# РОЗДІЛ 2

Ось проект другого розділу наукової роботи, що базується на наданих рекомендаціях, теоретичному описі та коді симуляції.

## РОЗДІЛ 2. ІДЕНТИФІКАЦІЯ ЯДРОВИХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕСУ ЗБАГАЧЕННЯ ЗАЛІЗНОЇ РУДИ МЕТОДОМ МАГНІТНОЇ СЕПАРАЦІЇ

### 2.1. Аналітичні дослідження процесу для ідентифікації ядрових моделей

Як було зазначено у попередньому розділі, побудова точної фізико-хімічної моделі процесу збагачення є малореалістичною задачею1. Тому для синтезу системи предиктивного керування було обрано підхід ідентифікації на основі даних (

**data-driven identification**)2. Метою є створення непараметричної моделі, здатної апроксимувати складні нелінійні залежності між вхідними та вихідними параметрами процесу, що є ключовою перевагою над лінійними аналогами3333.

Для врахування динамічних властивостей об'єкта, таких як інерційність та транспортні затримки, структура моделі базується на використанні лагованих значень вхідних змінних4444. Це відповідає структурі моделей типу

**ARX (AutoRegressive with eXogenous inputs)**, де поточний вихід yt​ залежить не лише від поточних входів ut​, але й від їхніх значень на попередніх кроках часу t−1,…,t−L. Вхідний вектор стану (регресор) xt​ для прогнозної моделі формується наступним чином:

xt​=[ut−LT​,ut−L+1T​,…,utT​]

де uk​=[feed\_fek​,ore\_flowk​,solid\_feedk​]T — вектор вхідних параметрів на кроці k, а L — глибина лагу.

### 2.2. Розробка комплексної математичної моделі

Для апроксимації нелінійної функції f у співвідношенні yt​=f(xt​) було обрано

В рамках дослідження було реалізовано та порівняно три варіації ядрових методів у рамках єдиного програмного інтерфейсу

KernelModel7:

• Kernel Ridge Regression (KRR): Метод мінімізує суму квадратів помилок з додаванням L2-регуляризації для запобігання перенавчанню. Цільова функція має вигляд:JKRR​=∑i=1n​(yi​−f(xi​))2+λ∣∣w∣∣2деλ — коефіцієнт регуляризації. 8

• **Gaussian Process Regression (GPR):** Байєсівський підхід, що моделює виходи як реалізацію гауссівського процесу. 9Ключовою перевагою є отримання не лише точкового прогнозу, але й оцінки його**невизначеності (дисперсії)**, що є критично важливим для прийняття рішень10101010.

• **Support Vector Regression (SVR):** Метод, стійкий до викидів у даних завдяки використанню ϵ-нечутливої функції втрат, яка ігнорує помилки, менші за поріг ϵ. 11111111 Цільова функція:JSVR​=21​∣∣w∣∣2+C∑i=1n​max(0,∣yi​−f(xi​)∣−ϵ)

Для забезпечення практичності та підвищення якості моделей реалізовано механізм
**автоматичного підбору гіперпараметрів** (λ, γ, C, ϵ) за допомогою методу RandomizedSearchCV, що є важливою складовою реалізації model.py.

### 2.3. Аналіз впливу параметрів

Кожен з реалізованих методів має свої особливості, що впливають на поведінку системи керування. Порівняльний аналіз, проведений на етапі симуляції, показав наступні відмінності:

• **KRR** демонструє швидку та реактивну відповідь на зміни в даних, що може бути перевагою, але іноді призводить до надмірної чутливості до шуму12.

• **GPR** забезпечує більш плавне та "стратегічне" керування. Завдяки байєсівській природі він краще враховує загальні тренди, що в реальних умовах може призвести до зменшення зносу обладнання13.

• **SVR** показує високу робастність до аномальних викидів у навчальних даних, що робить його привабливим для використання в умовах зашумлених вимірювань.

Вибір конкретного типу моделі та ядра (наприклад, лінійного чи RBF) є компромісом між обчислювальною складністю, точністю та бажаною поведінкою системи керування.

### 2.4. Апробація моделі

Для валідації якості ідентифікованих моделей було проведено їх тестування на відкладеній вибірці даних, згенерованій симулятором. Важливою деталлю симуляційного стенду є використання моделі

**невідповідність моделі та об'єкта ("plant-model mismatch")**, що дозволяє оцінити робастність системи в умовах, наближених до реальних14141414.

Оцінка проводилася за стандартними метриками якості регресії: середньоквадратичною помилкою (RMSE) та середньою абсолютною помилкою (MAE). Результати апробації показали, що всі три моделі (KRR, GPR, SVR) здатні з високою точністю апроксимувати динаміку процесу, що підтверджує коректність обраного підходу до ідентифікації.