

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

МУЗИКА ЛЕВ ВОЛОДИМИРОВИЧ



УДК 622.73:622.733

**АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ КЕРУВАННЯ
СТРУМИННИМ ПОДРІБНЕННЯМ ЗА АКУСТИЧНИМИ
СИГНАЛАМИ РОБОЧИХ ЗОН МЛИНА**

Спеціальність 05.13.07 – автоматизація процесів керування

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дніпро - 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у відділі термогазодинаміки енергетичних установок Інституту технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України (м. Дніпро).

Науковий керівник доктор технічних наук, с.н.с.
Прядко Наталія Сергіївна,
провідний науковий співробітник
Інституту технічної механіки Національної
академії наук України і Державного
космічного агентства України
(м. Дніпро)

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Ткачов Віктор Васильович,
завідувач кафедри кіберфізичних
та інформаційно-вимірювальних систем
Національного технічного університету
«Дніпровська політехніка», Міністерства
освіти і науки України (м. Дніпро)

доктор технічних наук, професор
Купін Андрій Іванович,
завідувач кафедри комп'ютерних систем
та мереж Криворізького національного
університету Міністерства освіти і науки
України

Захист відбудеться “ 18 ” березня 2021 р. о 13-00 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.080.07 при Національному технічному університеті «Дніпровська політехніка» Міністерства освіти і науки України за адресою: 49005, м. Дніпро, просп. Яворницького, 19.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» Міністерства освіти і науки України за адресою: 49005, м. Дніпро, просп. Яворницького, 19.

Автореферат розісланий “ 12 ” лютого 2021 г.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 08.080.0
к.т.н., доц.



М. Удовик

Підписано до друку 05.01.2021.
Формат 60x84/16. Папір офсетний. Друк цифровий.
Ум. друк. арк. 0,9. Наклад 100 прим. Замовлення № 023.

Видавництво та друкарня ПП «Ліра ЛТД».
вул. Наукова, 5, м. Дніпро, 49107.
Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру видавців, виготовлювачів
та розповсюджувачів видавничої продукції
ДК № 6042 від 26.02.2018.

dnipro.lira@gmail.com | +38 (067) 561-57-05 | lira.dp.ua

Muzyka Lev Volodimirovich Automation of control process of jet grinding on acoustic signals of mill operating zones. - Manuscript.

The thesis for a scientific degree of the candidate of technical sciences on a specialty 05.13.07 - "Automation of control processes". - National Technical University "Dnipro Polytechnic" of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Dnipro, 2021.

The work is devoted to increasing the productivity of jet mills and the quality of the grinding product on the basis of automatic control of the degree of loading of the mill and the size of the product according to the parameters of the acoustic signals of the working zones of grinding. The study of the closed cycle of jet grinding revealed the technological characteristics that affect the productivity of the process. The developed nonlinear regression model showed the predominant influence of the level of grinding chamber loading on the performance of the mill as a whole. The developed simulation model of the grinding process showed that the control of the process of loading the mill allows to increase the productivity of the mill. The use of acoustic signals of the working zones of the shredding jet installation for control of process modes is substantiated. A method for determining the deviation of the grinding mode from the optimal by analyzing the parameters of the acoustic signals of the working area of the process. A new method of automatic control of the jet mill performance based on the acoustic signals of the grinding zone has been developed, which consists in controlling the loading of the mill and the quality of the grinding products. Algorithms for the operation of the automatic control system for loading the mill, software and hardware for its implementation, a simulation model of the control system. The proposed method of controlling the productivity of the jet mill was tested in the conditions of the Vilnohirs'k Mining and Metallurgical Plant, which allowed increasing the productivity of the mill by 10 - 30% depending on the size of the product.

Key words: jet grinding, acoustic signals, control, automatic control, loading hopper.

Актуальність теми. Млини сухого тонкого подрібнення, зокрема струминні установки, відрізняються високим енергоспоживанням, що стримує їх широке застосування. У виробничих умовах в процесі подрібнення змінюються експлуатаційні параметри (технологічні - тиск енергоносія, число обертів ротору класифікатора, тиск розрядження на вентиляторі; крупність готового продукту), що залежать від незначних допустимих відхилень технологічних параметрів і типу сировини. Зміна цих параметрів іноді призводить до того, що відбувається порушення технологічного процесу. Для підвищення ефективності роботи подрібнювальних установок **актуальним** є розробка системи поточного контролю та керування процесом подрібнення.

Аналіз останніх результатів досягнень і публікацій з автоматичного керування роботою струминних млинів і контролю продуктів подрібнення дозволяє виділити невирішену задачу, яка полягає в автоматичному визначенні оптимального завантаження струминного млина в сенсі підтримки максимальної продуктивності в процесі його роботи за акустичними сигналами зони подрібнення. Тому, встановлення нових закономірностей зміни акустичних сигналів робочих зон млина в залежності від режиму подрібнення і дисперсності матеріалу та розробка методу автоматичного керування продуктивністю струминного млина і якістю отриманого продукту є актуальною *науково-практичною задачею*. Вирішення цієї задачі дозволить істотно підвищити продуктивність процесу і якість готового продукту на промислових комбінатах України. Отже, тема дисертаційної роботи є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами. Робота виконана у відділі термодинаміки енергетичних установок Інституту технічної механіки НАН України і ДКА України відповідно до держбюджетних тем:

«Дослідження проблеми управління газовими потоками в задачах розширення функціональних можливостей та поліпшення характеристик ракетних двигунів та струминного технологічного обладнання» № ДР 0116U004127 (2016-2020 рр.); «Підвищення ефективності засобів контролю газоструминних технологічних процесів» № ДР 0118U003631 (2018-2020 рр.), за якими автор був виконавцем відповідних розділів

Мета роботи – підвищення продуктивності струминних млинів та якості продукту подрібнення на основі автоматичного керування ступеня завантаження млина та крупності продукту за параметрами акустичних сигналів робочих зон подрібнення.

Для досягнення цієї мети вирішуються наступні задачі:

- 1) обґрунтувати характеристики процесу струминного подрібнення для автоматичного керування продуктивністю млина;
- 2) встановити закономірності зв'язку параметрів акустичних сигналів робочої зони подрібнення і технологічних параметрів процесу;

3) розробити метод керування завантаженням млина за результатами аналізу акустичних сигналів зони подрібнення і класифікації;

4) розробити структурну схему та систему автоматичного керування процесом подрібнення і якістю продуктів подрібнення.

Об'єкт дослідження – процес автоматичного керування подрібненням сипучих матеріалів в струминному млині.

Предмет дослідження – методи і моделі автоматичного керування режимами струминного подрібнення.

Методи досліджень. Використані: метод Фур'є для аналізу параметрів сигналів, методи імітаційного моделювання для дослідження режимів роботи установки подрібнення у замкнутому циклі, регресійне моделювання для обґрунтування впливів технологічних і акустичних параметрів на продуктивність млина, експериментальні дослідження процесу подрібнення.

Наукові положення, які захищаються в дисертації:

1. Продуктивність струминного млина знаходиться у квадратичній залежності від завантаження струменів матеріалом, а в сталому режимі середня амплітуда сигналів знаходиться у квадратичній залежності від продуктивності млина відносно його завантаження, причому режими недовантаження або перевантаження визначаються значним відхиленням потужності акустичних сигналів робочої зони млина, що забезпечує можливість підвищення ефективності.

2. Нормована амплітуда акустичних сигналів, записаних в зоні за класифікатором, прямо пропорційна крупності часток продукту, який транспортується, що дозволяє автоматичним керуванням підвищити якість продукту подрібнення.

Наукова новизна отриманих результатів

1. Встановлені параметри процесу струминного подрібнення, як об'єкту керування, і зв'язок їх з характеристиками акустичних сигналів робочих зон млина, дозволяють визначати робочий режим з максимальною продуктивністю.

2. Розроблена імітаційна модель процесу подрібнення показала, що підвищення ефективності процесу можливо при автоматичному керуванні рівня завантаження млина через подачу нового матеріалу з урахуванням циркулюючого навантаження замкнутого циклу подрібнення.

3. Побудовані нелінійні регресійні моделі, які пов'язують параметри об'єкту керування з параметрами акустичних сигналів робочих зон подрібнювальної установки, показали, що переважний вплив на енергію сигналів надає рівень завантаження млина матеріалом.

4. Створений новий метод автоматичного керування продуктивністю струминного млина за акустичними сигналами робочих зон дозволяє керувати процесом завантаження камери за параметрами сигналів в ній.

Практичне значення роботи

1. Розроблено методiku визначення відхилення режиму подрібнення від оптимального за допомогою аналізу параметрів акустичних сигналів робочої зони процесу, що дозволяє на основі попереднього аналізу характеристик сигналів оцінювати продуктивність млина.

что контроль процесса загрузки мельницы позволяет поднять производительность мельницы.

Обосновано использование акустических сигналов рабочих зон струйной установки измельчения для управления режимами процесса. Разработанная методика определения отклонения режима измельчения от оптимального с помощью анализа параметров акустических сигналов рабочей зоны процесса позволяет на основе предварительного анализа характеристик сигналов оценивать производительность мельницы.

Экспериментально установлено, что акустические сигналы в противоположных предельных относительно эффективности измельчения режимах загрузки мельницы (разгрузки и перегрузки) имеют разницу в значении средней амплитуды более, чем 2-4 раза. Это установлено при измельчении в лабораторной и промышленной мельнице, поэтому можно контролировать параметры объекта управления по величине нормированного средней амплитуды акустических сигналов рабочих зон мельницы.

На основе установления закономерности изменения параметров акустических сигналов в зависимости от загрузки рабочей зоны мельницы разработан способ управления работой бункера загрузки и создано устройство для реализации способа, защищенное патентом на полезную модель. В качестве регулируемого параметра системы управления использовано изменение концентрации массопотоков в зоны измельчения. Основным возмущающим воздействием при измельчении является изменение циркуляционной нагрузки материалом. Сигнал задания формируется на основе моделирования массопотоков с учетом технологических условий (параметров энергоносителя, режима классификации), свойств и крупности исходного материала, а также результатов анализа акустических сигналов рабочих зон измельчительной установки.

Разработанный новый метод автоматического управления производительностью струйной мельницы по акустическим сигналам зоны измельчения, заключающийся в контроле загрузки мельницы и качества продуктов измельчения в условиях изменения режимов процесса, крупности сырья, позволяет поддерживать высокую производительность мельницы при требуемом качестве продукта. Разработаны алгоритмы работы системы автоматического управления загрузкой мельницы, программное и техническое обеспечение ее реализации, имитационная модель работы системы управления. Предложен алгоритм и методика непрерывного бесконтактного контроля и управления производительностью струйной мельницы, которые проверены в промышленных условиях Вольногорского горно-металлургического комбината, что позволило повысить производительность мельницы на 10 - 30% в зависимости от крупности продукта.

Ключевые слова: струйное измельчение, акустические сигналы, контроль, автоматическое управление, бункер загрузки

ня для керування режимами процесу. Наведено методику визначення відхилення режиму подрібнення від оптимального за допомогою аналізу параметрів акустичних сигналів робочої зони процесу. Створено новий метод автоматичного керування продуктивністю струминного млина за акустичними сигналами зони подрібнення, що полягає в контролі завантаження млина і якості продуктів подрібнення. Розроблено алгоритми роботи системи автоматичного керування завантаженням млина, програмне та технічне забезпечення її реалізації, імітаційну модель роботи системи керування. Запропонована методика керування продуктивністю струминного млина перевірено в умовах Вільногірського гірничо-металургійного комбінату, що дозволило підвищити продуктивність млина на 10 - 30 % в залежності від крупності продукту.

Ключові слова: струминне подрібнення, акустичні сигнали, контроль, автоматичне керування, бункер завантаження.

АННОТАЦИЯ

Музыка Лев Владимирович Автоматизация процесса управления струйным измельчением по акустическим сигналами рабочих зон мельницы – На правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.13.07 – «Автоматизация процессов управления». – Национальный технический университет «Днепропетровская политехника» Министерства образования и науки Украины, г. Днепр, 2021

Анализ последних результатов публикаций по автоматическому управлению работой струйных мельниц и контролю продуктов измельчения позволяет выделить нерешенную задачу, которая заключается в автоматическом определении оптимальной загрузки струйного мельницы в смысле поддержания максимальной ее производительности в процессе работы по акустическим сигналам в зоне измельчения. Целью работы было повышение производительности струйных мельниц и качества продукта измельчения на основе автоматического управления степени загрузки мельницы и крупности продукта по параметрам акустических сигналов рабочих зон измельчения.

На базе исследования замкнутого цикла процесса струйного измельчения выявлено технологические характеристики, влияющие на производительность процесса. Разработанная нелинейная регрессионная модель, которая связывает технологические параметры с производительностью мельницы, показала, что преобладающее влияние уровня загрузки помольной камеры на производительность мельницы в целом. Разработана имитационная модель процесса измельчения, основанная на дискретно-событийном подходе моделирования стохастических динамических процессов. Моделирование объекта управления показало,

2. На основе восстановления закономерности зміни параметрів акустичних сигналів в залежності від завантаження робочої зони млина розроблено спосіб керування роботою бункера завантаження та створено пристрій для реалізації способу, що захищені патентом на корисну модель (патент № 112112).

4. Розроблено алгоритми, структурну схему роботи системи автоматичного керування режимами та якістю продукту струминного подрібнення, що перевірені на імітаційній моделі, створено програмне та технічне забезпечення реалізації автоматичного керування процесом.

5. Запропоновано алгоритм та методику безперервного безконтактного контролю продуктивності струминного млина, які перевірено в промислових умовах Вільногірського гірничо-металургійного комбінату, що дозволяє підвищити продуктивність млина на 10-30 % в залежності від крупності продукту подрібнення (акт випробувань від 19.06.2019 р.).

Особистий внесок автора полягає в обґрунтуванні наукового завдання, постановці мети і задач дослідження, формулювання новизни і наукових положень, розробці та створенні математичних моделей процесу подрібнення, в плануванні, проведенні експериментальних досліджень та обробці їх результатів. Обґрунтування і впровадження в промисловість теоретичних розробок проведено за участю автора. Експериментальні дослідження, які увійшли в дисертаційну роботу, виконані безпосередньо здобувачем за участю співробітників відділу термогазодинаміки енергетичних установок ІТМ НАНУ і ДКАУ. Результати опубліковані в співавторстві з ними.

Апробація результатів дисертації. Основні наукові результати роботи доповідалися і одержали схвалення на наступних науково-технічних конференціях: Міжнародних науково-технічних конференціях «Форум гірників» (м. Дніпро, 2016 р.) і «Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем» (м. Дніпро, 2016, 2018р.), Міжнародній конференції «Інноваційні технології в науці та освіті. Європейський досвід»: (м. Відень, 2017), IX-ой Міжнародній конференції «Молоді вчені 2018 – від теорії до практики» (м. Дніпро, 2018 р.), Науково-технічних конференціях «Інформаційні технології в металургії й машинобудуванні (м. Дніпро, 2017, 2019-2020 рр.), Матеріали дисертації розглядалися на Вченій Раді ІТМ НАНУ і ДКАУ у 2019-2020 рр.

Публікації. Всього за результатами досліджень опубліковано 21 робота, з них 14 статей у виданнях, які входять до відповідного переліку МОН (з них 8 – у виданнях, зареєстрованих в наукометричних базах: 1 в наукометричній базі Scopus, 7 – Index Copernicus), 6 – тез доповідей (1 – Scopus), отримано 1 патент України на корисну модель.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел із 115 найменувань на 13 сторінках, містить 153 сторінок тексту, в тому числі 68 рисунків, 11 таблиць, а також 3 додатка на 15 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми і наукової задачі, сформульовано мету й задачі досліджень, визначено наукову новизну й практичне значення отриманих результатів, наведено відомості про їхню реалізацію, а також про апробацію роботи й публікації з теми дисертації.

У першому розділі виконано аналіз основних способів автоматизації технологічних процесів подрібнення, які застосовуються в даний час на збагачувальних фабриках. Розглянуті способи мають як низку переваг, так і недоліків. Основним недоліком, властивим всім методам, є тривалість їх проведення, що веде до накопичення некондиційного продукту до того, як будуть скориговані технологічні параметри процесу.

Питанням підвищення ефективності роботи подрібнювальних агрегатів присвячені праці науковців: С.Е. Андреева, Б.А. Арефьева, І.Г. Гривава, Д.К. Крюкова, В.А. Олевського, В.А. Петрова, О.Н. Тихонова, О. М. Марюти, В.І. Корсуна, В.І. Горобця, В.В. Ткачова, А.Е. Стежки, Г.А. Хаца, С.Ф. Шинкоренка, А.І. Купіна, Б.П. Яшина, Д. Ватсона, А. Лінча і багатьох інших. Зокрема, в роботах Горобця В. І. описано керування процесом струминного подрібнення на базі аналізу витратно-напірних характеристик пневмотранспортної мережі та тиску в камері подрібнення. Однак, в цих випадках час запізнювання був занадто великим і максимум продуктивності не досягнуто. В роботах В.І. Корсуна та його учеників побудована модель керування процесом струминного подрібнення на базі ланцюгів Маркова, але не обґрунтована можливість керування процесом без його зупинки.

В ІТМ НАНУ і ДКАУ запропоновано новий підхід до аналізу процесу подрібнення в струминному млині, розроблено основи акустичного моніторингу процесу, однак необхідно побудувати модель всієї подрібнювальної установки, обґрунтувати і розробити систему автоматичного керування технологічним процесом подрібнення за допомогою результатів аналізу акустичних сигналів. На основі проведеного аналізу сформульовані мета і завдання дослідження.

У другому розділі обґрунтовані вхідні, вихідні параметри, керуючі впливи процесу подрібнення як об'єкту керування, вибрано їх характеристики для автоматичного контролю продуктивності млина та побудована імітаційна модель струминного подрібнення та класифікації.

Розглянуто замкнутий цикл процесу струминного подрібнення (рис. 1) і виявлено основні технологічні характеристики, що впливають на продуктивність процесу, представлено процес подрібнення, як об'єкт керування (рис. 2). Потік вихідного матеріалу з бункера завантаження подається до подрібнювальної установки під деяким тиском P в потоці енергоносія в

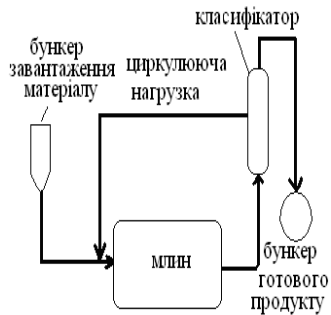


Рис. 1 – Схема замкнутого циклу подрібнення млина

ської науково-технічної конференції (1-2 листопада 2018 р.). – Дніпро : ДВНЗ УДХТУ. – 2018. – Ч. 1. – С. 367 - 368.

20. Музыка Л. В. Управление производительностью струйной мельницы по акустическим сигналам рабочей зоны // Материали міжнародної науково-технічної конференції «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні» (26-28 березня 2019 р.). – Дніпро. – 2019. – С. 123.

21. Музыка Л. В. Acoustic method of jet grinding study and control / Л. В. Музыка, Н. С. Прядко, Г. А. Стрельников, Е. В. Терновая, И. В. Верхоробина // E3S Web of Conferences 109, 00074 (2019) Essays of Mining Science and Practice. – Днепр. - 2019. - P. 1 – 11. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900074> (Scopus).

Внесок автора в роботи, що опубліковані у співавторстві: основи моделювання різних схем замкнутого циклу подрібнення наведені в [1, 4, 9, 13], розроблена багаторівнева модель подрібнення в замкнутому циклі [3], розглянуто перехід з однієї фракції в іншу [5]. Залежність характеристик акустичних сигналів від режимів подрібнення досліджені експериментально і показані в статтях [2, 16, 21]. У статтях [6, 8] розглянуто питання побудови системи автоматичного контролю і керування роботою подрібнювальної установки. У роботах [7, 10, 12] проведено і оброблено експериментальні дослідження по встановленню зв'язків технологічних і акустичних параметрів. Розробка моделі керованого бункера завантаження млина приведена в [19].

АНОТАЦІЯ

Музыка Лев Володимирович Автоматизація процесу керування струминним подрібненням за акустичними сигналами робочих зон млина. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – «Автоматизація процесів керування». – Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» Міністерства освіти і науки України, м. Дніпро, 2021.

Робота присвячена підвищенню продуктивності струминних млинів та якості продукту подрібнення на основі автоматичного керування ступеня завантаження млина та крупності продукту за параметрами акустичних сигналів робочих зон подрібнення. Дослідженням замкнутого циклу струминного подрібнення виявлено технологічні характеристики, що впливають на продуктивність процесу. Створена нелінійна регресійна модель показала переважний вплив рівня завантаження помольної камери на продуктивність млина в цілому. Розроблена імітаційна модель процесу подрібнення показала, що контроль процесу завантаження млина дозволяє підняти продуктивність млина. Обґрунтовано використання акустичних сигналів робочих зон струминної установки подрібнен-

9. Музыка Л. В. Контроль и управление процессами измельчения в измельчительных установках / Л. В. Музыка, Н. С. Прядко // Збагачення корисних копалин. – 2014. – № 58-59 (99-100). – С. 196 – 201.

10. Музыка Л. В. Анализ статистических характеристик высших порядков акустических сигналов струйной измельчения материалов / Л. В. Музыка, А. В. Прядко // Збагачення корисних копалин. – 2015. – № 61(102). – С. 78 – 85.

11. Музыка Л. В. Разработка автоматизированной системы управления работой струйной измельчительной установки / Л. В. Музыка // Збагачення корисних копалин. – 2016. – № 63(104). – С.112 – 117.

12. Музыка Л. В. Регрессионный анализ экспериментальных результатов работы струйной измельчительной установки с акустическим мониторингом / Л. В. Музыка, Н. С. Прядко, Е. В. Терновая // Збірник наукових праць Національного гірничого університету. – 2018. – № 55. – С. 238 – 247.

13. Музыка Л. В. Имитационное моделирование системы управления струйным измельчением / Л. В. Музыка, Е. В. Терновая, Е. А. Жукова // Збірник наукових праць Національного гірничого університету. – 2018. – № 56. – С. 149 – 156.

14. Музыка Л. В. Підвищення ефективності струминного подрібнення на основі акустичного моніторингу процесу / Л. В. Музыка, Н. С. Прядко, К. В. Тернова // Металургійна та гірничорудна промисловість. - 2019. – №5-6. – С. 18 – 23.

15. Патент на корисну модель № 112112 Газоструминний млин / Музика Л. В., Прядко Н. С.; заявник і патентоволодар Інститут технічної механіки НАНУ і ДКАУ. - u201603419, опубл. 04.04.16; опубл. 12.12.2016., Бюл. № 23. – 5 с.

Тези доповідей

16. Музыка Л. В., Прядко А. В. Оптимизация процесса измельчения на основе акустического мониторинга // Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем (КМОСС-2015) : матеріали I Всеукраїнської науково-технічної конференції (3-5 листопада 2015 р.). – Дніпропетровськ : ДВНЗ УДХТУ, 2015. – Ч. 1. – С. 239 - 243.

17. Музыка Л. В. Прядко Н. С., Саксонов Г. М., Прядко А. В. Разработка модели системы управления работой струйной мельницы // Міжнародна конференція «Інноваційні технології в науці та освіті. Європейський досвід» : Матеріали. У 2-х томах. Том II (21-24 листопада 2017 р.). – Дніпро-Відень. – 2017. – С. 329 - 334.

18. Музыка Л. В. Моделирование и управление работой струйной мельницы // Материалы IX-ой международной конференции «Молодые ученые 2018 – от теории к практике» (16 февраля 2018 г.). – Днепр : Национальная металлургическая академия Украины, 2018. - С. 194 - 197.

19. Музыка Л. В., Прядко А. В. Анализ сигналов зоны измельчения струйной мельницы для управления ее производительностью // Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем (КМОСС-2018) : матеріали IV Всеукраїн-

помольну камеру, з якої під надлишковим тиском частково подрібнений продукт подається в класифікатор, далі готовий продукт надходить в бункер вивантаження, де вимірюється продуктивність Q , а матеріал крупніше необхідного

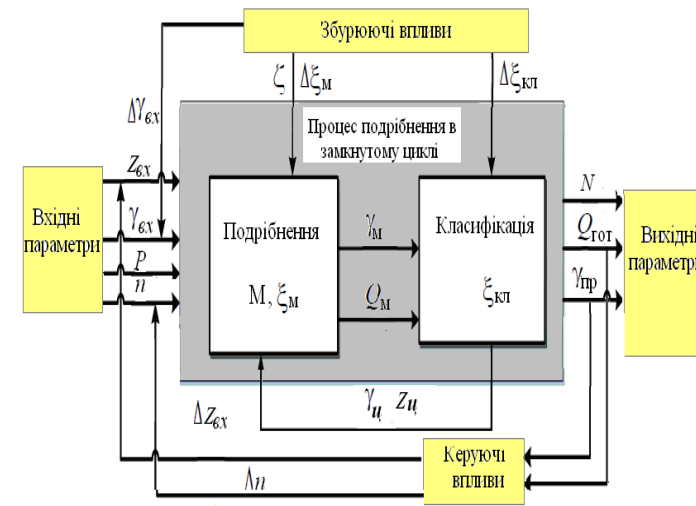


Рис. 2 – Об'єкт керування

надходить циркулюючим навантаженням до млина на доподрібнення змішуючись з вхідним матеріалом. Головну роль у зміні характеристик станів відіграє використання рециклів в процесі подрібнення, внаслідок чого в замкнутих циклах можуть виникати порушення режиму: перевантаження або недовантаження камери млина. До вхідних параметрів об'єкту керування відносяться: продуктивність бункера завантаження $Z_{вх}$ гранулометрична характеристика первинного матеріалу $\gamma_{вх}$; швидкість роботи класифікатора (кількість обертів ротора класифікатора) n ; тиск енергоносія P . Технологічний процес подрібнення в замкнутому циклі можна розбити на два процеси, які взаємопов'язані між собою: процес зменшення крупності матеріалу саме в млині (подрібнення) і процес класифікації подрібненого продукту. В зв'язку з цим процес подрібнення в млині характеризується змінними стану: запас матеріалу в млині M ; технічний стан млина ξ_M , процес класифікації також характеризується змінними стану, до яких відноситься технічний стан обладнання (класифікатору) $\xi_{кл}$.

Коли розглядати процес подрібнення в замкнутому циклі, то до внутрішніх змінних процесу треба віднести: циркуляційне навантаження млина $Z_{ц}$; гранулометрична характеристика циркуляційного навантаження $\gamma_{ц}$; вихід продукту з млина Q_M ; гранулометрична характеристика продукту млина γ_M . Збуреннями технологічного процесу є: зміна гранулометричної характеристики первинного матеріалу $\Delta \gamma_{вх}$; зміна фізико-механічних та речовинних властивостей матеріалу $\Delta \zeta$; зміна технічного стану млина та класифікатору. Вихідними змінними процесу подрібнення в замкнутому циклі є: продуктивність за готовим продуктом

$Q_{\text{гот}}$; гранулометрична характеристика готового продукту (або вміст готового класу крупності у вихідному продукті) γ_{np} ; споживана потужність N . До керуючих впливів процесу відносяться: зміна продуктивності за вхідним матеріалом $\Delta Z_{\text{вх}}$; керування швидкістю обертання ротора класифікатора Δn .

Для виявлення впливу основних технологічних параметрів на продуктивність млина у замкнутому циклі подрібнення побудована регресійна модель процесу. Функцією відгуку приймається продуктивність струминного млина Q , кг; факторами впливу прийняті технологічні параметри: тиск енергоносія P , МПа (фактор A), режим класифікації, який визначається числом обертів його ротору в секунду n , с^{-1} (фактор B), відносний рівень завантаження помольної камери Z (фактор C). Узагальнені регресійні залежності зміни продуктивності млина Q від трьох варійованих факторів для розрахунку задавалися у вигляді поліному другого ступеня з урахуванням взаємного впливу факторів:

$$Y = a_0 + \sum_i^n a_i \cdot x_i + \sum_i^n a_{ii} \cdot x_i^2 + \sum_{i < j}^n a_{ij} \cdot x_i \cdot x_j, \quad (1)$$

де Y – функція відгуку (Q); a_0 – вільний член рівняння; $a_i \cdot x_i$, $a_{ii} \cdot x_i^2$ – лінійні і квадратичні складові; $a_{ij} \cdot x_i \cdot x_j$ – складові парних добутоків факторів; $n = 3$ – число змінних факторів. Коефіцієнти заданої залежності визначалися методом найменших квадратів засобами прикладного пакету обробки статистичних даних Statgraphics Plus. Після кожного циклу оцінювалася адекватність F (статистика Фішера) отриманої моделі експериментальним даним, обчислювався коефіцієнт детермінації R . В результаті розрахунку була встановлена узагальнена регресійна залежність продуктивності млина Q від трьох змінних параметрів для різних матеріалів, що досліджувались. Наприклад, для шамоту:

$$Q = -2,306 \cdot Z^2 - 0,079 \cdot n^2 - 0,556 \cdot P^2 - 0,388 \cdot Z \cdot n + 0,138 \cdot P \cdot n - 0,138 \cdot P \cdot Z + 0,419 \cdot Z + 0,693 \cdot P + 0,616 \cdot n + 16,811 \quad (2)$$

Ця регресійна залежність в межах досліджуваних параметрів має коефіцієнт детермінації $R = 0,9$, який показує, що мінливість функції Q на 90 % пояснюється впливом врахованих в моделі факторів. На рис. 3а) представлено тривимірний графік залежностей продуктивності млина Q від розглянутих факторів. Аналіз моделі показав переважний вплив рівня завантаження Z помольної камери на продуктивність Q млина в цілому, при цьому дослідження взаємного впливу факторів підтвердив цей висновок (рис. 3б). Так вплив парної взаємодії завантаження (29%) майже в 3 рази більше за вплив тиску (10,5%) і числа обертів ротора класифікатора (9,5%). Спільний вплив усіх варійованих факторів не робить істотного впливу на зміну функції відгуку (менше 5%). Отже, в процесі струминного подрібнення завантаження млина є керуючим впливом, який може суттєво змінювати продуктивність замкнутого циклу подрібнення. Однак, при цьому треба враховувати особливості функціонування замкнутого циклу і не допустити перевантаження млина матеріалом

7. Розроблено структурну схему автоматичного керування процесу подрібнення та якості одержаних продуктів, на базі чого створена працююча система керування роботою бункера завантаження млина.

8. Розроблено імітаційну модель системи автоматичного керування завантаженням млина і контролем якості продукту подрібнення на основі безперервного моніторингу акустичних сигналів зони подрібнення і класифікації.

9. Запропоновані алгоритм та методика безперервного безконтактного контролю продуктивності струминного млина та перевірені в промислових умовах Вільногірського гірничо-металургійного комбінату дозволяють підвищити продуктивність млина на 10 - 30 % в залежності від режиму класифікації.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Фахові видання

1. Музыка Л. В. Управление массопотоками в замкнутом цикле измельчения / Л. В. Музыка, Н. С. Прядко, Г. А. Стрельников // Scientific Bulletin of National Mining University. – 2019. – № 4. – С. 5 – 10 (індексована Scopus).

2. Музыка Л. В. Методика автоматического управления струйным измельчением на основе моделей объекта и системы управления / Л. В. Музыка, Н. С. Прядко // Системні технології. - 2017. - № 2 (109). - С. 51 - 58 (індексована Index Copernicus).

3. Музыка Л. В. Система контроля и регулирования работы газоструйной измельчительной установки для повышения ее производительности / Л. В. Музыка, Н. С. Прядко, Г. А. Стрельников // Технічна механіка. – 2018. - №2. - С. 113 - 125 (індексована Index Copernicus).

4. Музыка Л. В. Повышение эффективности измельчительных установок на основе акустического мониторинга / Л. В. Музыка, Н. С. Прядко, Г. А. Стрельников, Е. В. Терновая, А. М. Шевелева // Технічна механіка. – 2018. - №3. - С. 69 - 82 (індексована Index Copernicus).

5. Muzyka L. V. Quality control of the grinding products / L. V. Muzyka, N. S. Pryadko, E. V. Ternovaya, S. V. Shvachich // Системні технології. – 2018. - № 6 (119). - С. 82 - 88 (індексована Index Copernicus).

6. Музыка Л. В. Автоматическое управление режимами струйного измельчения // Системні технології. – 2019. - № 3 (122). – С. 110 - 116 (індексована Index Copernicus).

7. Muzyka L. V. Regression model of the classification process at jet grinding / L. V. Muzyka, K. V. Ternova, N. S. Pryadko // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – 2019. - № 6 (125). - С. 77 – 83 (індексована Index Copernicus).

8. Музыка Л. В. Розробка системи автоматичного керування струминним подрібненням на основі експериментальних даних / Н. С. Прядко, А. В. Бубликов, Л. В. Музыка // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – 2020. - № 2 (127). - С. 140 – 149. (індексована Index Copernicus).

Верифікація імітаційної моделі на експериментальних даних струминного млина № 7 Вільногірського гірничо-металургійного комбінату показала, що використання системи керування дозволяє підвищити продуктивність млина на 10%. Обґрунтовано використання релейного регулятора для струминного подрібнення, при зменшенні інерційності процесу необхідно змінювати тип регулятора. Розроблена система керування процесом подрібнення пройшла випробування на подрібнювальній установці УСП-20, проведено промислове випробування в умовах Вільногірського гірничо-металургійного комбінату.

ВИСНОВКИ

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, в якій вирішена актуальна науково-технічна задача, яка полягає у підвищенні продуктивності струминних подрібнювальних установок та якості продукту на основі автоматичного керування оптимальним рівнем завантаження млина та крупністю продукту за акустичними сигналами робочих зон подрібнення. На основі наукових результатів, сформульованих наукових положень, розробленої системи автоматичного керування завантаженням млина досягнуто підвищення ефективності процесу та якості продукту подрібнення.

Найбільш важливі наукові і прикладні результати, висновки і рекомендації полягають у наступному.

1. Побудовано нелінійну регресійну модель процесу струминного подрібнення, яка дозволяє встановити вплив технологічних параметрів на продуктивність млина і амплітуду акустичних сигналів робочої зони подрібнювальної установки. Наведено, що циркулююче навантаження є керуючим впливом, яке може суттєво змінювати продуктивність замкнутого циклу подрібнення.

2. Розроблена імітаційна модель процесу подрібнення в замкнутому циклі розглядає процес подрібнення з позиції зміни гранулометричного складу матеріалу, описує всі кінетичні особливості подрібнення матеріалу.

3. Отримані нові залежності акустичних сигналів робочих зон млина від основних технологічних показників, які впливають на продуктивність процесу, що дозволяє контролювати процес подрібнення, тримаючи його на оптимальному рівні.

4. За регульований параметр системи керування використано зміну концентрації масопотоків в зоні подрібнення. Наведено, що основним збуджуючим впливом при подрібненні є зміна наповненості потоків матеріалом. Встановлено зв'язок заповнення млина матеріалом і характеристик акустичних сигналів зони подрібнення.

5. Розроблено методику визначення відхилення режиму подрібнення від оптимального за допомогою попереднього аналізу характеристик акустичних сигналів робочої зони процесу, що дозволяє оцінювати продуктивність млина.

6. Розроблено регресійну модель класифікатора струминного установки та алгоритм контролю якості продуктів подрібнення за результатами акустичного моніторингу зони за класифікатором.

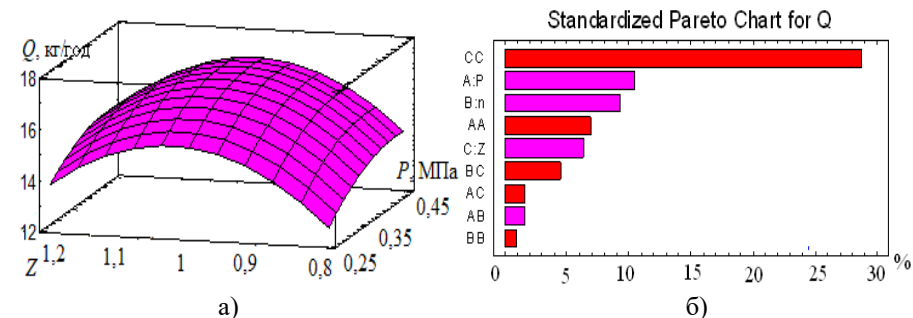


Рис. 3 – Залежність (а) продуктивності млина від завантаження (Z , кг) матеріалом і параметрів енергоносія P за результатами регресійного моделювання та взаємний вплив (б) технологічних параметрів на продуктивність млина.

Побудовано регресійну модель класифікатора струминного млина. Встановлено, що найбільший вплив на величину продуктивності класифікатора надає об'ємна витрата матеріалу на вході в класифікатор. Робота двигуна ротора класифікатора (число його обертів) впливає менше, але від режиму класифікації залежить якість продукту подрібнення.

Експериментальні дослідження підтвердили квадратичну залежність продуктивності струминного млина від завантаження її матеріалом. Зокрема, для подрібнення шамоту за даними експериментів при тиску енергоносія $P = 0,3$ МПа і числі оборотів класифікатора $n = 600$ хв⁻¹ рівняння продуктивності млина Q від завантаження G млина має вигляд:

$$Q(t) = -62,14G^2(t) + 89,1G(t) - 17,77. \quad (3)$$

Для обґрунтування впливу факторів на продуктивність млина розроблено імітаційну модель процесу подрібнення, що базується на дискретно-подійному підході моделювання стохастичних динамічних процесів. Потік матеріалу представляємо як суміш різно-фракційного сипучого матеріалу, який через рівні інтервали часу Δt дискретними порціями поступає у змішувач 1 системи завантаження (рис. 4).

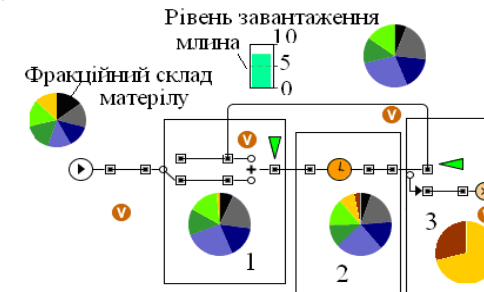


Рис. 4 – Структурна схема моделі подрібнення в термінах AnyLogic

Експериментальними дослідженнями встановлено, що залежність амплітуди сигналів від нормованої продуктивності млина є поліном 4 порядку. А якщо брати до уваги цілий цикл подрібнення, то для сталого режиму залежність є квадратичною функцією виду:

$$A_{cp} = -0,0062(Q/G)^2 + 0,2141Q/G - 0,4046 \quad (6)$$

де Q – продуктивність млина за готовим продуктом, G – маса завантаження в одиницю часу. Коефіцієнти (6) залежать від властивостей матеріалу і технологічних параметрів процесу.

Встановлено зв'язок характеристик сигналів з крупністю різних за властивостями матеріалів в зоні подрібнення і зоні за класифікатором. При транспортуванні розглядалась амплітуда сигналів, що нормована амплітудою шуму потоку без матеріалу. Одержані лінійні залежності амплітуди сигналів від розмірів часток різних матеріалів подрібнення з відповідними коефіцієнтами кореляції для шлаку, кварцу, технічного вуглецю $A_{cp} = 10.5d + 0.1$, $R^2 = 0.9$.

За результатами проведених досліджень розроблено алгоритм контролю якості готового продукту подрібнення і оптимального завантаження камери (в сенсі досягнення найбільшої продуктивності млина). Аналіз характеристик сигналів зони за класифікатором дозволяє контролювати якість продукту подрібнення. При появі середніх амплітуд, які вище встановлених контрольних, подається сигнал на зміну режиму класифікації.

Таким чином, встановлено, що в сталому режимі подрібнення середня амплітуда сигналів знаходиться у квадратичній залежності від продуктивності млина відносно його завантаження, причому, режими недовантаження або перевантаження млина, що призводять до зниження його продуктивності, визначаються значним відхиленням потужності акустичних сигналів робочої зони млина, що дозволяє автоматично керувати продуктивністю на основі характеристик акустичних сигналів камери млина. Встановлено лінійну залежність нормованої амплітуди акустичних сигналів в зоні за класифікатором від крупності часток продукту, що дозволяє автоматичним керуванням підвищити якість контрольованого продукту струминного подрібнення.

У четвертому розділі наведено результати розробки системи автоматичного керування роботою струминного млина, яка заснована на побудованій моделі процесу, моделі бункеру завантаження, визначених залежностях і результатах акустичного моніторингу. Схема включає об'єкт керування (бункер завантаження, млин і класифікатор), систему нижнього і верхнього рівня керування. На верхньому рівні реалізується аналіз сигналів, перевіряються умови необхідності дозавантаження. Нижня система реалізує керування засувкою бункеру завантаження за сигналом, що надходить з верхньої системи. Основним збудуючим впливом є зміна наповненості потоків матеріалом. Для перевірки системи керування розроблено її імітаційну модель (рис. 10), яка представлена у вигляді релейного регулятора та обчислення ковзного середнього значення у зворотному зв'язку.

При підвищенні рівня завантаження млина нерівномірними порціями в залежності від поповнення змішувача порціями циркулюючого навантаження (рис. 5б) і підтримки рівня біля 75% продуктивність підвищилась на 5 - 7%. При подальшому підвищенні рівня завантаження відмічалось перевантаження, процес подрібнення зупинявся.

Таким чином, розроблена імітаційна модель процесу подрібнення показала, що підвищення ефективності процесу можливо при керуванні рівня завантаження млина подачею нового матеріалу з урахуванням циркулюючого навантаження замкнутого циклу подрібнення. Керування процесом необхідно зосередити на підтримці рівня завантаження відповідного робочому режиму, з урахування квадратичної залежності продуктивності струминного подрібнення від завантаження струменів матеріалом, що пропонується реалізувати за результатами безперервного акустичного моніторингу робочих зон млина.

У третьому розділі вирішується друга і третя задача, тобто визначаються зв'язки характеристик акустичних сигналів робочої зони подрібнення і технологічних параметрів процесу та створюється алгоритм контролю завантаження млина і якості продукту за результатами акустичного моніторингу.

Акустичний моніторинг процесу подрібнення проводився на лабораторній установці струминного подрібнення УСП-20 продуктивністю 20 кг / год Інституту технічної механіки НАНУ і ДКАУ (рис. 6б).

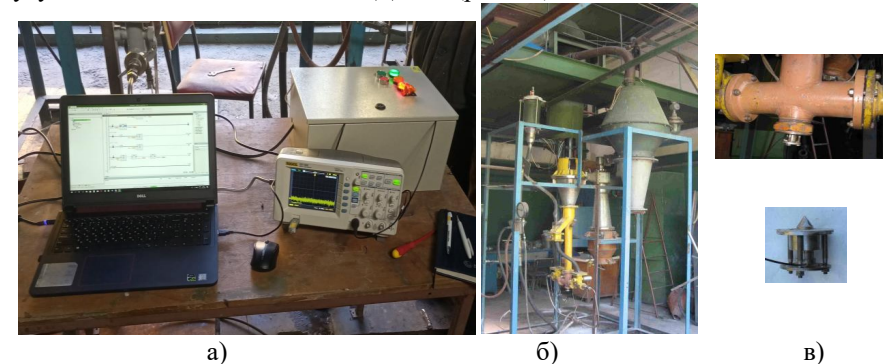


Рис. 6 – Дослідницький комплекс (а) струминної подрібнювальної установи УСП-20 (б) з встановленим в камері п'єзокерамічним датчиком (в).

Запис сигналів при постійному моніторингу процесу проводився через хвилевод в камері, з'єднаний з п'єзокерамічним датчиком GT- 200 (полоса пропуску 130-200 кГц) і АЦП з частотою 200-400 кГц, що визначалось можливостями датчику. Технологічні параметри процесу змінювались в інтервалах: тиск енергоносія (повітря) $P = 0,3-0,6$ МПа, режим класифікації – число обертів ротора класифікатора $n = 600 - 3000 \text{с}^{-1}$, рівень завантаження камери – 0,3 – 0,8.

Проводились дослідження режимів подрібнення: завантаження матеріалу, робочий режим, неповне завантаження камери и її розвантаження. Встановлено, що зміна цих режимів, різних за рівнем завантаження камери млина та ди-

намічності подрібнення матеріалу, обумовлюють зміну характеристик акустичних сигналів в зоні подрібнення. На рис. 7 наведені розподіли амплітуди сигналів за часом в різних режимах роботи установки при подрібненні шамоту.

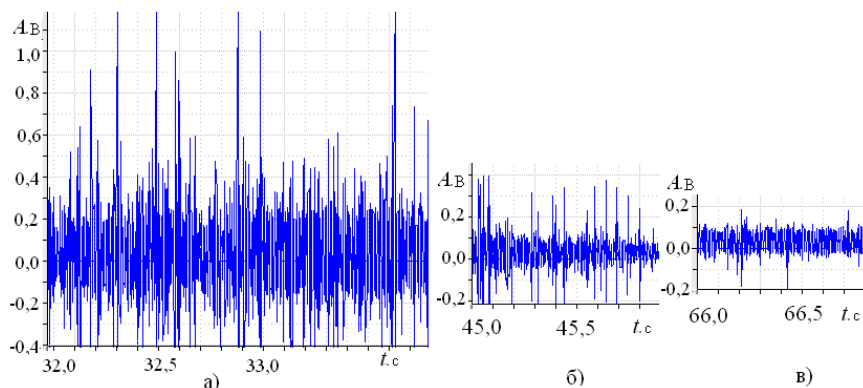


Рис. 7 – Зміна амплітуд акустичних сигналів у зоні подрібнення на різних стадіях процесу: а) подача матеріалі; б) робочий режим; в) розвантаження.

Експериментально встановлено, що акустичні сигнали в граничних режимах завантаження відносно ефективності подрібнення (розвантаження і перевантаження, так званий технологічний «завал») мають різницю у значенні середньої амплітуди A_{cp} більш, ніж в 2-4 рази. Це відмічено для лабораторного і промислового млина, тому контролювати режим завантаження можна за величиною

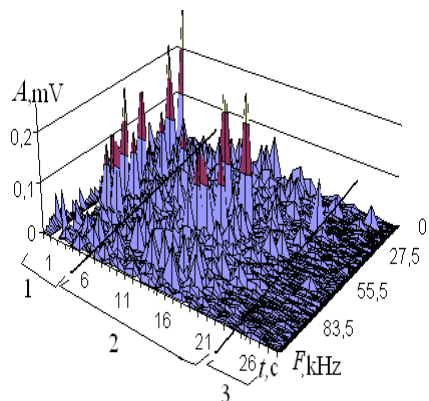


Рис. 8 – Розподілу амплітудно-частотних характеристик процесу

в період часу $5c \leq t \leq 22c$ і розвантаження (3) тривала до зупинки млина – 5 с. У робочому режимі подрібнення величина амплітуд АС більше, ніж на початко-

A_{cp} . Встановлено зв'язок характеристик акустичних сигналів з продуктивністю і рівнем завантаження камери. Після завантаження продуктивність і, відповідно, амплітуда і енергія сигналів зростає, але з часом, коли рівень завантаження млина падає, всі значення параметрів зменшуються до наступного завантаження. Загальна картина розподілу амплітудно-частотних характеристик процесу подрібнення, зокрема шлаку, з періодичним завантаженням матеріалу представлена на рис. 8.

При подрібненні з частотою реєстрації сигналів 200 кГц завантаження (1) тривало 4 с, робочий режим спостерігався в

тому етапі завантаження і, що більш важливо, ніж на заключному етапі подрібнення, тобто при недовантаженому млині.

Важливим параметром акустичного моніторингу процесу подрібнення є енергія сигналів. Для доказу цього побудована регресійна модель процесу подрібнення з результатами акустичного моніторингу. Для цього випадку функцією відгуку регресійної моделі є енергія E акустичних сигналів зони подрібнення струминного млина, факторами впливу прийняті ті ж технологічні параметри і продуктивність млина Q . Дослідженням характеристик акустичних сигналів зони подрібнення встановлено, що переважний вплив на енергію сигналів надає рівень завантаження млина матеріалом (30%). Трохи менше вплив тиску енергоносія (10,5%). В результаті розрахунку була встановлена узагальнена регресійна залежність енергії акустичних сигналів від продуктивності млина Q і трьох технологічних параметрів. Наприклад, для шамоту:

$$E = 0,017 + 0,004 \cdot P + 0,001 \cdot n + 0,002 \cdot Z + 0,001 \cdot Q + 0,006 \cdot P^2 + 0,005 \cdot P \cdot n - 0,003 \cdot P \cdot Z - 0,003 \cdot P \cdot Q + 0,004 \cdot n^2 + 0,003 \cdot n \cdot Z - 0,005 \cdot n \cdot Q + 0,002 \cdot Z^2 - 0,001 \cdot Z \cdot Q + 0,008 \cdot Q^2 \quad (5)$$

Характеристики сигналів реагують на зміну продуктивності (12%) і попарної залежності продуктивності і завантаження (13%). Це роз'яснюється зв'язком характеристик сигналів з крупністю матеріалу, що також було доведено в роботі.

Експериментальні подрібнення різних матеріалів показали, що у робочому режимі існує такий критичний момент процесу ($t_{кр}$), після якого без додаткового завантаження ефективність подрібнення падає, і процес може зупинитись. На

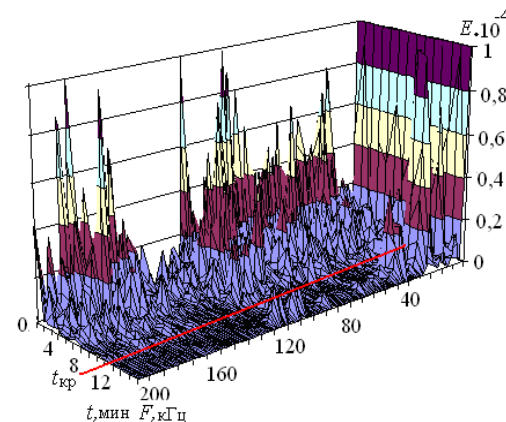


Рис. 9 – Розподіл енергії сигналів зони подрібнення

для ефективного подрібнення матеріалу в робочому режимі. Мета системи керування – не допустити цього моменту, необхідно вчасно подавати сигнал на завантаження нової порції матеріалу.

рис. 9 наведено розподіл енергії сигналів зони подрібнення і критичний момент процесу подрібнення кварцу в лабораторному млині. В ході моніторингу відбувається зменшення величини середньої амплітуди A_{cp} до контрольної. Це означає перехід робочого режиму подрібнення до неповного завантаження млина, а подальше зменшення величини амплітуди до $A_{cp} \ll A_{кр}$ веде до зупинки процесу подрібнення. Тому при керуванні процесом подрібнення умова $A_{cp} \approx A_{кр}$ є необхідною умовою дозавантаження млина