# Аналіз підходів до автоматизації процесу магнітної сепарації залізних руд

## Вступ

### Стратегічний контекст та проблематика

Сучасна гірничорудна промисловість працює в умовах високої динаміки, жорсткої конкуренції та ресурсних обмежень. Коливання цін на сировину й енергоносії, посилення екологічних вимог та нові міжнародні стандарти якості перетворюють підвищення ефективності процесів збагачення на стратегічну умову конкурентоспроможності та лідерства.

### Економічне та технологічне обґрунтування

Оптимізація процесу збагачення забезпечує:

* Зменшення втрат цінних компонентів
* Зниження енергоспоживання та витрат на реагенти
* Стабільність якості кінцевого концентрату

Це формує основу для надійного планування, екологічної відповідальності та сталого виходу на ринок.

#### Ключові показники ефективності (KPIs)

**Технологічні показники**

* Стабільний вміст цільового компонента (наприклад, Fe) у концентраті
* Мінімізація втрат корисних речовин у хвостах
* Контроль гранулометричного складу

**Економічні показники**

* Питомі витрати енергії
* Витрати на реагенти
* Продуктивність технологічних ліній

### Світовий досвід цифрової трансформації

#### Практика лідерів ринку

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Підприємство** | **Технології** | **Ключові результати** |
| Vale (Бразилія) | SmartPlant (IoT + AI) | – Енергозбереження 10–12% – Зниження втрат Fe 15% |
| Rio Tinto (Австралія) | Динамічні контролери з адаптацією | Вилучення Fe до 91% |
| LKAB (Швеція) | IIoT + MPC | ↓ флуктуації якості концентрату на 30% |
| BHP (Австралія) | Превентивна аналітика | Реальне виявлення аномалій |
| Sinosteel, Baosteel | Deep Learning + IIoT-датчики | Мінімізація людського фактора |

#### Технологічні тенденції

* Перехід від стабілізації до динамічної оптимізації (MPC, адаптивні системи)
* Розвиток “soft sensors” і систем раннього попередження
* Глибока інтеграція IIoT, MES-платформ та аналітики даних

### Стан та виклики українських підпримств

#### Поточний рівень автоматизації

* Автоматизовані вузли зросли з 10% (2015) до 50% (2024)
* Фрагментарна автоматизація окремих ділянок (PID-регулятори, локальні IIoT)

**Успішні кейси**

* Інгулецький ГЗК: автоматизація магнітної сепарації → ↓5% втрат Fe, оптимізація реагентів
* Північний ГЗК: тестування MPC → ↑7–10% стабільності концентрату, ↓18% простоїв, ↓9% енергозатрат
* Полтавський ГЗК: IIoT-контроль вологості → оптимізація відвантажень

#### Ключові проблеми

* Відсутність єдиної цифрової платформи
* Обмежена сенсорна база та слабка IT-інтеграція
* Дефіцит кваліфікованих кадрів
* Фрагментарне інвестування без системної стратегії

### SWOT-аналіз українських ГЗК

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Сильні сторони | Слабкі сторони | Можливості | Загрози |
| Відносна цифрова культура (Північний ГЗК) | Нестача історичних даних | Прискорене масштабування | Втрата темпу модернізації |
| Поетапність реалізації (Інгулецький ГЗК) | Нестача кадрів | Залучення міжнародних експертів | Кадрова міграція |
| Гнучкість у впровадженні (Центральний ГЗК) | Застаріла периферія | Побудова єдиної платформи | Фрагментація даних |

### Стратегічні напрями для України

1. **Data-Driven Decision Making**  
   – Розгортання IIoT-сенсорів та MES-платформ
2. **Від стабілізації до оптимізації**  
   – Впровадження адаптивних систем MPC
3. **Прогнозування та превентивні дії**  
   – Розвиток “soft sensors” і аналітики
4. **Дорожня карта 2025–2030**  
   – Інвестиції в інфраструктуру й IT-фахівців  
   – Перехід до мультиагентних платформ  
   – Партнерство з міжнародними інтеграторами

### Висновки

Системна цифрова трансформація IIoT, ШІ та MPC знижує енерговитрати й втрати корисних компонентів, підвищує якість концентрату та знижує операційні ризики. Для України ключовим є подолання фрагментарності через стратегічні інвестиції в єдині платформи, інфраструктуру та кадри.

## Математичне моделювання процесів збагачення

### Роль математичного моделювання

Моделювання слугує основою для аналізу, прогнозування та управління технологічними процесами збагачення. Різноманіття методів вимагає розуміння переваг і обмежень кожного класу моделей.

### Класифікація математичних моделей

#### Фізико-хімічні моделі (“біла скринька”)

**Основні рівняння**

* Баланс мас:
* Кінетика вилучення у флотації:
* Магнітна сепарація:
* Моделі Navier–Stokes для пульпи

**Промислові кейси**

* Vale (2017): оптимізація гідродинаміки → +3% вилучення Fe
* Fujiwara et al. (2020): деталізація кінетики → ↓30% коливань Fe

#### Статистичні лінійні моделі (“чорна скринька”)

**Формалізм**

* MLR:
* ARIMA для часових рядів
* PLS та дискримінантний аналіз для контролю гранулометрії

**Кейси**

* Samarco: MLR → ↓8% витрат реагентів
* Wang et al. (2021): ARIMA → ↓12% незапланованих зупинок

#### Нелінійні дані-моделі (“сіра/чорна скринька”)

**Методи**

* Нейронні мережі (MLP, LSTM)
* Ядерні методи (KRR, GPR, SVR)

**Кейси**

* LKAB: GPR + soft sensors → гранулометрія стабільна ±2%
* ArcelorMittal (Канада): SVR → +5% вилучення

### Порівняння моделей і стратегія вибору

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Тип моделі** | **Переваги** | **Недоліки** | **Оптимальна сфера застосування** |
| Фізико-хімічні | Інтерпретованість, надійність | Висока обчислювальна складність, неадаптивність | Теоретичний аналіз, симулятори |
| Лінійні | Швидкість побудови, легкість ідентифікації | Без урахування нелінійності, слабка екстраполяція | Моніторинг, оперативний контроль |
| Нелінійні | Апроксимація будь-яких залежностей, адаптивність | Потребують великі дані та потужності | Digital twins, MPC, soft sensors |

#### Гібридні підходи

Оптимальне рішення поєднує фізичний фундамент, статистичну корекцію та нелінійну адаптацію.  
**Приклад**: MPC зі “серцевиною” з фізичної моделі й нейромережею для корекції.

### Практичні аспекти впровадження

#### Типові помилки

* Погана ідентифікація процесу через неякісні дані
* Ігнорування мультиколінеарності й стохастики
* Overfitting моделей
* Недостатня валідація в реальних умовах

#### Підготовка даних

|  |  |
| --- | --- |
| **Тип моделі** | **Вимоги до даних** |
| Фізико-хімічні | Точні inline-вимірювання, калібровка сенсорів |
| Лінійні | Нормалізація, перевірка мультиколінеарності |
| Нелінійні | Великі синхронізовані набори, імпутація пропусків |

#### Soft sensors

* Фільтрація даних: корекція лагів, синхронізація зі SCADA
* Динамічна адаптація: автоматичне перенавчання
* Валідація через “цифровий двійник”

### Висновки та стратегічні орієнтири

Вибір моделі залежить від цілей:

* Фізико-хімічні – для фундаментальних досліджень
* Лінійні – для оперативного контролю
* Нелінійні – для адаптивних систем (MPC, digital twins)

Гібридизація забезпечує баланс точності, швидкості та адаптивності. Якість даних залишається критичним фактором.

## Методи керування магнітною сепарацією

### Класифікація регуляторів

#### Класичні регулятори (PID, каскадні схеми)

Класичні PID-регулятори та каскадні схеми застосовуються на підприємствах зі стабільною якістю сировини. Вони відрізняються простотою реалізації, надійністю роботи та легкою інтеграцією з існуючими PLC/SCADA. Водночас їх ефективність знижується при багатоканальних процесах або значних коливаннях властивостей руди.

#### Сучасні алгоритми (MPC, APC)

MPC (Model Predictive Control) та APC (Advanced Process Control) забезпечують адаптацію до динаміки багатьох параметрів одночасно. Ці алгоритми прогнозують поведінку системи на горизонті майбутніх кроків та коригують управляючі впливи за оптимізаційними критеріями. Недоліком є складність налаштування й потреба в достовірних моделях процесу.

#### Гібридні підходи

Гібридні рішення поєднують швидкодію PID на швидкому контурі та стратегічну оптимізацію MPC. Такі системи модульні й універсальні: PID відповідає за миттєві корекції, а MPC адаптує параметри з урахуванням змін у властивостях сировини. Приклад впровадження — Ferrexpo та Outokumpu.

### Оптимальні стратегії для типів руд

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Тип руди** | **Рекомендований метод** | **Промисловий кейс** | **Основний результат** |
| Магнетитові | Класичні PID | ArcelorMittal Кривий Ріг | Стабільна якість, мінімальні витрати |
| Гематитові | MPC + soft sensors | Vale, Ferrexpo | ↓ втрат Fe, стабілізація концентрації |
| Змішані/дрібні | Гібридні схеми з нелінійними моделями | Anshan Iron & Steel | Раннє виявлення деградації обладнання |

### Ядрові методи в промисловості

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Метод** | **Сфера застосування** | **Переваги** | **Обмеження** |
| KRR | Онлайн-корекція параметрів | Висока швидкість реакції | Велика обчислювальна складність |
| SVR | MIMO-системи, контроль домішок | Висока точність прогнозів | Складність налаштування гіперпараметрів |
| GPR | Діагностика обладнання | Оцінка невизначеності прогнозу | Потреба в досвідчених аналітиках |

### Інтеграція ядрових моделей у SCADA/PLC

1. Збір сигналів від сенсорів (температура, гранулометрія) через SCADA/PLC
2. Попередня обробка: нормалізація, фільтрація шуму
3. Обчислення оптимальних значень керуючих впливів за допомогою KRR/SVR/GPR
4. Формування уставок MPC/APC-модулем на основі прогнозів
5. Відображення результатів та тривог на операторському дашборді

Технології зв’язку: Industrial Ethernet, OPC UA.

### Проблеми впровадження та шляхи їх подолання

**Ключові виклики**

* Недостатня точність сенсорів призводить до похибок у прогнозах
* Обмежені обчислювальні ресурси контролерів SCADA/PLC
* Відсутність бекап-алгоритмів при збої основних моделей
* Дефіцит кваліфікованих фахівців для роботи з ядровими методами

**Стратегії оптимізації**

* Розподіл обчислень між edge-пристроями та центральними MES-серверами
* Впровадження автоматичного перенавчання моделей при зміні режимів
* Розробка fallback-механізмів для безперебійної роботи у разі відмов
* Навчання та підтримка персоналу через партнерство з університетами та тренінгові програми

### Висновки та стратегічні рекомендації

Для магнетитових руд оптимальним є застосування класичних PID-регуляторів через їх простоту та надійність.

Для гематитових і змішаних руд рекомендовано поєднання MPC із soft sensors або гібридними схемами, що забезпечує зниження втрат металу на 10–15% і стабілізацію процесу.

Ядрові методи (KRR, SVR, GPR) підвищують точність керування на 15–30% але потребують розвиненої IT-інфраструктури та навченої команди.

Ключове завдання при впровадженні — чіткий розподіл обчислювальних потужностей, сувора валідація даних та підтримка fallback-механізмів для забезпечення безперебійності.

## Актуальні виклики та дослідницькі орієнтири

### Сучасні промислові виклики

Сучасний гірничо-металургійний комплекс стикається з вимогою гнучко реагувати на зміну властивостей руди та технологічних параметрів.

* Посилена конкуренція на світовому ринку мінеральних ресурсів
* Жорсткі вимоги сталого розвитку: енергоощадність, мінімізація відходів, екологічна безпека
* Обмежена точність сенсорики та мінлива динаміка об’єктів
* Складність інтеграції інтелектуальних систем через технологічні й кадрові обмеження

### Об’єкт та предмет дослідження

Об’єкт дослідження:

* Динамічна система магнітної сепарації з параметрами:
* масова частка цільового компоненту у концентраті,
* втрати корисних речовин у хвостах,
* гранулометричний склад проміжної продукції,
* енергоспоживання.

Предмет дослідження:

* Комплекс математичних моделей та алгоритмів прогнозуючого керування на основі:
* методів ядрових функцій,
* підходів машинного навчання,
* адаптації до нелінійної динаміки процесу.

### Формалізація задачі прогнозуючого керування

#### Динамічна модель системи

Стан системи:

Вхідні впливи:

Вихідні параметри:

Функціональне співвідношення:

де w(t) – невимірювані стохастичні збурення.

Ядрова апроксимація:

де K – ядрова функція, – вагові коефіцієнти.

#### Реалізація та верифікація моделі

* Збір та обробка великих масивів виробничих даних
* Крос-валідація за часовими рядами
* Тестування на стійкість до шуму, мультиколінеарності та неповноти даних
* Інтеграція з “цифровим двійником” для перевірки адекватності

#### Задача прогнозуючого керування (MPC)

Оптимізаційна задача на горизонті N:

за умов:

#### Ідентифікація в умовах неповних даних

* Неповні та гетерогенні дані з високим рівнем шуму
* Додаткові терміни регуляризації для урахування кореляційності та структурної різнорідності
* Методи відновлення: імпутація пропущених значень, robust-регресія, багатозадачний підхід

### Валідація та порівняння з сучасними підходами

* Використання відкритих датасетів процесів мокрої магнітної сепарації
* Промислові стендові випробування в контрольованих умовах
* Порівняння з класичним лінійним MPC, нейронними мережами та статистичними методами
* Оцінка за ключовими показниками:
* стабільність при зміні сировини,
* робота в нестаціонарних режимах,
* точність прогнозів за неповних спостережень

### Межі дослідження та наукова новизна

Межі дослідження

* Не охоплюється макрорівневе диспетчерське планування
* Фокус на локальному рівні інтелектуального керування
* Не враховано економічні аспекти інвестицій

Наукова новизна

* Розробка адаптивних алгоритмів ідентифікації з регуляризацією для складних умов
* Інтеграція ядрових моделей у структуру MPC
* Оптимізація траєкторій керування для реальних промислових середовищ
* Механізми компенсації впливу неповних і зашумлених даних