

ределять только свободный член ряда Тейлора, что упрощает алгоритм и повышает точность идентификации параметров.

На основе предлагаемого метода разработан рекуррентный алгоритм и реализованы имитационные модели для идентификации параметров передаточных функций различных объектов. Результаты моделирования подтвердили корректность теоретических положений предлагаемого метода.

Таким образом, поскольку предлагаемый модифицированный метод моментов достаточно просто формализуется, в нем сняты ограничения на вид передаточной функции объекта, он может быть применен для экспериментальной идентификации параметров передаточных функций реальных промышленных объектов.

#### Список литературы

1. Дейч, А.М. Методы идентификации динамических объектов [Текст] / А.М. Дейч – М.: Энергия. – 1979. – 240 с.
2. Балакирев В.С. Экспериментальное определение динамических характеристик промышленных объектов [Текст] / В.С. Балакирев, Е.Г. Дудников и др. – М.: Энергия. - 1967. -232 с.
3. Гроп, Д. Методы идентификации систем [Текст] / Д. Гроп. – М.: Мир. – 1979. – 302 с.
4. Льюнг, Л. Идентификация систем. Теория для пользователя: пер. с англ. [Текст] / Л. Льюнг. – М.: Наука. – 1991. – 432 с.
5. Соседка, В.Л. Определение коэффициентов дифференциальных уравнений объектов с использованием модели [Текст] / В.Л. Соседка, Р.А. Мазур // Гірничча електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. Зб. – 2006. – Вип. 76. – С. 92-99.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Ткачовим В.В.  
Надійшла до редакції 19.05.11*

УДК 004.942

© А.І. Купін, І.О. Музыка

## **СПОСІБ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЗАПІЗНЮВАННЯ У ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСАХ ГІРНИЧОГО ВИРОБНИЦТВА**

У статті розглядаються питання ідентифікації параметрів запізнювання у технологічних процесах в умовах гірничого виробництва. Показана можливість визначення цих параметрів за допомогою кореляційного аналізу.

В статті розглядаються питання ідентифікації параметрів запізнення в технологічних процесах в умовах гірничого виробництва. Показана можливість визначення цих параметрів за допомогою кореляційного аналізу.

Questions of delay parameters identification of technological processes in the conditions of mining manufacture are considered in the article. Possibility of these parameters determination by correlation analysis is presented.

Сучасний рівень розвитку автоматизації виробництва характеризується підвищенням складності технологічних процесів (ТП), яке пов'язане з ускладненням існуючих завдань керування за рахунок нестационарних та нелінійних

об'єктів. Поступове підвищення вимог до якості керування, відсутність повного математичного опису деяких технологічних об'єктів, параметри яких змінюються в широких межах, вимагає застосування автоматизованих систем керування на основі сучасних інформаційних технологій (ІТ).

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.** Як відомо, більшість технологічних процесів гірничого виробництва характеризуються багатофакторністю, наявністю стохастичних збурень та значною інерційністю. Так, наприклад, при збагаченні залізної руди зміна гранулометричного складу на вході дробарки крупного дроблення зумовлює зміну фізико-механічних властивостей пульпи лише через декілька годин. У таких випадках системи безпосереднього керування процесами з фіксованими наперед визначеними параметрами настроювань вже не можуть забезпечити якісне керування з мінімальною похибкою. Тому сьогодні все більша увага приділяється дослідженню систем автоматизованого керування на базі адаптивних підходів. Такі системи дозволяють не просто реалізувати алгоритм традиційного регулятора, але й проводити оптимізацію параметрів технологічного процесу в режимі реального часу. Досягнення у галузі нейронних мереж, нечіткої логіки, генетичних алгоритмів із застосуванням паралельних обчислень слугують потужним засобом для створення спеціалізованих систем підтримки прийняття рішень (СППР). У гірничій галузі промисловості нашої країни сьогодні є гарні передумови для впровадження інтелектуальних СППР, які дозволять шляхом оптимізації параметрів підготовки гірничої маси в кар'єрі зменшити собівартість продукції підприємства. Так, за даними ДП «Науково-дослідний гірничорудний інститут» (НДГРІ), на Інгuleцькому ГЗК за 2005 р. було висаджено понад 16 млн. м<sup>3</sup> гірської породи, при цьому її собівартість склала близько 5 грн./м<sup>3</sup> [1]. За попередніми розрахунками застосування СППР дозволить зменшити собівартість продукції підприємства на 2-3%, що зумовить економічний ефект близько 2 млн. грн. на рік.

У процесі аналізу техніко-економічних моделей різних переділів гірничого виробництва авторами було підтверджено висновок, що створення ефективної СППР не можливе без урахування запізнювання технологічних об'єктів. Слід зазначити, що запізнювання властиве не тільки окремим технологічним операціям, але і всьому підприємству в цілому як людино-машинній системі. Так, наприклад, один конвеєр довжиною 600 м створює запізнювання близько 5 хв. Поклавши у якості основного принципу роботи СППР ідентифікацію параметрів математичної моделі в режимі реального часу, постало завдання визначення часу запізнювання. Так, проводячи планування буро-вибухових робіт (БВР) в кар'єрі гірничо-збагачувального комбінату, оцінити їх ефективність та встановити питомі витрати на видобування руди можна лише після деякого терміну. Поточна гірська маса після вибуху досягне першої секції збагачення тільки через декілька днів, тому в межах цілого виробництва досить складно встановити, входні параметри БВР якого вибуху зумовили теперішні економічні показники виробництва.

**Аналіз досліджень та публікацій.** У розвиток теорії адаптивних та оптимальних систем керування значний внесок зробили роботи Д.А. Поспелова, Г.С. Нестерова, О.Г. Івахненка, Л.А. Растрігіна та інших відомих вітчизняних і зарубіжних вчених [2, 3]. Більшість підходів, які застосовуються для опису динамічних об'єктів керування із запізненням, ґрунтуються на апараті передаточних функцій, зокрема вигляду  $e^{-\mathcal{P}}$ . Ідентифікація параметрів математичних моделей статичних об'єктів проводиться методом групового урахування аргументів (МГУА), лінійним регресійним аналізом, нейромережевими підходами тощо. Способи визначення параметрів запізнювання при аналізі часових статистичних рядів можна знайти в джерелах [4, 5]. Досить ефективним методом є використання кореляційного аналізу. Проте існуючі підходи орієнтовані на задачі, в яких для аналізу береться 2-3 предикторні змінні, а задача ідентифікації математичної моделі БВР є багатофакторною і передбачає включення у регресійне рівняння понад 15 незалежних предикторів. Крім того, застосування сучасних засобів ІТ за рахунок точніших розрахунків дозволить проводити визначення параметрів запізнювання в умовах сильно зашумлених статистичних даних.

**Постановка завдання.** Виходячи з вищезазначеного, авторами було вирішено провести аналіз різних способів ідентифікації параметрів запізнювання у статичних багатопараметричних об'єктах керування. Для реалізації алгоритму за допомогою обчислювальних засобів необхідно встановити ступінь впливу шуму у статистичних даних на результати моделювання.

**Викладення матеріалу та результати.** На рис. 1 представлена узагальнена модель технологічного об'єкта із запізнюванням. Вектор вхідних параметрів  $X_i$  та критерій функціонування  $y_i$  фіксуються у технологічній базі даних (БД) з певною періодичністю, де  $i$  – номер запису у БД,  $N$  – загальний обсяг статистичної вибірки. Параметром запізнювання є змінна  $\Delta$ , яка показує, наскільки кроків вихід системи відстає від входу. Як видно з табл. 1, при  $\Delta=0$  запізнювання відсутнє, тому вхідному вектору  $X_i$  точно відповідає вихідний  $y_i$ , для  $\Delta=1$  при подачі на вхід об'єкта вектора  $X_i$  на виході спостерігається значення, зумовлене попереднім вектором  $X_{i-1}$ , тобто  $y_{i-1}$ . Така схема найбільш точно характеризує техніко-економічні дані, які описують декілька переділів виробництва, розподілених у просторі та часі.

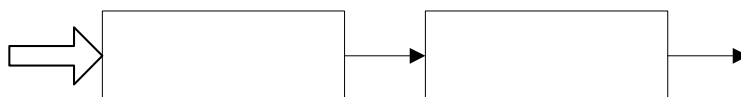


Рис.1. Модель технологічного об'єкта

Таблиця 1.

Відповідність вхідних параметрів об'єкта і вихідних при різному запізнюванні

Номер заміру $i$		1	2	3	4	...	$i$	...	$N$
Вектор вхідних параметрів		$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	...	$X_i$	...	$X_N$
Критерій функціонування (вихід об'єкта) при різному значенні параметра запізнювання	$\Delta=0$	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$	...	$y_i$	...	$y_N$
	$\Delta=1$	–	$y_1$	$y_2$	$y_3$	...	$y_{i-1}$	...	$y_{N-1}$
	$\Delta=2$	–	–	$y_1$	$y_2$	...	$y_{i-2}$	...	$y_{N-2}$

Більшість підходів до визначення параметра запізнювання  $\Delta$  у випадку однієї незалежної змінної ґрунтуються на застосуванні коефіцієнту кореляції Пірсона

$$R_{XY} = \frac{\text{cov}[X, Y]}{\sqrt{D[X]}\sqrt{D[Y]}}, \quad (1)$$

де  $\text{cov}[X, Y]$  – коваріація між вибіркою вхідної величини  $X$  та вихідної  $Y$ ;  $D[X]$ ,  $D[Y]$  – відповідні дисперсії. Проводячи зміщення ряду вихідної величини на значення  $\Delta$  можна отримати взаємкореляційну функцію у вигляді

$$R_{XY}(\Delta) = \frac{M[(X - M[X])(Y_\Delta - M[Y_\Delta])]}{\sqrt{D[X]}\sqrt{D[Y_\Delta]}}, \quad (2)$$

де  $Y_\Delta$  – зміщений ряд вихідної величини на  $\Delta$  кроків.

Як видно з формули (2), наявність шуму у статистиці об'єкта негативно позначається на коефіцієнті кореляції, оскільки збільшуються дисперсії  $D[X]$  і  $D[Y]$ . Хоча даний спосіб має ту перевагу, що значення кореляційної функції лежить у діапазоні  $[0; 1]$ , проте у випадку нелінійної залежності  $y=f(x)$   $R_{XY}$  приймає занижені значення.

На рис. 2 (а, б) представлені часові графіки відсоткової частки негабариту в кар'єрі  $\eta_H$ , що отримується після висадження гірської маси, та сумарних питомих витрат на видобування 1 т руди  $S_\Sigma$ . При цьому для побудови регресійної моделі даного процесу запізнювання  $\Delta$  знаходиться за абсолютним максимумом взаємкореляційної функції (рис. 2, в). Легко перевірити, що при  $\Delta = 3$  коефіцієнт детермінації лінійної апроксимації має найбільше значення  $R^2 \approx 0,3$  (рис. 2, г).

У випадку багатофакторних нелінійних об'єктів застосовується формула множинної кореляції

$$R_{X_1 X_2 \dots Y} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y(x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{mi}) - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (3)$$

де  $\bar{y}$  – математичне очікування ряду  $Y$ ;  $y(x_1, x_2, \dots, x_m)$  – значення регресійної функції, що залежить від предикторів  $x_1, x_2, \dots, x_m$ . Виконуючи зміщення статистичного ряду  $Y$  відносно векторів  $X$ , можна отримати кореляційну функцію, подібну до формули (2). Проте для даної методики характерний той недолік, що для побудови залежності коефіцієнта кореляції  $R_{X_1 X_2 \dots Y}$  від параметра запізнювання  $\Delta$  потрібно спершу провести регресійний аналіз і одержати рівняння  $y = f(x_1, x_2, \dots, x_m)$ . Це досить складно зробити, зважаючи на велику кількість незалежних змінних та відсутність інформації про їх роль у регресійному рівнянні. Розрахувати коефіцієнти кореляції, щоб потім включити змінні у модель, не вдасться, оскільки у технологічній статистиці ряди зміщені на невідомий параметр запізнювання  $\Delta$ . Тому авторами пропонується такий спосіб. Спершу для всіх пар  $X_i$  та  $Y$  будуються взаємкореляційні функції та проводиться їх аналіз на наявність екстремумів. Знаходиться найбільший екстремум відносно нуля і

визначається імовірне значення параметра запізнювання  $\Delta$ . Проаналізувавши всі предикторні змінні разом із залежною змінною  $y$ , формується масив найбільш імовірних значень  $\Delta$ . Для побудови регресійної моделі приймається значення запізнювання, що зустрічається найчастіше.

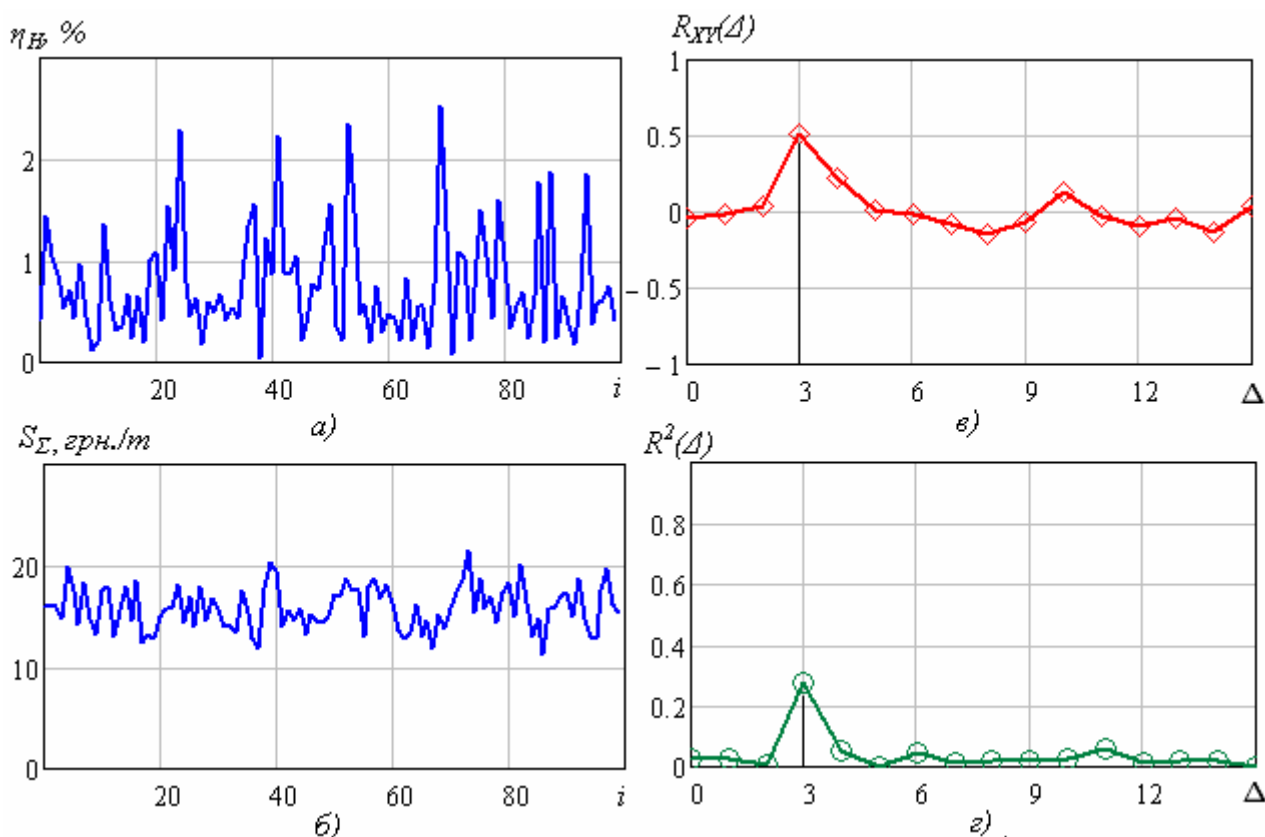


Рис.2. Результати ідентифікації параметра запізнювання: а) і б) графіки незалежної і залежної величини відповідно; в) взаємкореляційна функція; г) залежність коефіцієнта детермінації від параметра  $\Delta$

Для реалізації запропонованої методики за допомогою засобів обчислювальної техніки необхідно встановити межі допустимих похибок та оцінити збіжність пошуку екстремумів. Представимо вхідну величину статичного об'єкта у вигляді детермінованої та випадкової складової

$$\hat{x}_i = x_i + \varepsilon_i, \quad (4)$$

де  $\hat{x}_i$  – незалежна величина, яка вимірюється та заноситься до технологічної БД;  $x_i$  – дійсне значення вхідної величини;  $\varepsilon_i$  – адитивна похибка вимірювання. Так, наприклад, визначення гранулометричного складу в кар'єрі оцінюється фотопланіметричним методом і може мати суттєву похибку вимірювання (20–30%). Ступінь зашумленості даних оцінимо за допомогою відношення дисперсій сигнал/шум

$$k_{Ш} = \frac{D_C}{D_{Ш}} = \frac{D[X]}{D[\varepsilon]}. \quad (5)$$

На рис. 3 представлені графіки взаємкореляційних функцій для різного рівня зашумленості статистичних даних. Очевидно, що стабільність ідентифі-

кації значення запізнювання тим вища, чим чіткіше виражений екстремум на графіку  $R_{XY}(\Delta)$ . З цією метою введемо показник виразності екстремуму

$$\Theta = \frac{R_{\max 1}}{R_{\max 2}} \quad (5)$$

де  $R_{\max 1}$ ,  $R_{\max 2}$  – абсолютне значення першого та другого екстремуму на графіку функції відповідно. Таким чином, чим більше значення параметра  $\Theta$ , тим точніше можна визначити запізнювання  $\Delta$ , а у випадку коли  $\Theta \approx 1,0$  (рис. 3, б) однозначної відповіді дати не можна.

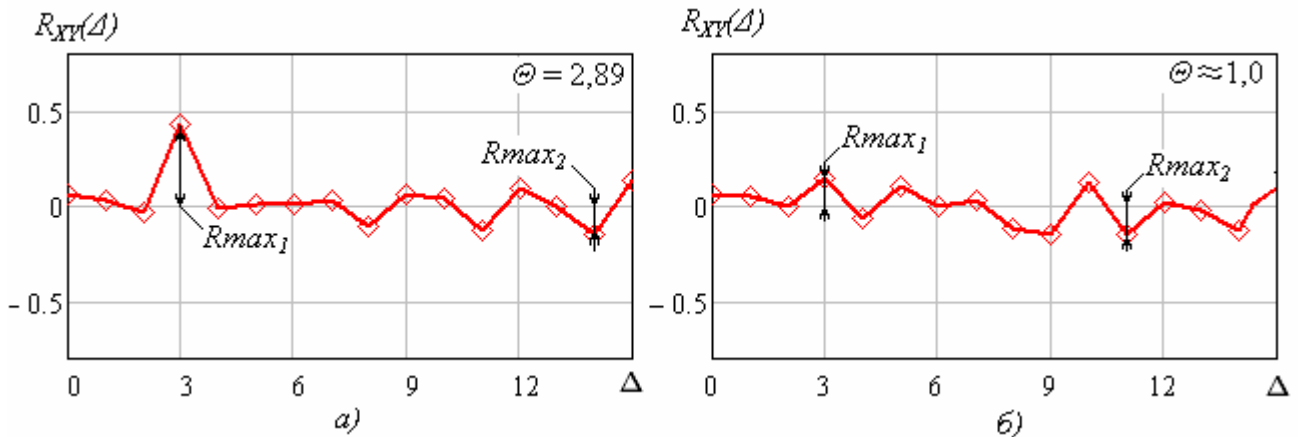


Рис.3. Графіки взаємкореляційної функції при різному рівні статистичного шуму: а)  $D_c/D_{ш} = 10$ ; б)  $D_c/D_{ш} = 0,1$

Як видно із залежностей (рис. 4, а), підвищення рівня статистичного шуму призводить до зменшення коефіцієнта виразності екстремуму на графіку кореляційної функції. Ця залежність близька до логарифмічної. Проте навіть при рівності дисперсій шуму та корисної складової ( $D_c/D_{ш} \approx 1$ ) запропонований спосіб дає прийнятний результат  $\Theta = 1,5-2,0$ . Залежність, наведена на рис. 4, б, показує, що точність лінійної регресійної моделі, побудованої із урахуванням визначеного параметра запізнювання ( $\Delta = 3$ ) теж інтенсивно спадає при зменшенні відношення  $D_c/D_{ш}$ .

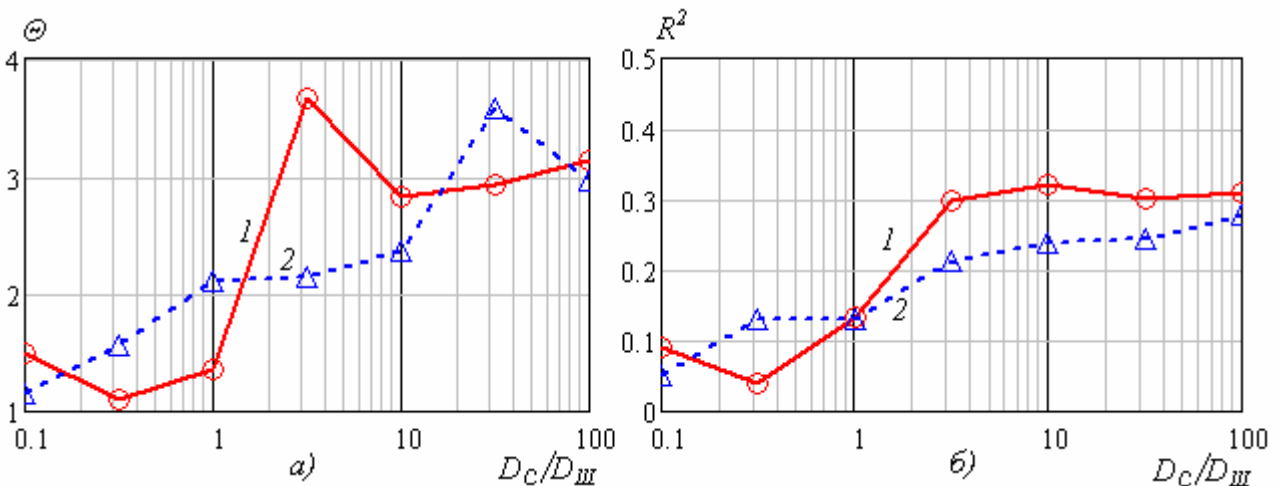


Рис.4. Вплив рівня шуму в статистичні вибірці на показник виразності (а) та коефіцієнт детермінації (б)

**Висновки.** Таким чином, було підтверджено необхідність врахування запізнювання при ідентифікації математичної моделі. Для статичних багатofакторних об'єктів найбільш доцільно проводити побудову парних взаємодіючих функцій між кожною предикторною та залежною змінними. За допомогою екстремумів кореляційної функції визначається параметр запізнювання статичних об'єктів розподілених у просторі та часі. Застосування даного методу дозволить проводити ідентифікацію запізнювання навіть при сильно зашумлених статистичних даних ( $D_C/D_{III} \geq 1$ ).

Подальші дослідження авторів будуть спрямовані на розробку ефективних алгоритмів реалізації запропонованого способу за допомогою паралельних обчислень.

#### Список літератури

1. Технично-економическіе показателі горнодобывающих підприємств України в 2004–2005 гг. / [Близнюков В.Г., Салганик В.А., Штанько Л.А., Русаненко П.А.]. – Кривой Рог: ГП «НИГРИ», 2006. – 122 с.
2. Поспелов Д.А. Ситуационное управление: теория и практика. – М.: Наука. – Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. – 228 с.
3. Растрингин Л.А. Адаптация сложных систем. – Рига: Зинатне, 1981. – 375 с.
4. Кендал М. Многомерный статистический анализ и временные ряды / М. Кендал, А. Стьюарт; [пер. с англ. Э.Л. Пресмана, В.И. Ротаря]. – М.: Наука, 1976. – 736 с.
5. Гайдышев И.П. Анализ и обработка данных: специальный справочник / И.П. Гайдышев. – СПб.: Питер, 2001. – 752 с.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Ткачовим В.В.  
Надійшла до редакції 19.05.11*

УДК 621.182.3:621.926.004.2

© Pistun Ye., Zahray V. and Fedoryshyn R.

## **AUTOMATION AND OPTIMIZATION OF SOLID MATERIAL GRINDING BY MEANS OF BALL MILLS**

Рассмотрена система автоматического регулирования и оптимизации процесса измельчения твердого материала в шаровых барабанных мельницах. Система обеспечивает измерение основных параметров процесса измельчения и его оптимизацию. При применении системы гарантируется безопасная работа мельницы, повышается энергоэффективность процесса измельчения, а также увеличивается производительность мельницы.

Розглянута система автоматичного регулювання та оптимізації процесу розмелювання твердого матеріалу в кульових барабаних млинах. Система забезпечує вимірювання основних параметрів процесу розмелювання і його оптимізацію. При застосуванні системи гарантується безпечна робота млина, підвищується енергоефективність процесу розмелювання, а також збільшується продуктивність млина.

This work deals with the system for automated control and optimization of solid material grinding in ball mills. The system provides measurement of the main parameters of the technological process of grinding and optimization of this process. By applying the system the safe operation of a