# Аналіз підходів до автоматизації процесу магнітної сепарації залізних руд

## Підходи до підвищення ефективності керування процесом збагачення залізної руди методом магнітної сепарації

### Загальна характеристика процесу магнітної сепарації

#### Основні етапи процесу

Процес магнітної сепарації залізної руди складається з кількох послідовних технологічних етапів, що утворюють єдиний виробничий цикл:

- Підготовка сировини: Включає дроблення, подрібнення та декласифікацію рудної маси для досягнення оптимальної крупності, необхідної для вивільнення залізовмісних компонентів від породи.

- Змішування та кондиціонування: Забезпечує гомогенізацію пульпи, регулювання співвідношення твердої та рідкої фаз, введення реагентів у разі потреби.

- Магнітна сепарація: Напрямок пульпи через магнітний сепаратор, де відбувається розділення за магнітною сприйнятливістю мінералів. Магнітна фракція накопичується як концентрат, немагнітна – як хвости.

- Згущення, фільтрація, водооборот: Відокремлення води від продуктів збагачення та її повернення у цикл.

Ці етапи органічно пов’язані між собою, і якість виконання кожного з них визначає ефективність усього процесу.

#### Фізико-хімічні основи та динаміка процесу

Ефективність магнітної сепарації визначається фізико-хімічними властивостями рудної сировини, зокрема:

- Магнітна сприйнятливість (χ): Показник здатності матеріалу намагнічуватися під впливом зовнішнього магнітного поля. Залізовмісні мінерали (наприклад, магнетит, частково гематит) мають суттєво більшу χ, ніж основні породи (кварц, силікати).

- Розмір і форма частинок: Впливають на ступінь вивільнення цільових мінералів і швидкість їхнього переміщення у магнітному полі.

- Концентрація пульпи: Оптимальний вміст твердої фази впливає на селективність та швидкість розділення.

- Хімічний склад і вміст шкідливих домішок: Визначають вимоги до глибини збагачення і кінцевої якості концентрату.

З фізичної точки зору, процес відбувається в неоднорідному магнітному полі, де частинки з більш високою χ притягуються до поверхонь магнітних елементів, осідають або накопичуються в зонах з підвищеною індукцією, тоді як немагнітні частки вимиваються потоком розділювального середовища.

#### Типові схеми та обладнання

У промисловості застосовуються різноманітні технологічні схеми магнітної сепарації залежно від типу руди, вимог до якості продукту та фізико-хімічних особливостей сировини:

- Барабанні магнітні сепаратори: Використовуються для збагачення як слабко-, так і сильнонамагнічених руд. Можуть працювати у мокрому та сухому режимах, забезпечують безперервність процесу та високу продуктивність.

- Валкові сепаратори: Ефективні для тонкого поділу концентрату та зниження вмісту шкідливих домішок.

- Високоінтенсивні магнітні сепаратори: Застосовуються для збагачення слабкомагнітних руд або видалення домішок із концентратів.

- Магнітні гідроциклонні установки: Поєднують гідродинамічне та магнітне розділення, особливо ефективні на тонкодисперсних класах.

Вибір того чи іншого типу обладнання визначається не лише технологічними вимогами, але й технічними та енергетичними характеристиками, а також економічною доцільністю.

#### Основні технологічні та експлуатаційні виклики

Процес магнітної сепарації супроводжується рядом складнощів, що обумовлюють високі вимоги до автоматизації та гнучкості керування:

- Змінність властивостей сировини: Відмінності у складі, вологості, крупності і мінералогії призводять до коливань у ефективності збагачення, що потребують адаптації режимів.

- Екологічні обмеження: Необхідність зниження втрат цінних компонентів, мінімізації викидів і зниження споживання води та енергії.

- Cтруктурна і параметрична нелінійність процесу: Взаємозалежність фазових потоків, затримки (dead-time) і складна динаміка змін технологічних параметрів.

- Вимоги до стабільності і прогнозованості роботи: Необхідність забезпечення сталих показників якості концентрату на фоні збурень та аномалій.

Саме ці чинники визначають потребу у впровадженні сучасних автоматизованих систем прогнозуючого керування, здатних працювати на основі фізико-орієнтованих моделей із урахуванням нелінійних ефектів, шумів, затримок та змін у властивостях процесу.

#### Зв’язок із завданням дослідження

Враховуючи складність та багатофакторність процесу магнітної сепарації, недостатність класичних лінійних схем керування і суттєві втрати при зміні характеристики сировини, найбільш актуальним напрямом є розробка і впровадження інтелектуальних систем прогнозуючого керування на основі нелінійних моделей. Зокрема, застосування ядерних функцій для побудови цифрового двійника технологічного процесу дозволяє гнучко відтворювати реальні залежності, оперативно адаптувати керуючі дії і мінімізувати технологічні втрати.

### Сучасні виклики та тенденції в галузі магнітної сепарації

У сучасних умовах видобувна та переробна галузь стикається зі зростаючими технічними, економічними й екологічними вимогами до процесу збагачення залізної руди методом магнітної сепарації. Класичні технології, успадковані з минулих десятиліть, все меншою мірою відповідають світовим стандартам якості та енергоефективності, а динаміка змін ринку змушує шукати нові шляхи для підвищення гнучкості виробництва.

Основні виклики сучасного етапу включають:

* Зниження якості природної сировини. Спостерігається тенденція до залучення гірших за якісними показниками руд, що містять більшу кількість домішок, тонкодисперсних фракцій та нерівномірний розподіл окремих мінералів.
* Посилення екологічних обмежень. Збільшується нормативний тиск щодо мінімізації втрат заліза у хвостах, зниження споживання води та електроенергії, зменшення викидів забруднюючих речовин.
* Енергозбереження та оптимізація ресурсів. Впровадження інноваційних енергозберігаючих технологій стає фактором конкурентоздатності, особливо у великих комбінатах.
* Зростання вимог до якості та стабільності концентрату. Ринки вимагають концентратів з високим та постійним вмістом Fe і мінімальним рівнем шкідливих домішок.
* Змінність та невизначеність властивостей сировини. Коливання складу поданої руди у часі, що обумовлює непередбачувані зміни у режимах апаратів та підвищений ризик нестабільної роботи технологічної ланки.
* Дефіцит кваліфікованого персоналу й суб’єктивізм операторських рішень.

Тенденції, що формують сучасне обличчя галузі:

* Цифровізація і автоматизація: Впровадження систем автоматизованого керування, цифрових двійників технологічних процесів, інтеграція систем реального часу для моніторингу та адаптивного впливу на виробництво.
* Використання великих даних (Big Data), машинного навчання та предиктивної аналітики: Акцент на алгоритмах, здатних виявляти приховані залежності у виробничих даних, прогнозувати відмови і оптимізувати режими роботи.
* Екологічна орієнтація виробничих процесів: Перехід до замкнених водних циклів, мінімізації втрат цінних компонентів та підвищення комплексного використання сировини.
* Інтеграція гібридних технологічних схем: Поєднання магнітної, флотаційної, гравітаційної сепарації для збільшення вилучення заліза та розширення номенклатури продуктів.

Зазначені виклики і тенденції ставлять нові вимоги до гнучкості та інтелектуалізації систем керування, роблячи недостатніми підходи, що базуються лише на статичних моделей та досвіді оператора.

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

### Критерії ефективності та оцінка керування технологічним процесом

Ефективність керування процесом магнітної сепарації оцінюється комплексом технологічних, економічних та екологічних індикаторів, які відображають результативність реалізованої системи керування та якість кінцевого продукту.

До основних критеріїв ефективності належать:

* Вилучення корисного компонента (Fe) у концентрат: Відношення кількості заліза у концентраті до його загального вмісту у вихідній руді.
* Якість концентрату (вміст Fe): Відсотковий вміст заліза у кінцевому продукті, визначає придатність концентрату для металургійного використання.
* Якість хвостів: Вміст Fe у відходах, визначає технологічні втрати і є критичним для екології та економіки.
* Продуктивність: Кількість переробленої сировини за одиницю часу.
* Стабільність технологічних режимів: Відсутність різких флуктуацій параметрів потоку, ступеня збагачення, навантаження на апарати, що забезпечує передбачуваність процесу та мінімізацію аварійних ситуацій.
* Енергоспоживання та використання води: Кількість електроенергії та води, витрачених на виробництво одиниці концентрату.

Методи оцінювання ефективності керування:

* Аналіз виробничих та лабораторних даних: Регулярний контроль показників (проби, онлайн-датчики) для визначення стану системи.
* KPІ-аналітика: Побудова трендів, контроль відхилення від нормативних/цільових значень.
* Використання імітаційних/цифрових моделей: Для тестування нових режимів чи впливу збурень без ризику для реального виробництва.
* Автоматизовані системи сповіщення про відхилення та аномалії.

Роль системи керування:

Саме ефективний контур керування дозволяє мінімізувати втрати Fe, стабілізувати якість концентрату, запобігати виходу параметрів за допустимі межі та реагувати на зміну характеристик сировини у реальному часі. Системи керування, що базуються на статичних моделях, обмежені у справжніх виробничих умовах нелінійністю та швидкоплинністю протікання процесів.

### Основні підходи до підвищення ефективності керування

Для підвищення ефективності керування процесом магнітної сепарації застосовуються різноманітні підходи, що еволюціонують від традиційних (класичних) до сучасних (інтелектуальних, предиктивних) рішень.

Традиційні підходи:

* Ручне та операторське керування: Базується на досвіді й суб’єктивних рішеннях операторів. Переваги — гнучкість, недоліки — залежність від людини, низька повторюваність та ризик помилок.
* ПІД- та каскадні регулятори: Автоматизація на рівні підтримки значень окремих параметрів (рівень, витрата, концентрація), ефективно працюють для стабільних, слабко-збурених, лінійних підпроцесів.
* Групове та багатоконтурне керування: Розширення класичних схем, коли координується декілька технологічних параметрів одночасно, але без урахування складних взаємозв’язків або змін нелінійності.

Сучасні підходи:

* Оптимізаційні та адаптивні системи (APC, RTO): Прагнуть врахувати взаємозв'язок змінних, оптимізують режим щогодини/зміни для досягнення максимального вилучення/продуктивності. Часто все ще ґрунтуються на статичних чи спрощених математичних моделях.
* Моделююче прогнозуюче керування (MPC): Дає змогу враховувати обмеження, dead-time, взаємодії між численними параметрами, працює на базі математичних моделей об’єкта. Обмеження — чутливість до похибок у моделюванні, труднощі із отриманням точної моделі для нелінійного процесу.
* Гібридні й інтелектуальні системи: Поєднують класичні методи з алгоритмами машинного навчання, оптимізації, нечіткої логіки. Наприклад, використання цифрових двійників, систем підтримки прийняття рішень, самонавчальних моделей.
* Data-driven підходи та ядерні моделі: Персоніфікована побудова предикції та керування на основі великих масивів виробничих даних і сучасних ядерних функцій для апроксимації складних нелінійних залежностей.

Узагальнення:

Класичні системи керування (зокрема й MPC на лінійних моделях) часто не здатні адекватно впоратися з високою нелінійністю і змінністю процесу магнітної сепарації, що обумовлює часті відхилення від цільових показників, технологічні втрати і необхідність ручних втручань. Це створює попит на нові методології моделювання та керування: застосування ядерних функцій (KRR, SVR, GPR тощо) для побудови цифрового двійника та інтеграції цих моделей у предиктивні схеми MPC дозволяє підвищити точність і гнучкість керування, забезпечити адаптацію до зміни властивостей сировини, зменшити втрати Fe та оптимізувати споживання ресурсів.

Саме ці підходи лежать в основі дослідження, спрямованого на розробку новітніх систем прогнозуючого керування процесом магнітної сепарації із застосуванням нелінійних ядерних моделей.

## Автоматизація процесу магнітної сепарації: історія, сучасний стан, приклади впровадження

### Етапи розвитку автоматизації в галузі

Автоматизація процесу магнітної сепарації, як і загалом у збагаченні корисних копалин, пройшла декілька ключових етапів у своєму розвитку.  
Перші спроби автоматизації на початку XX століття були суто механічними — контроль або регулювання окремих технологічних параметрів здійснювалося за допомогою простих пристроїв (наприклад, плаваючих клапанів або важільних механізмів).

З 1960-х років, із впровадженням аналогової електроніки, почали з'являтися локальні автоматичні регулятори (типу ПІД) на основі релейно-контакторних схем. Впровадження мікропроцесорної техніки (кінець 1970-х – початок 1980-х) призвело до масового впровадження програмованих логічних контролерів (PLC), що дозволили реалізовувати складні алгоритми послідовного, логічного й комбінованого керування. У 1980–1990-х роках основою автоматизації стають АСУ ТП (автоматизовані системи управління технологічними процесами), в яких PLC виконують локальні функції, а централізований диспетчерський контроль здійснюється через операторські станції.

Відчутний прорив відбувся зі впровадженням комп’ютерних технологій — SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) й DCS (Distributed Control System):

* SCADA-системи дозволили забезпечити моніторинг, централізовану візуалізацію, архівування параметрів, сигналізацію про відхилення, автоматизований збір і передавання даних у масштабах підприємства.
* DCS-системи реалізували розподілену логіку керування (наприклад, зонування контролю у масштабах фабрики, каскадне ієрархічне керування над технологічними вузлами).

Як приклад можна навести сучасні збагачувальні фабрики Північного й Інгулецького ГЗК (Україна), Lebedinsky GOK (РФ), Sishen (ПАР), де досі працюють об'єднані SCADA+PLC/RTU рішення, поступово доповнювані новими цифровими платформами.

Межі класичних автоматизованих систем пролягали по таких рубежах:

* **Автономність:** більшість систем працювала ізольовано, з незначною координацією між апаратами, реалізуючи тільки підтримку окремих технологічних параметрів.
* **Інтегрованість:** інтеграція даних із різних ділянок та виробничих ланцюгів забезпечувалася часто з великими затримками або через сторонні системи.
* **Зона відповідальності:** оператор міг бачити та впливати тільки на “своє” обладнання, що ускладнювало відслідковування причинно-наслідкових зв'язків процесу.

Істотний внесок автоматизації — стабілізація продуктивності (коливання рівня концентрату, втрата Fe у хвостах) та зменшення аварійності. За оцінками виробників, впровадження SCADA/DCS систем на збагачувальних фабриках забезпечило скорочення втрат цінних компонентів до 5–10% порівняно із типово ручним управлінням [1,2].

### Технологічні платформи та рівні автоматизації

Сучасна ієрархія автоматизації магнітної сепарації складається, як правило, з декількох рівнів:

* **Польовий рівень (Field Level):** Виконавчі механізми, датчики (рівня, тиску, потоку, магнітних властивостей), релейні блоки, “розумна” фурнітура. Основна функція — забезпечення збору і базового контролю параметрів.
* **Локальний рівень:** Тут розташовуються ПІД-регулятори, які підтримують сталі значення локальних змінних (наприклад, рівень у сепараторі, витрата живлення). Найчастіше — це внутрішні PLC або модульні електронні регулятори.
* **Каскадний (груповий) рівень:** Декілька підсистем об’єднуються під спільним управлінням — наприклад, контроль балансу подачі концентрату й автоматичне переналаштування у відповідь на зміни виду сировини. Застосовуються каскадно-координуючі ПІД схеми, нерідко додані “логічні матриці” або прості алгоритми розподіленої оптимізації.
* **Операторський/диспетчерський рівень:** Впровадження SCADA/DCS забезпечує всю повноту інтеграції даних, віддалений моніторинг, візуалізацію технологічних схем, задання/коригування параметрів у масштабі фабрики.
* **Оптимізаційний/аналітичний рівень (MES/ERP/Cloud):** Платформи, що збирають великі масиви даних із різних об'єктів, аналізують історичні і прогнозні тренди (інколи з елементами машинного навчання). Тут розташовані системи глобальної оптимізації (RTO) і підтримки прийняття рішень.

**Реальні приклади:**

* На Південному ГЗК (Україна) використовується система Siemens PCS7 DCS із десятком локальних контролерів S7-400/1200, SCADA WinCC та OPC-сервером для інтеграції з ERP підприємства.
* Lebedinsky GOK (РФ) — Honeywell Experion PKS, Siemens S7, Boolean Logic CASCADE control для головних пульповодів і сепараторів.
* Промислові впровадження в Південній Африці приймають ABB 800xA на рівні фабрики, з цифровими датчиками масового балансування на кожній стадії.

**Особливості архітектури:**

* Впровадження каскадних і багатоконтурних систем, наближення до принципу “soft sensors” — для оцінки онлайн-параметрів, які йдуть без прямого вимірювання (наприклад, вміст Fe на виході).
* Зростає частка інтегральних платформ, де SCADA виконує і функцію архівування “Big Data”, а MES рівень — функцію аналізу та планування (наприклад, блок оптимізації ресурсів, прогнозування аварій).

### Основні обмеження класичних АСК ТП

Незважаючи на безперечні здобутки у підвищенні ефективності, класичні автоматизовані системи керування технологічними процесами (АСК ТП) мають суттєві обмеження:

* **Проблеми реакції на збурення:** Більшість ПІД-регуляторів оптимізовані для локальної стабілізації сталих режимів і не можуть оперативно компенсувати швидкі зміни (збурення) у властивостях вхідної сировини або появу зовнішніх впливів.
* **Відхилення і “dead-time”:** Через наявність значних затримок між зміною керуючого впливу і реакцією об'єкта (інерційність гідроциклонів, сепараторів), класичні регулятори працюють зі зниженою точністю або ж “підлаштовуються” із запізненням, що призводить до втрат матеріалу.
* **Недостатність фізичних моделей:** Класичні системи побудовані або на статичних спрощених моделях, або взагалі не враховують взаємозв’язків між технологічними ланками, і не можуть заздалегідь оцінити наслідки нелінійностей та динамічних ефектів.
* **Проблеми із переналаштуванням:** У разі зміни властивостей руди, схем подачі або сезонних флуктуацій, параметри ПІД-регуляторів потребують ручної повторної ідентифікації — що в промисловій практиці зазвичай робиться із значним запізненням або взагалі ігнорується.
* **Відсутність гнучкої адаптації:** Класична логіка не враховує взаємодію між багатьма одночасними факторами (наприклад, магнітна сприйнятливість, гранулометрія, концентрація пульпи, продуктивність перекачувальних пристроїв), що веде до частої втрати оптимального режиму при зміні типу сировини.

Наслідки:

* Підвищені втрати Fe у хвостах або зниження якості концентрату в разі переходу на новий вид сировини.
* Часті аварійні ситуації або вимушені простої для ручної перенастройки.
* Обмежена можливість оптимізації енергоспоживання та витрат води.
* Недостатня експлуатаційна надійність і вимушена залежність від інтуїції досвідченого оператора.

Узагальнюючи, класичні підходи до автоматизації магнітної сепарації вже вичерпують свій потенціал. Динаміка ринку та вимоги виробництва дедалі більше акцентують необхідність переходу до інтелектуальних і адаптивних систем, які здатні працювати з непрямими вимірюваннями, прогнозувати реакцію процесу на зовнішні впливи і використовувати цифрові моделі для реального оптимального керування.

## Математичне моделювання і цифрові двійники у збагаченні руд

### Класифікація моделей технологічних процесів

Математичне моделювання є ключовим інструментом для аналізу, оптимізації та прогнозування процесів збагачення руд. У цій сфері використовують різні класи моделей, кожен з яких має свої переваги й обмеження:

- Детерміновані моделі: ґрунтуються на фундаментальних фізичних законах (балансові рівняння маси, енергії, імпульсу) й описують технологічний процес через систему диференціальних або різницевих рівнянь. Вони дозволяють відслідковувати причинно-наслідкові зв’язки, але вимагають точних параметрів і повної інформації про процес.

- Напівемпіричні моделі: комбінують фізичні закономірності з коригувальними емпіричними коефіцієнтами, визначеними з експерименту. Такі моделі широко застосовують у промислових умовах, наприклад, для розрахунку ефективності сепараторів, де відсутня повна інформація про всі внутрішні параметри об’єкта.

- Black-box-моделі (чорного ящика): описують зв’язок між вхідними і вихідними параметрами на основі статистичного навчання без фізичної інтерпретації структури. Вони незамінні у випадках складних, слабкоформалізованих або нелінійних процесів, характерних для сучасного збагачення руд.

Ідентифікація моделей за експериментальними даними може здійснюватися різними методами:

- Метод найменших квадратів (LSM), регресійний аналіз.

- Структурна і параметрична ідентифікація систем.

- Використання інструментів машинного навчання (нейронні мережі, рішення деревами, SVM, ядерні методи тощо).

Правильний вибір класу моделі залежить від цілей дослідження, доступної інформації, вимог до інтерпретованості та ринку/виробництва.

### Обмеження та можливості фізичних і статистичних моделей

Розглядаючи застосування детермінованих і статистичних моделей у збагаченні руд, потрібно враховувати низку їхніх характеристик:

- Адекватність: Фізичні моделі дають чітку структурну інтерпретацію процесу, що дозволяє відслідковувати причини змін. Проте, при складній структурі або змінності властивостей сировини їхня точність може бути недостатньою.

- Гнучкість і стійкість: Статистичні моделі, і особливо black-box-підходи, добре пристосовуються до змін вхідних параметрів, здатні враховувати впливи, не передбачені початковою структурою моделі.

- Точність: Напівемпіричні й чорний ящик-моделі часто забезпечують вищу точність у прогнозі короткострокових змін, оскільки вчаться на реальних історичних даних.

- Стійкість до шуму: Статистичні моделі можуть бути стійкими до незначних флуктуацій або похибок при належній обробці даних.

- Виклики dead-time та інерційності: Багато фізичних моделей ігнорують часові затримки (dead-time), які реальні у технологічних процесах: час транспортування пульпи, “запізнення” реакцій регуляторів, інерційність сепараторів.

Статистичні моделі краще розв’язують проблему dead-time через моделювання реакції системи у часовому вікні на основі даних. Водночас вони програють фізичним моделям у пояснюваності і здатності бути основою для інтерпретації “причина → наслідок”.

### Роль машинного навчання та сучасних методів

Сучасна тенденція в моделюванні складних технологічних систем полягає в інтеграції методів машинного навчання, зокрема нелінійних, нелінійних ядерних моделей. Серед них:

- Ядерна регресія (Kernel Ridge Regression; KRR): Дозволяє створити нелінійну модель зв’язку між вхідними й вихідними параметрами через відповідну ядерну функцію (гаусову, поліноміальну тощо), що дає змогу детально апроксимувати складні залежності без явної побудови фізичної структури процесу.

- Методи опорних векторів для регресії (Support Vector Regression; SVR): Використовують ядерні трюки для знаходження оптимальної гіперплощини в багатовимірному просторі ознак, забезпечуючи стійкість до викидів і хорошу генералізацію.

- Гаусівська процесна регресія (Gaussian Process Regression; GPR): Надає не лише прогноз, а й оцінку невизначеності, що критично для прийняття рішень у промислових системах.

Їх переваги:

- Висока точність апроксимації та адаптація до складних, нелінійних, нерівномірних процесів з великою кількістю параметрів.

- Стійкість до шуму та флуктуацій, здатність використовувати “історичну пам’ять” для врахування dead-time.

- Відсутність необхідності формалізувати фізичну структуру об’єкта, що є проблематичним для реальних промислових систем, де значна частина процесу “закрита” для безпосереднього спостереження.

Приклади застосування:

- Впровадження GPR-моделей для оптимізації режимів флотації та сепарації на фабриках ArcelorMittal (2022).

- Розробка цифрових двійників ланцюгів магнітної сепарації на базі SVR/KRR-моделей у Китаї, ПАР, Скандинавії.

- Гібридні моделі “цифровий двійник + фізична модель” у завданнях прогнозування втрат Fe у хвостах та оптимізації подачі реагентів (останні огляди: Minerals Engineering, 2023; IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2024).

Цифровий двійник у такому контексті — це дані/модель, що відображають у реальному часі стан виробничого процесу, дозволяють моделювати “що-станеться-якщо”, тестувати різні алгоритми керування і бачити весь ланцюг наслідків до впровадження у реальне виробництво.

## Завдання дослідження