

**УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ КОНУСНОЮ ДРОБАРКОЮ
СЕРЕДНЬОГО ДРОБЛЕННЯ**А.М. Тігарєв¹, Т.Г. Тігарєва²

¹Державний університет інтелектуальних технологій та зв'язку
1, Ковальська вул., м.Одеса, 65029, Україна
email: amtigar@ukr.net

²Одеська державна академія будівництва та архітектури
4, Дідріхсона вул., м.Одеса 65029, Україна
email: tatianatigareva@gmail.com

В статті розглядається система автоматизації конусної дробарки середнього дроблення та можливість її удосконалення шляхом використання оптимальної системи керування за допомогою лінійно-квадратичного регулятора з усуненням статичної похибки шляхом введення інтегральної складової. На підставі аналізу існуючих підходів до дробарки як об'єкту керування отримано параметричну схему дробарки. В роботі не розглядається питання щодо регулювання дисперсного складу готового продукту, тому параметрична схема була спрощена з урахуванням перехресних зв'язків між рівнем сировини в дробарці і продуктивністю дробарки. На підставі цього було розроблено її математична модель. З використанням цієї моделі дробарки розроблено модель системи керування за каналами, що впливають на рівень сировини в дробарці і продуктивність дробарки. Запропоновано модель оптимальної системи керування дробаркою за допомогою лінійно-квадратичного регулятора з усуненням статичної похибки шляхом введення інтегральної складової. Результати дослідження системи керування при різних комбінаціях збурень показали, що вона є субоптимальною. Це дозволяє застосування такої системи керування для використання в системі автоматизації дробарки, що забезпечить її роботу в оптимальних режимах при різній щільності сировини, а також в значній мірі її безаварійну роботу і зменшення зносу вузлів дробарки.

Ключові слова: конусна дробарка, керування, рівень сировини, продуктивність дробарки, передаточна функція, оптимальна система керування, математичне моделювання, лінійно-квадратичний регулятор.

Вступ. У цей час (в умовах так званого «рваного» виробництва) при відсутності гарантованих замовлень на постачання готового продукту підприємства змушені переглядати свою виробничу політику. Враховуючи постійне зростання цін на енергоносії, сировину, запасні частини та інше, для зменшення витрат на техобслуговування й поточний ремонт підприємства більше уваги приділяють зменшенню зношування й збереженню обладнання. Тому в якості одного із критеріїв зменшення затрат на виробництво товарної продукції починає використовуватися регулювання потужності. Таким чином, розробляється система регулювання потужності дробарки, навіть на шкоду продуктивності. Це дозволяє зменшити зношування обладнання, броньових плит, електроприводів дробарки.

Застосовувані на дробильно-сортувальних заводах і установках щоківі або конусні дробарки великого дроблення є головними агрегатами поточно-транспортних систем з переробки матеріалу [1–5]. Єдиним агрегатом потоку, що дозволяє регулювати його продуктивність, є щоківі або конусна дробарка первинного дроблення, які оснащені пластинчастим живильником, установленим під ємністю прийомного бункера, що акумулює дроблений матеріал. Завдання автоматизації дробарок середнього дроблення зводиться до підтримки незмінної, за умовами технологічного процесу, продуктивності в поточно-транспортній системі. Тому величина вихідної продуктивності дробарки середнього дроблення може бути використана в якості

параметра керування. Тісний зв'язок між потужністю, що витрачається на дроблення, й пропускною здатністю дробарки, призводить до створення декількох варіантів простого й комбінованого керування з використанням у якості регульованих параметрів потужності (або струму) двигуна подавального транспортеру (ПТ) для підтримання потрібного рівня сировини в дробарці. Контроль ступеня завантаження дробарки здійснюється шляхом підтримання номінального значення рівня в камері дроблення. При підвищенні рівня в камері дроблення потрібно зменшити потужність приводного електродвигуна подавального транспортеру ПТ сировини, у результаті чого знижується подача сировини в камеру дроблення. Це призводить до зменшення рівня сировини в камері дроблення і зменшенню продуктивності дробарки [2–5].

Мета роботи. Метою роботи є розгляд варіанта вдосконалення автоматичної системи, яка забезпечить оптимальне керування конусною дробаркою середнього дроблення для дроблення вапняку при виробництві цементу [6 – 9]. 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. Тому далі буде розглядатися не загальна система керування дробаркою, а завдання підтримання номінального режиму для зменшення зношування обладнання, броньових плит, електроприводу дробарки.

Матеріали та методи. Існує багато підходів до визначення конусної дробарки, як об'єкта керування й визначення її параметрів [10 – 13]. Більшість авторів вірно визначають параметри, що відносяться до вхідних керуючих впливів, збурень, вихідних вимірювань. Однак, окремі автори допускають грубі помилки. Наприклад, автор [13] відносить до керуючих впливів частоту хитань рухомого конуса, а автор [11] положення конуса, що обертається. Тому слід одразу визначити, що в сучасних конусних дробарках існують тільки три пристрої, якими можливо керувати. До них належать: потужність двигуна дробарки; потужність двигуна транспортеру, що завантажує сировину; пристрої, що змінюють положення конусів дробарки (наприклад, потужність двигуна насоса, якій змінює тиск в гідросистемі, що впливає на положення нижнього конуса або положення кільця, яке регулює зазор між конусами).

У результаті узагальненої параметричної схеми дробарки можна представити в наступному вигляді (рис. 1).

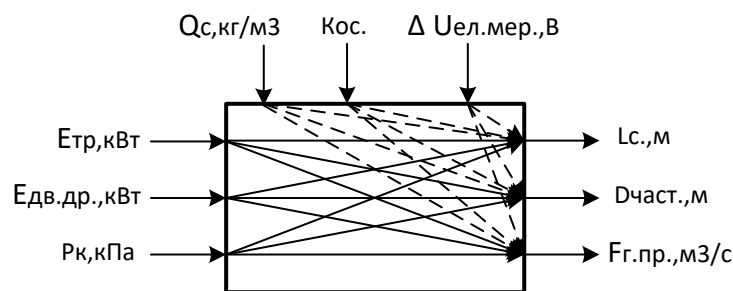


Рис. 1. Узагальнена параметрична схема конусної дробарки, як об'єкта керування

На рис.1: $E_{тр}$ – потужність транспортеру, що подає сировину в дробарку, кВт; $E_{дв.др.}$ – потужність двигуна дробарки, кВт; P_k – тиск в гідросистемі, що впливає на положення нижнього конуса дробарки, МПа; L_c – рівень сировини, що завантажена в дробарку, м; $D_{част.}$ – середній діаметр частинок готового продукту, м; $F_{г.пр.}$ – витрата готового продукту, м³/с; Q_c – щільність сировини, кг/м³; $K_{ос.}$ – конструктивні особливості дробарки, $\Delta U_{ел.мер.}$ – коливання напруги в електричній мережі, В.

Для визначення основних каналів й спрощення системи керування врахуємо, що конусні дробарки для подрібнення сировини для виробництва цементу звичайно

використовуються на другому етапі дроблення, і тому керування дисперсним складом не розглядається, оскільки готовий продукт має значне менший розмір шматків матеріалу і коливання їх розмірів значне менш впливають на подальшу переробку. Крім того, у зв'язку з тим, що сировина (вапняк) не належить до сировини підвищеної твердості, знос броні конусів відбувається досить повільно. Також враховуючі, що конусні дробарки зазвичай працюють в змінному режимі, і згідно з технологічним регламентом перед початком зміни виконуються перевірка стану броні і корегування положення конусів дробарки, то керування положенням конусів для підтримання дисперсного складу продукту на виході конусної дробарки теж не розглядається (таке керування може виконуватися окремою системою керування).

Найбільш прості схеми автоматизації використовують в якості керованого параметра рівень заповнення камери дроблення. При рівності продуктивності живильника й дробарки в режимі, що встановився, рівень заповнення змінюється незначно. У випадку зниження продуктивності дробарки живильник зупиняється або переводиться на знижену швидкість подачі [10 – 12].

На підставі цих міркувань для конусної дробарки середнього дроблення як об'єкта керування можливо вибрати два окремих канали керування: перший канал – «потужність двигуна завантажувального транспортеру – рівень в дробарці»; другий канал – «потужність двигуна дробарки – витрата сировини на виході з дробарки».

Інформацію про рівень сировини в конусній дробарці можливо отримувати за допомогою сучасних мікрохвильових рівнемірів.

У результаті спрощену параметричну схему конусної дробарки можна представити в наступному вигляді (рис. 2).

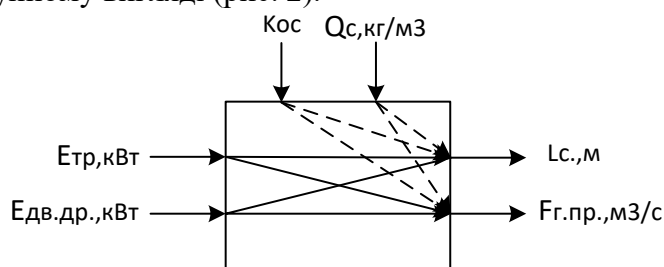


Рис. 2. Спрощена параметрична схема конусної дробарки як об'єкта керування

Основна частина. Для подальшої розробки системи керування розглянемо схему технологічного процесу подрібнення сировини в конусній дробарці середнього дроблення типу КСД-900, яка виготовляється в Україні (рис. 3).

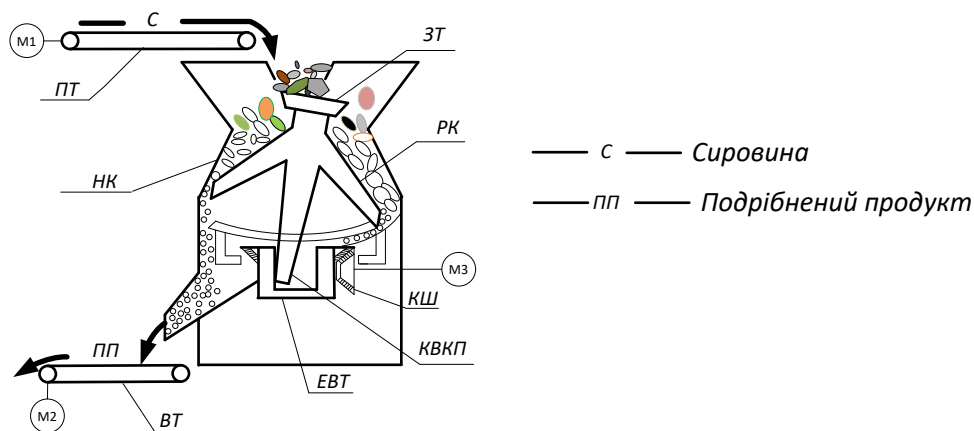


Рис. 3. Схема технологічного процесу подрібнення сировини конусною дробаркою
 ПТ – подавальний транспортер; КД – конусна дробарка; ВТ – транспортер для вивантаження; ЗТ – загрузочна тарілка; НК – нерухомий конус, РК – конус, що рухається; КШ – конусні шестерні; КВКП – конічний вал конусу, що подрібнює; ЕВТ – ексцентрикова вал-втулка

Технологічними та конструктивними параметрами конусної дробарки КСД-900, які визначають її математичну модель, є [13]: $a_k=1,5-2,5$ – коефіцієнт, що враховує невилітне падіння матеріалу в просторі дробарки; $h_k=2,5$ м, – величина шляху падіння від завантажувальної щілини до розвантажувальної, або практично від живильника до датчика витрати готового продукту, м; $c_k = 2,0$ – безрозмірний коефіцієнт, який для середніх умов при витраті сировини $F_c = 0,005\text{м}^3/\text{с}$; $n_k = 5,59\text{с}^{-1}$ – частота хитань конуса Основні технічні характеристики пристроїв та режимів, що використовуються при керуванні конусною приведені 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	2	3,5	5
	Витрата сировини, м ³ /с	0,01	0,014	0,02
Двигун дробарки	Потужність, кВт	25	38,5	55
Конусна дробарка	Рівень сировини, м	0,4	0,63	1

Математична модель дробарки має вигляд за каналами:

- потужність двигуна дробарки u_1 – витрата готового продукту y_1

$$P11 = \frac{0,000364}{1,05s^2 + 3,35s + 1} e^{-4,8s};$$

- потужність двигуна дробарки u_1 – рівень сировини в дробарці y_2

$$P12 = \frac{0,01638}{9s^2 + 6s + 1} e^{-3,2s};$$

- потужність двигуна транспортера u_2 – витрата готового продукту y_1

$$P21 = \frac{0,004}{1,05s^2 + 3,38s + 1} e^{-4,13s};$$

- потужність двигуна транспортера u_2 – рівень сировини в дробарці y_2

$$P22 = \frac{0,18}{7,5s^2 + 5,5s + 1} e^{-5s};$$

З урахуванням уведених позначень на підставі спрощеної параметричної схеми структурну схему математичної моделі дробарки представимо в наступному вигляді (рис. 4).

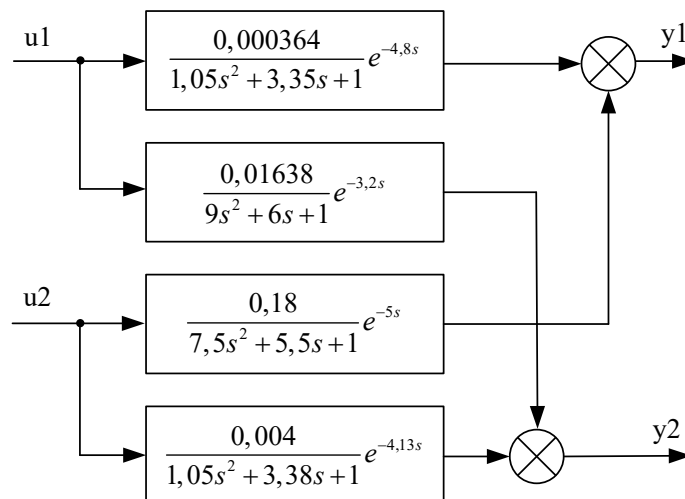


Рис. 4. Математична модель дробарки з урахуванням перехресних зв'язків

Враховуючи наявність перехресних зв'язків між потужністю двигуна дробарки й потужністю транспортера подачі сировини в дробарку, які впливають на витрату готового продукту й рівень сировини в дробарці, для побудови системи керування

дробаркою найкращим є оптимізаційний підхід. У зв'язку з наявністю можливостей у програмному пакеті MATLAB відповідних функцій для побудови оптимальних регуляторів розглянемо можливість застосування лінійно-квадратичного регулятора для його використання при керуванні конусною дробаркою.

Однак враховуючи, що лінійно-квадратичний регулятор є П-регулятором і має значну статичну похибку, виникає необхідність додавання інтегральної складової для її усунення.

Відомі різні способи реалізації цього підходу [14 – 17]. Більшість із них мають різні недоліки, які у першу чергу обумовлені неточністю моделі об'єкта, його нелінійністю, зміною його параметрів у часі та інші. Відомо, що в неперервному часі математична форма запису в вигляді простору станів не дозволяє представити чисте запізнення без апроксимації – частіше за все обирають апроксимацію Паде першого порядку [14]. Для синтезу цифрового регулятора переведемо математичну модель з неперервного в дискретний час (назвемо таку дискретну модель Pd_2). Цифрова система керування з лінійно-квадратичним регулятором має включати спостерігач стану й модель збурень в вигляді стрибку (інтегратор). В літературі описані дві структури систем автоматичного керування: з відновленням та без відновлення станів моделі збурення (вони і так відомі) [14]. Для реалізації виберемо систему без відновлення станів моделі збурення.

Розробка моделі керування з використанням лінійно-квадратичного регулятора в програмному пакеті MATLAB виконана в наступній послідовності.

1. Апроксимуємо запізнювання в МПФ ланкою 1 порядку.
2. Переводимо перетворену МПФ в простір станів в неперервному часі.
3. Виконуємо дискретизацію систем і отримуємо дискретну систему $Pd_2 \{A, B, C, D\}$ в просторі станів з кроком дискретності 1 с.

4. Введемо значення вагових коефіцієнтів $Q_{IK1}, Q_{IK2}, Q_{IL}, R_{IK}, R_{IL}$.

Для початку доцільно їх прийняти одиничними.

5. Сформуємо вагові матриці: $Q_1 = \begin{bmatrix} C^T \cdot Q_{IK1} \cdot C & 0 \\ 0 & Q_{IK2} \end{bmatrix}, R_1 = R_{IK}$

6. Розрахуємо регулятор стану з інтегральною складовою за допомогою функції $K=lqi(Pd_2, Q_1, R_1)$.

Ця функція використовує розширену матрицю моделі виду (I – одинична матриця).

$$A_1 = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C \cdot \Delta t & I \end{bmatrix}, B_1 = \begin{bmatrix} B \\ -D \cdot \Delta t \end{bmatrix}.$$

7. Сформуємо наглядач стану за допомогою функції $dlqr$ для матриць системи Pd_2

$$L = dlqr(A^T, C^T, Q_{IL}, R_{IL})^T.$$

8. Сформуємо регулятор C_1 , як систему в дискретному просторі станів зі спостерігачем за допомогою команд $L = estim(Pd_2, L, [1:m]), C_1 = lqgtrack(L, K)$,

де $m = 2$ – кількість входів й виходів.

Моделювання перехідних процесів ведеться за допомогою пакету візуального імітаційного моделювання Simulink. При моделюванні розроблений цифровий регулятор підключимо до моделі в неперервному часі. Зовнішній вигляд схеми розробленої системи керування дробаркою за обраними каналами в програмному пакеті Simulink має наступний вигляд (рис. 5).

Основним збуренням при роботі конусної дробарки при виробництві цементу є щільність вапняку, яка складає $2700-2900 \text{ кг/м}^3$, тобто може коливатися в межах $\approx \pm 100 \text{ кг/м}^3$ або 3.6%. При підвищенні щільності вапняку для дроблення шматка потрібна більша потужність двигуна дробарки й при цьому час перебування шматка в дробарці

зростає. При цьому спадає продуктивність дробарки. При використанні сировини навіть із одного з кар'єру залежність співвідношення сировини підвищеної твердості й меншої твердості невідома. Тому завжди спостерігається коливання потужності двигуна транспортеру і двигуна дробарки і відповідно її продуктивності.

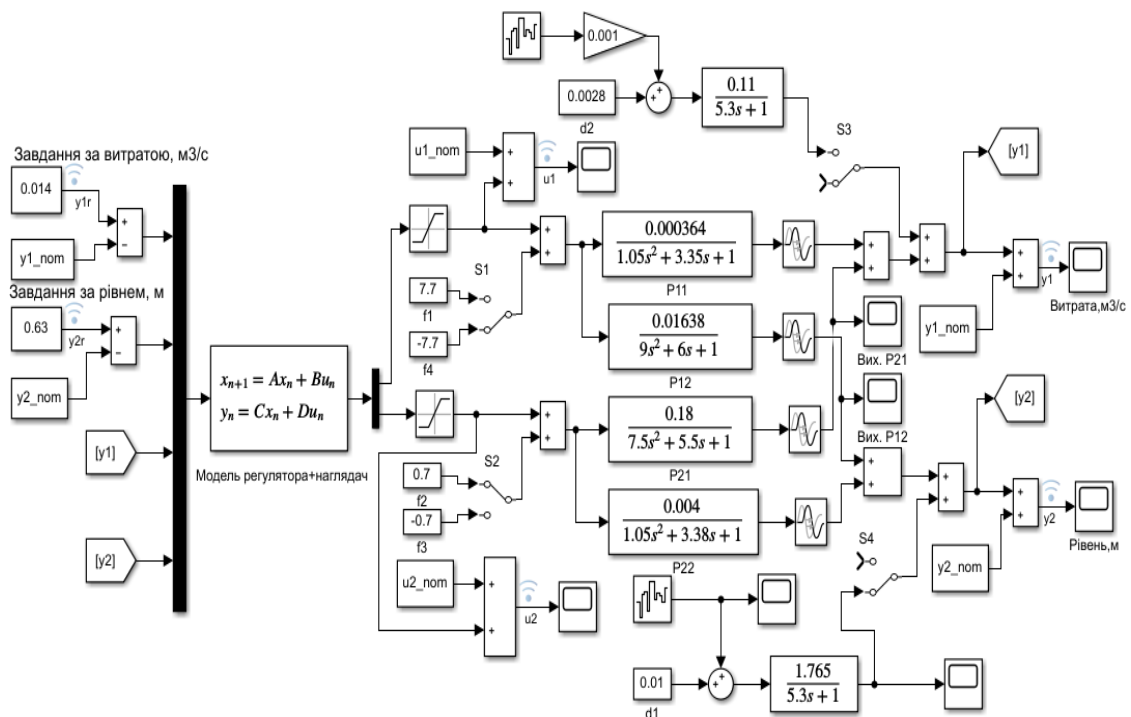


Рис. 5. Модель системи регулювання рівня сировини в дробарці і продуктивності дробарки за готовим продуктом

Припускаючи, що ці коливання підкоряються нормальному закону розподілу, представимо модель збурювань у вигляді послідовного з'єднання генератора білого шуму Band-Limited White Noise і аперіодичної ланки першого порядку.

Припускаючи, що залежність між продуктивністю дробарки, рівнем сировини і щільністю вапняку має лінійну залежність, тоді модель збурювань обома каналами: подачі сировини і продуктивності дробарки буде мати аналогічну структуру. На підставі цих міркувань виконано дослідження впливу щільності сировини шляхом подачі сигналів збурень на виходи відповідних каналів.

На підставі експериментальних відомостей, що приведені в [18] і описують часові реалізації ширини розвантажувальної щілини і потужності електроприводу дробарки, які виміряні у процесі дроблення руди, вважаємо, що вони аналогічно характеризують і часові коливання потужності дробарки і завантажувального транспортеру. На підставі цих відомостей була вибрана частота коливань $\approx 0,3-0,4$ Гц, а максимальне відхилення амплітуди коливань $\approx 20\%$ від продуктивності дробарки і рівня сировини визначено параметри налаштування генератора білого шуму при побудові моделі цих збурень. Для забезпечення можливості підключення цих моделей до системи керування передбачені перемикачі S3 і S4.

При моделюванні були проведені дослідження при всіх можливих комбінаціях, і визначено, що система керування забезпечує роботу дробарки в припустимих межах. Найгіршими комбінаціями збурень при роботі дробарки будуть максимальний щільність сировини і максимальна потужність двигуна дробарки. Перехідні процеси системи керування приведені на рис. 6 та 7.

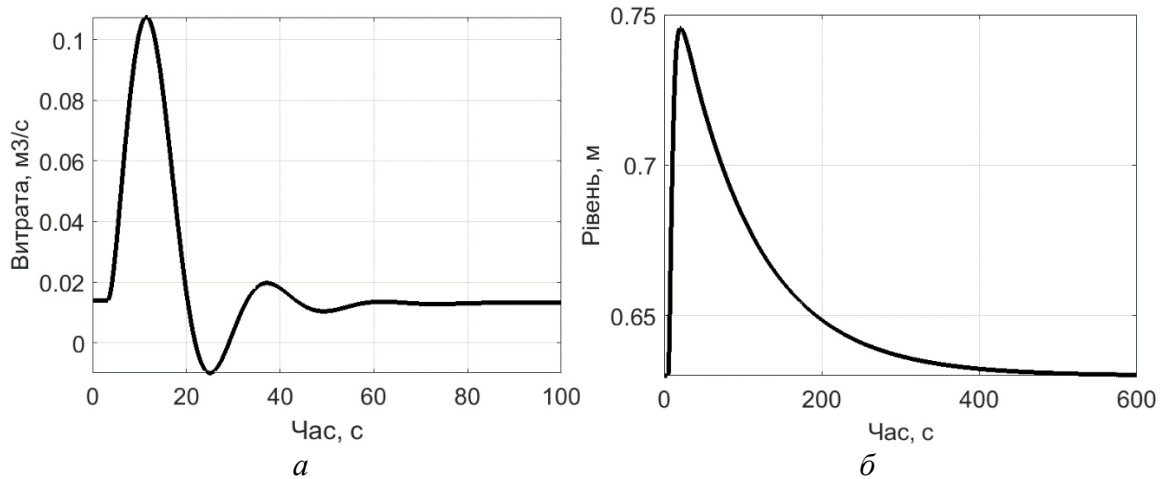


Рис. 6. Перехідні процеси зміни витрати готового продукту (а) та рівня сировини в дробарці (б) при завданнях $y1r$, $y2r$ і найгіршій комбінації збурень з ключами S1–S2.

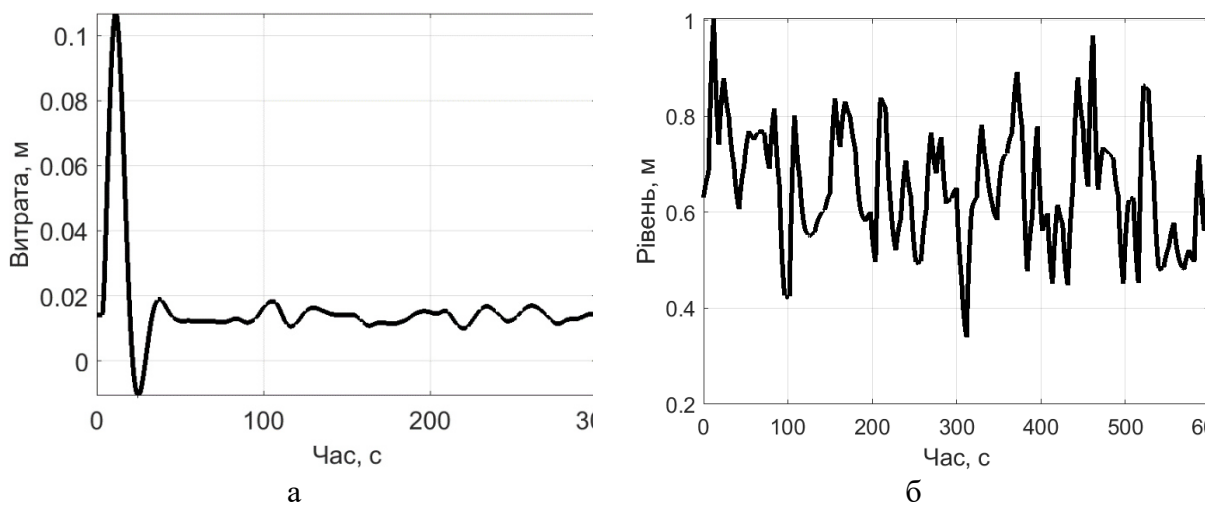


Рис. 7. Перехідні процеси зміни витрати готового продукту (а) та рівня сировини в дробарці (б) при завданнях $y1r$, $y2r$ і найгіршій комбінації збурень з ключами S3–S4.

Аналіз перехідних процесів показує, що запропонована система керування є сталою. Крім того, результати моделювання показують, що навіть при найгірших комбінаціях збурень відхилення продуктивності і рівня сировини в дробарці не перевищують заданих значень.

Висновки. Запропонована метод удосконалення система керування конусною дробаркою середнього дроблення, що використовується для дроблення вапняку при виробництві цементу. 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 КСД-900 Харківського заводу промислового обладнання «ПРОГРЕС» з застосуванням цифрового лінійно-квадратичного регулятора з інтегральною складовою в програмному пакеті MATLAB-Simulink. Проведено моделювання системи при різних збуреннях. Визначено, що запропонований підхід робить систему керування квазіоптимальною. Розроблена система керування забезпечує підтримання завдань за потужністю двигуна дробарки и рівнем сировини в межах $\pm 20\%$ відхилень керуючих впливів, що обумовлено коливанням щільності сировини. Також потужність двигуна дробарки і двигуна транспортеру не перевищує максимальне допустимих значень. Це дозволяє рекомендувати запропоновану систему керування для застосування при розробці промислових систем

керування конусною дробаркою середнього дроблення для дроблення вапняку при виробництві цементу.

Список літератури

1. Андреев С. Е., Перов В. А., Зверевич В. В. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. Москва : Недра, 1980. 415 с.
2. Пивняк Г.Г., Вайсберг Л.А., Кириченко В.И., Пилов П.И., Кириченко В.В. Измельчение. Энергетика и технология. Москва : Руда и металлы, 2007. 296с.
3. Оборудование для переработки сыпучих материалов: учебное пособие / В.Я. Борщев, Ю.И. Гусев, М.А. Промтов, А.С. Тимонин. Москва : Машиностроение-1», 2006. – 208 с.
4. Линч А.Дж. Циклы дробления и измельчения. Моделирование, оптимизация, проектирование и управление. Москва : Недра, 1981. 343 с.
5. Воробьев Н. И., Новик Д.М. Обогащение полезных ископаемых. Минск : БГТУ, 2008. 174 с.
6. Цементні заводи України URL : <https://energosteel.com/cementnye-zavody-ukrainy/>
7. Сировинна база для виробництву цементу URL: <https://www.karer.in.ua/limestones.php>
8. Види вапняків URL: <https://www.voscem.ru/articles/cement-material/ karbonat/>
9. Вапняк технічні характеристики URL: <https://www.karer.in.ua/limestones.php>
10. Олейников В. А., Тихонов О. Н. Автоматическое управление технологическими процессами в обогатительной промышленности. Москва : Недра, 2006. 355 с.
11. Троп А. Е., Козин В.З., Прокофьев Е.В. Автоматическое управление технологическими процессами обогатительных фабрик: технический справочник. Москва : Недра, 1986. 303 с.
12. Марюта А.Н., Качан Ю.Г., Бунько В.А. Автоматическое управление технологическими процессами обогатительных фабрик. Москва : Недра, 1983. 277 с.
13. Комаров А.Я., Прокофьев Е.В. Аналитическое определение параметров статических и динамических характеристик щековых и конусных дробилок: *Известия Уральского государственной горно-геологической академии. Серия: Горная электромеханика.* 1997. Вып. 6. С. 181-189.
14. Стопакевич А.А. Системный анализ и теория сложных систем управления. Одесса : Астропринт, 2013. 352 с.
15. Di Ruscio D. Discrete LQ optimal control with integral action: A simple controller on incremental form for MIMO systems. *Modeling, Identification and Control.* 2012. V. 33. No. 2., P. 35-44.
16. Anderson B. D. O., Moore J. B. Optimal Control: Linear Quadratic Methods. Prentice-Hall International Editions, 1989.
17. Johansson K. H. Interaction bounds in multivariable control systems. *Automatica.* 2002. V.38. No.2. P. 1045–1051. DOI:10.1016/S0005-1098(01)00285-0
18. Михайленко О.Ю., Щокін В.П., Федоренко П.Ю. Аналіз впливу ширини розвантажувальної щілини на споживання електричної енергії конусної: *Вісник Криворізького національного університету.* 2013. Вип. 34. С. 57-61.

A.M. Тігарєв, Т.Г. Тігарєва

IMPROVEMENT OF THE MEDIUM CRUSHER CONE CONTROL SYSTEM

A.M.Tigarev¹, T.G. Tigareva²

¹State University of Intellectual Technologies and Communications
1, Kovalska st., Odesa, 65029, Ukraine
email: amtigar@ukr.net

²Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture
4, Didrichson st., Odesa, 65029, Ukraine
email: tatianatigareva@gmail.com

The article discusses the control system of the cone crusher of medium crushing and the possibility of its improvement. Based on the analysis of the existing approaches to the crusher, the parametric scheme of the crusher is obtained as a control object. The work does not address issues related to the regulation of the dispersed composition of the finished product. Therefore, the parametric scheme was simplified taking into account the cross-links between the level of raw materials in the crusher and the capacity of the crusher. Based on this, a mathematical model was developed. A model of an optimal crusher control system using a linear-quadratic regulator with elimination of static error by introducing an integral component is proposed. The results of the study of this model with different combinations of perturbations showed that it is suboptimal. Thus, this will allow the use of such a control system to automate the crusher, which will provide its work in optimal modes at different density of raw materials, as well as to a large extent ensure its accident-free operation and reduce wear of the crusher units.

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

