого контролю та регулювання вмісту заліза в магнітному продукті сприяє зростанню його виходу відповідної якості з 62% до 82%, що становить приріст на п'яту частину.



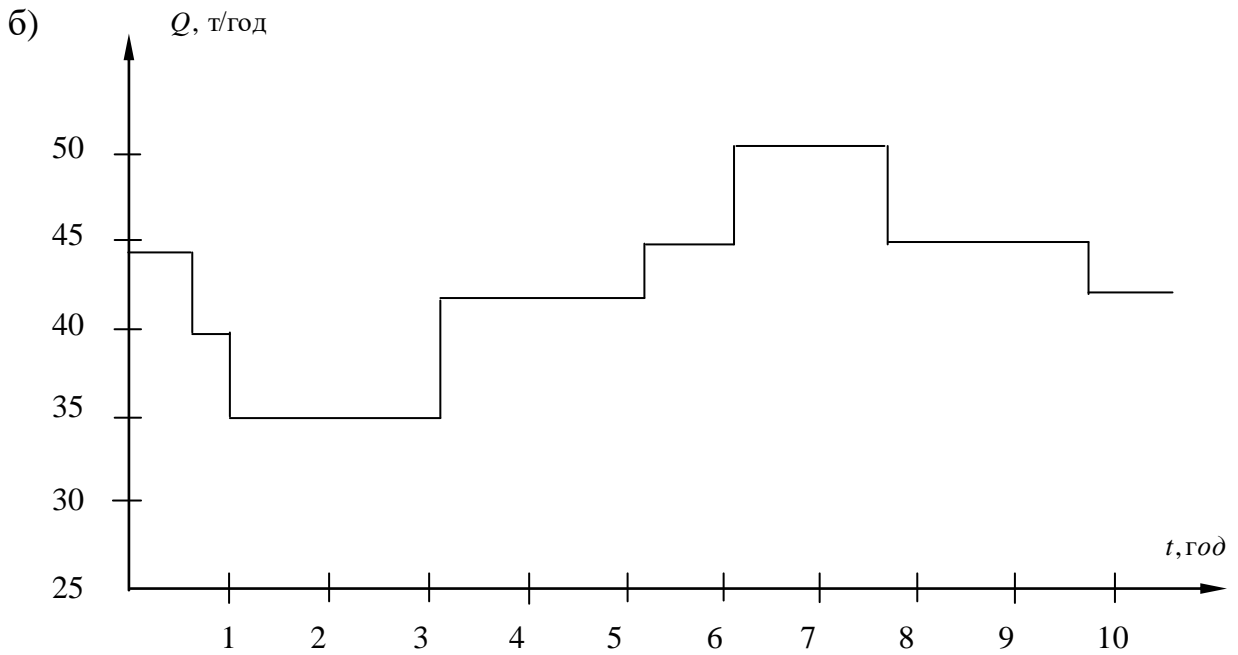


Рисунок 4.4 – Тимчасові діаграми моделювання роботи САРД:

- а) графік зміни масової частки магнітного заліза β на виході магнітного сепаратора сухого збагачення. $3\Delta \pm \theta$ - попереджувальні кордони регулювання;
 б) графік зміни продуктивності по руді на вході сепаратора

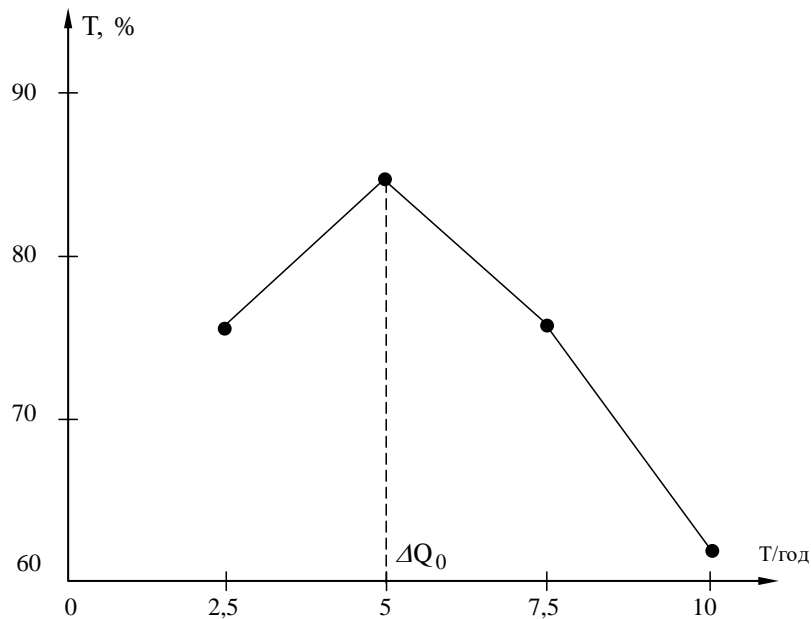


Рисунок 4.5 – Графік залежності точності процесу магнітного збагачення від величини кроку корекції продуктивності по вихідній руді

Результати моделювання в середовищі імітаційного аналізу дозволяють сформулювати такі висновки: впровадження автоматизованої системи регулювання вмісту заліза в магнітному концентраті позитивно впливає на

стабільність і якість кінцевого продукту, суттєво збільшуючи його вихід у межах заданих параметрів.

З огляду на те, що динамічні характеристики магнітного сепаратора змінюються в діапазоні кількох десятків секунд, тоді як фізико-хімічні параметри вихідної руди залишаються відносно постійними протягом тривалого часу (до кількох годин), ефективним рішенням для керування процесом збагачення є використання статистичних систем з релейною логікою дії.

На рис.4.5 зображено графік, який ілюструє, як змінюється хід тонкого процесу залежно від розміру кроку регулювання подачі віброживильника по вихідній руді ΔQ . Аналіз показує, що найвища точність тонкого магнітного збагачення, яка становить $T = 82,5\%$, досягається при певному оптимальному значенні цього кроку $\Delta Q_0 = 5$ т/год.

4.2. Дослідження диференціальної системи екстремального регулювання продуктивності магнітного сепаратора

Структурна схема системи

Схема структури системи, яка відповідає функціональному зображенню, показана на рис.4.6.

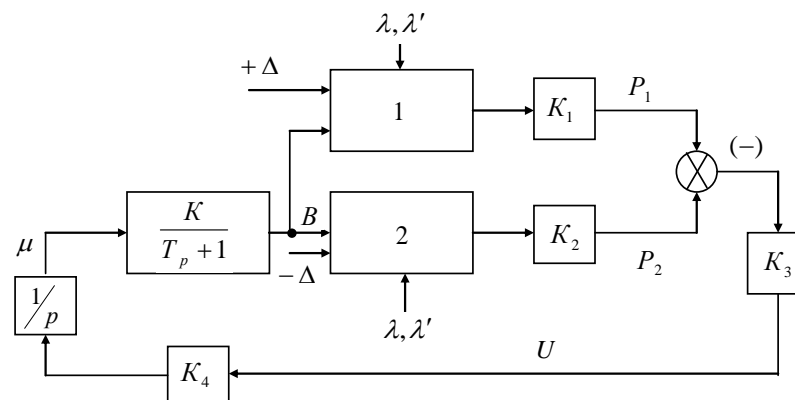


Рисунок 4.6 – Структурна схема системи:

1,2– нелінійна частина об'єкта управління, відповідна експериментальним статичним характеристикам $I_1 = f(Q)$ і $I_2 = f(Q)$; K_1, K_2 - коефіцієнти передачі

вимірювальних перетворювачів активної потужності 1П і 2П; K_3 - коефіцієнт передачі регулятора; K_4 - передавальний коефіцієнт виконавчого механізму; μ - ступінь відкриття регулюючого органу віброживильника; U - керуючий вплив на виході регулятора; K - коефіцієнт передачі лінійної частини об'єкта управління по каналу - переміщення регулюючого органу віброживильника - продуктивність на вході сепаратора; T - постійна часу сепаратора; λ, λ' - відповідно горизонтальна і вертикальна складові дрейфу статичної характеристики $P = f(B)$ від зміни властивостей збагачуваної руди.

На рис. 4.7 зображено графік розгінної характеристики лінійної ділянки об'єкта, що підлягає керуванню.

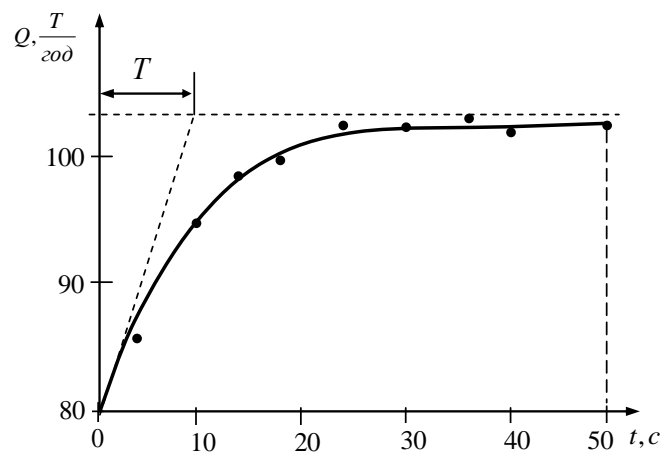


Рисунок 4.7 – Розгінна характеристика лінійної частини об'єкта управління

На основі цієї характеристики були встановлені значення коефіцієнтів передачі та часової постійної для лінійної складової керованої системи. У процесі визначення розгінної кривої поступово змінювали рівень відкриття регулюючого елемента віброживильника в межах від 10 до 60 відсотків.

За результатами експерименту був визначений коефіцієнт K

$$K = \frac{\Delta Q}{\Delta \mu} = \frac{24}{50} = 0,48 \frac{M^3}{4 \cdot \%} ; T = 10c.$$

Параметри структурної схеми для типових вихідних сигналів датчиків у діапазоні 0...5 мА матимуть такі значення

$$K_1 = K_2 = \frac{\Delta I}{\Delta P} = \frac{5}{30} = 0,167 \frac{mA}{кВт},$$

де $\Delta \dot{I} = 5 \text{ мА}$; ΔP - діапазон зміни активної потужності двигуна магнітного сепаратора;

$$K_3 = \frac{\Delta \dot{I}}{\Delta P_{\text{дон}}} = \frac{5}{0,2} = 25 \frac{\text{мА}}{\text{кВт}}$$

де $\Delta P_{\text{дон}}$ - максимально допустима неузгодженість, яка визначається технічними вимогами до системи;

$$K_4 = -\frac{\Delta \mu}{\Delta \dot{I}} = \frac{100}{5} = 20 \frac{\%}{\text{мА}}$$

де $\Delta \mu = 100\%$ - діапазон відкриття регулюючого органу.

4.3 Дослідження динаміки системи та якості перехідних процесів

Застосовано узагальнений підхід до аналізу диференціальної системи екстремального типу, як подано в джерелі [11]. У випадку, коли статична залежність нелінійного елемента системи може бути змодельована за допомогою параболічного рівняння, це дозволяє точно оцінити поведінку об'єкта під час регулювання.

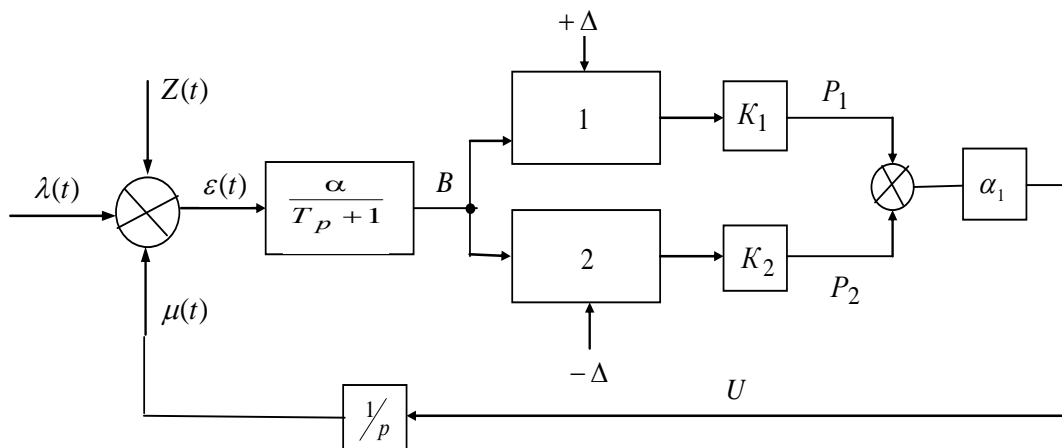


Рисунок 4.8 – Структурна схема системи при випадкових збурюючих впливах

Позначення на рис. 4.8 такі ж як на рис.4.6, крім наступних: $\alpha_1 = K_3 \cdot K_4$; $\lambda(t)$ - рівноваги вплив, що характеризує коливання витрат води; $Z(t)$ - рівноваги вплив, що характеризує коливання якості руди.

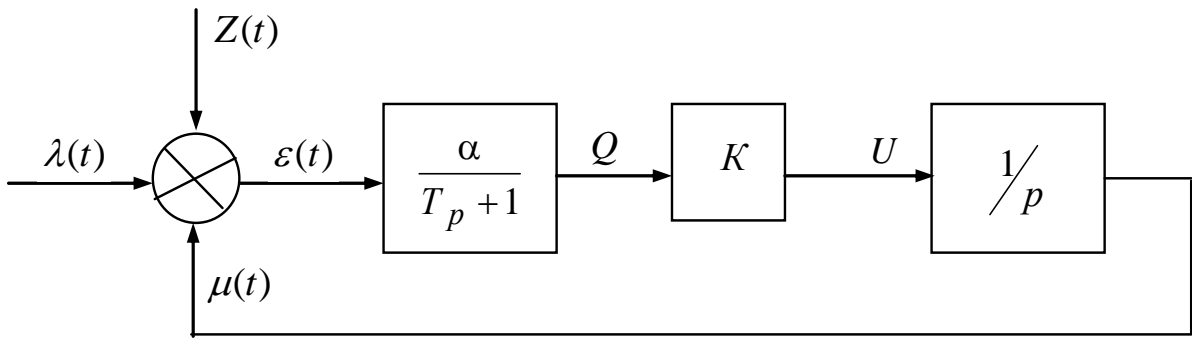


Рисунок 4.9 – Перетворена структурна схема

За умови коректного налаштування параметрів запропонована система повністю нечутлива до впливів виду λ та λ' , а при рівності коефіцієнтів $K_1 = K_2$ забезпечується відсутність статичної похибки.

Узагальнене диференціальне рівняння системи, що враховує динаміку складових відносно похибки, визначається шляхом одночасного розв'язання відповідних рівнянь руху елементів.

Система стійка, тобто при будь-яких збуреннях в ній виникають затухаючі перехідні процеси.

На рисунку 4.10 зображено зміну похибки під час перехідного процесу. Наведені характеристики – ступінь його загасання $\varphi = 0,95$ та час виходу на встановлений режим $T_p = 2,5xв$ – відповідають заданим технічним критеріям.

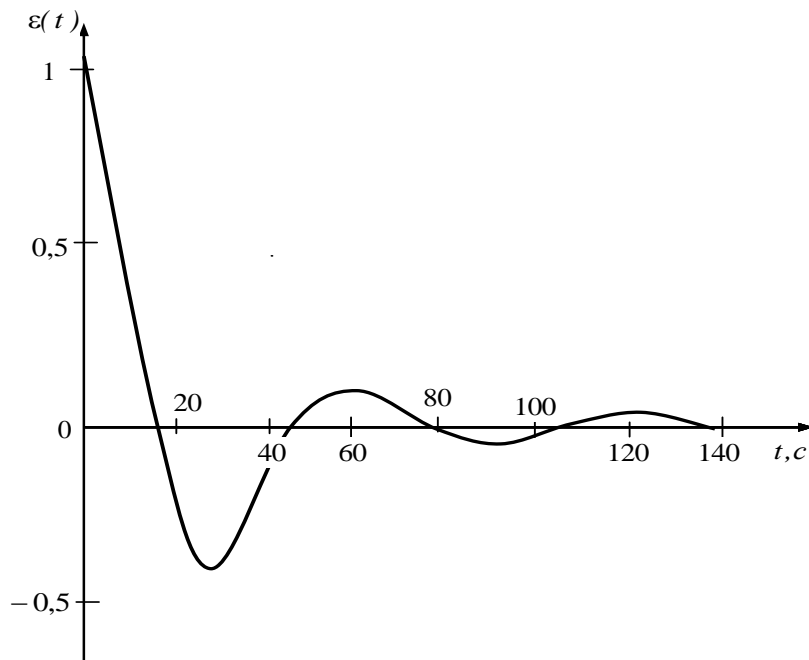


Рисунок 4.10 – Графік зміни помилки системи при її ступінчастій зміні

4.4 Дослідження імпульсної системи регулювання межі поділу магнітного сепаратора зміною швидкості обертання його барабана

На рис.4.11 зображено функціональну схему системи керування. Контроль швидкості обертання барабана сепаратора здійснюється за допомогою тиристорного частотного перетворювача, що разом із цифровим П-регулятором формує цифровий блок регулювання швидкості. Така система забезпечує стабільність магнітної індукції в зоні дії сепаратора шляхом динамічного коригування швидкості обертання барабана.

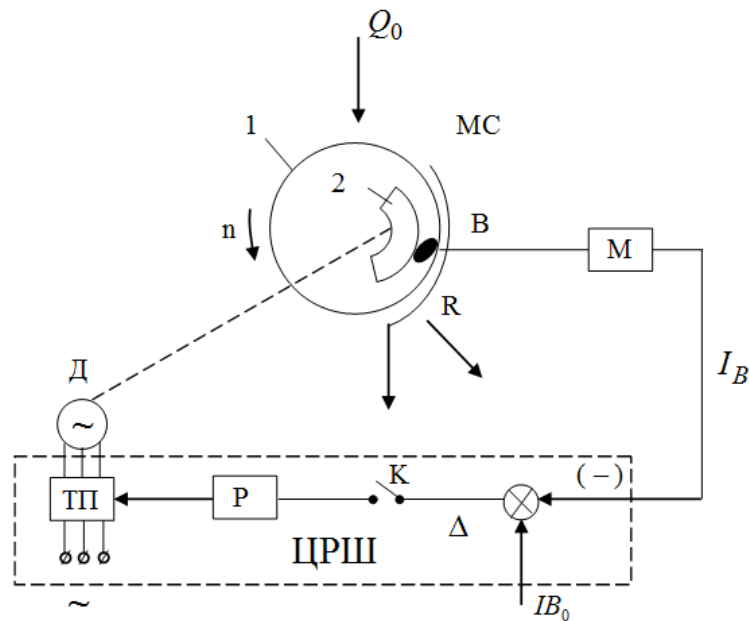


Рисунок 4.11 – Функціональна схема САК:

МС - магнітний сепаратор; 1 - барабан сепаратора; 2 - магнітна система; Е - електродвигун; ТП - тиристорний перетворювач; Р - вбудований регулятор; К - ключ; ЦРШ - цифровий регулятор швидкості; n - число обертів барабана сепаратора; М - міст постійного струму; R - магніторезистор, що вимірює магнітну індукцію В; I_B – струмовий сигнал, пропорційний В; I_{B_0} – завдання; Δ – сигнал помилки регулювання.

Структурна схема САК представлена на рис. 4.12.

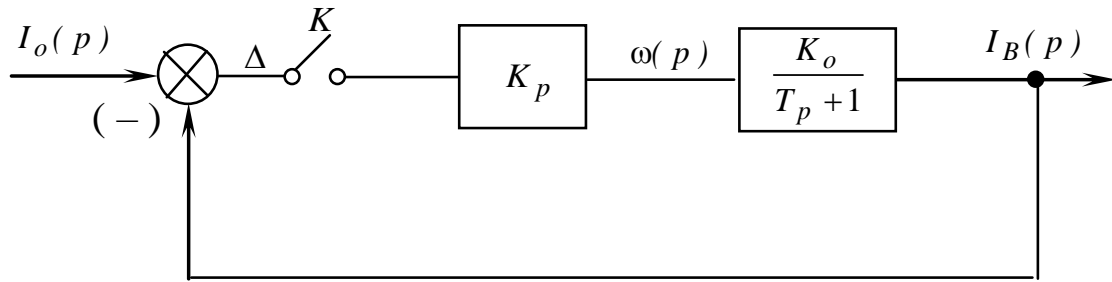


Рисунок 4.12 – Структурна схема САК:

P - оператор Лапласа, K_p , K_o – коефіцієнти передачі регулятора і об'єкта, T – постійна часу об'єкта.

На рис.4.13 зображено отримані характеристики розгону досліджуваного об'єкта. До складу системи, що підлягає регулюванню, входять електричний привід барабана та безпосередньо магнітний сепаратор.

Об'єкт регулювання має рівняння першого порядку

$$T \frac{dI_B}{dt} + I_B = K_o n$$

Позначимо $n = x_{вх}$, $I_B = x_{вих}$, тоді

$$T \frac{dx_{вих}}{dt} + x_{вих} = K_o x_{вх}$$

Значення $x_{вих}$ підтримується на стабільному рівні за допомогою регулятора пропорційного типу з переривчастим режимом роботи, який характеризується певним коефіцієнтом підсилення K_p та визначеним інтервалом активації.

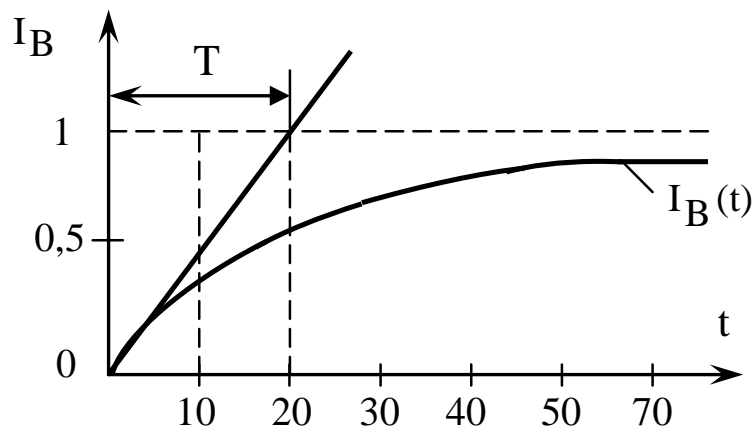


Рисунок 4.13 – Розгінна характеристика об'єкта керування

Щоб дослідити динамічну поведінку системи під впливом зовнішніх факторів, зокрема при зміні вхідного сигналу, до сформульованого рівняння необхідно додати відповідний вираз у правій частині.

У рівнянні регулятора врахуємо змінне завдання $x_0(n) = x_0(t)$:

$$x_{вх}(n+1) = -K_p[x_{вих}(n) - x_0(n)]. \quad (4.3)$$

тоді отримаємо

$$x_{вих}(n+1) = \left\{ x_{вих}(n) + K_o K_p [x_{вих}(n) - x_0(n)] \right\} e^{-\frac{\Delta t}{T}} - K_o K_p [x_{вих}(n) - x_0(n)].$$

Якщо позначити $B = K_o K_p - K_o K_p e^{-\frac{\Delta t}{T}}$, то

$$x_{вих}(n+1) + A_1 x_{вих}(n) = B x_0(n). \quad (4.4)$$

Подібно до лінійних диференціальних рівнянь, таке рівняння класифікують як неоднорідне кінцево-різницеве. У загальному вигляді його права частина відповідає певній заданій функції, що залежить від часу.

Знайдемо реакцію імпульсної САК з рівняння

$$x_{вих}(t+1) + 0,161x_{вих}(t) = 0,633x_0(t)$$

при ступінчастій зміні завдання $x_0(t) = 1$ передбачається, що нове значення встановлюється одночасно з моментом запуску регулятора $[t] = \Delta t$.

Графік перехідного процесу $x_{вих}(t)$ при ступінчастому вхідному впливі представлений на рис. 4.14.

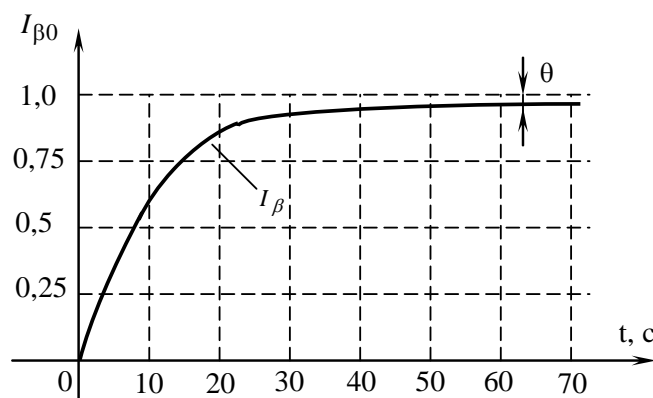


Рисунок 4.14 – Реакція системи на одиничний ступінчастий сигнал

ВИСНОВКИ

Аналіз сучасних магнітних сепараторів, що використовуються для сухого збагачення залізовмісних руд, а також вивчення принципів роботи систем контролю й автоматичного управління технологічними лініями сухої магнітної сепарації дозволяє дійти таких висновків:

– процесам автоматизації етапів сухої магнітної сепарації, які виконують підготовчу функцію, довгий час не надавали значної уваги. Основний акцент зосереджувався на удосконаленні автоматизованих систем саме мокрої сепарації, яка вважалася пріоритетною через більший технологічний ефект при обмеженому фінансуванні;

– технічні підходи, що успішно застосовуються для керування мокрою сепарацією, не можуть бути повноцінно адаптовані до сухого процесу, оскільки останній не передбачає регулювання витрати води – ключового параметра у мокрих методах;

– пристрої магнітної сепарації для сухого збагачення мають специфіку, яка суттєво ускладнює їх автоматизоване керування. Вони класифікуються за кількістю барабанів: один, два або більше, та можуть працювати в умовах як розосередженого одношарового потоку матеріалу, так і при ущільненому, багатшаровому завантаженні. Це зумовлює необхідність індивідуального підходу до розробки систем контролю та алгоритмів управління з урахуванням режиму функціонування – вільний чи обмежений потік руди на барабані.

Серед найбільш ефективних і надійних варіантів для автоматизованого керування виділяються сигнали магнітної індукції в зоні дії сепаратора та активна потужність електропривода барабана. Незважаючи на потенційні переваги, у магнітних сепараторах, що працюють за принципом сухого збагачення, ці параметри досі не були застосовані на практиці, а їх використання залишалося поза полем досліджень.

Аналіз параметрів фракційного складу руди разом із дослідженням характеристик роботи магнітних сепараторів, що використовуються для сухого

збагачення, дав змогу встановити: для досягнення високої ефективності процесу необхідно забезпечити стабільність зони розділення матеріалу та підвищити градієнт сепараційної кривої.

Оптимізація процесу сухої магнітної сепарації заліззовмісних руд можлива за умови стабільної подачі сировини, шляхом динамічного регулювання швидкості обертання барабана в залежності від змін у магнітній сприйнятливості матеріалу у робочій області сепаратора.

У разі реалізації регулювання за збуренням обертальна швидкість барабана повинна змінюватися пропорційно до квадратного кореня середнього значення магнітної сприйнятливості збагачуваної маси, що забезпечує гнучке реагування системи на зміну властивостей вхідної сировини.

Максимальна ефективність сепарації при сухому способі збагачення досягається за умов стислого багат шарового режиму, де оптимальний рівень продуктивності обернено пропорційний тривалості процесу розшарування сировини на фракції з різним вмістом цінного компонента.

Використання статистичних релейних автоматів для стабілізації межі поділу у магнітному полі сепаратора дозволяє значно підвищити вихід концентрату з необхідними якісними характеристиками.

У випадку незмінної подачі руди, положення зони розділення в сепараторі сухого типу може регулюватися через комплектні тиристорні перетворювачі, які змінюють оберти електродвигуна барабана. У складі цієї системи присутній імпульсний цифровий регулятор, що точно налаштовує швидкісні параметри.

В результаті реалізації даної бакалаврської роботи досягнуто повного розкриття поставленої мети, а всі заплановані інженерні задачі виконано в повному обсязі.

Література

1. Автоматизация технологических процессов на горно-рудных предприятиях Справочное пособие / Под редакцией В.С. Виноградова. М.: Недра, 1984.-166с.
2. Автоматизация процессов опробования пульповых продуктов на обогатительных фабриках/ Кучер Б.Г. // Черная металлургия. – 1989. – с.2-17.
3. Азбель Е.И., Круглова, Устинов И.Д. Особенности оптимизации обогатительных процессов при усреднении качественного состава входного потока руды // Изв. ВУЗов. Цветная металлургия. – 1986. - №1. – с.3-7.
4. Бессекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. – М.: Наука, 1975. – 767с.
5. Жосан А.А., Бабец Е.К., Хорольский В.П. Синтез адаптивного цифрового регулятора с квазискользящим режимом для нестационарных объектов обогатительной технологии // Изв. ВУЗов. Горный журнал. – 1990. - №10 – с.119-124.
6. Коваленко В.Я. Адаптивная математическая модель процесса магнитного обогащения // Механизация и автоматизация управления. – 1982. - №3.
7. Козин В.З., Тихонов О.Н. Опробование, контроль и автоматизация обогатительных процессов. - М.: Недра, 1990. –343с.
8. Козин В.З. Опробование и контроль технологических процессов обогащения. - М.: Недра, 1985. – 294с.
9. Кочура Е.В., Ислам Абдальхамид Юсеф Аль Бостанжи. Метод автоматического контроля массовой доли железа в концентрате магнитного сепаратора// Науковий вісник НГУ. – 2005. – №10. – с. 86-89.

10. Кошарский Е.Д., Ситковский А.Я. Автоматизация управления обогатительными фабриками. – М.: Недра, - 1977.

11. Кочура Е.В., Младецкий И.К., Коломиец В.И. Устройство технологической диагностики процесса “измельчение-классификация-магнитная сепарация” // Материалы совещания “Метрологическое обеспечение и автоматизация технологических процессов – основа повышения качества продукции горных предприятий” – Губкин. – 1988.

12. Кочура Е.В., Марюта А.Н., Голод В.С. Моделирование и оптимизация управления качеством железорудного концентрата // Изв. ВУЗов. Горный журнал. – 1981. - №11. – с.127-131.

13. Кочура Е.В., Марюта А.Н. Статические критерии активного контроля качества железорудного сырья // Изв. ВУЗов. Горный журнал. – 1978. - №2.

14. Линч А.Дж. Циклы дробления и измельчения. Моделирование, оптимизация, проектирование и управление. М.: Недра, 1981. – 343с.

15. Марюта А.Н. Автоматическая оптимизация процесса обогащения руд на магнитообогажительных фабриках. М.: Недра, 1975. – 230с.

16. Моркун Н.В. Адаптивная система управления процессом магнитной сепарации // Тр. научно-технической конференции “Проблемы развития Криворожского железорудного бассейна”. - Кривой Рог: КТУ. – 2002. – с.99-100.

17. Моркун Н.В. Оптимальное управление процессом магнитной сепарации железных руд // Тр. Международной научной конференции по прикладной математике и информатике. – Львов: ЛНУ, 2003. – с.42.

18. Моркун Н.В. Адаптивная система управления процессом магнитной сепарации железных руд // Вісник Криворізького технічного університету. – Кривий Ріг: КТУ. – 2004. - №3. – с.113-115.

19. Младецкий И.К., Марюта А.Н. Моделирование процесс магнитной сепарации руд. – Киев: Вища школа, 1974. – 215с.

20. Справочник по обогащению руд: Обоганительные фабрики / Под редакцией О.С. Богданова. – М.: Недра, 1974. Т 3. – 404с.
21. Справочник по обогащению руд: Подготовительные процессы / Под редакцией О.С. Богданова. – М.: Недра, 1982, Т 2. – 365с.
22. Тихонов О.Н. Автоматизация производственных процессов на обоганительных фабриках. - М.: Недра. 1985. – 272с.
23. Троп А.Е., Козин В.З., Прокофьев Е.В. Автоматическое управление процессами обоганительных фабрик. М.: Недра. 1986. – 302с.
24. Шеннон Р.Ю. Имитационное моделирование систем – искусство и наука. - М.: Мир, 1978. – 418с.
25. Шупов Д.Г. Прикладные математические методы в обогащении полезных ископаемых. - М.: Недра, 1972. – 169с.
26. Aubery, W.M. and Funk, R.M., 1971. The Quadrupole Magnetic Separator. 32nd Annu. Mining Symp., Jan. 12-13, 1971, Duluth, Minn., Univ. of Minnesota, Minneapolis, pp.55-59.
27. Eyssa, Y.M. 1973. A Feasibility Study of Superconducting Magnetic Separators for Weakly-Magnetic Ores. Thesis, Univ. of Wisconsin-Madison, September 25, 1973, Nuclear Engineering.
28. Lawver, J.E. and Carpenter, J.H., 1965. Wet magnetic separation of oxidized semi taconites. Mining Eng., 17(9): 87-91.
29. Lawver, J.E., Wright, J.L. and Kokal, H.R., 1968. The behavior of mesabi iron and silicate minerals in 20 kilogauss magnetic fields. Soc. Mining Eng., 291(2): 194-203.
30. Obertueffer, J.A., 1973. High gradient magnetic separation. IEEE Trans. On Magnetics., MAG-9(3): 303-306.
31. Pryor, E.J., 1965. Mineral Processing. Elsevier, Amsterdam, 3rd., er., pp.571-599.
32. Spells, K.E., 1955. Correlations for use in transport of aqueous suspensions of fine solids through pipes. Trans. Inst. Chem. Eng., 33(2): 79-82.

33. Stone, W.J.D., 1971 Base metals and high intensity wet magnetic separation. *Can. Mining J.*, 92(6): 56-62.

34. Wade, H.H. and Schulz, N.F., 1960. Magnetic roasting of iron ores in traveling grate roaster. *Mining Eng.*, 12(11): 1161-1165.