

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

МАЦЮК СЕРГІЙ МИХАЙЛОВИЧ

УДК 004.9: 519.711.3

**ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ПРОГНОЗУВАННЯ  
ТА ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСОМ  
КРУПНОКУСКОВОГО ДРОБЛЕННЯ РУДИ**

Спеціальність 05.13.06 – Інформаційні технології

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Дніпро – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі безпеки інформації та телекомунікацій в Національному технічному університеті «Дніпровська політехніка» Міністерства освіти і науки України (м. Дніпро).

**Науковий керівник:**

доктор технічних наук, професор

**Корнієнко Валерій Іванович,**

завідувач кафедри безпеки інформації та телекомунікацій

Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»

Міністерства освіти і науки України (м. Дніпро).

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, професор

**Шекета Василь Іванович,** завідувач кафедри інженерії програмного забезпечення Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу Міністерства освіти і науки України.

доктор технічних наук, професор

**Прокопенко Тетяна Олександрівна,** завідувачка кафедри інформаційних технологій проектування Черкаського державного технологічного університету Міністерства освіти і науки України.

Захист дисертації відбудеться «30» вересня 2021 р. о 13-00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.080.07 при Національному технічному університеті «Дніпровська політехніка» (м. Дніпро) Міністерства освіти і науки України за адресою: 49005, м. Дніпро, пр. Д. Яворницького, 19, тел. (056) 746-22-00.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» Міністерства освіти і науки України за адресою: 49005, м. Дніпро, пр. Д. Яворницького, 19, корпус 1.

Автореферат розісланий «27» серпня 2021 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради  
Д 08.080.07, к.т.н., доцент

І.М. Удовик

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність роботи.** Рудопідготовка включає технологічні процеси дроблення і здрібнення, витрати на які складають більше половини собівартості гірничо-збагачувального виробництва. Розвиток технології самоздрібнювання руди, що передбачає наявність лише стадії крупнокускового дроблення (ККД), зменшив капітальні витрати, але при цьому підвищилися питомі енерговитрати, що вимагає проведення досліджень з метою їх зниження.

Процеси ККД руд є складними динамічними об'єктами, моделі яких мають нестационарні параметри, нелінійні залежності і стохастичні змінні. Ці процеси мають різні режими роботи (змінну структуру), значні транспортні запізнювання і чутливі до властивостей руди.

Розробці інформаційних технологій та систем управління процесами рудопідготовки присвячені дослідження вчених В.А. Воронова, Ю.Г. Качана, В.І. Корнієнка, Е.В. Кочури, А.Н. Марюти, В.С. Моркуна, В.М. Назаренка, В.П. Хорольського, Шекети В.І, Прокопенко Т.О., А. Дж. Лінча, Дж. А. Херста та ін. Найбільш ефективним принципом управління ККД є оптимальне управління, яке потребує наявності відповідної апріорної (адекватних прогнозуючих моделей) та апостеріорної (поточних вимірювань та результатів обробки) інформації. Це передбачає використання мало витратних і ефективних засобів оцінювання та ідентифікації, для чого найбільш перспективним є використання методів систем штучного інтелекту, зокрема, нейронних мереж і систем з нечіткою логікою, які здатні до навчання і є універсальними та ефективними апроксиматорами.

Нестационарність і стохастичність процесу ККД передбачає створення адаптивних інформаційних систем управління, які ефективні в умовах варіації збурень і неконтрольованих змін властивостей (режимів роботи) об'єктів. Для адаптації моделей і алгоритмів управління складними об'єктами перспективними є пошукові та еволюційні методи, зокрема, генетичні алгоритми.

Таким чином, важливим є підвищення якості управління процесом ККД в умовах невизначеності інформації про його стан шляхом розробки і використання інформаційних технологій синтезу оптимального управління на основі ідентифікації математичної моделі процесу в ході функціонування системи управління. Все це визначає актуальність теми дисертаційної роботи.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** В основу роботи покладені матеріали, які узагальнюють дослідження автора в рамках реалізації науково-дослідних робіт (НДР), які виконувалися в НТУ «Дніпровська політехніка» відповідно до закону України № 2623-14 від 11.07.2001 «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки», Постанов Кабінету Міністрів України: «Про заходи щодо розвитку гірничо-металургійного комплексу», «Про хід виконання Програми розвитку залізорудної промисловості України», а також відповідно до «Основних напрямів енергетичної стратегії України на період до 2030 року». Дисертаційна робота виконана відповідно до досліджень за держбюджетною НДР ГП-458

«Інтелектуальні технології управління процесами гірничого виробництва в завданнях енергозбереження і енергоефективності» (державна реєстрація 0113U000402), де здобувач був виконавцем.

**Мета і завдання досліджень.** Метою дисертаційної роботи є вирішення актуальної науково-прикладної задачі підвищення якості функціонування та управління процесом ККД руд в умовах невизначеності інформації про його стан шляхом розробки і реалізації інформаційної технології синтезу оптимального управління із використанням ідентифікації прогнозуючої моделі технологічного процесу в реальному часі.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- 1) виконати аналіз методів, систем і інформаційних технологій для управління та моделювання процесами дроблення;
- 2) обґрунтувати метод і розробити алгоритм синтезу оптимального управління процесом ККД;
- 3) обґрунтувати метод і розробити методику структурно-параметричної ідентифікації для управління процесом ККД;
- 4) розробити інтелектуальну модель процесу ККД;
- 5) розробити інформаційну технологію та виконати експериментальні дослідження і оцінити ефективність запропонованих моделей, методів та методик для прогнозування та оптимального управління процесом ККД.

**Об'єкт дослідження** – процеси управління технологічними циклами дроблення руди.

**Предмет дослідження** – методи та засоби інформаційної технології прогнозування та оптимального управління процесом ККД.

**Методи дослідження.** В основу досліджень покладені методи теорії автоматичного управління для розробки структури і алгоритму синтезу оптимального управління процесом крупнокускового дроблення руди; методи систем штучного інтелекту (нейронні мережі, нечітка логіка, генетичні алгоритми) для розробки прогнозуючої моделі керованого процесу; методи нелінійної динаміки для визначення характеристик технологічного процесу; методи імітаційного моделювання для визначення ефективності запропонованих інформаційної технології, моделей, методів, методики і алгоритмів; статистичні методи для обробки модельних і експериментальних даних.

**Наукові положення:**

1. Синтез оптимального управління процесом крупнокускового дроблення руди за його прогнозуючою моделлю дозволяє компенсувати запізнювання технологічного процесу і, таким чином, підвищити якість його функціонування та управління.

2. Ідентифікація прогнозуючої моделі процесу крупнокускового дроблення руди в реальному часі забезпечує її адаптацію до змін стану та характеристик технологічного процесу, що підвищує точність моделі та ефективність її використання при синтезі управління.

### **Наукова новизна одержаних результатів:**

1. Вдосконалено метод синтезу оптимального управління для процесу крупнокускового дроблення руди, що полягає у знаходженні мінімуму функціонала узагальненої роботи на ковзному інтервалі управління з використанням у реальному масштабі часу інформації про стан процесу до нового інтервалу та його майбутнього стану за прогнозуючою моделлю. При цьому інтервали підсумовування складових функціоналу та функція витрат на якість управління враховують необхідну глибину прогнозу, що забезпечує коректність визначення оптимального управління для процесів із запізненням.

2. Отримав подальший розвиток комплексний метод структурно-параметричної ідентифікації нелінійного динамічного процесу, що містить оцінку стану і характеристик процесу та його структурно-параметричну ідентифікацію, який додатково включає визначення необхідного інтервалу дискретизації процесу з урахуванням його стохастичних та динамічних властивостей, що дозволяє підвищити точність отримуваних моделей процесу.

3. Розроблено інтелектуальну модель процесу крупнокускового дроблення руди підвищеної точності, яка здатна до адаптації та має оптимальну структуру у вигляді каскадної нейронної мережі прямого розповсюдження за критерієм мінімуму зсуву та оптимальні параметри за критерієм мінімуму похибки між модельними та експериментальними даними, що враховують необхідний інтервал дискретизації процесу та його запізнення.

4. Запропонована інформаційна технологія оптимального управління процесом крупнокускового дроблення руди за функціоналом узагальненої роботи з прогнозуючою моделлю та структурно-параметричною ідентифікацією процесу у класі інтелектуальних прогнозуючих моделей у реальному часі, що дозволяє реалізувати управління процесом з підвищеною якістю.

### **Практичне значення отриманих результатів:**

1. Розроблено алгоритм синтезу оптимального управління процесом крупнокускового дроблення руд, що враховує точність процедур обчислення градієнта цільової функції та інтегрування вільного руху процесу.

2. Розроблена модифікована методика структурно-параметричної ідентифікації технологічного процесу, що включає на етапі визначення характеристик процесу вибір інтервалу дискретизації процесу та достатнього об'єму даних, що враховують властивості процесу.

3. Розроблена функціональна структура автоматизованої системи управління процесом крупнокускового дроблення руди, що визначає склад та функції підсистем та забезпечує підвищення якості управління. Для перспективної SCADA Siemens розроблено інтерфейс робочого місця оператора-технолога дробарки крупного дроблення, що дозволяє виконувати моделювання реального технологічного процесу.

4. Розроблено програмне забезпечення запропонованих методики та алгоритмів прогнозування і оптимального управління процесом крупнокускового дроблення руди, що дозволяє скоротити витрати на дослідження та проектування системи управління.

Практичне значення результатів підтверджується впровадженнями результатів дисертаційної роботи у практику робіт ПрАТ «Полтавський ГЗК» та Інституту технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України, використанням розроблених алгоритмів, методики та програм при виконанні держбюджетної науково-дослідної роботи, а також в освітній процес НТУ «Дніпровська політехніка».

**Достовірність і обґрунтованість наукових положень і результатів** підтверджується: коректністю постановки і вирішення завдань; застосуванням сучасних методів теоретичного аналізу, математичного моделювання і обробки інформації з урахуванням загальноприйнятих припущень; достатнім обсягом експериментів, проведених на об'єкті інформатизації, що забезпечило із вірогідністю не менше ніж 0,95 відхилення модельних і експериментальних результатів не більше ніж 10%; адекватністю отриманої прогнозуючої моделі.

**Особистий внесок здобувача.** Наукові результати, які виносяться на захист, отримані автором самостійно. Здобувач брав безпосередню участь в теоретичних дослідженнях і в роботах з впровадження отриманих результатів, а також самостійно виконав прикладні дослідження.

**Апробація результатів дисертації.** Результати дисертаційної роботи доповідались на: II всеукраїнській науково-практичній конференції (м. Івано-Франківськ, 6-9 жовтня 2015р.); всеукраїнській науково-практичній конференції «Безпека та зв'язок» (м. Дніпропетровськ, 26 березня 2015р.); III міжнародній науковій конференції «Обчислювальний інтелект» (м. Черкаси, 12-15 травня 2015р.); всеукраїнській науково-практичній конференції «Сучасні методи, інформаційне та програмне забезпечення систем управління організаційно-технологічними комплексами» (м. Луцьк, 11 травня 2016р.); VII міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми використання інформаційних технологій в освіті, науці та промисловості» (м. Дніпро, 23-24 листопада 2016р.).

**Публікації.** Основні результати дисертаційної роботи опубліковано у 14 наукових працях, 4 з яких – без співавторів. Дев'ять статей опубліковано у наукових виданнях, включених до переліку фахових видань України (1 з яких індексується у Index Copernicus, 1 стаття індексується у Web of Science, 1 стаття індексується у Scopus, 1 стаття у закордонному виданні Taylor&FrancisGroup), 5 – тез доповідей та матеріалів конференцій, що опубліковано у збірниках наукових праць та матеріалах міжнародних конференцій.

**Структура і обсяг дисертаційної роботи:** робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 190 сторінок, містить 149 сторінок основної частини, включає 46 рисунків, 152 літературних джерела, 5 додатків.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

У вступі обґрунтовані актуальність роботи, її зв'язок з науковими програмами і темами, сформульовані наукова проблема, мета і задачі досліджень, викладена наукова новизна та практичне значення отриманих результатів.

**В першому розділі** виконаний аналіз інформаційних технологій і систем для управління процесами дроблення, на основі чого сформульовані основні задачі досліджень.

Витрати на технологічні процеси дроблення і здрібнювання складають більше половини собівартості гірничо-збагачувального виробництва. Освоєння технології самоздрібнювання руд, особливістю якої є наявність лише стадії ККД, дозволили знизити капітальні витрати на будівництво, але при цьому збільшилися питомі витрати електроенергії. Тому актуальним є підвищення ефективності функціонування процесу ККД.

Для процесу ККД вихідними змінними є гранулометричний склад дробленого продукту  $\Gamma_{вих}$ , продуктивність процесу  $P_{др}$  і споживана потужність  $M_{др}$ . Керуючими впливами є продуктивність рудного живлення (подача)  $P_{вх}$  і розмір розвантажувальної щілини дробарки  $\mathcal{W}$ . До збурень відносять гранулометричний склад вхідної руди  $\Gamma_{вх}$  і її міцність  $Kp$ , стан футерування  $\zeta$  тощо.

Процеси дроблення відносяться до підготовчих процесів, тому для їх управління використовують технологічні критерії, наприклад, управління процесом ККД здійснюють за заданим гранулометричним складом  $\Gamma_{вих}^{зад}$  продукту дроблення:

$$\left\| \Gamma_{вих} - \Gamma_{вих}^{зад} \right\| \rightarrow \min \quad (1)$$

при обмеженнях на допустимі потужність  $M_{др} \leq M_{др\max}$  і продуктивність  $P_{др} \geq P_{др\min}$ . При цьому,  $\Gamma_{вих}^{зад}$  відповідає максимальній продуктивності за вхідною рудою процесу самоздрібнювання, наступного в технологічній лінії.

Процеси дроблення є динамічними об'єктами з нестационарними параметрами, нелінійними залежностями і стохастичними змінними, що мають значні транспортні запізнювання, різні режими роботи і чутливі до якості руди. Їх динамічні властивості приблизно визначаються передатними функціями аперіодичної ланки першого або другого порядку із запізнюванням.

Більш точними є нелінійні моделі, наприклад, у вигляді кінцево-різницевого рівнянь або нелінійного відображення Ено, що описує рух частинок в умовах тертя й імпульсних впливів (зіткнень). Його поведінку зображується у вигляді карти динамічних режимів: від рівноваги, періодичних та квазіперіодичних режимів до хаосу. Іншими моделями є нелінійні дисипативні осцилятори із силовим чи параметричним збудженнями, які у просторі параметрів теж мають періодичні і хаотичні режими.

Наразі для управління процесами дроблення використовують системи з адаптацією параметрів або статичної оптимізації, які в умовах варіації якості руди і змінних динамічних режимів роботи устаткування мають недостатню якість управління. Одна з провідних концепцій сучасної теорії управління полягає в досягненні головної кінцевої мети на кожному етапі функціонування, що забезпечується шляхом оптимізації технологічного процесу у реальному

масштабі часу. Це вимагає повного використання наявної апріорної інформації у вигляді моделей цього процесу.

Тобто, найбільш ефективним принципом управління процесом ККД є оптимальне управління, яке вимагає відповідного інформаційного забезпечення (адекватних прогнозуючих моделей і поточної обробки інформації). Для цього найбільш перспективним є використання методів систем штучного інтелекту, зокрема, нейронних мереж і систем з нечіткою логікою, що є універсальними й ефективними апроксиматорами. Крім того, нестационарність і стохастичність процесів потребує створення адаптивних моделей, які ефективні в умовах варіації збурень і неконтрольованих змін режимів роботи. При цьому для адаптації моделей перспективними є пошукові і еволюційні методи, зокрема, генетичні алгоритми.

**Другий розділ** присвячений обґрунтуванню методу та розробці алгоритму синтезу оптимального управління нелінійним процесом ККД руд.

Головним при управлінні є синтез регуляторів, що гарантують асимптотичну стійкість і є найкращими в деякому сенсі. Це вирішується за допомогою аналітичного конструювання оптимальних регуляторів (АКОР) Лєтова-Калмана, який полягає в пошуку змушеного рішення основного функціонального рівняння (нелінійного диференціального рівняння у частинних похідних), методи аналітичного розв'язання якого відсутні.

Розвитком теорії Лєтова-Калмана є принцип мінімуму узагальненої роботи за відповідним функціоналом (ФУР), розроблений академіком О.А. Красовським, згідно з яким основним функціональним рівнянням Беллмана є лінійне диференціальне рівняння в частинних похідних, що має принципово більш прості рішення. При цьому система управління включає підсистему оптимального оцінювання й ідентифікації процесу та його оптимальний регулятор.

Нами запропоновано розв'язання задачі синтезу оптимального регулятора для процесу ККД у реальному часі за ФУР із прогнозуючою моделлю з глибиною прогнозу  $n$ :

$$\hat{\Gamma}_{вих}[k+n] = F_{\hat{\Gamma}}\{\Gamma_{вих}[k], \mathcal{U}[k], \Gamma_{вх}[k], Kp[k], \zeta[k], a_{\hat{\Gamma}}[k], k\}, \quad (2)$$

аргументи якої оцінюються за допомогою фільтрів

$$\hat{z} = \{\mathcal{U}, \Gamma_{вх}, Kp, \Gamma_{вих}, \Pi_{оп}, M_{оп}\}; k = t / T, \quad (3)$$

де  $F_{\hat{\Gamma}}, a_{\hat{\Gamma}}$  – структурна функція та параметри моделі;  $k, T$  – такт та інтервал дискретизації часу.

Синтез здійснюється за стохастичним адитивним функціоналом

$$\begin{aligned} J_{ККД} = & E\{V_3(\vec{\Gamma}[k_{j+1}]) + \sum_{k=k_j+n}^{k_{j+1}-1} Q_3(\vec{\Gamma}[k], \Gamma_{вих}^{зад}[k]) + \\ & + K^{-1} \cdot \{ \sum_{k=k_j}^{k_{j+1}-n-1} U_3(\mathcal{U}^*[k]) + \sum_{k=k_j}^{k_{j+1}-n-1} U_3(\mathcal{U}^*_{opt}[k]) \} \}, \end{aligned} \quad (4)$$

де  $E$  – математичне очікування;  $V_3$  – термінальна функція кінцевого стану (цільова функція);  $Q_3, U_3$  – позитивно визначені функції витрат на якість



управління та на саме управління;  $[k_j, k_{j+1}]$  – послідовні такти оптимізації;  $K$  – заданий позитивний коефіцієнт. Тут якість процесу (другий доданок) оцінюється на інтервалі  $[k_j+n, k_{j+1}-1]$ , а витрати на управління (третій і четвертий доданки) – на інтервалі  $[k_j, k_{j+1}-n-1]$ , що, на наш погляд, відповідає фізичному змісту завдання синтезу за прогнозуючою моделлю для процесів із запізненням.

При цьому, якщо прийняти технологічний критерій (1), то відповідна йому функція витрат  $Q_3$  функціонала (4) при оцінюванні і ідентифікації є нормою вектора різниці прогнозованого і реального значень гранулометричного складу продукту дроблення на поточний інтервал

$$Q_{3Oч} = \left\| \hat{\Gamma}_{вих}[k] - \Gamma_{вих}[k] \right\|, \quad (5)$$

а при обчисленні оптимального регулятора – нормою вектора різниці прогнозованого і заданого значень гранулометричного складу продукту дроблення на прогнозований інтервал

$$Q_{3Упр} = \left\| \hat{\Gamma}_{вих}[k+n] - \Gamma_{вих}^{зад}[k+n] \right\|. \quad (6)$$

При керуванні швидкістю  $\mathcal{U}^*[k] = \mathcal{U}[k] - \mathcal{U}[k-1]$  розширена модель процесу (2) приймає вигляд з лінійно вхідним керуванням

$$\begin{bmatrix} \hat{\Gamma}_{вих}[k+n] \\ \mathcal{U}[k] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{\hat{\Gamma}} \\ \mathcal{U}[k-1] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \cdot \mathcal{U}^*[k] \text{ або } \vec{\Gamma}[k+n] = \vec{A} + \vec{B} \cdot \mathcal{U}^*[k], \quad (7)$$

де  $\vec{\Gamma}[k+n] = \{\vec{\Gamma}_{вих}[k+n], \mathcal{U}[k]\}$ ;  $\vec{A} = \{F_{\hat{\Gamma}}, \mathcal{U}[k-1]\}$ ;  $\vec{B} = \{0, 1\}$ , а рівняння Беллмана має вигляд

$$V_i(\vec{\Gamma}[i+n]) = E\{Q_3(\vec{\Gamma}[k], \Gamma_{вих}^{зад}[k]) + V_{i+1}\{\vec{A} + \vec{B} \cdot \mathcal{U}_{opt}^*[i]\} - \frac{\partial V_{i+1}}{\partial \mathcal{U}[i+1]} \cdot \mathcal{U}_{opt}^*[i]\};$$

$$i = k_{j+1} - n - 1, k_{j+1} - n - 2, \dots, k_j. \quad (8)$$

Тоді при квадратичній функції витрат на керування  $U_3$  оптимальна зміна ширини розвантажувальної щілини дробарки знаходиться як градієнт цільової функції за керуючою координатою:

$$\mathcal{U}_{opt}^*[i] = -K \cdot \frac{\partial V_{i+1}}{\partial \mathcal{U}[i+1]}. \quad (9)$$

Таким чином, рішення задачі синтезу оптимального управління для процесу ККД руд здійснюється в ході функціонування за принципом мінімуму узагальненої роботи з поточним оцінюванням стану процесу і його майбутнього стану за прогнозуючою моделлю, що дозволяє спростити рішення задачі синтезу для нелінійного процесу ККД і компенсувати збурення, а це забезпечує підвищення якості управління і ефективність процесу ККД.

Алгоритм синтезу оптимального управління включає процедури:

- оцінки поточного стану процесу ККД;
- ідентифікації структури та параметрів моделі процесу;
- прогнозування процесу;

– обчислення оптимального рішення.

Реальне управління через похибки реалізації відрізняється від оптимального. В результаті досліджень процедур алгоритму синтезу визначені основні похибки їх виконання. Так, точність оцінки поточного стану визначається інтервалом дискретизації процесу  $T$ ; на етапі прогнозу – похибкою інтегрування, що залежить від обраного методу та інтервалу дискретизації  $T$ ; на етапі обчислення градієнта – способом представлення кінцевої різниці.

**Третій розділ** присвячений обґрунтуванню методу ідентифікації та розробці прогнозуючої моделі процесу ККД руд.

Нами запропонована модифікована методика ідентифікації нелінійного процесу ККД (рис. 1), що складається з процедур визначення стану процесу і його структурно-параметричної ідентифікації. Її особливістю є визначення необхідного інтервалу дискретизації відповідно до динамічних властивостей процесу.

За часовою реалізацією, що породжується нелінійним процесом, визначається фазовий портрет атрактора, кореляційна ентропія  $K_R$ , оцінка інтервалу передбачуваності  $T_{Rnp}$ , кореляційна розмірність  $D_C$  і розмірність вкладення атрактора  $d$  (глибина пам'яті процесу).

При цьому необхідний інтервал випередження (глибина прогнозу  $n$  в (2)) визначається значенням суми періоду дискретизації  $T$  і еквівалентного часу запізнювання  $\tau$  процесу

$$T + \tau \leq T_{Rnp}. \quad (10)$$

Іншим способом вибору періоду  $T$  є статистичний підхід, згідно якому із задовільною для практики точністю повинна виконуватися умова

$$T + \tau \leq 0,2 \cdot \tau_{кор}, \quad (11)$$

де  $\tau_{кор}$  – інтервал кореляції вихідної координати процесу.



Рисунок 1 – Методика ідентифікації процесу ККД

Виконання умови (11) досягається шляхом послідовного збільшення періоду  $T$ , що призводить до звуження спектру усередненого процесу щодо початкового  $i$ , отже, розширенню його автокореляційної функції (тобто збільшенню інтервалу кореляції усередненого процесу).

Відомий композиційний метод передбачає ідентифікацію структури моделі на базі композиції методів глобальної і локальної оптимізації для параметричного навчання базисних функцій, а також селекцію кращих моделей за критеріями структурної оптимізації. При цьому, нелінійна динамічна система може бути представлена шляхом комбінації лінійної динамічної (ЛДЛ) і нелінійної статичної ланок (НСЛ), наприклад, у вигляді моделі Вінера-Гаммерштайна (рис. 2). Тут лінійна ланка є лінією затримки, величини яких визначаються розмірністю вхідних і вихідних змінних, а в рамках нелінійної ланки використовуються інтелектуальні засоби (базисні функції) – нейронні мережі (НМ) прямого поширення (ПР), НМ з радіальними базисними функціями (РБФ) та гібридні НМ з нечіткою логікою (Anfis).

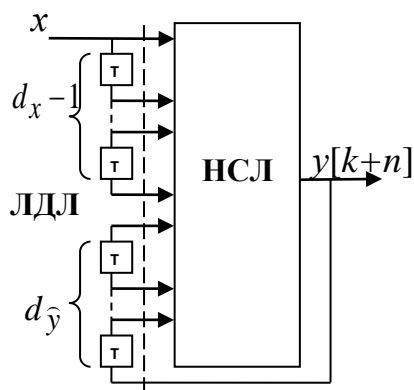


Рисунок 2 –  
Структура Вінера-  
Гаммерштайна  
прогнозуючої моделі  
процесу ККД

Моделювання виконувалось на основі експериментальних даних, отриманих в умовах Інгулецького гірничо-збагачувального комбінату. Як вихідна координата процесу ККД розглядався вміст класу +100 мм в дробленій руді  $\Gamma_{+100}$  (рис. 3). Шляхом розрахунків визначені його кореляційні ентропія  $K_R=0,405$  та розмірність  $D_R=1,931$  процесу. При цьому, кореляційний

інтервал передбачення (глибина точного прогнозу) процесу складає  $T_{Rnp}=3,97$  такта.

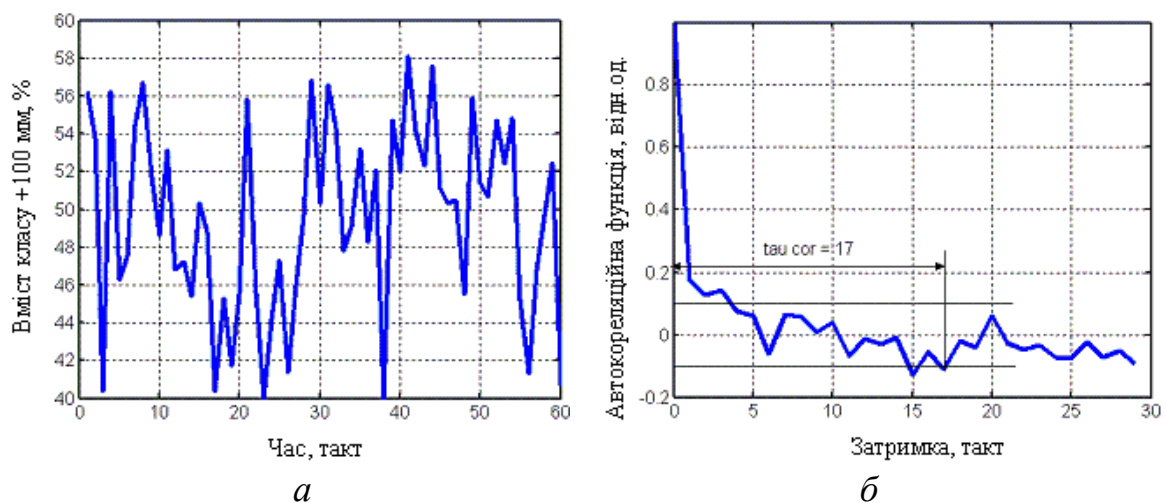


Рисунок 3 – Сигнал  $\Gamma_{+100}$  (а) та його автокореляційна функція (б)

Особливістю процесу ККД є те, що руда на дроблення подається порційно (думпкарами або автосамоскидами) у випадкові моменти часу. Тому для зручності за міру часу використовуються порядкові номери порцій. Перехід до реального часу може бути легко здійснений через середній інтервал часу надходження порцій (для Інгулецького гірничо-збагачувального комбінату – 79,3 с). Еквівалентний час запізнювання процесу за різними каналами (рис. 4) за максимумами взаємкореляційних функцій складає  $\tau = 2$  такти.

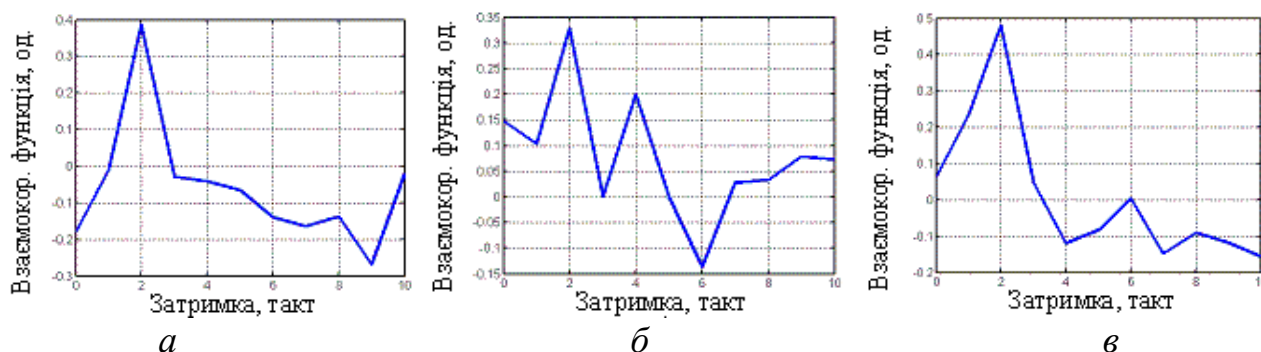


Рисунок – Взаємкореляційні функції за каналами:  $\Gamma_{+100} - \Gamma_{ex}$  (а),

$\Gamma_{+100} - Kp$  (б) та  $\Gamma_{+100} - Ш$  (в)

Тоді приймемо значення періоду дискретизації  $T = 1$  такт (одна порція руди з середнім часом надходження на дроблення), оскільки виконуються перша (10) и друга (11) умови:  $1 + 2 \leq 3,97$  такту і  $1 + 2 \leq 0,2 * 17 = 3,4$  такту (тут значення інтервалу кореляції  $\tau_{кор} = 17$  тактів (див. рис. 3,б) при рівні значущості кореляційного зв'язку 0,1).

Для визначення розмірності  $d$  фазового простору вкладення атрактора (глибини пам'яті процесу) обчислювалася її оцінка зверху за формулою Мане, а оцінка знизу визначалась за залежністю  $D_R(d)$ . Розмірність  $D_R$  практично перестає зростати при  $d \geq 3$ . Визначено, що для ідентифікації процесу ККД, який породжує сигнал  $\Gamma_{+100}$ , глибина точного прогнозу складає 4 такти, а глибина пам'яті – від 3 до 5 тактів.

Як критерій структурної оптимізації використовувався критерій зсуву між результатами за навчальною  $A$  та перевіркою  $B$  вибірками:

$$J_{смККД} = \frac{\|\hat{\Gamma}_{+100A}[k+n] - \hat{\Gamma}_{+100B}[k+n]\|}{\|\Gamma_{+100}[k+n]\|}, \quad (12)$$

а при параметричній оптимізації – критерій регулярності, обчислюваний на перевіркою вибірці  $B$ :

$$J_{регККД} = \frac{\|\Gamma_{+100B}[k+n] - \hat{\Gamma}_{+100B}[k+n]\|}{\|\Gamma_{+100B}[k+n]\|}. \quad (13)$$

При ідентифікації як глобальні методи оптимізації застосовувалися прямий випадковий пошук (ПВП) та генетичний алгоритм (ГА). ГА мав одно точкове схрещування, селективний вибір батьків і формування нової популяції

з витісненням, алгоритм ПВП – адаптивний крок пошуку і повний пошук навколо поточної ітерації. Кількість ітерацій (поколінь) – 100, а розмір простору пошуку (розмір популяції) – 30.

При глобальній оптимізації варіювалися наступні структурні характеристики моделі:

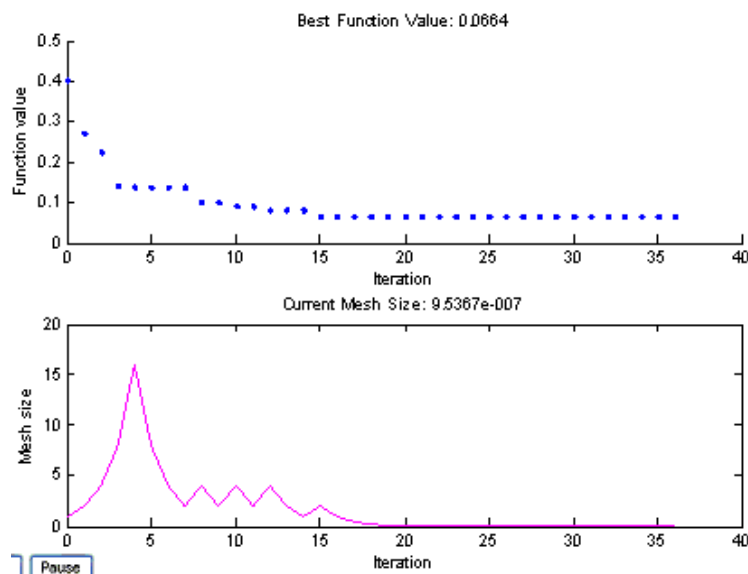
- 1) тип базисної функції – каскадна НМПП, НМ РБФ і НМ Anfis;
- 2) кількість нейронів в прихованому шарі;
- 3) тип функцій активації (для НМПП) і належності (для НМ Anfis) прихованого шару;
- 4) тип алгоритму параметричної оптимізації (для НМПП і НМ Anfis).

В результаті оптимізації моделі (рис. 5) встановлено, що ГА має вищу швидкість збіжності (ГА виходить в область оптимальних рішень на перших поколіннях, а ПВП – після 15 ітерацій). Алгоритм ПВП виявив вищу швидкодю (4,2 с на ітерацію при 10,6 с на покоління в ГА). Збіжність алгоритму ГА вища, ніж ПВП (значення критерію (13) склали 0,048 і 0,066 відповідно).

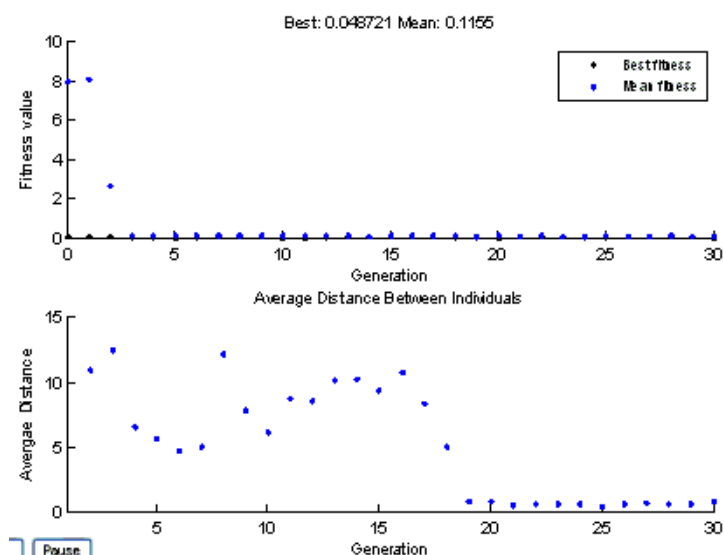
В цілому, встановлено, що мінімуму критерію зсуву (12) відповідають базисні функції у вигляді каскадної НМПП. При цьому кількість нейронів в прихованому шарі складає 26, функція активації прихованого шару – сигмоїдальна, вихідного шару – лінійна, алгоритм навчання НМ – метод Флетчера-Рівса.

Моделі у вигляді НМ з РБФ вимагають значно менших обчислень, але їх значення критерію істотно вище, що можна пояснити поганою прогностичною здатністю цих НМ. Моделі у вигляді НМ з нечіткою логікою Anfis мають достатню точність, але у них дуже низька швидкодю при розмірах вектору входів більш ніж п'ять (сумарна кількість входів моделі ККД складає десять).

За результатом параметричної ідентифікації (рис. 6) похибка моделі оптимальної структури за критерієм регулярності (13) на всій вибірці експериментальних даних складала 0,0357.



(a)



б

Рисунок 5 – Результати глобальної оптимізації структури моделі процесу ККД за допомогою ПВП (а) і ГА (б)

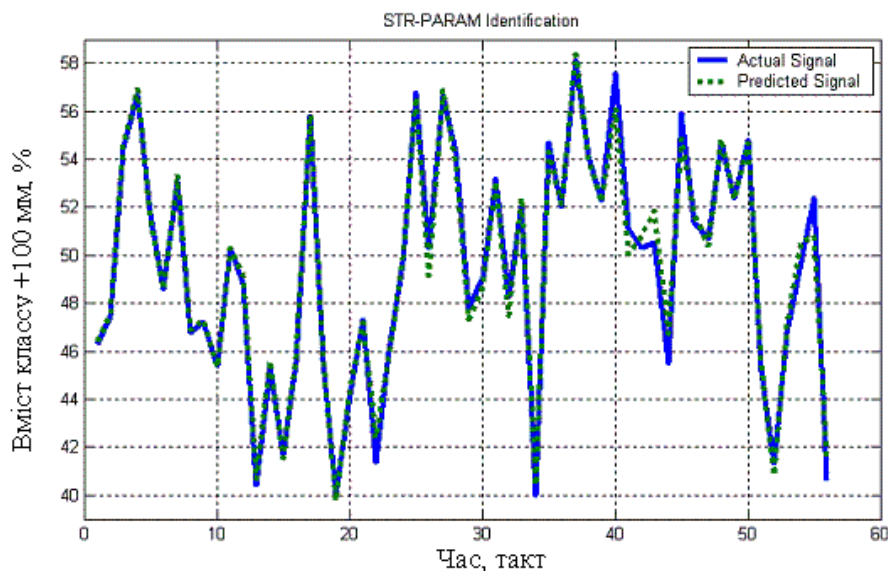


Рисунок 6 – Результат ідентифікації процесу ККД руд

За непараметричним критерієм знаків встановлено, що розроблена модель адекватна з рівнем значущості 0,01 динаміці процесу ККД. Час пошуку оптимальних рішень при глобальній оптимізації процесу ККД на ПК складає 4...12 хв. Час параметричної оптимізації НМ моделі ККД не перевищує 3 с, а час обчислень складає до 10 мс на цикл прогнозу.

**Четвертий розділ** присвячений реалізації, експериментальним дослідженням та розробці інформаційної технології прогнозування та оптимального управління процесом ККД руди.

В цілому, реалізація запропонованих моделей не вносить часових обмежень на їх використання в автоматизованій системі управління (АСУ) ККД, яка є дворівневою системою управління, що працює в реальному масштабі часу. На верхньому рівні в реальному часі здійснюється ідентифікація

моделі процесу та синтез оптимального значення ширини розвантажувальної щілини дробарки. А на нижньому рівні управління оптимальна ширина встановлюється виконавчими механізмами.

Перспективною для реалізації АСУ процесом ККД є використання SCADA-системи SIMATIC WINCC фірми Siemens, для якої розроблений відповідний інтерфейс (рис. 7). Він дозволяє проводити ідентифікацію і синтез оптимального регулятора в автоматичному і ручному режимах; формувати бази експериментальних даних і проводити моделювання для уточнення режимних параметрів системи.

З метою отримання вхідних даних для моделювання оптимального регулятора на Інгулецькому гірничо-збагачувальному комбінаті були проведені експериментальні дослідження, в ході яких визначені показники процесу ККД.

Вхідні змінні: середньозважена крупність вхідної руди мала середнє значення  $\bar{\Gamma}_{ex}=195,1$  мм ( $\Gamma_{ex\min}=143$  мм  $\Gamma_{ex\max}=241$  мм), середньоквадратичне відхилення  $\sigma_{\Gamma_{ex}}=20,72$  мм і коефіцієнт варіації  $k_{\Gamma_{ex}}=10,6$  %; міцність руди –  $\bar{Kp}=7,28$  од. ( $Kp_{\min}=4,5$  од. і  $Kp_{\max}=10,1$  од.),  $\sigma_{Kp}=1,46$  од.,  $k_{Kp}=20,1$  %; ширина щілини –  $\bar{\mathit{Ш}}=210,9$  мм ( $\mathit{Ш}_{\min}=190$  мм і  $\mathit{Ш}_{\max}=220$  мм),  $\sigma_{\mathit{Ш}}=11,4$  мм,  $k_{\mathit{Ш}}=5,4$  %.

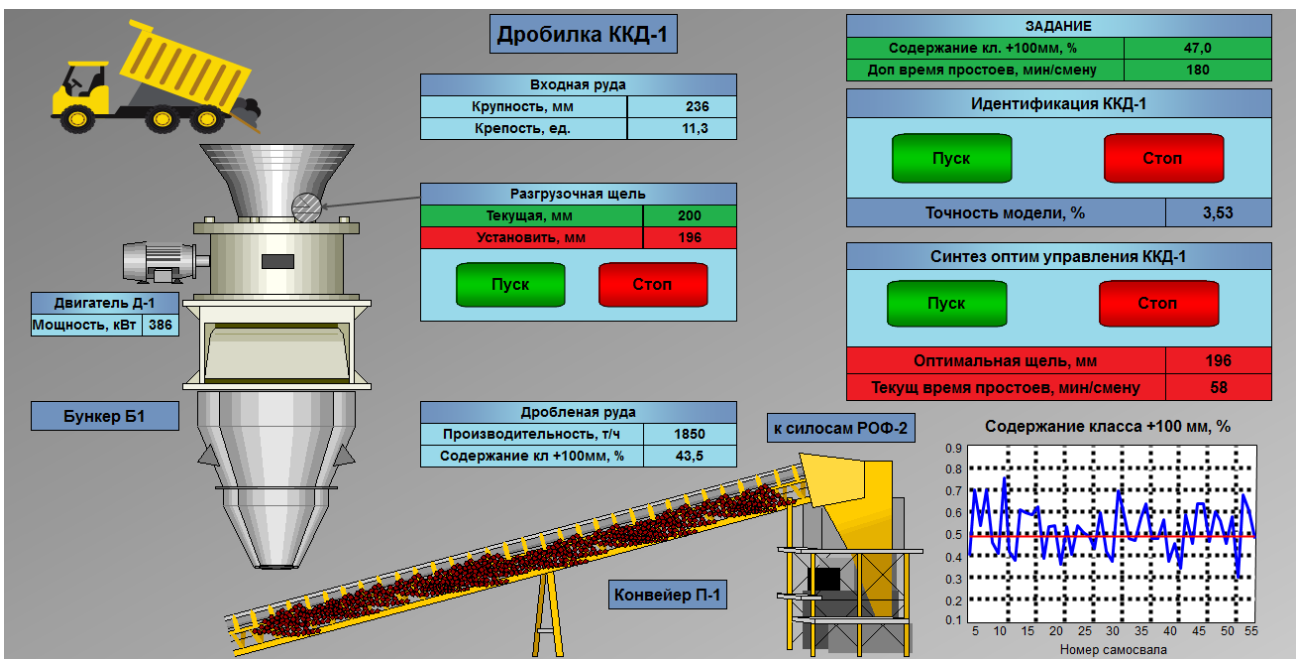


Рисунок 7 – Інтерфейс оператора-технолога АСУ процесом ККД руди

Вихід (вміст класу +100 мм в дробленій руді) –  $\bar{\Gamma}_{+100}=49,62$  % ( $\Gamma_{+100\min}=40$  % і  $\Gamma_{+100\max}=58,1$  %),  $\sigma_{\Gamma_{+100}}=5,07$  %,  $k_{\Gamma_{+100}}=10,2$  %.

Реалізації сигналів були занормовані в діапазон  $[0,1]=[min, max]$ . Для крупності вхідної руди кореляційна ентропія складає  $K_{\Gamma_{ex}}=0,349$  (глибина

точного прогнозу  $T_{Г_{ex}} = 4,6$  такту), а розмірність (глибина пам'яті процесу, що породжує) –  $d_{Г_{ex}} \geq 3$ . Для міцності руди:  $K_{Кр} = 0,358$  ( $T_{Кр} = 4,5$ );  $d_{Кр} \geq 3$ .

Оцінка ефективності оптимального регулятора виконувалась шляхом його імітаційного моделювання. Оскільки зміна ширини розвантажувальної щілини дробарки виконується на її холостому ході, то час простоїв дробарки повинен бути менше часу допустимих простоїв:

$$T_{пр} \leq T_{пр доп}; T_{пр доп} = T_n \cdot (\Pi_{оп} - \Pi_{изм}) / \Pi_{изм}, \quad (14)$$

где  $T_n$  – інтервал часу спостереження;  $\Pi_{оп}$  – проектна продуктивність дробильного відділення;  $\Pi_{изм}$  – проектна продуктивність відділення самоздрібнювання.

Як завдання (Set-point) прийнято значення вмісту класу +100 мм в дробленій руді  $\Gamma_{+100}^{зад} = 49\%$ , а метою управління – середньоквадратична похибка:  $\varepsilon = \|\Gamma_{+100} - \Gamma_{+100}^{зад}\| \rightarrow \min$ .

Результати моделювання алгоритму синтезу оптимального управління для процесу ККД в некерованому (Plant not control) і керованому (Plant with control) режимах наведені на (рис. 8).

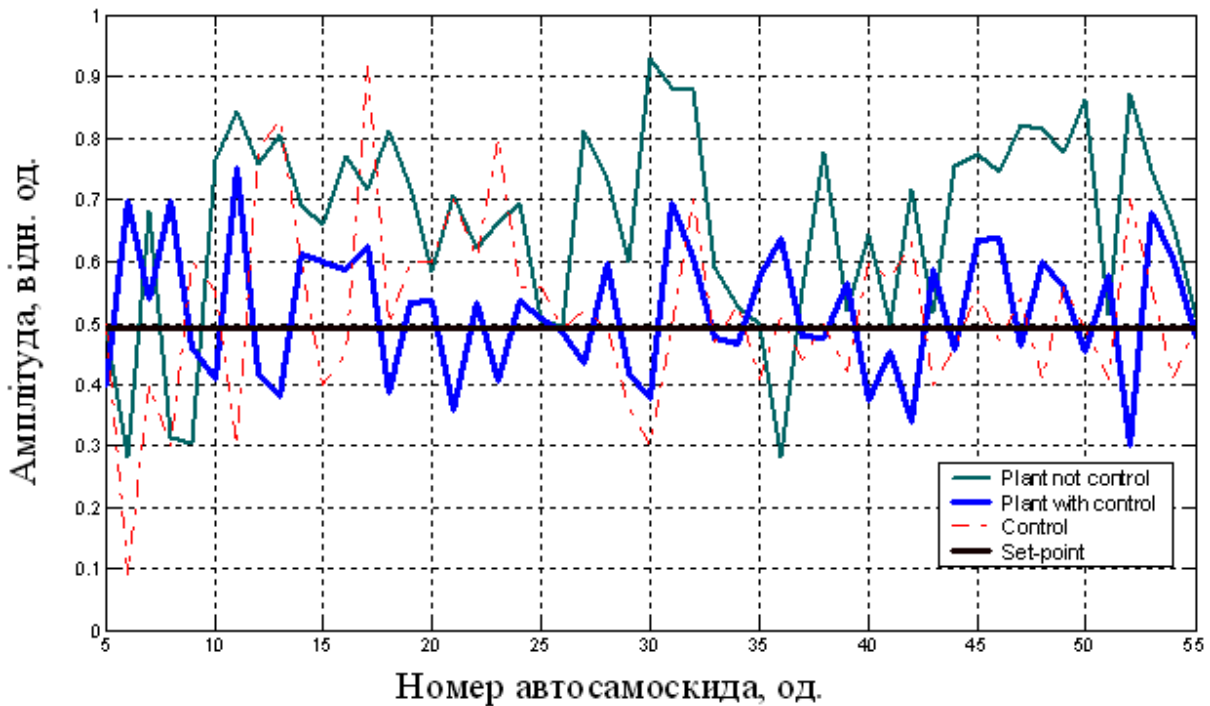


Рисунок 8 – Результати моделювання алгоритму оптимального управління процесом ККД

Значення похибки склало  $\varepsilon = 0,076$ , що визначає зниження похибки управління в 1,85 разів. Це дозволяє підвищити продуктивність за вхідною рудою млинів самоздрібнювання типу ММС 70x23 на 4,1 т/час або на 3,8 %. Час синтезу при обчисленнях ПК складає біля 0,01с на один цикл управління при аналітико-чисельному пошуку оптимального рішення. Статистична перевірка за критерієм знаків підтвердила значущість отриманих результатів.



## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі отримано нові науково обґрунтовані результати, які відповідно до поставленої мети дають вирішення актуальної науково-прикладної задачі підвищення якості прогнозування та оптимального управління процесом крупнокускового дроблення руди в умовах невизначеності інформації про його стан шляхом розробки і використання інформаційної технології синтезу оптимального управління на основі ідентифікації прогнозуючої моделі технологічного процесу в реальному часі.

Основні наукові та практичні результати полягають у наступному:

1. Вдосконалено метод синтезу оптимального управління процесом крупнокускового дроблення руди, що полягає у знаходженні мінімуму функціонала узагальненої роботи шляхом врахування необхідної глибини прогнозу при підсумовування складових функціоналу та функції витрат на якість управління, що забезпечує коректність синтезу оптимального управління для процесів із запізненням.

2. Отримав подальший розвиток комплексний метод структурно-параметричної ідентифікації нелінійного динамічного процесу, який додатково включає визначення необхідного інтервалу дискретизації процесу з урахуванням його стохастичних та динамічних властивостей, що дозволило зменшити похибку моделі процесу до величини 0,0357.

3. Розроблено інтелектуальну модель процесу крупнокускового дроблення руди підвищеної точності, яка здатна до адаптації та має оптимальну структуру та параметри, що враховують необхідний інтервал дискретизації процесу та його запізнення.

4. Запропонована інформаційна технологія оптимального управління для процесу крупнокускового дроблення руди за функціоналом узагальненої роботи та структурно-параметричною ідентифікацією процесу у класі інтелектуальних прогнозуючих моделей, що дозволяє в 1,85 разів знизити похибку управління та підвищити на 3,8% продуктивність подальшого процесу самоздрібнювання по вхідній руді.

5. Розроблена модифікована методика структурно-параметричної ідентифікації, що включає на етапі визначення характеристик процесу вибір інтервалу дискретизації процесу та достатнього об'єму даних, що враховують динамічні і стохастичні властивості процесу.

6. Розроблена функціональна структура АСУ процесом крупнокускового дроблення руди та розроблено програмне забезпечення запропонованих методики і алгоритмів прогнозування та оптимального управління, що дозволяє скоротити витрати на дослідження та проектування системи управління. Для перспективної SCADA Siemens розроблено інтерфейс оператора-технолога дробарки крупного дроблення, що дозволяє виконувати моделювання реального технологічного процесу.

7. Розроблені методика, алгоритми та програми використані при виконанні держбюджетної науково-дослідної роботи, впроваджені у практику робіт ПрАТ «Полтавський ГЗК» та Інституту технічної механіки Національної академії наук

України і Державного космічного агентства України, а також в навчальний процес НТУ «Дніпровська політехніка».

### ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

*Статті, що входять до міжнародних науко-метричних баз та видань:*

1. Korniyenko V.I. Method and algorithms of nonlinear dynamic processes identification / V.I. Korniyenko, S.M. Matsiuk, I.M. Udovik, A.M. Alekseyev // Науковий вісник Національного гірничого університету. – Дніпропетровськ. – 2016. – № 1. – С. 98 – 103. (Наукометрична база Scopus).

2. The algorithm for automatic lump materials granulometric composition monitoring / **S.M. Matsyuk**, V.I. Korniyenko, I.M. Udovik, A.M. Alekseyev // Power Engineering and Information Technologies in Technical Objects Control. – London: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2017. – P.p. 187 – 194.

3. Korniyenko V.I. Adaptive optimal system of ore large crushing process / V.I. Korniyenko, I.M. Udovik, **S.M. Matsiuk** // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2018. – № 1. – С. 159 – 165. (Наукометрична база Web of Science).

4. **Мацюк С.М.** Методика оценки характеристик нелинейных динамических процессов по временным реализациям / С.М. Мацюк // Системні технології. – 2015. – № 1 (96). – С. 94 – 102. (Наукометрична база Index Copernicus).

*Публікації у фахових виданнях:*

5. **Мацюк С.М.** Синтез адаптивного оптимального управління в інформаційній системі управління процесом крупнокускового дроблення руд / С.М. Мацюк, І.М. Удовик, В.І. Корниєнко // Гірничі електромеханіка та автоматика: наук.техн. збірн. – Дніпропетровськ, 2014. – Вип. 93. – С. 51 – 56.

6. Корниєнко В.І. Принципи побудови інформаційної системи управління нелінійними технологічними процесами рудопідготовки / В.І. Корниєнко, **С.М. Мацюк**, І.М. Удовик // Системи обробки інформації. – 2014. – № 9 (125). (Наукометрична база Index Copernicus).

7. **Мацюк С.М.** Структурно-параметрическая идентификация нелинейных динамических процессов / С.М. Мацюк, І.М. Удовик, В.І. Корниєнко // Актуальні проблеми автоматизації та інформаційних технологій. – 2015. – Том 19. – С. 121 – 131.

8. Корниєнко В.І. Алгоритм синтеза адаптивного оптимального управления сложными объектами по принципу минимума обобщенной работы / В.І. Корниєнко, **С.М. Мацюк**, І.М. Удовик // Проблеми інформаційних технологій. – 2015. – № 2 (16). – С. 22-28.

9. Корниєнко В.І. Оптимальное управление нелинейным динамическим процессом с интеллектуальным прогнозированием его состояния / В.І. Корниєнко, **С.М. Мацюк** // Штучний інтелект. – 2015. – № 1-2 (67-68). – С. 137-145.

*Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:*

10. Алексєєв М.О. Інформаційна система оптимального управління процесом крупнокускового дроблення залізняку / М.О. Алексєєв,

В.І. Корнієнко, С.М. Мацюк, І.М. Удовик // Матеріали II всеукраїнської науково-практ. конференції, м. Івано-Франківськ, 6-9 жовтня 2015. – С. 58 – 59.

11. Мацюк С.М. Анализ информационных систем управления процессами дробления / С.М. Мацюк // «Безпека та зв'язок», Матеріали всеукр. науково-практ. конф., 26 берез. 2015р., – Дніпропетровськ, С. 50 – 52.

12. Мацюк С.М. Алгоритм управления сложными объектами по принципу минимума обобщенной работы / С.М. Мацюк // «Обчислювальний інтелект»: матеріали III міжнар. конф. 12 – 15 травня 2015р., Черкаси. – С. 313 – 315.

13. Мацюк С.М. Анализ информационных систем управления процессами дробления и измельчения руд / С.М. Мацюк, О.М. Алексеев // «Сучасні методи, інформаційне та програмне забезпечення систем управління організаційно-технологічними комплексами»: матеріали всеукр. науково-практ. конференції, м. Луцьк, 11 травня 2016р., С. 51 – 53.

14. Мацюк С.М. Функциональная структура АСУ процессом крупного дробления руд / Мацюк С.М. // «Проблеми використання інформаційних технологій в освіті, науці та промисловості»: матеріали 7 міжнар. конф. 23 – 24 листопада 2016р., Дніпро. – С. 59-61.

## АНОТАЦІЯ

**Мацюк С.М. Інформаційна технологія прогнозування та оптимального управління процесом крупнокускового дроблення руди. Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.06 – інформаційні технології. – Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, 2021.

У дисертації вирішена актуальна науково-прикладна задача підвищення якості функціонування та управління процесом крупнокускового дроблення руди в умовах невизначеності інформації про його стан шляхом розробки і використання інформаційної технології синтезу оптимального управління на основі ідентифікації прогнозуючої моделі технологічного процесу в реальному часі. Рішення завдання полягає в розробці інформаційної технології синтезу оптимального регулятора за функціоналом узагальненої роботи на основі прогнозуючої моделі процесу, яка формується в реальному часі шляхом структурно-параметричної ідентифікації процесу з використанням інтелектуальних базисних функцій (нейронних мереж і гібридних мереж з нечіткою логікою) по структурному (мінімуму зсуву) і параметричного (мінімуму помилки) критеріям з використанням глобальних (прямий випадковий пошук і генетичний алгоритм) і локальних (градієнтних) методів оптимізації.

Запропонована інформаційна технологія дозволяє в 1,85 раз знизити похибки управління і підвищити на 3,8% продуктивність подальшого процесу самоздрібнювання по вхідній руді.

**Ключові слова:** крупнокускове дроблення, інформаційна технологія, оптимальний регулятор, функціонал узагальненої роботи, ідентифікація, прогноуюча модель, нейронна мережа, нечітка логіка, генетичний алгоритм.

### АННОТАЦИЯ

**Мацюк С.М. Информационная технология прогнозирования и оптимального управления процессом крупнокускового дробления руды. Квалификационная научная работа на правах рукописи.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.06 – информационные технологии. – Национальный технический университет «Днепровская политехника», Днепр, 2021.

В диссертации решена актуальная научно-прикладная задача повышения качества функционирования и управления процессом крупнокускового дробления руды в условиях неопределенности информации о его состоянии путем разработки и использования информационной технологии синтеза оптимального управления на основе идентификации прогнозирующей модели технологического процесса в реальном времени. Решение задачи заключается в разработке информационной технологии синтеза оптимального регулятора по функционалу обобщенной работы на основе прогнозирующей модели процесса, формируемой в реальном времени путем структурно-параметрической идентификации процесса с использованием интеллектуальных базисных функций (нейронных сетей и гибридных сетей с нечеткой логикой) по структурному (минимуму сдвига) и параметрическому (минимуму ошибки) критериям с использованием глобальных (прямой случайный поиск и генетический алгоритм) и локальных (градиентных) методов оптимизации.

Предложенная информационная технология позволяет в 1,85 раза снизить ошибку управления и повысить на 3,8% производительность последующего процесса самоизмельчения по входной руде.

**Ключевые слова:** крупнокусковых дробления, информационная технология, оптимальный регулятор, функционал обобщенной работы, идентификация, прогнозирующая модель, нейронная сеть, нечеткая логика, генетический алгоритм.

### ABSTRACT

**Matsiuk S.M. Information Technology for Forecasting and Optimal Control of the Process of Large-scale Ore Crushing – Manuscript.**

This thesis is submitted to obtain a Ph. D (Candidate of Technical Sciences) in specialty 05.13.06 – information Technology – Dnipro University of Technology, Dnipro, 2021.

This dissertation addresses the current scientific problem of improving the operating quality and management processes for large-scale ore crushing. This is achieved during uncertain conditions and information about its state. The use and development of information technology seeks to optimize the process with management based on the identification of predictive process models in real time.

The solution lies in the development of information technology for the optimal controller synthesis for the functionality of generalized work. This is based on a predictive process model. This model is formed in real time by structural and parametric identification of the process using intelligent basic functions (neural networks and hybrid networks with fuzzy logic). The foregoing applies to structural and parametric (minimum error) criteria using global (direct random search and genetic algorithm) and local (gradient) optimization methods.

The method of the optimal controller synthesis for the process of large-scale ore crushing has been improved. This method consists of finding the minimum functionality of the generalized work by taking into account the required depth of the forecast. This is done by summing up the components of the function and the cost function for quality control. This ensures the correct synthesis of the optimal controller for delayed processes.

The complex method of structural and parametric identification of a nonlinear dynamic process was further developed. This method includes determining the required sampling interval of the process while taking into account its stochastic and dynamic properties. This reduced the error of the process model to the value of 0.0357. The proposed information technology allows control errors to be reduced by 1.85 times.

A modified method of structural and parametric identification has been developed. This includes the choice of the discrediting interval during the process when determining its characteristics. It also encompasses the required amount of data which allows the dynamic and stochastic properties of the process to be taken into account.

The functional structure of the automated system by the process of large-scale ore crushing has been developed as well as the software application of the proposed techniques and algorithms of identification. The optimum controller that allows expenses for research and design of control systems to be reduced has been developed as well. For SCADA Siemens, an interface of a large crusher-operator-technologist has been developed, which allows modelling by way of a real technological process.

**Keywords:** large-scale crushing, information technology, optimal regulator, generalized work functionality, neural network, fuzzy logic, genetic algorithm.

Мацюк Сергій Михайлович

**ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ПРОГНОЗУВАННЯ  
ТА ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСОМ  
КРУПНОКУСКОВОГО ДРОБЛЕННЯ РУДИ**

(Автореферат)

Підписано до друку 26.08.2021р. Формат 60×90/16.  
Папір офсет. Ризографія. Ум. друк. арк. 0,9  
Обл.-вид. арк. 0,9. Тираж 100 прим. Зам. №3008.

Видавництво ПП Вахмістров О.Є.  
Адреса видавництва та друкарні: 49000, Дніпро,  
вул. Пісаржевського, буд. 18. тел. +380633598309  
ел. адреса: 8102@ukr.net