

# АВТОМАТИЗАЦІЯ ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСІВ

УДК 681.5.015:622.7–52

*В. П. Хорольський, д-р техн. наук, В. Б. Хоцькіна, к-т техн. наук, Т. В. Хорольська  
(Україна, м. Кривий Ріг, ДВНЗ Криворізький національний університет)*

## ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ КОМПЛЕКСОМ ЗБАГАЧЕННЯ ЗАЛІЗНИХ РУД

### Вступ

В останні п'ять років перед підприємствами групи «МЕТІНВЕСТ» поставлене стратегічне завдання підвищення конкурентоспроможності продукції (за рахунок підвищення її якості), зменшення її собівартості та збільшення рентабельності виробництва. Сучасні корпоративні системи керування, що впроваджуються на підприємствах групи «МЕТІНВЕСТ» на етапі до 2020 року, розв'язують триєдині завдання: по-перше, необхідно встановлювати більш стійкі відносини між збагачувальними комбінатами і металургійними заводами, по-друге, підвищувати рівень власної операційної ефективності, по-третє, підвищувати конкурентоспроможність продукції, що випускається [1]. Окреслені стратегічні завдання спонукають до впровадження АСУВ на базі сучасних ERP-систем, АСУТП та MES-класу виробничих виконавчих систем (Manufacturing Execution Systems), орієнтованих на інформатизацію задач оперативного планування й керування виробництвом продукції (концентрату, котунів), оптимізації виробничих процесів і виробничих ресурсів, контролю та диспетчеризації виконання планів виробництва з мінімізацією затрат. Водночас MES-системи інтегровані із джерелами фізичних даних рівня АСУТП (програмованими логічними контролерами (ПЛК), SCADA-системами й базами даних реального часу, з одного боку, і ERP-системами, з іншого боку, забезпечують інтегроване керування виробництвом продукції управлінської вертикалі [2].

Розглянута концепція управління підприємствами зі збагачувальними виробництвами принесе її власникам (акціонерам) значний економічний ефект за умови, коли на нижньому рівні ефективніше працюватимуть операційні системи, тобто робастні або адаптивні системи керування стадіями збагачення [2].

### Формулювання мети і завдань дослідження

Продуктивність технологічного комплексу збагачувального виробництва з мінімізацією питомих витрат на тону концентрату магнітного збагачення залежить від: оптимізації процесів подрібнення, класифікації та сепарації першої стадії збагачення, що доведено в наукових працях [3 - 5]; оперативного розпізнавання видів руд, постійної оцінки мінералогічних текстурних характеристик руд, що надходять на збагачення та завдань фабрик огрудкування (флотажії), а загалом – від портфеля замовлень металургійних комбінатів [2].

До вихідних характеристик магнітного концентрату належать:

1. Продуктивність збагачувальної фабрики (збагачувальних технологічних секцій)  $Q_{ik}^{nom} \in Q_{ik}^{зад}$ , де  $Q_i^{nom}$  – поточна продуктивність збагачувальної фабрики по концентрату;  $Q_i^{зад}$  – планове (задане) значення продуктивності фабрики по концентрату.

2. Дисперсія масової частки заліза  $\beta_{Fe\ конц}$  в магнітному концентраті  $\sigma_{\beta_{Fe\ конц}}^{nom} \in \sigma_{\beta_{Fe\ конц}}^{зад}$ , де  $\sigma_{\beta_{Fe\ конц}}^{nom}$  – поточна дисперсія масової частки заліза в концентраті;  $\sigma_{\beta_{Fe\ конц}}^{зад}$  – планове (задане) значення дисперсії масової частки заліза в концентраті.

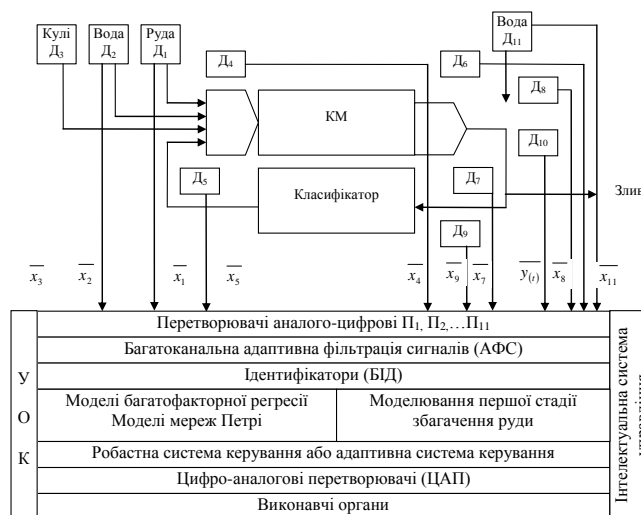
3. Ступінь розкриття готового класу -0,056 мм із дисперсіями  $\sigma_{-0,056}^{nom} \in \sigma_{-0,056}^{зад}$ , задану технологією збагачення руди в подальших стадіях огрудкування або флотажії, де  $\sigma_{-0,056}^{nom}$  – поточне значення дисперсії готового класу -0,056 мм в концентраті;  $\sigma_{-0,056}^{зад}$  – планове (задане) значення дисперсії готового класу.

Отже, зі зростанням вимог до якості магнітного концентрату, відповідно підвищуються вимоги до протікання технологічного процесу збагачення руди на базі інтелектуальних систем керування багатостадійним збагаченням руди і особливо до першої стадії збагачення (подрібнення, класифікації, магнітної сепарації).

**Метою** статті є розроблення та дослідження системи комбінованого керування першою стадією збагачення руди як передумови стабілізації режимів огрудкування та керування якістю концентрату, характеристики якого задаються стадіями огрудкування.

**Викладання основного матеріалу досліджень**

На рис. 1 подана система автоматизованого керування першою стадією збагачувальної фабрики, на якій кульовий млин (КМ) працює в замкненому циклі з класифікатором, злив з якого надходить на першу стадію сепарації. Контроль параметрів збагачення здійснюється датчиками ( $D_i$ ), а виробничі ситуації  $\{S_B\}$  в темпі з процесом оцінюються за допомогою УОК (управлінського обчислювального комплексу), створеного на базі розроблених програмних продуктів та алгоритмів управління [6, 7].

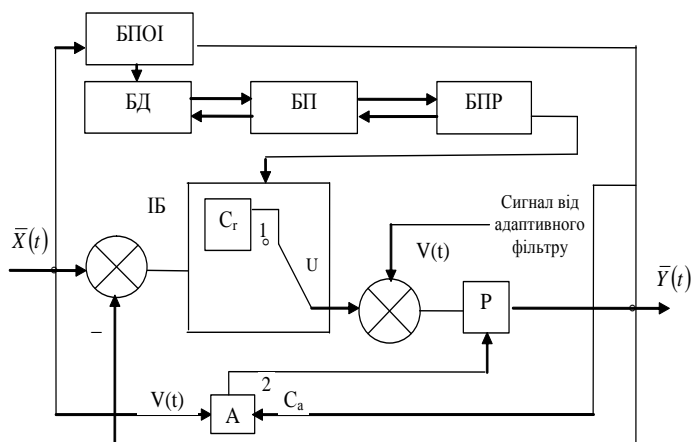


**Рис. 1. Автоматизована система керування першою стадією збагачення**

Інформація з датчиків  $D_1$  – датчик продуктивності,  $D_2$  – датчик витрат води,  $D_3$  – датчик витрат куль,  $D_4$  – датчик наявності руди,  $D_5$  – датчик циркуляційного навантаження,  $D_6$  – датчик зрідження,  $D_7$  – датчик густини зливу млина,  $D_8$  – датчик витрат води в злив класифікатора,  $D_9$  – датчик густини зливу класифікатора,  $D_{10}$  – датчик рівня пульпи в зумпфі, через аналого-цифрові перетворювачі  $\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \Pi_5 \dots$ , багатоканальну адаптивну фільтрацію сигналів (АФС) надходить у блоки ідентифікації (БІД), і далі після створення спеціальних експертних моделей та бази знань (БЗ) утворюють інтелектуальну систему експертного управління [2].

Інтелектуальна система працює дискретно, тобто відповідно до заданих інтервалів часу  $t_1, t_2, t_3, t_4 \dots$

На рис. 2 наведено структурну схему системи з інтелектуальним блоком (ІБ), яка забезпечує вид керування.



**Рис. 2. Структурна схема системи з інтелектуальним блоком:**

$C_r, C_a$  – алгоритми керування розроблені для різних умов збагачення руди (1 – робастний режим роботи, 2 – адаптивний режим роботи);  $A$  – блок адаптації;  $P$  – об’єкт керування з передавальною функцією  $\tilde{P} = (1 + \Delta W)P$

На вхід блока надходять сигнали  $\bar{X}(t)$  і вимірюваний вихідний сигнал об'єкта  $\bar{Y}(t)$ . У блоці початкової обробки інформації (БПОІ) за часовими характеристиками сигналів  $\bar{X}(t)$  і  $\bar{Y}(t)$  визначаються частотні характеристики вхідного сигналу  $\bar{X}(w)$  і зовнішнього збудження  $\bar{V}(t)$ , взаємне розташування спектрів  $\bar{X}(w)$  і  $\bar{V}(w)$ , характерні значення відношення сигнал/шум  $\bar{X}(t)/\bar{V}(w)$ .

Уся ця інформація надходить до бази даних. Блок прийняття рішень (БПР), використовуючи створену базу правил (БП) і дані БД, виробляє функції, відповідно яким починає діяти один із видів керування (робастний або адаптивний).

Нечіткість вхідних сигналів про характеристики руди, що надходить на збагачення, вказує на різну природу зовнішніх збурень, що діють на об'єкт (кульовий млин і регулятор завантаження руди).

У процесі налагодження технологічного режиму роботи кульового млина першої стадії оператор-технолог звертається до програмного забезпечення «Моделювання першої стадії збагачення руди». Спочатку УОК виокремлює проблемну технологічну ситуацію  $\{S^{PC}\}$ . На момент отримання інформації про проблемну ситуацію  $\{S^{PC}\}$  оператор має справу з найбільш невизначеною ситуацією щодо вибору режимів роботи кульового млина. У даному випадку диспетчер-оператор працює в зоні недовантаження

кульового млина. Називатимемо таку зону межею робастного керування – алгоритм  $C_r$ . Інша межа – перевантаження кульового млина, про що свідчитиме інформація  $X_{ДС}$  з датчика зрідження  $D_6$  та зміни режимів роботи класифікатора і магнітного сепаратора на першій стадії. Отже, між цими двома межами перебуває режим адаптації  $C_a$ , тобто у цих межах потрібно використовувати адаптивне керування. Так, завданням інтелектуального блока є вибір типу керування залежно від умов функціонування першої стадії збагачення. Механізм прийняття рішень щодо вибору режимів роботи першої стадії збагачення полягає в наступному: отримавши інформацію, оператор контролює вид руди, яка надходить на збагачення, шляхом оцінки ситуації щодо інформації з датчиків  $D_1, D_5, D_6, D_9, D_{10}, D_{11}$  та вибирає режим роботи млина на першій стадії подрібнення-збагачення.

Налагодження процесу оператором відбувається за допомогою аналізу параметрів вхідної руди, вибору раціональних параметрів: заповнення кульових млинів першої стадії збагачення, густини пульпи та режимів роботи класифікаторів і магнітних сепараторів першої стадії. За частістю викидів нездрібнених шматків руди (датчик зрідження  $D_6 - X_{ДС}$ ) здійснюється діагностика стану кульового млина першої стадії збагачення. При цьому в пам'ять УОК за запитом оператора для пари технологічних параметрів  $(X_i, X_j)$ , що характеризують ситуацію за вхідною рудою, сформована база експертних значень у вигляді «правил продукції»:

$$Q_{мл}[t_1 - 15] = Q_{мл}[t_1 - 30] + b_1 \frac{x_5[t_1 - 15] - x_5[t_1 - 30]}{x_5[t_1 - 30]} \cdot Q_{мл}[t_1 - 30] \quad (1)$$

де  $Q_{мл}[t_1 - 15]$  – продуктивність млина т/год. у момент часу  $[t_1 - 15]$ ;  $Q_{мл}[t_1 - 30]$  – продуктивність млина т/год. у момент часу  $[t_1 - 30]$ ;  $x_5[t_1 - 15]$  – вміст важкозбагачуваних руд у % у момент часу  $[t_1 - 15]$ ;  $x_5[t_1 - 30]$  – вміст важкозбагачуваних руд у % у момент часу  $[t_1 - 30]$ ;  $b_1$  – корегуючий коефіцієнт, який визначається за допомогою моделі Петрі (сигнал з логічного датчика перевантаження млина) і розпізнавання проблемної ситуації  $S^{PC}$  – зміни моменту виду руди на вході першої стадії подрібнення [5, 6].

За допомогою контуру керування завантаженням млинів та блоків БПОІ, ІБ, БД, БП, БПР автоматично виконується налагодження системи завантаження кульових млинів. Водночас, як і за допомогою мереж Петрі, стає можливим отримання поточної оцінки ідентифікації нечітких ситуацій щодо виду руди [7]. Крім цього за допомогою компонентів оболонки експертної системи (ЕС) виконується вибір виду керування (робастного або адаптивного). Компоненти оболонки ЕС розглянуті на рис. 3.

Після визначення виду руди конструктор CONST вибирає систему моделювання PS, а налащик ОТЛАД – вид керування (наприклад робастний), і якщо вид руди на вході млина є незмінним, то закон керування – постійний. Якщо якісні показники різновидів руди змінилися, то змінюється крок корекції величини навантаження кульового млина і відповідно відбувається перехід до адаптивного виду керування.

У розробленій експертній системі для збагачувальної фабрики з нечіткою логікою кожній зміні виду руди, що надходить на збагачення, відповідає своя проблемна ситуація  $S_i^{PC}$ , де  $i = 1, 2, \dots$ , своя  $D$  – мережа Петрі, свої «правила продукції» у вигляді:

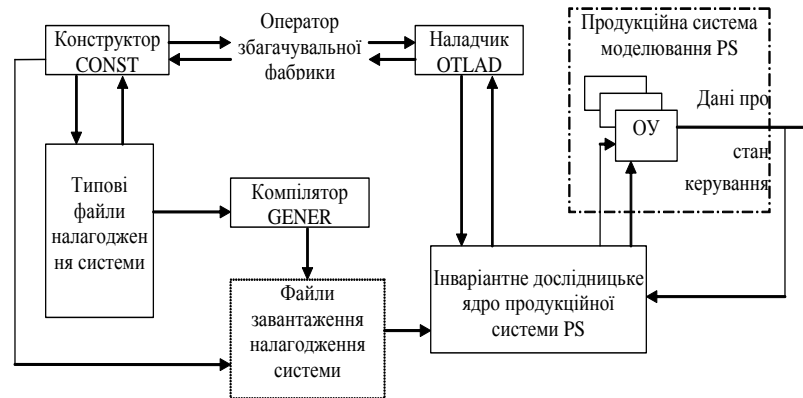


Рис. 3. Компоненти оболонки ЕС

<проблемна ситуація> → <D – мережа Петрі> → <вибір відповідної мережі Петрі> → <логічна модель знань> → <синхронізація процесів керування> → <планування і пошук рішень> → <рішення>.

Для умов збагачувальної фабрики ПАТ «Центральний ГЗК» розроблені «правила продукції» нечіткого керування процесом збагачення у вигляді лінгвістичних змінних:

<поточна продуктивність технологічної секції т/год.: висока ≥ {290 – 300 т/год.}; середня {290 – 280 т/год.}; нижче середньої {280 – 270 т/год.}; низька {< 260 т/год.}>;

<якість концентрату магнітного збагачення: висока ≥ {64,95 – 64,8%}; середня {64,7 – 64,6%}; нижче середньої {64,5 – 64,4%}; нижче планової {64,3%}>;

<зміни якості: зростає темп {+0,1 – +0,2%}; не змінюється {-0,1 +0,1%}; зменшується темп {-0,15 – -0,3%}>;

<співвідношення важкозбагачених руд: значно збільшилось на {3 –5%}; збільшилось на {2 – 1%}; стабільне {+1 –1%}; зменшилось на {3 – 5%}>;

<продуктивність: зменшити на 8 т/год.; зменшити на 4 т/год.; стабільно держати в межах {-5 ... +5% т/год.}; збільшити на +10 т/год.; значно збільшити на {15 – 20 т/год.}>.

На основі розроблених «правил продукції» за допомогою блока ОТЛАД автоматично виконується корекція продуктивності млинів першої стадії подрібнення. Розглянемо більш детально роботу цього блока, коли регулятором локальних систем завантаження кульових млинів використовують ПІД – регулятор із передавальною функцією

$$\frac{U(p)}{X(p)} = G_C(p) = K_1 + \frac{K_2}{p} + K_3 p, \quad (2)$$

де  $K_1$  – коефіцієнт пропорційності;  $K_2$  – коефіцієнт каналу інтегрування;  $K_3$  – коефіцієнт в каналі диференціювання;  $p$  – оператор;  $U(p)$  – сигнал керування на вході регулятора, записаний в операторній формі;  $X(p)$  – вхідний сигнал на вході системи автоматичного керування.

Цифрову апроксимацію ПІД-регулятора можливо отримати, якщо використовувати дискретну апроксимацію операцій диференціювання й інтегрування. Для похідної в часі використано правило зворотної різниці

$$U(KT) = \frac{dx}{dt} \Big|_{t=KT} = \frac{1}{T} \{x(KT) - x[(K-1)T]\}. \quad (3)$$

Використавши  $Z$  – перетворення, отримано

$$U(z) = \frac{(1 - z^{-1})}{T} X(z) = \frac{z-1}{Tz} X(z). \quad (4)$$

Операцію інтегрування варто апроксимувати за допомогою формули прямокутників

$$U(KT) = U[(K-1)T] + T x(KT), \quad (5)$$

де  $U(KT)$  – вихід інтегратора у момент  $t = KT$ . Застосувавши до формули (5)  $z$ -перетворення, одержано  $U(z) = z^{-1}U(z) + TX(z)$ , звідки передавальна функція дискретного інтегратора  $\frac{U(z)}{X(z)} = \frac{Tz}{z-1}$ .

Отже, передавальна функція цифрового ПІД-регулятора має вигляд

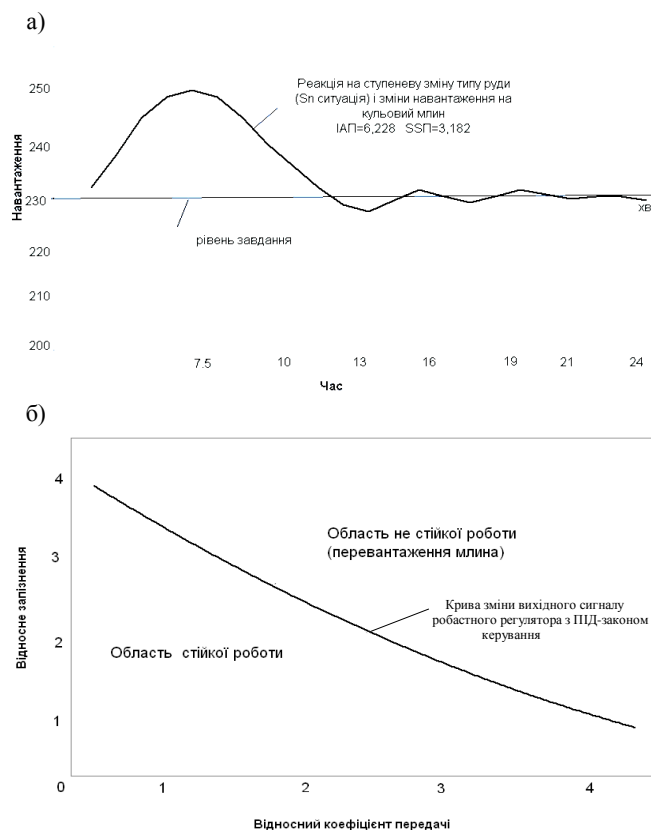
$$G_C(z) = K_1 + K_2 \frac{T_2}{z-1} + K_2 \frac{z-1}{Tz}. \quad (6)$$

На базі цієї передавальної функції можливо одержати рівняння різниці, яке описує алгоритм роботи цифрового ПІД-регулятора (нами використані позначення  $X(KT) = X(K)$ ):

$$U(K) = K_1 x(K) + K_2 [U(K-1) + T x(K)] + \frac{K_3}{T} [x(K) - x(K-1)] =$$

$$\left[ K_1 + K_2 T + \frac{K_3}{T} \right] x(K) - \frac{K_3}{T} (x(K-1) + K_2 U(K-1)). \quad (7)$$

Дослідження системи керування першою стадією збагачення руди з розробленими моделями багатофакторної регресії проведені на збагачувальній фабриці ПАТ «Центральний ГЗК». На рис. 4,а розглянута реакція контуру керування щодо завантаження сировою рудою кульового млина першої стадії збагачення. Реакція контуру інтелектуального керування на ступеневу зміну навантаження подана на рис. 4,б (робастний тип керування).



**Рис. 4. Реакції контуру керування завантаженням кульового млина**

Із діаграми робастності (рис. 4,б) видно, що в момент зміни типу руди інтелектуальна система надсилає диспетчеру інформацію про необхідність змінити налагодження у напрямку підвищення або зменшення коефіцієнта запасу стійкості.

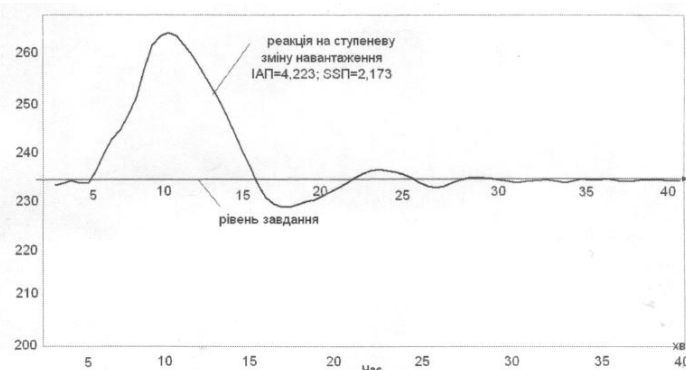
Діаграма робастності побудована в нормованих координатах: по осі ординат відкладається відношення поточного часу чистого запізнення (кульового млина) до часу чистого запізнення, на яке налагоджується регулятор; по осі абсцис – аналогічне відношення щодо коефіцієнта передачі. На діаграмі виділяються дві зони – зона стійкості і зона нестійкості, які розподілено межею стійкості. Із рис. 4,б видно,

що за 10% перерегулювання контур з алгоритмом  $C_t$  надстійкий до змін виду руди на вході технологічної секції.

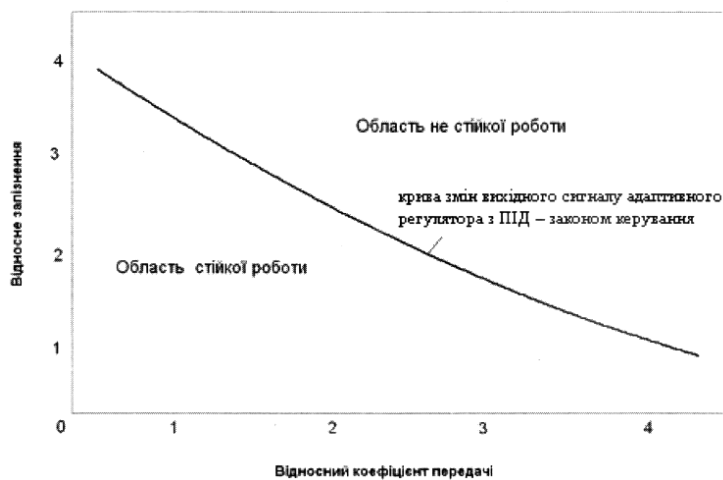
Перехід до нового виду алгоритму (адаптивного) виникає за умови зміни частоти викидів нездрібнених шматків руди (інформація з датчика зрідження  $D_6$ ), див. рис. 5. Такому положенню відповідає реакція об'єкта Р на зміну параметрів вхідної руди. При цьому за допомогою програмного забезпечення (алгоритм  $C_d$ ) одержана реакція контуру завантаження (за налагодження інтелектуальної системи), що забезпечує ступінь затухання 0,25. Зі зменшенням параметра інтегральної абсолютної помилки (ІАП) зменшуються питомі витрати електроенергії на тону переробленої руди, що є свідченням ефективності роботи адаптивного алгоритму керування.

На рис. 5, а наведені результати моделювання адаптивного керування навантаженням кульового млина (першої стадії збагачення) на момент зміни виду руди і частоти викидів датчика зрідження (від 8 до 12 викидів за хвилину). На рис. 5, б розглянута поведінка алгоритму  $C_d$  (адаптивний контур керування) під час зміни виду руди з параметром ІАП=4,223, де сума квадратів помилки  $SSP=2,173$ .

а)



б)



**Рис. 5. Результати моделювання адаптивного контуру керування**

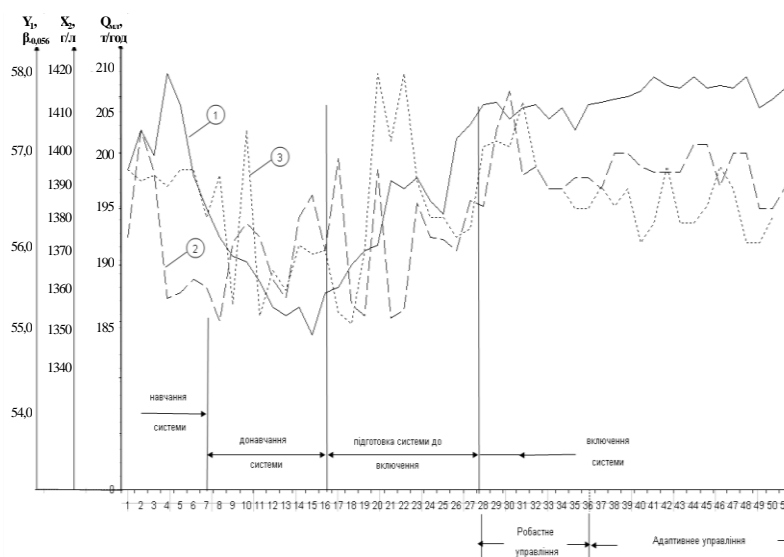
Практичне використання розроблених моделей на основі мереж Петрі й оптимізації за допомогою алгоритмів керування з нечіткою логікою дозволяє покращити функціонування об'єктів збагачувальної фабрики. Про це свідчать результати досліджень диспетчерського керування технологічними секціями, які працюють на фабрику огрудкування.

Дослідження системи керування першою стадією збагачення технологічної секції ПАТ «Центральний ГЗК» проведено протягом 52 год. за таким планом:

- підготовка системи до роботи (вибір виду керування та відпрацювання уставок локальних систем завантаження кульових млинів першої стадії збагачення);
- період оцінки проблемних ситуацій: диспетчер працює з локальними системами нижнього рівня керування, система розпізнає проблемні ситуації  $\{S_n\}$ , зміни видів руди у часі.

На рис. 6 наведено результати роботи технологічної секції ПАТ «Центральний ГЗК», що працює на огрудкування.

Розглянуто в часі зміни таких параметрів: продуктивність млина  $Q_{мл}$ , т/год; вміст твердого у пром-продукті зливу класифікатора, г/л, масова частка класу  $\beta_{-0,056}$  у промпродуктах класифікації, %.



**Рис. 6. Криві диспетчерського керування з локальними системами регулювання:**  
**1 – залежність погодинної продуктивності млина в часі, т/год.;**  
**2 – вміст твердого у промпродукті зливу класифікатора, г/л;**  
**3 – масова частка класу – 0,056 мм**

### Висновки

Аналіз графіків (рис. 6) свідчить, що перехід на робастне і адаптивне керування (з урахуванням в-дів руди), а також розпізнавання проблемної ситуації  $\{S_n\}$  дають такі результати:

*зменшується:*

- дисперсія коливань масової частки заліза в концентраті магнітного збагачення (на 18%);
- вміст магнітного заліза у хвостах збагачувальної фабрики (на 5%);
- питомі витрати води (на 6%);

*збільшується:*

- продуктивність кульових млинів першої стадії збагачення (на 3%);
- вихід концентрату (на 4,5%).

При цьому погодинна продуктивність технологічної секції збільшилася на 3%, а витрати електроенергії на виробництво тонни концентрату зменшилися на 10% порівняно із системою диспетчерського керування.

Економічний ефект від впровадження підсистеми інтелектуального керування з алгоритмами робастності та адаптивності становить 80 тис. грн. на рік на одну технологічну секцію.

### Список літератури:

1. Сборник технико-экономические показатели горнодобывающих предприятий Украины в 2009 – 2010 гг.; под ред. Е.К. Бабец. – Кривий Ріг : ГП «НИГРИ», 2011. – 305 с.
2. Інтегроване інтелектуальне управління технологічними процесами в економічних системах корпоративних підприємств гірничо-металургійного комплексу : монографія / В. П. Хорольський, В.Б. Хоцкіна, Т. В. Хорольська, Е. К. Бабець ; під ред. В. П. Хоролького. – Д. : Січ, 2008. – 443 с.
3. Кочура Е. В. Развитие научных основ автоматизации процессов магнитного обогащения руд с целью энергосбережения : дис. д-ра техн. наук / Е. В. Кочура. – Д. : 1996. – 331 с.
4. Корнієнко В. І. Автоматизовані системи оптимального керування процесами крупного дроблення та самоздрібнення руд : автореф. дис. д-ра техн. наук / В. І. Корнієнко. – Д., 2010. – 35 с.
5. Кулін А. І. Інтегрована система управління процесами першої стадії збагачення залізної руди з мінімальними втратами у хвостах : автореф. дис. канд. техн. наук / А. І. Кулін. – Кривий Ріг, 2001. – 19 с.
6. Хоцкіна В. Б. Автоматизація процесів керування технологічним комплексом збагачення залізних руд з використанням моделей мереж Петрі : автореф. дис. канд. техн. наук / В. Б. Хоцкіна. – Д., 2012. – 22 с.
7. Хоцкіна В. Б. Управление процессами обогащения руд на основе сетевых моделей Петри / В. Б. Хоцкіна, В. П. Хорольський, Е. К. Бабец // Наук. вісн. НГУ. – 2005. – №8. – С. 83 – 87.

*Рекомендовано до друку д-ром техн. наук, професором Є. В. Кочурою*