DOI 10.34185/1562–9945–5–166–2026–12
УДК 622.776

Н.С. Прядко, Д.Д. Іванов

АВТОМАТИЧНЕ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ СТРУМИННОГО ПОДРІБНЕННЯ ЗА АКУСТИЧНИМИ ІНФОРМАЦІЙНИМИ ОЗНАКАМИ: СТАН ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

Анотація. Проведено критичний аналіз передумов розвитку автоматичного керування процесом струминного подрібнення за акустичним зворотним зв'язком. Показано, що відомі акустичні інформаційні ознаки дають змогу ідентифікувати режими роботи подрібнювальної установки, а релейне керування подаванням матеріалу забезпечує підтримання завантаження камери поблизу раціональної області. Водночас порогове прийняття рішень недостатньо враховує статистичну мінливість інформаційних ознак і часові властивості інформаційного каналу. Обґрунтовано напрям подальших досліджень, пов'язаний із формуванням функцій належності за статистичними розподілами акустичних інформаційних ознак та створенням нечіткої системи автоматичного керування продуктивністю, у якій керуючий вплив на подавання матеріалу формується за результатами акустичної ідентифікації режиму подрібнення.
Ключові слова: струминне подрібнення, система автоматичного керування, акустичний сигнал, інформаційна ознака, нечітка логіка, функція належності, статистичний аналіз, продуктивність, завантаження подрібнювальної камери.

Постановка проблеми. Одержання тонкодисперсних і ультрадисперсних матеріалів є необхідною складовою технологічних процесів у гірничо–металургійній, хімічній, будівельній, фармацевтичній та інших галузях промисловості. Ступінь подрібнення вихідного матеріалу впливає на інтенсивність подальших фізико–хімічних процесів, якість готової продукції та ефективність використання сировини. Водночас тонке подрібнення характеризується значними енергетичними витратами, тому актуальним є забезпечення заданої дисперсності продукту за максимально можливої продуктивності та раціонального використання енергетичних ресурсів [1, 2].

Одним із технологічних засобів одержання тонкодисперсних матеріалів є струминне подрібнення. Руйнування частинок у струминному млині відбувається переважно внаслідок їх високоенергетичних зіткнень у потоці енергоносія. Відсутність тіл, що перемелюють, дає змогу зменшити забруднення готового продукту та обробляти тверді, абразивні й термочутливі матеріали. Проте ефективність процесу істотно залежить від завантаження подрібнювальної камери, тиску і витрати енергоносія, властивостей вихідного матеріалу, інтенсивності його подавання, режиму класифікації та циркуляції частинок [1, 3].

© Прядко Н.С., Іванов Д.Д. 2026
Copyright for this paper by its authors. Use permitted under License CC BY 4.0.
ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

Як об’єкт автоматичного керування струминна подрібнювальна установка характеризується стохастичністю процесів руйнування і переміщення частинок, взаємним впливом технологічних параметрів, наявністю запізнення та складністю безпосереднього вимірювання поточного завантаження камери. За недостатнього завантаження зменшується кількість ефективних зіткнень частинок і неповно використовується енергія струменів. Надмірне завантаження погіршує умови прискорення частинок, знижує ефективність їх руйнування та створює небезпеку завалу установки. Тому підтримання завантаження камери в області раціонального технологічного режиму є однією з основних задач автоматичного керування процесом [3, 4].

Через технічну складність безпосереднього контролю маси матеріалу в камері для оцінювання стану процесу запропоновано використовувати акустичні сигнали, що виникають унаслідок взаємодії частинок між собою та з елементами технологічного обладнання. У попередніх дослідженнях установлено зв’язки між технологічними параметрами струминного подрібнення та амплітудними, енергетичними, частотними й комплексними інформаційними ознаками, які обчислюються за акустичними сигналами [1, 4]. На цій основі розроблено методи ідентифікації режимів роботи установки та алгоритми формування керуючих впливів на механізм подавання матеріалу [4, 5].

Для автоматичного підтримання завантаження подрібнювальної камери розроблено систему з релейним регулятором і зоною нечутливості, у якій оцінювання керованої величини здійснюється опосередковано за результатами спектрального аналізу акустичного сигналу [5]. Керуючий вплив у цій системі формується за результатом порівняння розрахованої інформаційної ознаки з установленими пороговими значеннями. Релейний закон забезпечує двопозиційну зміну положення засувки, але не відображає ступінь наближення стану процесу до межі перевантаження та невизначеність його ідентифікації за статистично мінливими значеннями інформаційних ознак. Властиве акустичному інформаційному каналу запізнення додатково ускладнює формування керуючого впливу за релейним законом.

Релейний алгоритм передбачає однозначну дію після перетину інформаційною ознакою встановленої межі. Такий підхід не відображає ступінь достовірності ідентифікації поточного стану та може спричиняти хибні або надмірно часті зміни положення виконавчого механізму. Наявність і параметри областей неоднозначності не можна задавати апріорно: їх необхідно перевірити за експериментальними вибірками для визначених режимів роботи. Об’єктом статистичного опрацювання при цьому мають бути не миттєві значення вихідного акустичного сигналу, а встановлені в попередніх дослідженнях інформаційні ознаки, придатні для обчислення в реальному часі.

Застосування нечіткої логіки створює можливість подати стан процесу через ступені належності до режимів недовантаження, раціонального завантаження і перевантаження. Нечіткі моделі вже використовували для відтворення залежностей між технологічними параметрами струминного млина, масою продукту та його дисперсністю [6]. Однак прогнозна нечітка модель процесу не є замкненою системою автоматичного ке-

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

рування за акустичним зворотним зв'язком. Параметри функцій належності для керування продуктивністю мають визначатися за статистичними розподілами інформаційних ознак зони подрібнення. Закон керування має враховувати інерційність каналу керування, мати процедуру верифікації ідентифікованого режиму та обмеження частоти зміни подавання матеріалу.

Таким чином, актуальною є науково–прикладна задача розвитку автоматичного керування струминним подрібненням шляхом створення нечіткого закону формування керуючого впливу на механізм подавання матеріалу за інформаційними ознаками режиму подрібнення. Розв'язання цієї задачі потребує встановлення статистичних характеристик ознак для режимів недовантаження, раціонального завантаження і перевантаження, формування функцій належності, урахування часових властивостей акустичного інформаційного каналу та кількісного порівняння нечіткого і відомого релейного законів керування завантаженням камери.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Дослідження струминного подрібнення, пов'язані з автоматизацією процесу, охоплюють чотири взаємопов'язані напрями: моделювання технологічних процесів у подрібнювальній установці; акустичний моніторинг зони подрібнення; ідентифікацію режимів завантаження камери; формування впливів на подавання матеріалу за результатами непрямих вимірювань. Розгляд цих напрямів як єдиної послідовності дає змогу оцінити функціональну повноту відомих рішень і визначити елементи, необхідні для замкненого нечіткого автоматичного керування.

Моделі технологічної частини струминної установки відтворюють вплив тиску енергоносія, інтенсивності подавання матеріалу, завантаження камери та частоти обертання ротора класифікатора на продуктивність і дисперсність продукту. Дослідження енергетичної густини струминного подрібнення підтвердили залежність ефективності процесу від режимних параметрів і властивостей матеріалу [2]. Для класифікатора одержано регресійні залежності об'ємної витрати вихідного потоку від витрати на вході та частоти обертання ротора з коефіцієнтами детермінації 0,88–0,95 [7]. Представлення струминної установки як об'єкта керування дало змогу виділити керуючі, контрольовані та збурюючі параметри, а також урахувати замкнений цикл руху матеріалу [3]. Ці моделі описують технологічні зв'язки, однак не забезпечують самостійного оперативного оцінювання стану камери й крупності продукту за змінних властивостей сировини.

Методи акустичного моніторингу створюють непрямий інформаційний канал, який не потребує зупинки установки для відбору проб. У працях [1, 8] установлено зв'язки амплітудно–частотних характеристик акустичних сигналів із завантаженням камери, продуктивністю, гранулометричним складом і дисперсністю продукту. Для аналізу запропоновано середню і максимальну амплітуди, енергію та потужність сигналів, дисперсію характерної частоти, деталізуючі вейвлет–коефіцієнти, спільну функцію густини ймовірності амплітуд у двох робочих зонах, а також комплексні технолого–акустичні критерії ефективності, оптимальності, циркуляції та енергоємності процесу [1].

Інформаційне призначення ознак залежить від місця реєстрації сигналу. У зоні подрібнення амплітудні, енергетичні та комплексні критерії відображають ступінь завантаження камери, інтенсивність руйнування частинок і відхилення процесу від режиму максимальної продуктивності [1, 4, 8]. Первинний акустичний сигнал є носієм даних, тоді як режим подрібнення характеризують обчислені за ним інформаційні ознаки. Статистичні вибірки для побудови функцій належності мають формуватися за значеннями цих ознак у режимах недовантаження, раціонального завантаження і перевантаження.

На основі встановлених зв’язків розроблено метод керування масовою витратою матеріалу за акустичним моніторингом [4] і структурну схему системи автоматичного керування струминною установкою за критерієм максимальної продуктивності [9]. У системі [9] сигнал з зони подрібнення після підсилення та аналого–цифрового перетворення усереднюється на заданому інтервалі; одержане значення використовується для формування впливу на привод регульованого завантажувального бункера. Модель ураховує динаміку бункера, камери, класифікатора та циркуляційного потоку, але межі технологічних станів визначаються встановленими контрольними значеннями акустичних параметрів.

Завершеним варіантом замкненого керування завантаженням є система з релейним регулятором і зоною нечутливості ±2 % [5]. У моделі враховано інерційність матеріальних потоків і запізнення, необхідне для накопичення вибірки та спектрального аналізу сигналу. Релейний закон забезпечив утримання заповнення камери й потоків класифікатора в діапазоні ±3,5 %, період перемикань виконавчого механізму 14–15 с та підвищення продуктивності приблизно на 10 % [5]. Дискретне перемикання визначається фактом перетину порогової межі й не містить оцінки ступеня належності поточного стану до суміжних режимів.

Нечітку логіку для струминного подрібнення застосовано у моделі FLMill [6]. Вхідними змінними моделі є тиск робочого повітря, частота обертання ротора класифікатора і тривалість досліду, а вихідними – маса продукту та середній діаметр частинок за Заутером. Трикутні й сталі функції належності забезпечили відтворення нелінійних залежностей та оптимізацію режимних параметрів у широкій області умов [6]. Водночас FLMill є моделлю процесу з технологічними входами, а не регулятором у замкненому контурі з акустичним зворотним зв’язком; її функції належності не визначаються статистичними розподілами акустичних інформаційних ознак.

Сучасні методи опрацювання акустичних даних розвиваються в напрямі виділення прихованих компонентів і статистичної класифікації станів. Для сигналів контролю струминного подрібнення запропоновано сингулярний спектральний аналіз, який підвищує якість фільтрації, виявлення закономірностей і прогнозування змін часових рядів [10]. У суміжних процесах шліфування показано, що результат ідентифікації істотно залежить від тривалості вікна, частотного діапазону датчика та складу ознак у часовій, частотній і часо–частотній областях [11]. Ці результати підтверджують необхід-

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

ність обґрунтованого вибору інформаційних ознак і параметрів їх накопичення, але не розв'язують задачу формування керуючих впливів для струминної установки.

Функціональне зіставлення розглянутих підходів наведено в таблиці 1. Повна позначка відповідає безпосередній реалізації певної функції в описаному підході; часткова – її допоміжному, опосередкованому або проєктному використанню. Матриця показує наявність тієї чи іншої функції в різних підходах щодо вирішення завдання й не містить кількісної оцінки ефективності підходу, тому в ній відсутні суб'єктивні бальні показники.

Таблиця 1

Функціональна повнота відомих підходів щодо керування продуктивністю струминного подрібнення

Клас підходів	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Технологічні та регресійні моделі [2, 3]	○	○	◐	○	○	○
Акустичний моніторинг та ідентифікація режимів [1, 8]	●	●	●	○	◐	○
САК на основі експериментальних даних [9]	●	●	●	●	○	○
Керування масовою витратою за акустичним каналом [4]	●	●	●	●	○	○
Релейне керування завантаженням камери [5]	●	●	●	●	○	○
Нечітка модель процесу подрібнення [6]	○	○	◐	○	○	◐
Напрям дослідження: нечітке керування продуктивністю	●	●	●	●	●	●

● – реалізовано; ◐ – реалізовано частково або опосередковано; ○ – не реалізовано.
F1 – акустичний моніторинг; F2 – формування інформаційних ознак за результатом моніторингу; F3 – ідентифікація режиму подрібнення; F4 – замкнене автоматичне керування подаванням матеріалу; F5 – статистичне подання невизначеності ознак; F6 – нечітке формування керуючого впливу. Позначки характеризують наявність функції, а не ефективність підходу.

Матриця показує, що замкнене керування подаванням матеріалу за акустичним інформаційним каналом реалізовано в підходах [4, 5, 9]. У цих рішеннях не передбачено статистичного подання невизначеності інформаційних ознак і нечіткого формування керуючого впливу. Нечітка модель [6] відтворює нелінійні залежності процесу, але не утворює замкненого акустичного контуру. Невирішеною залишається інтеграція акустичної ідентифікації режиму та нечіткого закону керування продуктивністю зі статистично обґрунтованими межами технологічних станів.

Мета дослідження. Метою дослідження є систематизація підходів до автоматичного керування струминним подрібненням за акустичним зворотним зв'язком та обґрунтування структури і завдань створення системи нечіткого автоматичного керування продуктивністю, у якій вплив на механізм подавання матеріалу формується за функціями належності, визначеними зі статистичних розподілів акустичних інформаційних ознак зони подрібнення.

Досягнення поставленої мети передбачає класифікацію відомих методів за повнотою реалізованих функцій; установлення меж застосовності акустичних ознак режиму подрібнення для оцінювання продуктивності; формування переліку статистичних і часових характеристик, необхідних для побудови функцій належності та бази нечітких правил; обґрунтування структури замкненого контуру; визначення показників порівняльного оцінювання нечіткого і релейного автоматичного керування подаванням матеріалу.

Викладення основного матеріалу дослідження. Струминна подрібнювальна установка функціонує як система з двома технологічно пов'язаними, але функціонально відокремленими контурами автоматичного керування (рис. 1). Контур продуктивності формує вплив на положення засувки завантажувального бункера, тоді як контур якості змінює частоту обертання ротора класифікатора. Різні керовані величини та виконавчі механізми дають змогу синтезувати закони керування окремо. Водночас зміна режиму класифікації змінює циркуляційне навантаження, тому для контуру продуктивності ця дія враховується як збурення.

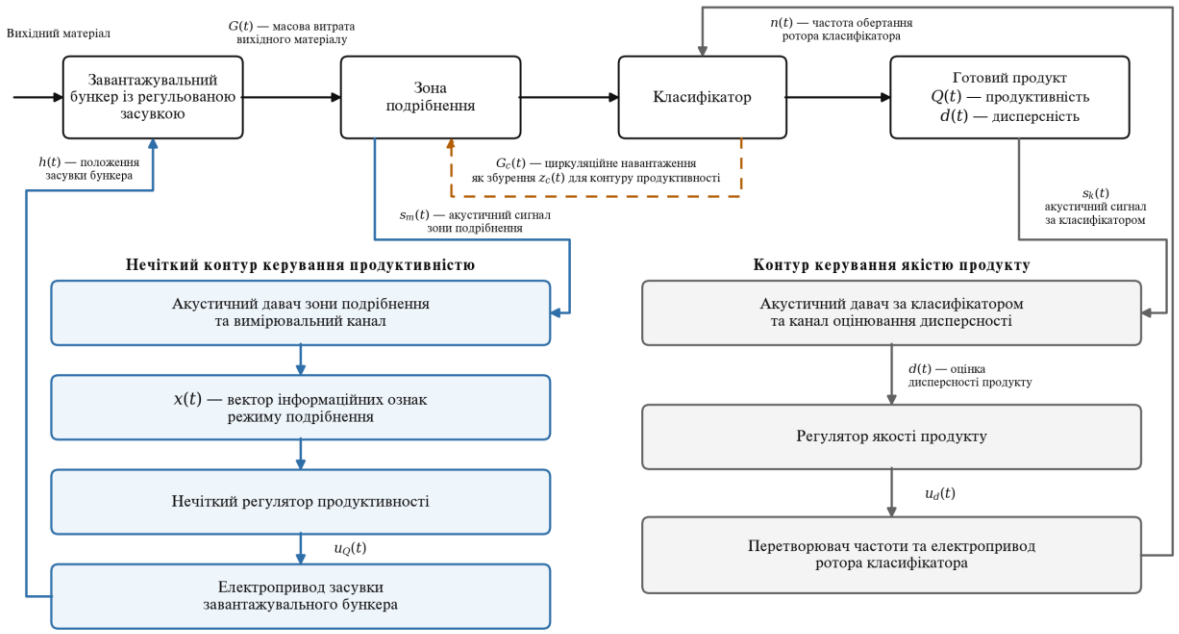


Рисунок 1 – Структура двоконтурного автоматичного керування струминною подрібнювальною установкою

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

У нечіткому контурі керування продуктивністю керуючий сигнал надходить до електропривода засувки завантажувального бункера. Положення засувки $h(t)$ визначає масову витрату вихідного матеріалу $G(t)$, яка безпосередньо впливає на завантаження зони подрібнення та продуктивність $Q(t)$. Стан процесу оцінюється за акустичним сигналом $s_m(t)$, зареєстрованим у зоні подрібнення. Після попереднього опрацювання сигнал перетворюється на вектор інформаційних ознак $x(t)$, що характеризує режими недовантаження, раціонального завантаження та перевантаження камери [1, 4, 8, 9]. Нечіткий регулятор формує вплив лише на канал подавання вихідного матеріалу.

У контурі керування якістю акустичний сигнал $s_k(t)$, зареєстрований за класифікатором, використовується для оцінювання дисперсності готового продукту $d(t)$. Регулятор якості формує сигнал для перетворювача частоти та електропривода ротора класифікатора, змінюючи частоту його обертання $n(t)$. Зміна $n(t)$ впливає на межу розділення частинок і величину циркуляційного навантаження $G_c(t)$. Для контуру продуктивності циркуляційне навантаження є збуренням $z_c(t)$, оскільки воно змінює завантаження камери та інтенсивність зіткнень частинок [3, 7, 9]. Отже, функціональна відокремленість критеріїв двох контурів не означає динамічної розв'язаності технологічного об'єкта; взаємний вплив враховується через матеріальний циркуляційний потік.

Інформаційна основа нечіткого керування. До вектора $x(t)$ доцільно включати лише ознаки, для яких попередніми дослідженнями встановлено стійкий зв'язок із завантаженням камери та продуктивністю. Потенційними складовими є амплітудні, енергетичні, частотні та комплексні технолого–акустичні критерії [1, 4, 8]. Остаточний склад вектора визначається не кількістю доступних параметрів, а роздільною здатністю щодо суміжних технологічних режимів, стійкістю до зміни властивостей матеріалу, кореляційною надлишковістю та тривалістю обчислення в реальному часі.

Статистичне формування функцій належності. Для кожної відібраної ознаки мають бути сформовані експериментальні вибірки, що відповідають режимам недовантаження, раціонального завантаження і перевантаження. Положення, розсіювання та області перекриття емпіричних розподілів визначають параметри функцій належності. За такого підходу межі нечітких термів відображають фактичну статистичну мінливість інформаційних ознак, а не задаються виключно за експертними припущеннями. Області перекриття розподілів інтерпретуються як зони неоднозначної ідентифікації технологічного стану.

Вибір мінімально достатнього вектора ознак. Окрема інформаційна ознака може не забезпечувати стійкого розділення режимів у всій області роботи установки. У цьому разі рішення має ґрунтуватися на сукупності взаємодоповнювальних ознак. Перед їх об'єднанням необхідно оцінити взаємну кореляцію, статистичну значущість відмінностей між режимами та чутливість до зміни гранулометричного складу і фізико–механічних властивостей вихідного матеріалу. Обмеження розмірності вектора зменшує обчислювальне запізнення та підвищує придатність алгоритму до реалізації в реальному часі.

Урахування часових властивостей інформаційного каналу. Розмір вікна накопичення акустичних даних визначає компроміс між статистичною стійкістю ознак і

швидкодією системи. До загального запізнення входять час накопичення вибірки, попереднього опрацювання сигналу, обчислення ознак, формування нечіткого висновку, зміни положення засувки та перебудови матеріальних потоків у камері. Керуюче рішення має підтверджуватися послідовністю інформаційних вікон, а частота зміни положення засувки повинна узгоджуватися з інерційністю подрібнювальної установки. Це обмежує надмірно часті спрацьовування виконавчого механізму та зменшує ризик реакції на короткочасні акустичні відхилення.

Формування нечіткого керуючого впливу. Вхідними змінними регулятора є ступені належності поточного стану до основних режимів подрібнення, а також, за результатами перевірки інформативності, напрям і швидкість зміни окремих ознак. За недовантаження керуючий вплив має збільшувати подавання матеріалу; у раціональній області – утримувати або коригувати його з малою інтенсивністю; за наближення до перевантаження – завчасно зменшувати подавання. Величина корекції визначається не лише ідентифікованим класом, а й ступенем належності та стійкістю його підтвердження у часі. На виході регулятора необхідно врахувати допустимий діапазон положення засувки і максимальну швидкість зміни її положення.

Порівняльне оцінювання законів керування. Нечіткий і відомий релейний закони мають порівнюватися за однакових послідовностей зміни властивостей та витрати вихідного матеріалу, циркуляційного навантаження і режиму класифікації. До показників оцінювання належать середня продуктивність, коефіцієнт її варіації, частка часу перебування в області раціонального завантаження, тривалість і частота наближення до перевантаження, час відновлення режиму після збурення та кількість спрацьовувань електропривода засувки. Таке зіставлення дає змогу відокремити підвищення продуктивності від небажаного зменшення запасу технологічної стійкості.

Завдання подальшого експериментального дослідження. Експериментальна програма має охоплювати усталені режими та переходи між ними, різні рівні подавання матеріалу, зміни частоти обертання класифікатора і варіації властивостей сировини. Для кожного режиму необхідно синхронно реєструвати акустичні сигнали, положення засувки, частоту обертання ротора, продуктивність і показники дисперсності. Одержані дані використовуються для статистичної перевірки ознак, побудови функцій належності, формування бази правил і незалежної перевірки нечіткого регулятора на вибірках, які не застосовувалися під час його параметризації.

Прогнозовані результати та практична значущість. Результатом подальшого дослідження має стати статистично обґрунтований склад акустичних інформаційних ознак, параметризовані за експериментальними розподілами функції належності, база нечітких правил і замкнена модель контуру керування продуктивністю. Практична значущість полягає у можливості зменшення частоти необґрунтованих переміщень засувки, підвищення тривалості роботи в області раціонального завантаження та збереження запасу до перевантаження за дії технологічних збурень. Кількісні переваги порівняно з релейним законом мають бути встановлені за результатами моделювання й експериментальної перевірки.

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

Висновки. Проведений аналіз підтвердив, що акустичні інформаційні ознаки зони подрібнення можуть бути використані для опосередкованого оцінювання завантаження камери та формування зворотного зв'язку в системі автоматичного керування продуктивністю струминної установки. Розроблені раніше порогові й релейні алгоритми забезпечують коригування подавання матеріалу, однак не враховують ступінь невизначеності ідентифікації режиму в областях перекриття статистичних розподілів ознак та часові обмеження акустичного інформаційного каналу.

Структура автоматичного керування струминною подрібнювальною установкою містить функціонально відокремлені контури продуктивності та якості продукту. Нечіткий закон керування доцільно реалізовувати в контурі продуктивності шляхом зміни положення засувки завантажувального бункера. Контур якості діє на частоту обертання ротора класифікатора, а зумовлена зміною режиму класифікації варіація циркуляційного навантаження враховується в контурі продуктивності як технологічне збурення.

Формування функцій належності має ґрунтуватися на статистичних розподілах інформативних амплітудних, енергетичних, частотних і комплексних ознак для ідентифікованих режимів подрібнення. Склад вектору ознак визначається за їхньою роздільною здатністю, статистичною стійкістю, кореляційною надлишковістю та тривалістю обчислення. Нечіткий регулятор повинен ураховувати не лише поточний рівень ознак, а й напрям та швидкість їх зміни, тривалість підтвердження стану та допустиму частоту переміщення засувки.

Подальша перевірка запропонованого підходу передбачає параметризацію функцій належності за експериментальними вибірками, формування бази нечітких правил і порівняння нечіткого та релейного законів за середньою продуктивністю, варіацією продуктивності, тривалістю роботи в області раціонального завантаження, запасом до перевантаження, часом відновлення після збурення та кількістю спрацьовувань електропривода засувки. Сукупність цих показників дає змогу оцінити підвищення ефективності керування продуктивністю струминної установки без зниження технологічної стійкості процесу подрібнення.

ЛІТЕРАТУРА

1. Pryadko N.S., Ternova K.V. Acoustic Monitoring of Jet Grinding. Kyiv: Akademperiodyka, 2020. 192 p. DOI: https://doi.org/10.15407/akademperiodyka.409.192.

2. Urbaniak D., Otwinowski H., Wyleciał T., Zhukov V. P., Barochkin A. Y., Boryca J. Research on the Grinding Energy Density in a Jet Mill. Materials. 2021. Vol. 14, No. 8. Article 2008. DOI: https://doi.org/10.3390/ma14082008.

3. Pryadko N. S., Bublikov A. V., Ternova K. V., Muzyka L. V. Jet Grinding as a Control Object. System Technologies. 2021. No. 2 (133). P. 119–126.
DOI: https://doi.org/10.34185/1562–9945–2–133–2021–13.

4. Muzyka L. V., Pryadko N. S., Strelnikov H. A., Grenev A. F. Control of Mass Flow in Jet Mill on the Base of Acoustic Monitoring. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2019. No. 4. P. 5–10. DOI: https://doi.org/10.29202/nvngu/2019–4/3.

5. Bublikov A.V., Pilov P.I., Pryadko N. S., Papaika Y. A., Ternova K. V. Automatic Control of Jet Grinding on the Basis of Acoustic Monitoring of Mill Operating Zones. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2021. No. 4. P. 29–34.
DOI: https://doi.org/10.33271/nvngu/2021–4/029.
6. Krzywanski J., Urbaniak D., Otwinowski H., Wyleciał T., Sosnowski M. Fluidized Bed Jet Milling Process Optimized for Mass and Particle Size with a Fuzzy Logic Approach. Materials. 2020. Vol. 13, No. 15. Article 3303. DOI: https://doi.org/10.3390/ma13153303.
7. Ternova K.V., Muzyka L.V., Pryadko N.S. Regression Model of the Classification Process at Jet Grinding. System Technologies. 2019. No. 6 (125). P. 113–120.
DOI: https://doi.org/10.34185/1562–9945–6–125–2019–11.
8. Pryadko N. S., Ternova K. V., Strelnykov H. O., Muzyka L. V., Verhorobina I. V. Acoustic Method of Jet Grinding Study and Control. E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 109. Article 00074. DOI: https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900074.
9. Pryadko N.S., Bublikov A.V., Muzyka L.V. Automatic Control System of Jet Grinding Based on Experimental Data. System Technologies. 2020. No. 2 (127). P. 140–149.
DOI: https://doi.org/10.34185/1562–9945–2–127–2020–11.
10. Holinko O.V., Alekseev M.O., Holinko V.I., Zabelina V.A. Application of Singular Spectral Analysis in Control Systems of Technological Processes and Explosion Safety Control of Facilities. Radio Electronics, Computer Science, Control. 2025. No. 1. P. 209–219.
DOI: https://doi.org/10.15588/1607–3274–2025–1–19.
11. Shen C.H. Acoustic Emission Based Grinding Wheel Wear Monitoring: Signal Processing and Feature Extraction. Applied Acoustics. 2022. Vol. 196. Article 108863.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2022.108863.

REFERENCES

1. Pryadko, N.S., & Ternova, K.V. (2020). Acoustic monitoring of jet grinding. Akademperiodyka. https://doi.org/10.15407/akademperiodyka.409.192
2. Urbaniak, D., Otwinowski, H., Wyleciał, T., Zhukov, V. P., Barochkin, A. Y., & Boryca, J. (2021). Research on the grinding energy density in a jet mill. Materials, 14(8), 2008. https://doi.org/10.3390/ma14082008
3. Pryadko, N.S., Bublikov, A.V., Ternova, K.V., & Muzyka, L.V. (2021). Jet grinding as a control object. System Technologies, 2(133), 119–126. https://doi.org/10.34185/1562–9945–2–133–2021–13
4. Muzyka, L.V., Pryadko, N. S., Strelnikov, H.A., & Grenev, A.F. (2019). Control of mass flow in jet mill on the base of acoustic monitoring. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, (4), 5–10. https://doi.org/10.29202/nvngu/2019–4/3
5. Bublikov, A.V., Pilov, P. I., Pryadko, N. S., Papaika, Y. A., & Ternova, K. V. (2021). Automatic control of jet grinding on the basis of acoustic monitoring of mill operating zones. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, (4), 29–34. https://doi.org/10.33271/nvngu/2021–4/029

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

6. Krzywanski, J., Urbaniak, D., Otwinowski, H., Wyleciał, T., & Sosnowski, M. (2020). Fluidized bed jet milling process optimized for mass and particle size with a fuzzy logic approach. Materials, 13(15), 3303. https://doi.org/10.3390/ma13153303
7. Ternova, K. V., Muzyka, L. V., & Pryadko, N. S. (2019). Regression model of the classification process at jet grinding. System Technologies, 6(125), 113–120.
https://doi.org/10.34185/1562–9945–6–125–2019–11
8. Pryadko, N. S., Ternova, K. V., Strelnykov, H. O., Muzyka, L. V., & Verhorobina, I. V. (2019). Acoustic method of jet grinding study and control. E3S Web of Conferences, 109, 00074. https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900074
9. Pryadko, N. S., Bublikov, A. V., & Muzyka, L. V. (2020). Automatic control system of jet grinding based on experimental data. System Technologies, 2(127), 140–149.
https://doi.org/10.34185/1562–9945–2–127–2020–11
10. Holinko, O. V., Alekseev, M. O., Holinko, V. I., & Zabelina, V. A. (2025). Application of singular spectral analysis in control systems of technological processes and explosion safety control of facilities. Radio Electronics, Computer Science, Control, (1), 209–219.
https://doi.org/10.15588/1607–3274–2025–1–19
11. Shen, C. H. (2022). Acoustic emission based grinding wheel wear monitoring: Signal processing and feature extraction. Applied Acoustics, 196, 108863.
https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2022.108863

Received 16.06.2026.
Accepted 17.08.2026.
Published 30.10.2026

Automatic control of the jet milling process based on acoustic information features: current status and research objectives

A critical analysis of the prerequisites for developing automatic control of the jet milling process using acoustic feedback is presented. It is shown that known acoustic information features enable the identification of the operating modes of the milling unit, while relay–based control of material feed ensures that the chamber load is maintained near an optimal range. However, threshold–based decision–making fails to adequately account for the statistical variability of these features or the temporal characteristics of the information channel. A direction for future research is proposed, involving the construction of membership functions based on the statistical distributions of acoustic features and the development of a fuzzy automatic control system for throughput, where the control action on material feed is determined by the acoustic identification of the milling mode.

The analysis confirms that acoustic features from the milling zone can be utilized for the indirect estimation of chamber load and for establishing feedback within an automatic throughput control system for jet milling units. While previously developed threshold and relay–based algorithms allow for the adjustment of material feed, they do not account for the degree of uncertainty in mode identification—particularly where the statistical distributions of features overlap—nor do they consider the temporal limitations of the acoustic information channel.

Keywords: jet milling, automatic control system, acoustic signal, informational feature, fuzzy logic, membership function, statistical analysis, throughput, loading of the grinding chamber.

Прядко Наталія Сергіївна – завідувач відділу термогазодинаміки енергетичних установок Інституту технічної механіки НАНУ і ДКАУ.
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1656-1681
Іванов Даніїл Дмитрович – здобувач групи АРа-25-10 НТУ "Дніпровська політехніка", Україна.
ORCID: https://orcid.org/0009-0000-4503-5141.

Pryadko Nataliia – Head of Termogasdynamic Department of ITM NASU and SSAU.
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1656-1681
Ivanov Daniil – graduate student of the group APa-25-10, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine.
ORCID: https://orcid.org/0009-0000-4503-5141.

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)