



УДК 681.5.01

МОДЕЛЬ БАГАТОВИМІРНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ КОНУСНОЮ ДРОБАРКОЮ ДРІБНОГО ДРОБЛЕННЯ З ОТРИМАННЯМ ПРОДУКТУ ЗАДАНОГО ДИСПЕРСНОГО СКЛАДУ

MULTIVARIABLE CONTROL SYSTEM MODEL FOR A FINE CRUSHING CONE CRUSHER TO OBTAIN A PRODUCT WITH A SPECIFIED PARTICLE SIZE DISTRIBUTION

¹Тігарєв А. М., ²Тігарєва Т. Г.

¹Tigariev A.M., ²Tigarijeva T.H.

¹Державний університет інтелектуальних технологій та зв'язку, м. Одеса, Україна

²Одеська державна академія будівництва та архітектури, м. Одеса, Україна

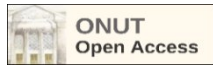
ORCID; ¹<http://orcid.org/0000-0002-3394-2526>, ²<https://orcid.org/0000-0003-4453-279X>

E-mail: ¹amtigar@ukr.net, ²tatianatigareva@gmail.com

Copyright © 2025 by author and the journal "Automation of technological and business – processes".

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>



DOI: 10.15673/atbp.v17i3.3259

Анотація. В статті розглядається побудова моделі багатовимірної системи керування конусною дробаркою дрібного дроблення шляхом застосування оптимальної системи керування з використанням лінійно-квадратичного регулятора з усуненням сталої похибки шляхом введення інтегральної складової.

На підставі аналізу існуючих підходів до дробарки як об'єкту керування, отримано параметричну схему дробарки. В зв'язку зі значним впливом на якість сировини після дрібного дроблення дисперсного складу готового продукту розглядається питання щодо можливості його регулювання. Для цього було розроблено математичну модель конусної дробарки. З використанням цієї моделі розроблено модель системи керування за каналами, що впливають на рівень сировини в дробарці, продуктивність дробарки і дисперсний склад готового продукту.

Запропоновано модель багатовимірної оптимальної системи керування дробаркою за допомогою лінійно-квадратичного регулятора з усуненням статичної похибки шляхом введення інтегральної складової. Результати дослідження цієї моделі при різних комбінаціях збурень показали, що вона є працездатною.

Це дозволяє застосувати таку модель для використання в системі автоматизації дробарки, що забезпечить її роботу в оптимальних режимах при коливаннях продуктивності, рівня завантаження і дисперсного складу сировини.

Abstract. This article presents the development of a multivariable control system model for a fine cone crusher based on an optimal control strategy using a linear-quadratic regulator with an integral component to eliminate steady-state error. Based on an analysis of existing approaches to the synthesis of automatic control systems for crushers as control objects, a parametric scheme of the crusher has been developed.

Given the significant impact of the dispersed composition on the quality of the final product, the feasibility of controlling this composition is examined. To this end, a mathematical model of the cone crusher was created. Using this model, a control system was designed to regulate key parameters: raw material level inside the crusher, crusher throughput, and the dispersion characteristics of the final product.

The proposed multivariable optimal control system, incorporating a linear-quadratic regulator with integral action, was tested under various combinations of disturbances. Simulation results confirm the system's efficiency and stability, suggesting that it can be integrated into crusher automation to maintain optimal performance despite fluctuations in productivity, feed level, and raw material composition.

Ключові слова: конусна дробарка дрібного дроблення, параметри керування, рівень сировини, продуктивність дробарки, дисперсний склад готового продукту, передаточна функція, оптимальна система керування, математичне моделювання, лінійно-квадратичний регулятор.

Key words: cone crusher, control parameters, raw material level, crusher capacity, transfer function, optimal control system, mathematical modeling, linear-quadratic regulator.



Вступ. Переробка корисних копалин складається їх видобутку та значної кількості технологічних схем їх переробки, що складаються з дроблення, здрібнювання, грохочення, сепарації та інших [1, 2]. У цей час (в умовах воєнного стану) виникає необхідність виробництва значної кількості будівельних матеріалів і продуктів дроблення для багатьох галузей промисловості. При цьому якість продуктів дроблення в значній мірі залежить від їх дисперсного складу, особливо при необхідності їх подальшого здрібнювання. Враховуючи постійне зростання цін на енергоносії, сировину, запасні частини та інше, для підвищення економічних показників, що пов'язані з якістю готового продукту підприємства більше уваги приділяють можливості регулювання дисперсного складу готового продукту. Тому в якості одного з критеріїв зменшення затрат на виробництво товарної продукції доцільно використовувати дисперсний склад готового продукту.

Аналіз літературних джерел і постановка проблеми. Застосовувані на дробильно-сортувальних заводах і установках конусні дробарки дрібного дроблення є кінцевими агрегатами поточно-транспортних систем з переробки мінеральної сировини для подальшого здрібнювання [2]. Тому виникає потреба для поліпшення роботи пристроїв, що виконують здрібнювання сировини, підтримання потрібного дисперсного складу. Завдання автоматизації дробарок дрібного дроблення зводиться до підтримки незмінного за умовами технологічного процесу дисперсного складу сировини. Однак, тісний і складний зв'язок між цими параметрами, що залежить від багатьох факторів (фізико-механічними характеристиками мінеральної сировини, конструкцій дробарок, умов роботи всього комплексу поточно-транспортних систем з переробки мінеральної сировини і іншого) спонукає для зменшення витрат на отримання готового продукту виконувати удосконалення систем керування дробарками дрібного дроблення.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є розгляд варіанта вдосконалення автоматичної системи, яка забезпечить оптимальне керування конусною дробаркою дрібного дроблення для дроблення мінеральної сировини [3 – 5]. Це дозволить забезпечити роботу дробарки в номінальному режимі при підтриманні необхідного рівня сировини в дробарці і забезпечити її номінальну продуктивність, що необхідна для підтримання ритмічної роботи агрегатів, які розташовані на наступних етапах, а також забезпечити потрібний дисперсний склад готового продукту. Тому далі буде розглядатися побудова моделі системи керування дробаркою дрібного дроблення, яка дозволить забезпечити підтримання номінального режиму для основних параметрів при дробленні.

Результати досліджень. Відомо, що в сучасних конусних дробарках для подрібнення сировини можливо використовувати три керуючі впливи [5]. До них належать: потужність двигуна дробарки, потужність двигуна транспортеру, що завантажує сировину, і пристрої, що змінюють положення конусів дробарки (наприклад: потужність двигуна мастилостанції, якій змінює тиск в гідросистемі, що впливає на положення нижнього конуса або положення кільця, яке регулює зазор між конусами). При цьому до основних параметрів, які керуються, можливо віднести витрату готового продукту, рівень сировини, що завантажена в дробарку, середній діаметр шматків готового продукту (тобто його дисперсний склад). До основних збуджуючих впливів належать: якість сировини (тобто її щільність, вологість, дисперсний склад тощо), конструктивні особливості дробарки, коливання напруги в електричній мережі тощо.

У результаті узагальнену параметричну схему дробарки можна представити в наступному вигляді (рис. 1).

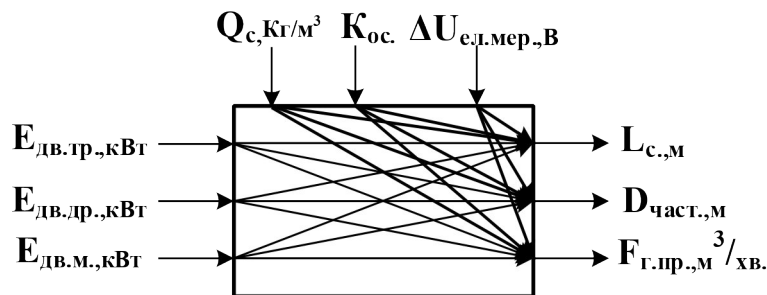


Рис. 1 – Узагальнена параметрична схема конусної дробарки, як об'єкту керування: $E_{дв.тр.}$ – потужність двигуна транспортеру, що подає сировину в дробарку, кВт; $E_{дв.др.}$ – потужність двигуна дробарки, кВт; $E_{дв.м.}$ – потужність двигуна мастилостанції, що впливає на положення нижнього конуса дробарки, кВт; $L_с.$ – рівень сировини, що завантажена в дробарку, м; $D_{част.}$ – середній діаметр шматків готового продукту, м; $F_{г.пр.}$ – витрата готового продукту, м³/хв.; $Q_с$ – щільність сировини, кг/м³; $K_{ос.}$ – конструктивні особливості дробарки; $\Delta U_{ел.мер.}$ – коливання напруги в електричній мережі, В

Fig. 1 – Generalized parametric diagram of the crusher, which is the control object: $E_{тр.}$ – power the conveyor supplying the raw materials to the crusher, kWt; $E_{др.}$ – crusher engine power, kWt; $E_{м.}$ – engine power of oil station. which affects the position of the crusher lower cone, kWt; $L_с.$ – level of raw material loaded into crusher, minute; $D_{част.}$ – average size of finished product pieces, m; $F_{г.пр.}$ – consumption of finished product, m³/minute; $Q_с$ – density of raw materials, kg/m³; $K_{ос.}$ – design features of crusher; $\Delta U_{ел.мер.}$ – voltage fluctuations in the electrical network, V. $F_{г.пр.}$, m³/хв.

Враховуючі, що конусна дробарка дрібного дроблення входить в технологічну схему переробки корисних копалин, для забезпечення безперервності всього технологічного процесу необхідно підтримувати технологічний регламент дроблення в припустимих межах. В зв'язку з тим, що дробарка являє собою багатомірний об'єкт



керування, для підтримання вихідних параметрів необхідно застосовувати оптимальний регулятор на підставі певного математичного критерію. Після дробарки наступним етапом є подрібнювання за допомогою барабанного млина. Для стабільної роботи барабанного млина необхідно, щоб на нього подавалися шматки сировини з певним дисперсним складом. Крім того, потрібно забезпечення стабільності продуктивності дробарки. Попередня спроба авторів розробити модель системи керування з застосуванням оптимізаційного підходу з урахуванням двох перехресних зв'язків між рівнем сировини в дробарки та продуктивністю дробарки виявилась вдалою [7]. Теперішня робота є її продовженням для виявлення можливості врахувати додатковий параметр – дисперсний склад сировини, для підвищення якості процесу дроблення.

Звісно, що сировина після дроблення являє собою сипучий матеріал з певним дисперсним складом (або інакше – гранулометричним складом). Цей склад підкоряється певному закону розподілу шматків за розміром. Для його визначення використовувалися різні аналізатори дисперсного складу – гранулометри ситові, ударної дії, ізотопні, оптичні [8]. Для процесів дроблення в якості еталонного методу аналізу дисперсного складу для технологічного процесу в Україні використовується ситовий аналіз [9]. Але існуючі ситові аналізатори потребують ручного відбору і підготовки проб, мають тривалий час проведення аналізу. Також не існує серійних ситових аналізаторів для використання безпосередньо в ході технологічного процесу. Зараз, в зв'язку з удосконаленням оптичних матриць, програмних методів обробки зображень, застосування відеокамер і покращення їх якісних показників, отримують поширення оптичні методи визначення дисперсного складу. Різні автори пропонують різну термінологію для таких рішень – «машинний аналіз» [100], комп'ютерний аналіз [11], відеометричний аналіз [12]. Результати аналізу за допомогою такого методу дозволяють отримати багато показників дисперсного складу – середній розмір частинок, статистичні параметри: моду, медіану, дисперсію, можливість оцінювати форму частинок, кольоровий спектр частинок різних мінералів та інші параметри [13]. Класичні системи аналізу з застосуванням таких систем складаються з освітлювального приладу, відеокамери і обчислювального пристрою [12]. Освітлювальний прилад і відеокамери розміщуються над конвеєром вивантаження готового продукту і передають зображення в обчислювальний пристрій аналізатора. Аналізатор забезпечує визначення розміру частинок дробленого продукту, що розташовані в верхньому шарі конвеєра, і забезпечує оперативний контроль якості дроблення на дробарці або в усьому технологічному ланцюжку. При цьому час отримання інформації про дисперсний склад не перевищує 2 хвилин.

Для більшості процесів дроблення в якості технологічного критерію якості продуктів дроблення приймається середній розмір частинок. Тому прийємо саме його для подальшої розробки моделі системи керування.

Основна частина

На підставі параметричної схеми за керуючими впливами і враховуючи динамічні властивості конусної дробарки, які визначаються витратою сировини, кількістю матеріалу в дробильному просторі, частотою хитань конуса, властивостями матеріалу і його дисперсним складом, можна зробити висновок, що конусна дробарка є об'єктом з перехресними зв'язками. Для урахування дисперсного складу сировини при дробленні конусною дробаркою і побудови моделі системи керування визначимо три основних вхідних і вихідних параметра, які характеризують дробарку; введемо позначення:

u_1 – потужність двигуна дробарки;

u_2 – потужність двигуна транспортера подачі сировини;

u_3 – потужність двигуна дробарки – середній розмір частинок;

y_1 – витрата готового продукту;

y_2 – рівень сировини в дробарці;

y_3 – середній розмір частинок.

P_{11} – передаточна функція дробарки за каналом «потужність двигуна дробарки – продуктивність дробарки за готовим продуктом»;

P_{12} – передаточна функція дробарки за каналом «потужність двигуна дробарки – рівень сировини в дробарці»;

P_{13} – передаточна функція дробарки за каналом «потужність двигуна дробарки – середній розмір частинок»;

P_{21} – передаточна функція дробарки за каналом «потужність двигуна транспортера подачі сировини в дробарку – продуктивність дробарки за готовим продуктом»;

P_{22} – передаточна функція дробарки за каналом «потужність двигуна транспортера подачі сировини в дробарку – рівень сировини в дробарці»;

P_{23} – передаточна функція дробарки за каналом «потужність двигуна транспортера – середній розмір частинок»;

P_{31} – передаточна функція дробарки за каналом «потужність двигуна дробарки – витрата готового продукту»;

P_{32} – передаточна функція дробарки за каналом «потужність двигуна мастилостанції – рівень сировини в дробарці»;

P_{33} – передаточна функція за каналом «потужність двигуна мастилостанції – середній розмір частинок».

З урахуванням уведених позначень на підставі параметричної схеми структурну схему математичної моделі дробарки, з урахуванням перехресних зв'язків між трьома параметрами, можна представити в наступному вигляді (рис. 2).

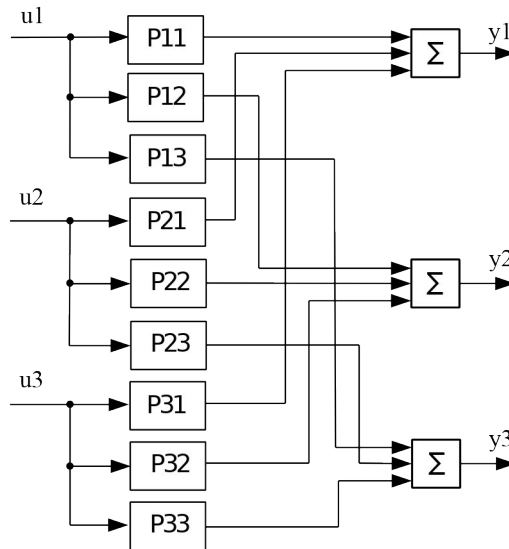


Рис. 2 – Структурна схема математичної моделі дробарки у вигляді передаточних функцій з урахуванням перехресних зв'язків
Fig.2 – Structural diagram of the mathematical model of the crusher in the form of transfer functions taking into account cross-links

Для побудови математичної моделі конусної дробарки виконані аналітичні розрахунки її основних параметрів за методикою, що запропоновано в [14]. Для розгляду обрана конусна дробарка дрібного дроблення КМД-2200Т1, яка виготовляється в Україні [15].

Основні технічні характеристики пристроїв і режимів для керування конусною дробаркою дрібного дроблення КМД-2200Т1 наведені в табл. 1.

Таблиця 1 - Технічні характеристики пристроїв і режимів для керування конусною дробаркою

Пристрої	Параметри	Режими		
		Мін.	Номін.	Макс.
Двигун подавального транспортеру	Потужність, кВт	7	10	16
	Витрата сировини, м ³ /хв.	0,666	3,33	3,99
Двигун дробарки	Потужність, кВт	230	250	280
Конусна дробарка	Рівень сировини, м	0,7	1,1	1,5
Двигун мастилостанції	Потужність, кВт	15	20	25
Діапазон регулювання ширини розвантажувальної щілини	м	0,05	0,09	0,15

На підставі технічної документації дробарки дрібного дроблення КМД-2200Т1 та за результатами проведених розрахунків за методикою [14] виконана розробка моделі дробарки у вигляді передаточних функцій для номінального режиму за наступними каналами.

Передаточна функція за каналом «потужність двигуна дробарки – витрата готового продукту» при її роботі в номінальному режимі, яка має наступний вигляд:

$$P11 = \frac{0,0165}{1,082s^2 + 2,08s + 1} e^{-5,3s}.$$

Передаточна функція за каналом «потужність двигуна дробарки – рівень сировини в дробарці» при її роботі в номінальному режимі, має такий вигляд:

$$P12 = \frac{0,0055}{1,035s + 1} e^{-3,1s}.$$

Передаточна функція за каналом «потужність двигуна дробарки – середній розмір частинок» при її роботі в номінальному режимі, має такий вигляд:

$$P13 = \frac{0,004}{1,03s + 1} e^{-4,9s}.$$

Передаточна функція за каналом «потужність двигуна транспортера – витрата готового продукту» при її роботі в номінальному режимі, має такий вигляд:

$$P21 = \frac{0,333}{0,3675s^2 + 1,4s + 1} e^{-5s}.$$



Передаточна функція за каналом «потужність двигуна транспортера – рівень сировини в дробарці» при її роботі в номінальному режимі, має такий вигляд:

$$P22 = \frac{0,11}{0,35s + 1} e^{-2,1s}.$$

Передаточна функція за каналом «потужність двигуна транспортера – середній розмір частинок» при її роботі в номінальному режимі, має такий вигляд:

$$P23 = \frac{0,11}{0,581s + 1} e^{-5,3s}.$$

Передаточна функція за каналом «потужність двигуна мастилостанції – витрата готового продукту» при її роботі в номінальному режимі, має такий вигляд:

$$P31 = \frac{0,1655}{1,66s + 1} e^{-0,766s}.$$

Передаточна функція за каналом «потужність двигуна мастилостанції – рівень сировини в дробарці» при її роботі в номінальному режимі, має такий вигляд:

$$P32 = \frac{0,055}{1,66s + 1} e^{-1,6s}.$$

Передаточна функція за каналом «потужність двигуна мастилостанції – середній розмір частинок» при її роботі в номінальному режимі, має такий вигляд:

$$P33 = \frac{0,55}{1,66s + 1} e^{-5s}.$$

Таким чином, дробарка представляє собою багатомірний об'єкт. Для керування такими об'єктами доцільно використовувати оптимальні системи керування, що побудовані на базі лінійно-квадратичного регулятора. За методикою, що запропоновано в [7], виконано розробку програми моделі керуванням дробаркою з використанням лінійно-квадратичного регулятора в програмному пакеті MATLAB з урахуванням того, що лінійно-квадратичний регулятор є П-регулятором і має статичну помилку – виконано додавання інтегральної складової для її усунення.

Розглянемо можливість застосування такого підходу при керуванні конусною дробаркою дрібного дроблення. Було побудовано програмну реалізацію для трьох вхідних і вихідних параметрів та виконано моделювання розробленої моделі.

Використання дискретної реалізації систем та масштабування часу на сучасному комп'ютері дозволяє досягти достатньо високої швидкості моделювання. В зв'язку з відсутністю математично обґрунтованих методів визначення коефіцієнтів моделі необхідно виконувати їх підбір. Моделювання перехідних процесів проводилось як програмно, так і за допомогою пакету візуального імітаційного моделювання Simulink. Це робить зручною процедуру емпіричного вибору параметрів.

Скористаємось процедурою моделювання для дослідження властивостей моделі системи автоматичного керування згідно з методикою, що запропоновано в [7]. В якості часу моделювання виберемо хвилини.

Зовнішній вигляд розробленої моделі системи керування дробаркою за обраними каналами в програмному пакеті Simulink має наступний вигляд (рис. 3). Для проведення оцінки якості регулювання за кожним каналом застосуємо вплив збурень в вигляді стрибка відповідного рівня для кожного вихідного параметру дробарки в діапазоні $\pm 10\%$ відносно номінального за допомогою перемикачів S1, S2, S3 (рис. 3).

Зміну відповідних вихідних параметрів за цими каналами можливо спостерігати за допомогою відповідних осцилографів.

Основним збуренням при роботі конусної дробарки є щільність сировини і розмір шматків сировини на вході в дробарку. При підвищенні щільності сировини для дроблення шматка потрібна більша потужність двигуна дробарки, й при цьому час перебування шматка в дробарці зростає. Це означає збільшення постійної часу об'єкта. При цьому спадає продуктивність дробарки. Тобто, дробарка є об'єктом зі змінними параметрами. При використанні сировини навіть із одного кар'єру залежність співвідношення сировини підвищеної твердості й меншої твердості невідома. Тому завжди спостерігається коливання потужності двигуна транспортеру, що подає сировину, і двигуна дробарки, і, відповідно, її продуктивності, а також коливання середнього розміру шматків готового продукту. Припускаючи, що ці коливання підкоряються нормальному закону розподілу, представимо модель збурювань за кожним каналом у вигляді білого шуму, котрий реалізуємо за допомогою блока Vand-Linsted White Noise. Це припущення засновано на тому, що дробарка дрібного дроблення є останнім агрегатом в ланцюзі дроблення сировини перед агрегатами здрібнювання (млинами) і після неї виконується операція грохочення. Тобто шматки сировини не перевищують певний розмір. При цьому вважаючи, що залежність між продуктивністю дробарки, рівнем сировини і середнім розміром шматків сировини в невеликому діапазоні лінійна, модель збурювань за всіма каналами буде мати аналогічну структуру. На підставі цих міркувань



виконано дослідження впливу всіх трьох параметрів шляхом подачі сигналів збурювань на виходи відповідних каналів.

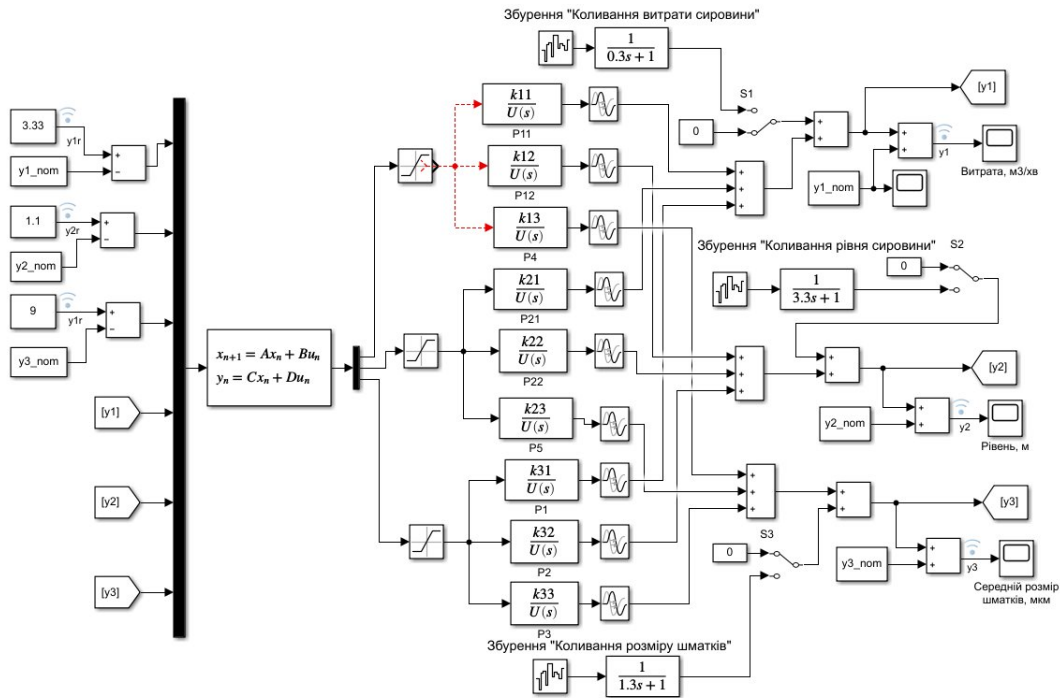


Рис. 3 – Модель системи регулювання рівня сировини в дробарці, продуктивності дробарки за готовим продуктом і дисперсним складом готового продукту
Fig. 3 – Model of the system for controlling the level of raw materials in the crusher, the crusher productivity by the finished product and the dispersed composition of the finished product

На підставі [16] було вибрано частоту коливань $\approx 0,3-0,4$ Гц, а максимальне відхилення амплітуди коливань $\approx 10\%$ від продуктивності дробарки, рівня сировини і середнього розміру шматків сировини визначено параметри налаштування генератора білого шуму при побудові моделей цих збурень. Для забезпечення можливості підключення цих моделей до системи керування передбачені перемикачі S1 – S3.

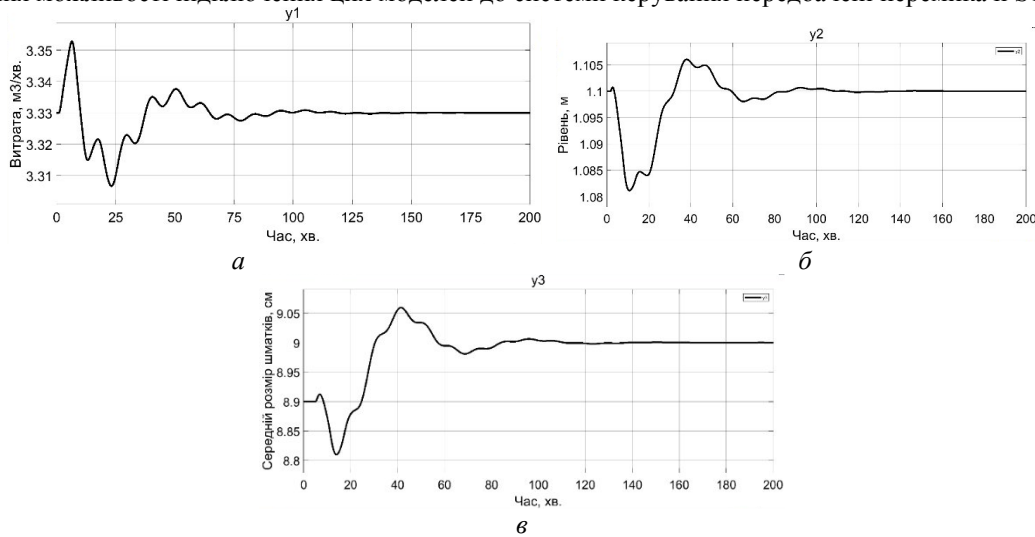


Рис. 4 – Перехідні характеристики дробарки в номінальному режимі: за витратою готового продукту – а, за рівнем сировини в дробарці – б, за середнім розміром шматків сировини – в
Fig. 4 – Transient characteristics of the crusher in nominal mode: by consumption of finished product – a, by raw material level in crusher – б, by average size of pieces of raw material – в

При моделюванні були проведені дослідження при всіх можливих комбінаціях збурень за всіма трьома каналами, і визначено, що система керування забезпечує роботу дробарки в припустимих межах. Найгіршими комбінаціями збурень при роботі дробарки будуть максимальний рівень сировини в дробарці, максимальна потужність двигуна дробарки і максимальний розмір шматків сировини. Перехідні характеристики роботи моделі системи керування, що запропоновано за трьома каналами, в номінальному режимі наведені на рис. 4.



Результати моделювання при найгірших комбінаціях збурень і коливаннях щільності сировини за тими ж каналами наведені на рис. 5.

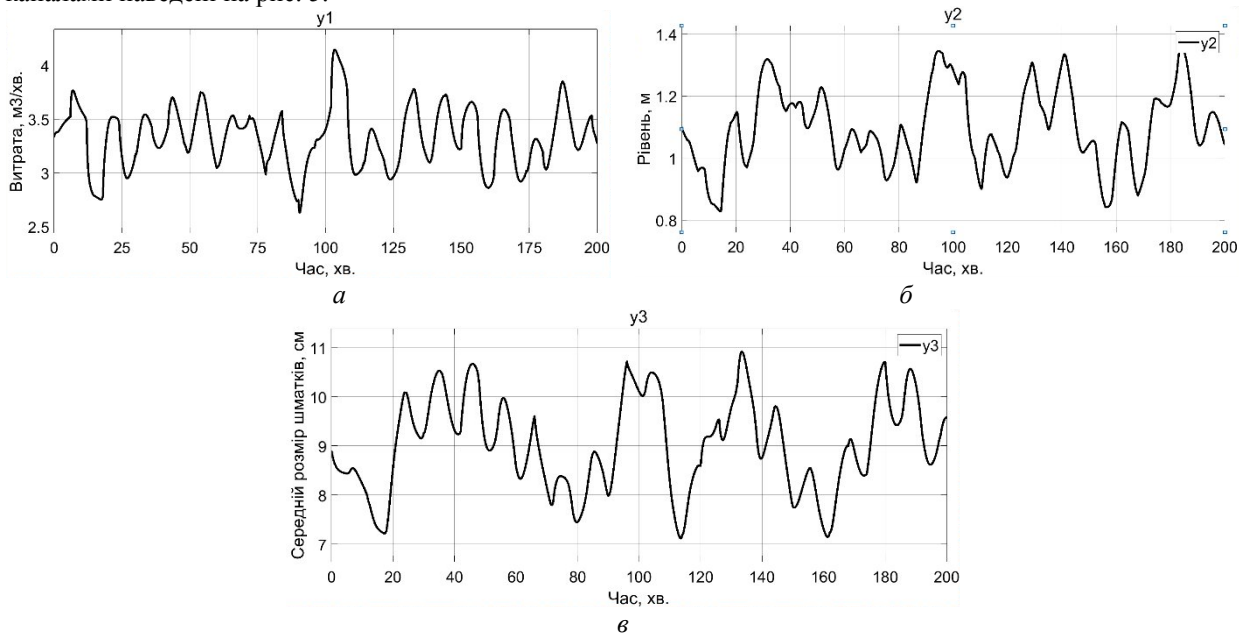


Рис. 5 – Перехідні характеристики дробарки при сукупності найгірших збурень за витратою готового продукту – *a*, за рівнем сировини в дробарці – *б*, за середнім розміром шматків сировини – *в*
Fig. 5 – Transient characteristics of the crusher at the set of worst disturbances by consumption of finished product – *a*, by raw material level in crusher – *b*, by average size of pieces of raw material – *c*

Аналіз перехідних характеристик показує, що запропонована система керування є сталою. Крім того, результати моделювання показують, що навіть при найгірших комбінаціях збурень максимальне припустимі відхилення вихідних параметрів не перевищують припустимих відхилень від заданих значень продуктивності, рівня сировини і середнього розміру частинок.

Висновки

Запропоновано модель багатовимірної системи керування конусною дробаркою дрібного дроблення. Проведено аналіз дробарки, як об'єкту керування. На підставі спрощеної параметричної схеми конусної дробарки як об'єкту керування, запропоновано математичну модель дробарки з урахуванням перехресних зв'язків між каналами. Виконано розробку моделі оптимальної системи керування дробаркою на прикладі дробарки КМД-2200Т1 з застосуванням лінійно-квадратичного регулятора з урахуванням інтегральної складової для усунення статичної похибки в програмному пакеті MATLAB-Simulink. Проведено її моделювання при різних збуреннях. Результати моделювання показали, що система керування забезпечує підтримання завдань за потужністю двигуна дробарки, рівнем сировини в дробарці і середнім розміром шматків готового продукту в межах $\pm 10\%$ відхилень керуючих впливів. Також потужність двигуна дробарки, двигуна транспортеру і двигуна мастилостанції не перевищує максимальне допустимих значень. Це дозволяє рекомендувати запропоновану модель системи керування для застосування при розробці промислових систем керування конусною дробаркою дрібного дроблення для дроблення мінеральної сировини.

Список використаних джерел

- [1]. Смирнов В.О., Білецький В.С., Шолда Р.О. Переробка корисних копалин. Донецьк: Східний видавничий дім, 2013. 600 с.
- [2]. Підготовка корисних копалин до збагачення : монографія / М.І. Сокур, В.С. Білецький, О.І. Єгурнов, О.М. Воробйов, В.О. Смирнов, Д.П. Божик. Кременчук : ПП Щербатих О.В., 2017. 392 с.
- [3]. Stopakevich A.A. Sistemnyy analiz i teoriya slozhnykh sistem upravleniya. Odessa : Astroprint, 2013. 352 с.
- [4]. Anderson, B. D. O. and Moore, J. B. Optimal Control: Linear Quadratic Methods. Prentice-Hall International Editions, 1989.
- [5]. Johansson, K. H. Interaction bounds in multivariable control systems. Automatica, 2002. 38(2):1045-1051. doi:10.1016/S0005-1098(01)00285-0.
- [7]. Тігарев А.М., Тігарева Т.Г. Удосконалення системи керування конусною дробаркою середнього дроблення. Інформатика та математичні методи в моделюванні. 2024. №1-2. Т14. С. 108-114.
- [8]. Allen T. Powder sampling and particle size determination. Elsevier, 2003.
- [9]. ДСТУ ГОСТ ІСО 2591-1:2004 Ситовий аналіз. Частина 1. Методи з використанням контрольних сит з дротяної тканини і перфорованих металевих листів (ГОСТ ІСО 2591-1-2002, IDT).



- [10]. Mkwelo S. "A machine vision-based approach to measuring the size distribution of rocks on a conveyor belt". PhD thesis. University of Cape Town, 2004.
- [11]. Kontny M., Machine vision methods for estimation of size distribution of aggregate transported on conveyor belts. JVE international ltd. vibroengineering procedia. sep 2017, vol. 13. pp. 296-300.
- [12]. Li, M., Wang, X., Yao, H., Saxén, H., Yu, Y. (2022). Analysis of Particle Size Distribution of Coke on Blast Furnace Belt Using Object Detection. *Processes*, 10(10), Retrieved from <https://doi.org/10.3390/pr10101902>
- [13]. Hamzeloo E, Massinaei M., & Mehrshad N. (2014). Estimation of particle size distribution on an industrial conveyor belt using image analysis and neural networks. *Powder Technology Volume 261*, 185-190.
- [14]. Komarov A.Ya., Prokofev E.V. Analiticheskoe opredelenie parametrov staticheskikh i dinamicheskikh kharakteristik shchekovykh i konusnykh drobilok: Izvestiya Ural'skoy gosudarstvennoy horno-geologicheskoy akademii. Seriya: Hornaya elektromekhanika. 1997. Vyp. 6. S. 181-189.
- [15]. Гірське та збагачувальне обладнання. Дробарки конусні. ПАТ Новокраматорський машинобудівний завод. URL: <http://nkmz.com/ua/> (дата звернення: 17.06.2025).
- [16]. Михайленко О.Ю., Щокін В.П., Федоренко П.Ю. Аналіз впливу ширини розвантажувальної щілини на споживання електричної енергії конусної дробарки: Вісник Криворізького національного університету, 2013. Вип. 34. С. 57-61.

References

- [1]. Smyrnov V.O., Biletskyi V.S., Sholda R.O. Pererobka korysnykh kopalyn. Donetsk: Skhidnyi vydavnychiy dim, 2013. 600 s.
- [2]. Pidhotovka korysnykh kopalyn do zbahachennia : monohrafiia / Sokur M.I., Biletskyi V.S., Yehurnov O. I., Vorobiov O. M., Smyrnov V.O., Bozhyk D.P. Kremenchuk: PP Shcherbatiykh O.V., 2017. 392 s.
- [3]. Stopakevych A.A. Systemni analiz y teoryia slozhnykh system upravleniya. Odessa : Astroprint, 2013. 352 c.
- [4]. Mular, Andrew L.; Halbe, Doug N.; Barratt, Derek J. (2002). Mineral Processing Plant Design, Practice, and Control: Proceedings. SME. pp. 2369. ISBN 978-0-87335-223-9. Retrieved 26 October 2012.
- [5]. Anderson, B. D. O. and Moore, J. B. Optimal Control: Linear Quadratic Methods. Prentice-Hall International Editions, 1989.
- [6]. Johansson, K. H. Interaction bounds in multivariable control systems. *Automatica*, 2002. 38(2):1045-1051. doi:10.1016/S0005-1098(01)00285-0.
- [7]. Tiharev A.M., Tiharieva T.H. *Udoskonalennia systemy keruvannia konusnoiu drobarkoiu serednoho droblennia*. Informatyka ta matematychni metody v modeliuvanni. 2024. №1-2. T14. S. 108-114.
- [8]. Allen T. Powder sampling and particle size determination. Elsevier, 2003.
- [9]. DSTU HOST YSO 2591-1:2004 Sytovyi analiz. Chastyna 1. Metody z vykorystanniam kontrolnykh syt z drotianoi tkanyny i perforovanykh metalevykh lystiv (HOST YSO 2591-1-2002, IDT).
- [10]. Mkwelo S. "A machine vision-based approach to measuring the size distribution of rocks on a conveyor belt". PhD thesis. University of Cape Town, 2004.
- [11]. Kontny M. Machine vision methods for estimation of size distribution of aggregate transported on conveyor belts. JVE international ltd. vibroengineering procedia. sep 2017, vol. 13. Retrieved from <https://doi.org/10.21595/vp.2017.19151>
- [12]. Li, M., Wang, X., Yao, H., Saxén, H., Yu, Y. (2022). Analysis of Particle Size Distribution of Coke on Blast Furnace Belt Using Object Detection. *Processes*, 10(10). <https://doi.org/10.3390/pr10101902>
- [13]. Hamzeloo E, Massinaei M., & Mehrshad N. (2014). Estimation of particle size distribution on an industrial conveyor belt using image analysis and neural networks. *Powder Technology Volume 261*, 185-190.
- [14]. Komarov A.Ya., Prokofev Ye.V. Analiticheskoe opredelenie parametrov staticheskikh i dinamicheskikh kharakteristik shchekovykh i konusnykh drobilok: Izvestiya Uralskoi gosudarstvennoi gorno-geologicheskoi akademii. Seriya: Gornaya elektromekhanika. 1997. Vip. 6. S. 181-189.
- [15]. Hirske ta zbahachuvalne obladnannia. Drobarky konusni. Pryvatne aktsionerne tovarystvo NOVOKRAMATORSKYI MASHYNOBUDIVNYI ZAVOD. <http://nkmz.com/ua/> (data zvernennia: 17.06.2025).
- [16]. Mykhailenko O.Yu., Shchokin V.P., Fedorenko P.Yu. Analiz vplyvu shyryny rozvantazhuvalnoi shchilyny na spozhyvannia elektrychnoi enerhii konusnoi: Visnyk Kryvorizkoho natsionalnoho universytetu, 2013. Vyp. 34. S. 57 - 61.

Отримана в редакції 12.06.2025. Прийнята до друку 18.06.2025. Received 12 June 2025. Approved 18 June 2025. Available in Internet 30 June 2025