# РОЗДІЛ 1

Звісно. Ось проєкт першого розділу наукової роботи, написаний з урахуванням наданих рекомендацій, теоретичного опису та мого знання коду симуляції.

## РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПІДХОДІВ ДО АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ МАГНІТНОЇ СЕПАРАЦІЇ ЗАЛІЗНИХ РУД

### 1.1. Підходи до підвищення ефективності керування процесом збагачення

Процес збагачення залізної руди методом магнітної сепарації є ключовим етапом у металургійному виробництві, ефективність якого безпосередньо впливає на якість кінцевого продукту та економічні показники підприємства1111. Основні технологічні виклики полягають у необхідності стабільного підтримання заданих параметрів якості концентрату при одночасній мінімізації втрат цінного компонента у хвостах222. Традиційні підходи до керування часто призводять до неоптимальних режимів роботи, що спричиняє фінансові збитки та підвищений знос обладнання через агресивні або несвоєчасні керуючі дії3. У зв'язку з цим, розробка та впровадження систем удосконаленого керування (Advanced Process Control) є актуальною науково-технічною задачею, спрямованою на підвищення стабільності та ефективності процесу.

### 1.2. Аналіз математичних моделей процесу збагачення

Адекватна математична модель є основою будь-якої сучасної системи керування4444. Історично для опису процесів збагачення застосовувалися два основні класи моделей:

1. **Фізико-хімічні моделі:** Ці моделі базуються на фундаментальних законах гідродинаміки, магнетизму та масопереносу. Незважаючи на високу теоретичну точність, їх практичне застосування обмежене через надзвичайну складність, велику кількість важко вимірюваних параметрів та нездатність оперативно адаптуватися до змін у властивостях сировини, що є характерною рисою реального виробництва.

2. **Статистичні моделі на основі даних:** Цей підхід використовує історичні дані для побудови "чорної скриньки" моделі. Класичні лінійні моделі, такі як ARIMA або множинна лінійна регресія, є простими в реалізації, але не здатні адекватно описувати складні**нелінійні залежності** та перехресні зв'язки між параметрами процесу55.

Таким чином, існує розрив між складними, але негнучкими фізичними моделями та простими, але неточними лінійними статистичними моделями. Цей розрив створює потребу в розробці

**нелінійних непараметричних моделей** на основі даних, здатних гнучко апроксимувати складну динаміку процесу збагачення6666.

### 1.3. Аналіз методів керування процесом збагачення

Вибір методу керування безпосередньо залежить від характеристик об'єкта. Процес магнітної сепарації як об'єкт керування має риси, що ускладнюють застосування класичних підходів7:

• **Багатовимірність (MIMO):** Зміна одного входу впливає на кілька виходів8888.

• **Транспортні затримки та інерційність:** Реакція системи на керуючу дію є розтягнутою в часі.

• **Обмеження:** Існують жорсткі технологічні та апаратні обмеження на параметри процесу.

Традиційно для керування використовуються

**ПІД-регулятори**, однак для складних MIMO-систем з затримками їх налаштування є нетривіальною задачею, і вони не здатні явно враховувати обмеження9999. Це призводить до неоптимального, осцилюючого або надто консервативного керування.

Сучасною альтернативою є

**явно враховувати обмеження**, що робить його ідеальним кандидатом для керування процесом збагачення11111111.

### 1.4. Постановка задач дослідження

Виходячи з проведеного аналізу обмежень існуючих підходів, метою даної роботи є розробка та дослідження комплексної системи предиктивного керування процесом збагачення залізної руди. Для досягнення цієї мети були поставлені наступні задачі:

1. **Розробити гнучку нелінійну модель процесу** на основі даних, використовуючи **ядрові методи (KRR, GPR, SVR)**, здатну адекватно описувати динаміку об'єкта та забезпечувати автоматичний підбір гіперпараметрів.

2. **Синтезувати MPC-контролер**, що використовує розроблену модель, з формулюванням цільової функції, яка відображає технологічні та економічні критерії ефективності.

3. **Створити робастний механізм оцінки стану та непередбачуваних збурень** на основі **розширеного фільтра Калмана (EKF)** для забезпечення нульової статичної помилки керування (offset-free).

4. **Реалізувати адаптивний компонент** у вигляді **онлайн-перенавчання** прогнозної моделі, що активується за сигналом про деградацію її якості, отриманим від EKF.

5. **Провести комплексне експериментальне дослідження** розробленої системи на реалістичній симуляційній моделі, яка імітує шуми, аномалії вимірювань та невідповідність моделі реальному об'єкту ("plant-model mismatch"), для підтвердження її ефективності та робастності.