

УДК 681.513:691.216

ЕКСТРЕМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ ПРОДУКТИВНІСТЮ ПОМЕЛУ ВАПНЯКУ У ДВОКАМЕРНОМУ КУЛЬОВОМУ МЛИНІ

УЖЕЛОВСЬКИЙ В. О.^{1*}, к. т. н., доц.,

РУДЕНКО О. А.^{2*}, маг.

¹ Кафедра автоматики та електротехніки, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (056) 372-06-82, e-mail: uzhelovsky2015@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-2908-3116

² Кафедра автоматики та електротехніки, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 46-93-19, e-mail: olenka.rudenko@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7131-6964

Анотація. Постановка проблеми. Продуктивність кульових млинів – важливий технологічний параметр. Оптимізація завантаження млина допоможе отримати максимальну ефективність помелу вапняку. **Аналіз літератури.** У наукових працях із питань керування технологічним процесом помелу у кульових млинах, зокрема, Б. В. Алексєєва, А. А. Максименко, Е. В. Утеуша, Д. Д. Бапата, А. Д. Камінського, доведено, що оцінка ефективності управління помелом вапняку у кульовому млині є багатокритеріальною і повинна передбачати досягнення максимально можливої продуктивності і необхідної тонкості помелу при мінімальних витратах електроенергії. Суттєвий фактор впливу на продуктивність млина – це рівень завантаження вапняком. **Мета дослідження** – підвищення продуктивності двокамерного кульового млина шляхом підтримання оптимального рівня завантаження барабана вапняком. **Висновки.** 1. У пакеті Matlab розроблено і досліджено імітаційну модель системи екстремального керування продуктивністю кульового млина шляхом оптимізації рівня заповнення барабана вапняком. 2. На стадії проектних робіт імітаційна модель дозволяє виконувати дослідження впливу різних факторів на продуктивність роботи млина та обчислювати попередні значення параметрів налагоджування екстремального регулятора з метою отримання бажаного перехідного процесу із заданою точністю.

Ключові слова: імітаційне моделювання, вапняк, рівень заповнення, продуктивність, екстремальне регулювання

ЭКСТРЕМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬЮ ПОМОЛА ИЗВЕСТНЯКА В ДВУХКАМЕРНОЙ ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЕ

УЖЕЛОВСЬКИЙ В. А.^{1*}, к. т. н., доц.,

РУДЕНКО Е. А.^{2*}, маг.

¹ Кафедра автоматики и электротехники, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (056) 372-06-82, e-mail: uzhelovsky2015@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-2908-3116

² Кафедра автоматики и электротехники, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (0562) 46-93-19, e-mail: olenka.rudenko@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7131-6964

Аннотация. Постановка проблемы. Производительность шаровых мельниц – важный технологический параметр. Оптимизация загрузки мельницы поможет получить максимальную эффективность помола известняка. **Анализ литературы.** В научных работах по вопросам управления технологическим процессом помола в шаровых мельницах, в частности, Б. В. Алексеева, А. А. Максименко, Э. В. Утеуша, Д. Д. Бапата, А. Д. Каминского, доказано, что оценка эффективности управления помолом известняка в шаровой мельнице является многокритериальной и должна предусматривать достижение максимально возможной производительности и необходимой тонкости помола при минимальных затратах электроэнергии. Существенным фактором влияния на производительность мельницы является уровень загрузки известняком. **Цель исследования** – повышение производительности двухкамерной шаровой мельницы путем поддержания оптимального уровня загрузки барабана известняком. **Выводы.** 1. В пакете Matlab разработана и исследована имитационная модель системы экстремального управления производительностью шаровой мельницы путем оптимизации уровня заполнения барабана известняком. 2. На стадии проектных работ имитационная модель позволяет выполнять исследования влияния различных факторов на производительность работы мельницы и определять предыдущие значения параметров налаживания экстремального регулятора с целью получения желаемого переходного процесса с заданной точностью.

Ключевые слова: имитационное моделирование, известняк, уровень заполнения, производительность, экстремальное регулирование

EXTREME MANAGEMENT OF PERFORMANCE GRINDING OF LIMESTONE INTO TWO-CHAMBER BALL MILLS

UZHELOVSKY V. A. ^{1*}, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,

RUDENKO E. A. ^{2*}, *Master*

¹Department of automation and electrical engineering, the state university «Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture», St. Chernyshevsky, 24-a, 49600, Dnipropetrovsk, Ukraine, phone +38 (056) 372-06-82, e-mail: uzhelovsky2015@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-2908-3116

²Department of automation and electrical engineering, the state university «Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture», St. Chernyshevsky, 24-a, 49600, Dnipropetrovsk, Ukraine, phone +38 (0562) 46-93-19, e-mail: olenka.rudenko@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7131-6964

Summary. Problem statement. The productivity of ball mills is an important process parameter. Optimization of loading of the mill will get the maximum efficiency of grinding limestone. **Analysis of the present research.** In the scientific work on the process control of grinding in ball mills, particularly interesting are the work of Alekseev B. V., Maksimenko A. A., Uteush E. V., Bapat D. D., Kaminsky A. D. It is proved that the assessment of management effectiveness limestone grinding in a ball mill is a multiobjective and must provide to achieve the highest possible performance and the required fineness of electricity at the lowest cost. A significant factor affecting the performance of the mill is utilization level of limestone. **Purpose.** Performance of two-chamber ball mill increased by maintaining an optimal level of loading of the drum limestone. **Conclusions.** 1. In Matlab package developed and investigated simulation model of extreme performance management of a ball mill by optimizing the filling level of the drum limestone. 2. Simulation model allows you to study the influence of various factors on the performance of the mill and determine the previous settings establish extreme regulator to obtain the desired transition process with a given accuracy at the stage of design work.

Keywords: *imitating modeling, limestone, fill level, performance, extreme regulation*

Постановка проблеми. В умовах ринкових відносин та розвитку промисловості будівельних матеріалів різко зростає попит на продукцію підприємств із виробництва цементу. Великого значення набувають питання поліпшення якості вапняку і зниження його собівартості, необхідності збільшення надійності, продуктивності і терміну експлуатації технологічних агрегатів. Найбільш перспективний напрям вирішення цих питань – це створення і впровадження на цементних підприємствах АСУ (автоматизованих систем управління).

Помел різних видів матеріалів – основна технологічна операція в різних галузях промисловості: виробництві будівельних матеріалів, гірничорудній, харчовій, фармацевтичній та ін. При значних обсягах помелу продукту класу «мінус 100 мкм» у багатьох галузях базовими помольними агрегатами є трубні кульові млини.

Одним із факторів, що стримують поширення цих млинів, є їх низький ККД [2; 3; 4; 5; 12], який коливається в межах 0,5–2%. Тому необхідно приділяти увагу питанням підвищення ефективності роботи кульових млинів.

Аналіз літератури. У наукових працях із питань керування технологічним процесом

помелу у кульових млинах стверджується, що оцінка ефективності керування помелом багатокритеріальна і повинна передбачати досягнення максимальної продуктивності за необхідної тонкості помелу та мінімальних витрат електроенергії [6]. До використання систем керування узгодження даних критеріїв визначалося системою цінностей та переваг осіб, що приймали рішення: операторів, фахівців-технологів, інженерів виробничого відділу підприємства.

Для збільшення продуктивності помелу слід молотні тіла (найчастіше це – кулі) замінювати кульпесами, які мають відношення довжини до діаметра близько 2 [1]. Також указано, що тонкість помелу матеріалу і, відповідно, продуктивність млина залежить від твердості розмелюваного матеріалу. Розмельність вапняку дорівнює 1,2–1,8 порівняно з розмельністю клінкеру, яка приймається за одиницю.

Актуальним є створення систем автоматичного регулювання, які реагують на основне збурення (навантаження) і його похідні в часі. Сучасні можливості дозволяють створити системи, які поєднують у собі регулювання за відхиленням і регулювання за збуренням [13].

Отже, на продуктивність помелу вапня-

ку впливають багато різних факторів. Один з основних – рівень завантаження млина вапняком.

Залежність продуктивності млина від рівня його завантаження розглянута в [11] і підтверджує складну екстремальну залежність показників.

Мета дослідження. Підвищення продуктивності двокамерного кульового млина шляхом підтримання оптимального рівня завантаження барабана вапняком.

Виклад матеріалу. В науковій роботі у

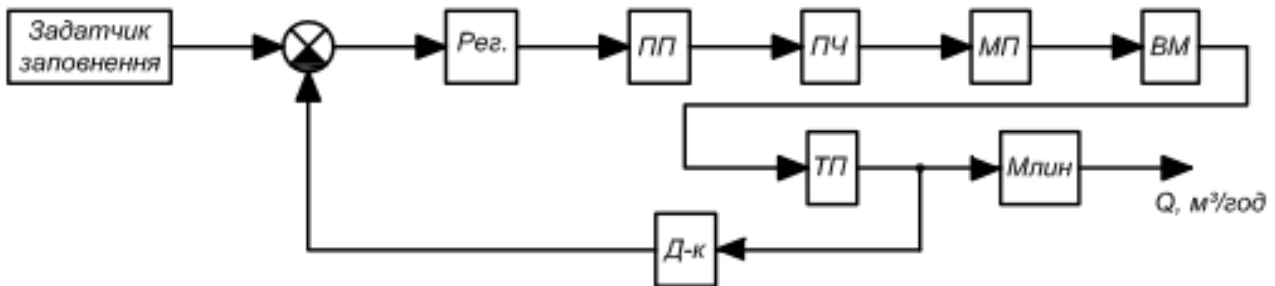


Рис. 1. Загальна структурна схема САР за контуром заповнення: Рег-р – ПІД-регулятор; ПП – попередній підсилювач; ПЧ – перетворювач частоти; МП – магнітний пускач; ВМ – виконавчий механізм; ТП – тарілчастий живильник; Д-к – датчик заповнення (електроакустичний пристрій)

Контур регулювання заповнення (рис.2) включає передатні функції елементів системи: блок завдання заповнення (Constant), ПІД-контролер (PIDController), попередній підсилювач (Gain, Gain3, Gain4), перетво-

пакеті Matlab для досягнення поставленої мети розроблено і досліджено імітаційну модель системи екстремального керування продуктивністю кульового млина шляхом підтримки оптимального рівня заповнення барабана вапняком. З метою отримання максимальної продуктивності було розроблено структурну схему, в якій враховано елементи контуру заповнення, що взаємодіють, та відображається процес, який відбувається у контурі (рис.1).

рювач частоти (Gain1), виконавчий механізм (TransferFcn), тарілчастий живильник (TransferFcn1, TransportDelay), млин (TransferFcn2), датчик заповнення (Gain2) [7; 9; 10].

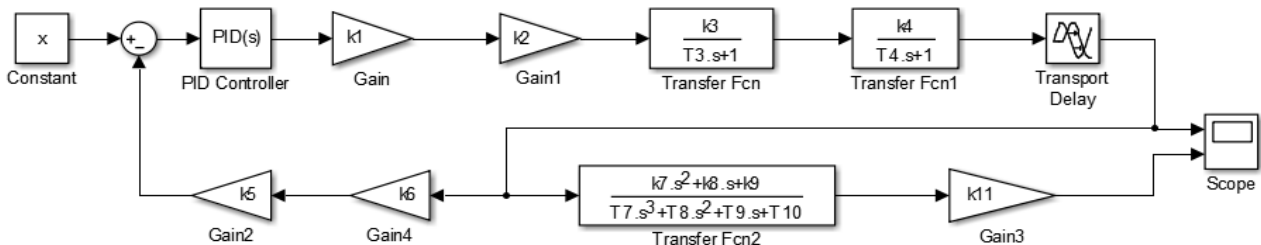


Рис. 2. Структурна схема САР за контуром регулювання

Підтримка оптимальної продуктивності із заданою якістю помелу вапняку досягається за допомогою екстремального регулювання (шляхом знаходження екстремуму статичної характеристики залежності про-

дуктивності млина від заповнення його барабана вапняком) [11]. Знайдемо рівняння лінії тренду $y = f(x)$, яке з точністю $R^2 = 0,9944$ відображає вищезначену залежність (рис.3):

$$y = 0,00002x^3 - 0,0024x^2 + 0,0872x + 0,0092 \quad (1)$$

За допомогою блоку Fcn реалізуємо рівняння (1) у пакеті Matlab, знайдемо похідні та отримаємо модель екстремального регулятора. Визначення похідної здійснюється

за допомогою блоку ділення Product – похідна із сигналу на початку рівняння ділиться на похідну із сигналу виходу блоку Fcn (рис. 4.).

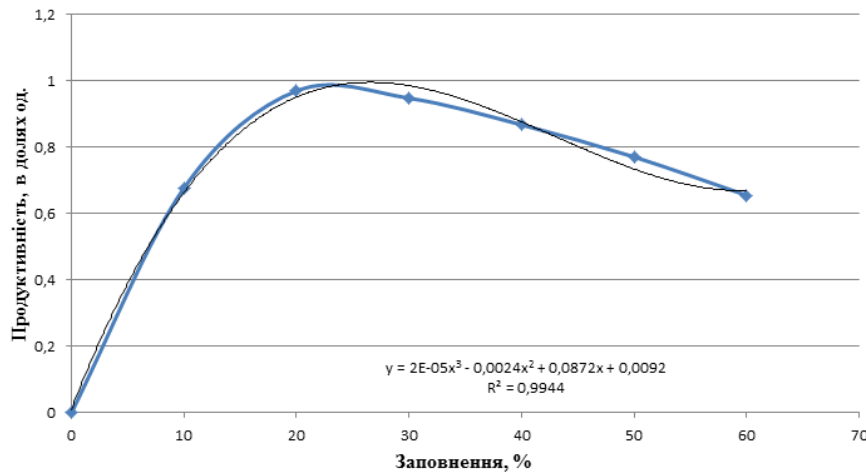


Рис. 3. Графік залежності продуктивності млина від його заповнення вапняком

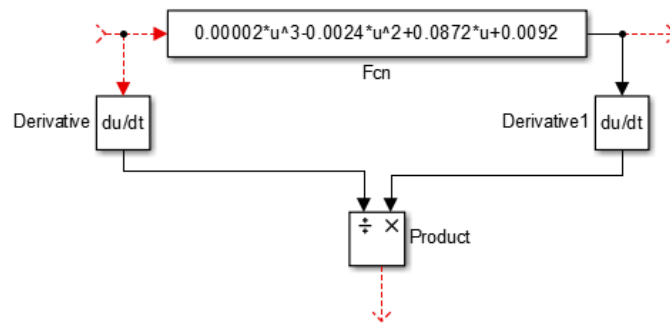


Рис. 4. Модель екстремального регулятора

З метою уникнення ділення на 0 додаємо до першої похідної поправний коефіцієнт. Результат похідної сумується з поправним коефіцієнтом (Constant 1) і подається у контур регулювання заповнення. Виконавчий механізм регулює завантаження вапняку, підтримуючи таким чином оптимальну продуктивність млина.

За допомогою функції PidTuner у блоку PID Controller можна розрахувати оптима-

льні значення коефіцієнтів контролера з ПІД-законом регулювання. Результати розрахунку наведено на рисунку 6. Після підставлення налагоджувальних коефіцієнтів отримано аперіодичний перехідний процес із перерегулюванням 6,67% (заповнення барабана вапняком відповідає параметру S, м³) та аперіодичний процес без перерегулювання (продуктивність відповідає параметру Q, м³/год.) (рис. 7).

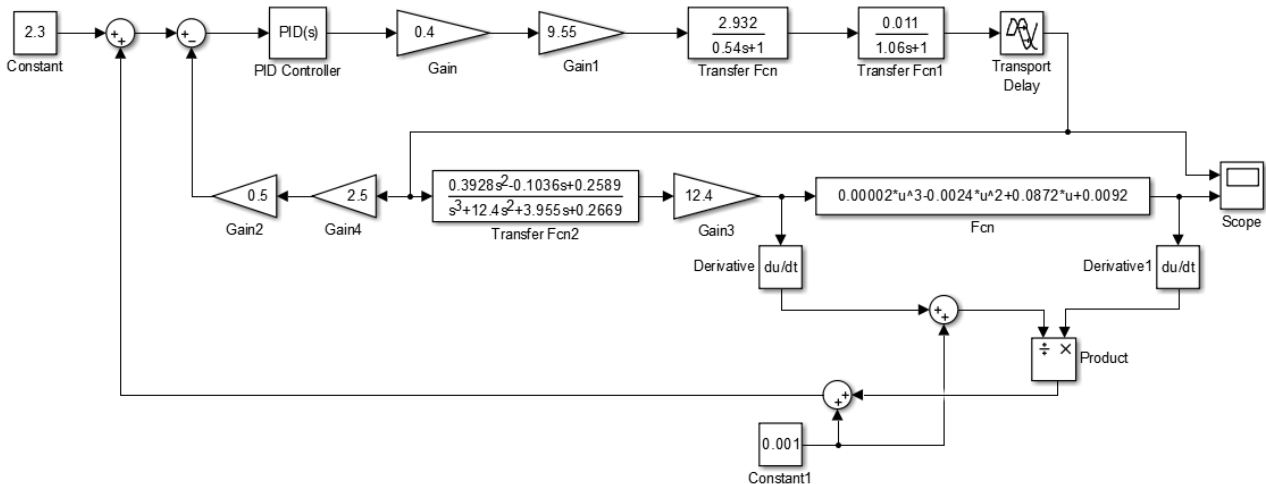


Рис. 5. Структурна схема екстремального керування заповнення вапняком кульового млина з підтримкою оптимальної продуктивності

Controller Parameters		
	Tuned	Block
P	1.6817	1.6817
I	2.157	2.157
D	0	0
N	100	100

Performance and Robustness		
	Tuned	Block
Rise time	3.4 seconds	3.4 seconds
Settling time	11.2 seconds	11.2 seconds
Overshoot	6.67 %	6.67 %
Peak	1.07	1.07
Gain margin	12.6 dB @ 1.07 rad/s	12.6 dB @ 1.07 rad/s
Phase margin	60 deg @ 0.322 rad/s	60 deg @ 0.322 rad/s
Closed-loop stability	Stable	Stable

Рис. 6. Коефіцієнти PID Controller

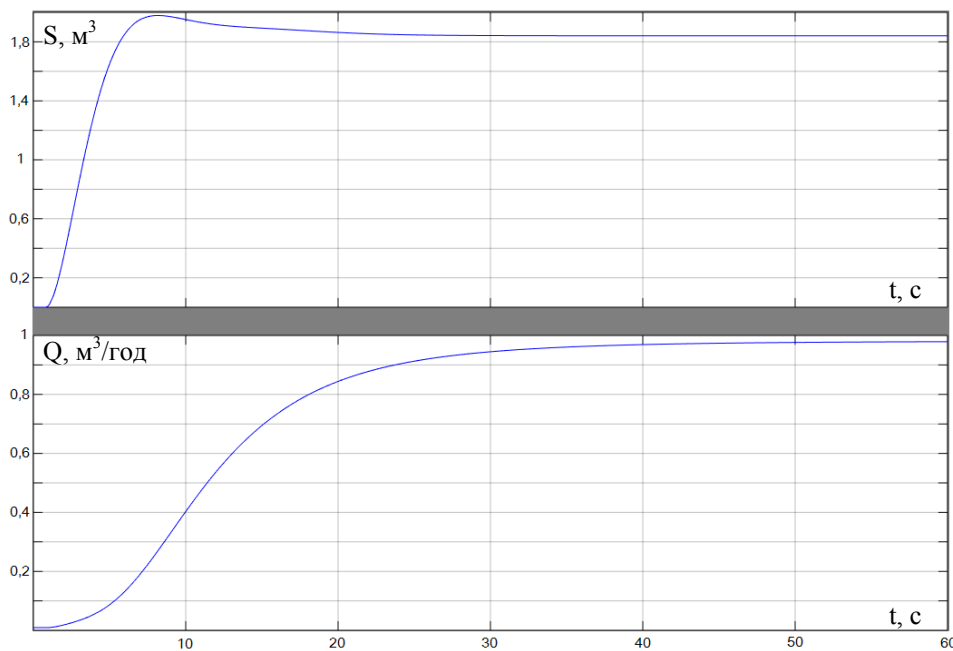


Рис. 7. Отримані перехідні процеси заповнення барабана S та щодо продуктивності Q

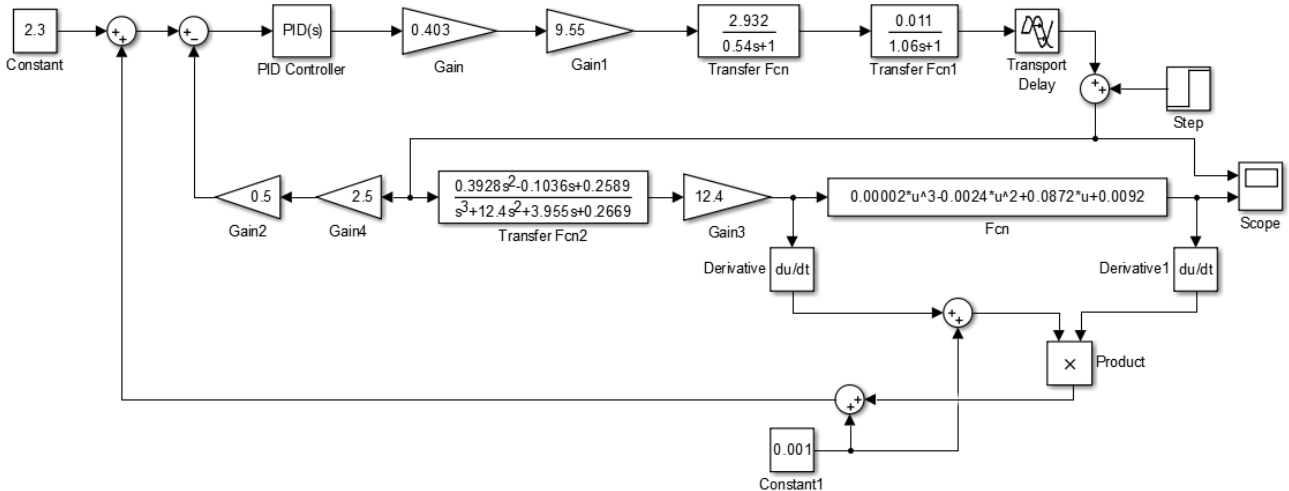


Рис. 8. Структурна схема екстремального керування заповнення вапняком кульового млина з підтримкою оптимальної продуктивності з включенням вузла зовнішніх збурень

На роботу САР впливають не лише сигнали керування, а також збурювальні дії, що безпосередньо можуть порушити роботу системи. Необхідно, щоб система при будь-яких збуреннях, що надходять іззовні, підтримувала значення заданих параметрів. У зв'язку з цим як збурювальну дію у сис-

тему було введено блок Step, який імітував зовнішній вплив (рис. 8).

Отримано перехідні процеси, що відображають роботу САР, в якій за рахунок уведення блоку екстремального керування підтримуються всі задані параметри (рис. 9).

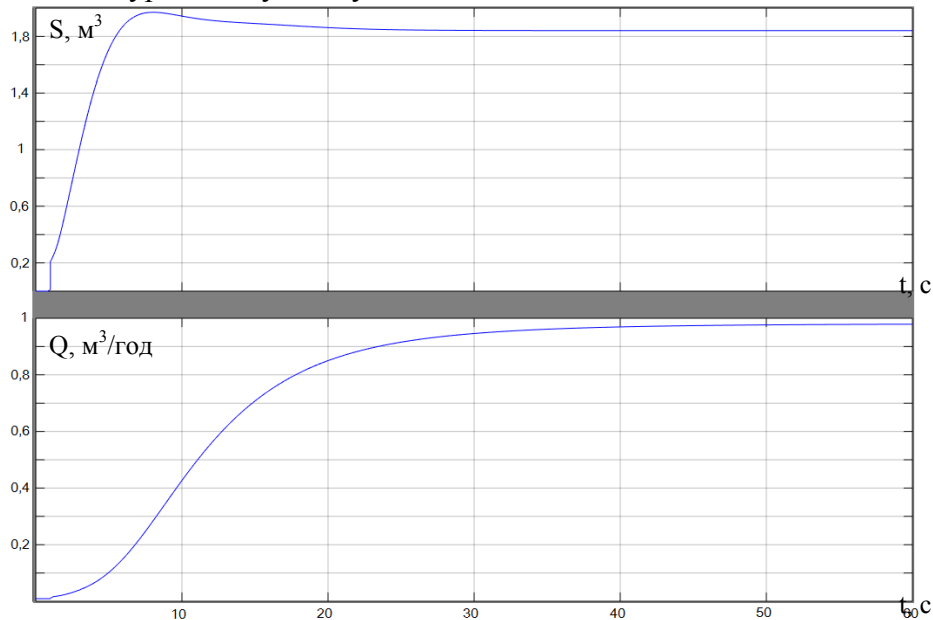


Рис. 9. Перехідні процеси САР за впливу зовнішніх збурень

Висновки. 1. У пакеті Matlab розроблено і досліджено імітаційну модель системи екстремального керування продуктивністю кульового млина шляхом оптимізації рівня заповнення барабана вапняком.

2. На стадії проектних робіт імітаційна модель дозволяє виконувати дослідження

впливу різноманітних факторів на продуктивність роботи млина та визначати попередні значення параметрів налагоджування екстремального регулятора з метою отримання бажаного перехідного процесу із заданою точністю.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Алексеев Б. В. Технология производства цемента / Б. В. Алексеев. – Москва : Высш. школа, 1980. – 266 с.
2. Андреев Е. Наиболее выгодное число оборотов шаровой мельницы / Е. Андреев // Горный журнал. – 1954. – № 10. – С. 44–49.
3. Бапат Д. Д. Повышение качества цемента с использованием современных процессов помола / Д. Д. Бапат // Цемент и его применение. – 1999. – № 2. – С. 8–10.
4. Берк Г. Опыт эксплуатации первой мельницы LM 56.3+3 в Турции / Г. Берк, Х. А. Фишер, К. Х.-Вайбадт // Цемент. Известь. Гипс. – 2008. – № 1. – С. 36–40.
5. Каминский А. Д. Некоторые вопросы теории помола в многотрубных мельницах / А. Д. Каминский, А. А. Каминский // Цемент. – 1980. – № 7. – С. 8–10.
6. Максименко А. А. Советующая система с нечеткой логикой по управлению мельницей помола клинкера : автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук : 05.13.07 / А. А. Максименко. – Белгород, 2000. – 32 с.
7. Машины и аппараты химических производств / [Доманский И. В., Исаков В. П., Островский Г. М., Решанов А. С., Соколов В. Н.] ; под общ. ред. В. Н. Соколова. – Ленинград : Машиностроение, 1982. – 384 с.
8. Нові вимоги щодо оформлення списку літератури // Бюлетень ВАК України. – 2009. – № 5. – Режим доступу: http://lib.ru.if.ua/file/bibl_opis.pdf.
9. Попович М. Г. Теорія автоматичного керування / М. Попович, О. Ковальчук. – Київ : Либідь, 1997. – 544 с.
10. Расчет исполнительных, корректирующих и преобразовательных элементов автоматических систем : справ. пособие / [Чинаев П. И., Чумаков Н. М., Жданов А. П., Панов В. И., Сивов Н. С., Судлочевский А. И., Чугунов И. И.] ; под общ. ред. Н. М. Чумакова. – Киев : Техніка, 1971. – 308 с.

11. Справочник по обогащению руд : в 4 т. / гл. ред. О. С. Богданов. – Москва : Недра, 1982-1984. – Т. 1 : Подготовительные процессы. – 1982. – 367 с.
12. Ужов В. Н. Очистка промышленных газов электрофильтрами / В. Н. Ужов – Москва : Химия, 1967. – 344 с.
13. Утеуш Э. В. Основы автоматизации измельчения материалов в шаровых мельницах. / Э. В. Утеуш, З. В. Утеуш. – Москва : Химия, 1968. – 156 с.

REFERENCE

1. Alekseev B.V. *Tekhnologiya proizvodstva tsementa* [Technology of cement production]. Moskva: Vysh. shkola, 1980, 266 p. (in Russian).
2. Andreev E. *Naivyygodneshee chislo oborotov sharovoy melnitsy* [The most profitable rotation number of ball mills]. *Gornyj zhurnal* [Mining journal]. 1954, no. 10, pp. 44-49. (in Russian).
3. Bapat D.D. *Povyshenie kachestva tsementa s ispol'zovaniem sovremennykh protsessov pomola* [Improving the cement quality using modern milling processes]. *Tsement i ego primenenie* [Cement and its implication]. 1999, no. 2, pp. 8-10. (in Russian).
4. Berk G., Fischer H.A. and Vajbadt K.H. *Opyt ekspluatatsii pervoy melnitsy LM 56.3 + 3 v Turtsii* [Operating experience of the first mill LM 56.3 + 3 in Turkey]. *Tsiment. Izvest'. Gips* [Cement. Limestone. Gyps]. 2008, no. 1, pp. 36-40. (in Russian).
5. Kaminskij A.D. and Kaminskij A.A. *Nekotorye voprosy teorii pomola v mnogotrubnykh melnitsakh* [Some questions in the theory of grinding in multiple-tube mills]. *Tsiment* [Cement]. 1980, no. 7, pp. 8-10. (in Russian).
6. Maksimenko A.A. *Sootvestvuyushchaya sistema s nechetkoj logikoj po upravleniyu melnitsej pomola klinkera: avtoref. dis. na soisk. step. kand. tekhn. nauk 05.13.07* [Proper system with fuzzy logic in mill operation of clinker grinding: authors abstract of Cand. Sc. (Tech.) Dissert. 05.13.07]. Belgorod, 2000, 32 p. (in Russian).
7. Domanskij I.V., Isakov V.P., Ostrovskij G.M., Reshanov A.S. and Sokolov V.N. *Mashiny i apparaty himicheskikh proizvodstv* [Machines and apparatus of chemical industry]. Leningrad: Mashinostroenie, 1982, 384 p. (in Russian).
8. VAK Ukrai.ny. *Novi vymogy shchodo oformlennia spysku literatury* [New requirements for bibliography registration]. *Bjuleten VAK Ukraini* [Bulletin of High Attestation Commission of Ukraine]. 2009, no. 5. Available at: http://lib.pu.if.ua/file/bibl_opis.pdf. (in Ukrainian).
9. Popovich M.G. and Kovalchuk O. *Teoriia avtomatichnogo keruvannia* [Theory of automatic regulation]. Kyiv: Lybid, 1997, 544 p. (in Ukrainian).
10. Chinaev P.I., Chumakov N.M., Zhdanov A.P., Panov V.I., Sivov N. S., Sud-Zlochevsky A.I and Chugunov I.I. *Raschet ispolnitelnykh, korrrektiruyushchikh i preobrazovatelnykh elementov avtomaticheskikh sistem* [Calculation of the executive, corrective and conversion elements of automatic systems]. Kiev: Tehnika, 1971, 308 p. (in Russian).
11. Bogdanov O.S. *Spravochnik po obogashcheniyu rud: v 4 t.* [Manual in ore-dressing: in 4 volumes]. T. 1: *Podgotovitelnye processy* [T. 1. Preparative processes]. Moskva.: Nedra, 1982, 367 p. (in Russian).
12. Uzhov V.N. *Ochistka promyshlennykh gazov elektrofil'trami* [Cleaning of industrial gases with electrostatics]. Moskva: Himiya, 1967, 344 p. (in Russian).
13. Uteush E.V. and Uteush Z.V. *Osnovy avtomatizatsii izmel'cheniya materialov v sharovykh melnitsah* [Fundamentals of automation of materials grinding in ball mills]. Moskva: Himiya, 1968, 156 p. (in Russian).

Рецензент: д-р т. н., проф. В. Г. Заренбін

Надійшла до редколегії: 17.08.2015 р. Прийнята до друку: 20.09.2015 р.