

In the production of bent profiles, cold plastic deformation is performed in places, for example, for a channel, between the shelf and the racks.

Cold-bent profiles are inferior in rigidity to hot-rolled ones.

For bent profiles, steels that can be welded are used.

In the modern world, work is constantly being done to reduce the cost of rolling production. At the same time, the requirements for the quality characteristics of the metal are constantly increasing. The use of steels from thermomechanical rolling leads to an increase in the tensile strength of the metal, a decrease in the linear mass of the meter of profiles and the mass of structures made of them.

The work proposes a developed technology for manufacturing cold-bent profiles with increased strength based on the use of low-carbon thermomechanically treated steels used for the production of welded pipes of large diameters.

In the production of bent profiles, it is proposed, for example, to use low-carbon rolled products according to API Spec 5L standards from steel X60 L415, where the tensile strength reaches 760 N/mm². This achieves a significant reduction in the mass of a linear meter of the profile compared to those currently produced. This leads to a reduction in the weight of structures. It is important that channels made of such steels can be welded.

Keywords: *Cold-bent profiles, weldability of metal, thermomechanically treated steels, increased strength, reduced mass of steel structures.*

Стаття надійшла 27.11.2025р.

УДК 669.1:681.5

doi.org/10.31498/2522-9990302025347111

Щербаков С. В.

ОПТИМІЗАЦІЯ ГРАНУЛОМЕТРИЧНОГО СКЛАДУ ПРОДУКТУ ПОДРІБНЕННЯ ЗАЛІЗНОЇ РУДИ В СИСТЕМАХ З АДАПТИВНИМ УПРАВЛІННЯМ

В умовах сучасного виробництва ефективне управління процесами та контроль технологічних параметрів набувають важливого значення для отримання якісного продукту. Впровадження інноваційних рішень є прямим шляхом до суттєвого підвищення якості виробництва, збільшення загальної ефективності, підвищення рівня промислової безпеки та оптимізації поточних витрат. З огляду на великий обсяг технологічних параметрів і необхідність швидкого прийняття рішень, якісне управління стає ключовим інструментом для досягнення даних цілей.

Процеси подрібнення і класифікації є критично важливими на початковому етапі технології збагачення руд. Рудний матеріал доводять до необхідної крупності, яка залежить від специфіки подальшої обробки. Оскільки перша стадія подрібнення визначає якісні показники кінцевого продукту, підвищення ефективності керування та модернізація обладнання (млинів, живильників, трубопроводів) є пріоритетним завданням. Це дозволяє гарантувати необхідну якість концентрату при одночасному зниженні його собівартості.

Наукові дослідження присвячені аналізу методів адаптивного керування замкнутим циклом подрібнення технологічних різновидів залізорудної сировини. Виконано огляд наукової та технічної літератури. Проведено критичний аналіз існуючих автоматичних систем керування процесом подрібнення та способів їх практичної реалізації. Розглянуто адаптивні системи керування та надано їх класифікацію. На основі проведеного аналізу сформульовано задачі та мету подальшого дослідження.

Зроблено аналіз функціонування системи керування подрібненням на основі стандартного ПІД-регулятора. Проведено дослідження показників якості регулювання системи в умовах зміни параметрів об'єкта управління. На основі отриманих результатів визначено вимоги до розробки ефективної системи, що базується на адаптивних методах керування.

Проведено експериментальне дослідження адаптивних регуляторів з оптимізаційними алгоритмами налаштування. Виконано аналіз динамічних показників якості адаптивної системи керування в умовах непостійності параметрів технологічного процесу.

Ключові слова: *Подрібнення руди, замкнений технологічний цикл, комп'ютерне моделювання, показники якості регулювання, адаптивний регулятор, мікропроцесорні засоби управління.*

Постановка проблеми. Узагальненим критерієм оцінки ефективності процесу подрібнення, як правило, слугує кількість подрібненого матеріалу цільового класу у зливні класифікатора, що функціонує в замкненому циклі з млином. Цей ключовий показник піддається постійним змінам через вплив багатьох чинників, таких як нестабільні характеристики сировини та варіативність режимних параметрів керування.

Одним із найбільш перспективних шляхів підвищення ефективності процесу подрібнення є впровадження адаптивних методів керування. Оскільки кульовий млин потребує точного та узгодженого алгоритму подачі сировини для оптимального використання як самого обладнання, так і вихідного матеріалу, адаптивні системи є необхідними.

Адаптивні системи керування здатні коригувати регулюючі впливи, пристосовуючись до змін внутрішніх і зовнішніх параметрів системи (наприклад, до непостійності складу вхідної сировини). Вони забезпечують високу точність керування та, як наслідок, покращення якості кінцевого продукту шляхом врахування нових умов виробництва та динамічної зміни характеристик об'єкта. Впровадження таких систем на підприємствах є актуальною необхідністю. Створення досконалих адаптивних систем пов'язане з певними викликами, зокрема, із розробкою точних пристроїв автоматичного контролю для вимірювання показників ефективності та забезпечення стабільності характеристик кінцевого продукту. Найбільш досконалий і перспективний підхід полягає у синтезі оперативних даних про внутрішній стан об'єкта та інформації про закономірності подрібнення з сучасними алгоритмами адаптивної ідентифікації та управління. Враховуючи, що подрібнення і класифікація залізорудної сировини є фундаментальними підготовчими етапами перед її збагаченням, задачі розробки та застосування адаптивних систем, що базуються на структурних моделях об'єкта управління, здатних здійснювати параметричну ідентифікацію в реальному часі та використовувати складні алгоритми обробки інформації, є на сьогодні надзвичайно актуальними.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Процес подрібнення є складною багатопараметричною системою, яка включає як керовані, так і некеровані змінні. За умов змінних характеристик рудного матеріалу звичайні системи керування, що не мають механізмів компенсації цих змін, не здатні забезпечити необхідну точність і стабільну якість кінцевого продукту.

Адаптивні системи керування (АСК) створені для того, щоб пристосовуватися до змін:

- параметрів вхідної сировини;
- характеристик технологічного обладнання.

Параметричні та координатні збурення, які неминуче виникають під час роботи млина, класифікатора та приводних механізмів, погіршують умови функціонування традиційних регуляторів. Відтак, для ефективного керування технологічним комплексом подрібнення є доцільним використання АСК, які здатні адаптуватися до динамічних змін параметрів процесу.

Металургія

З огляду на специфіку процесу подрібнення, зокрема на його динамічні характеристики, клас самоналагоджувальних адаптивних систем найкраще відповідає вимогам керування процесом подрібнення руди.

Функціональні схеми АСК зазвичай включають два ключові контури:

- основний контур - реалізує стандартний принцип керування;
- контур адаптації - забезпечує пристосування системи до змін.

АСК розрізняють за типом контуру адаптації:

- системи з розімкненим контуром адаптації: швидше завершують процес адаптації, але мають нижчу точність;
- системи із замкненим контуром адаптації: забезпечують вищу точність.

Зважаючи на те, що технологічний процес подрібнення має значне запізнення, для керування ним доцільно застосовувати АСК з розімкненим контуром адаптації [1]. Така система містить пристрій адаптації, який обробляє інформацію про зовнішнє середовище (збурення, зовнішні дії) та коригує керуючу дію регулятора.

Самоналагоджувальні системи функціонують завдяки наявності контуру самоналаштування. Його завдання полягає в оцінюванні динамічних і статичних властивостей системи та формуванні таких керуючих дій, які б забезпечили наближення системи до заданого критерію якості функціонування [2].

Окрему категорію становлять адаптивні системи з еталонною моделлю (АСК-ЕМ). Розробка та особливості функціонування цих систем широко обговорюються в науковій літературі [3–4].

Метод адаптивного управління, відомий як правила Зіглера-Ніколса, був запропонований [5] і належить до емпіричних методів налаштування. Регулятори, параметри яких визначено цим методом, зазвичай забезпечують перерегулювання в діапазоні від 10% до 60%.

Налаштування регулюючого пристрою здійснюється на підставі експериментальних даних, отриманих від реального об'єкта або його моделі. Широке застосування отримали два основні варіанти цього методу: налаштування за межею стійкості та налаштування за перехідною характеристикою.

Мета дослідження. Метою даного дослідження є оптимізація процесу регулювання циклу подрібнення залізорудної сировини шляхом дослідження та розробки системи керування, що ґрунтується на адаптивних алгоритмах.

Для досягнення поставленої мети та вирішення проблеми керування замкненим циклом подрібнення залізорудної сировини необхідно:

- проаналізувати системні взаємозв'язки між ключовими показниками технологічного процесу подрібнення та класифікації для різних типів залізорудної сировини з метою формалізації математичної моделі процесу подрібнення в замкненому циклі в умовах нестабільних технологічних параметрів;

- сформувати структуру адаптивної системи керування технологічним процесом подрібнення в замкненому циклі за умов нестабільності характеристик сировини та провести її дослідження на предмет здатності до адаптації при зміні параметрів технологічного об'єкта.

Для виконання поставлених задач застосовано наступні методи:

- аналіз вітчизняного та світового досвіду в галузі автоматизації процесів подрібнення;
- комп'ютерні, інформаційні та програмні технології;
- математичні методи теорії автоматичного керування;
- дослідження статистичних і динамічних характеристик процесу подрібнення в умовах нестабільності параметрів залізорудної сировини.

Основний матеріал дослідження. Процес подрібнення вважається одним із найбільш складних для регулювання технологічних процесів. Його ключовими характеристиками є

нелінійність та наявність великої кількості взаємопов'язаних параметрів керування. Оскільки контур подрібнення є чутливим до різноманітних збурень, ефективна компенсація їхнього негативного впливу потребує добре спроектованої та налаштованої системи керування. Великий вплив на показники якості регулювання мають транспортні затримки (запізнення), що виникають на різних ділянках технологічного процесу.

Традиційна система керування процесом реалізується за принципом відхилення поточного параметру від заданого значення з формуванням сигналу похибки. На підставі цього сигналу формується керуючий вплив за допомогою введення в систему регулятора, який працює за обраним типовим алгоритмом. В більшості сучасних систем використовується класичний регулятор, що працює за ПД (пропорційно-інтегрально-диференціальним) законом регулювання (рис. 1).

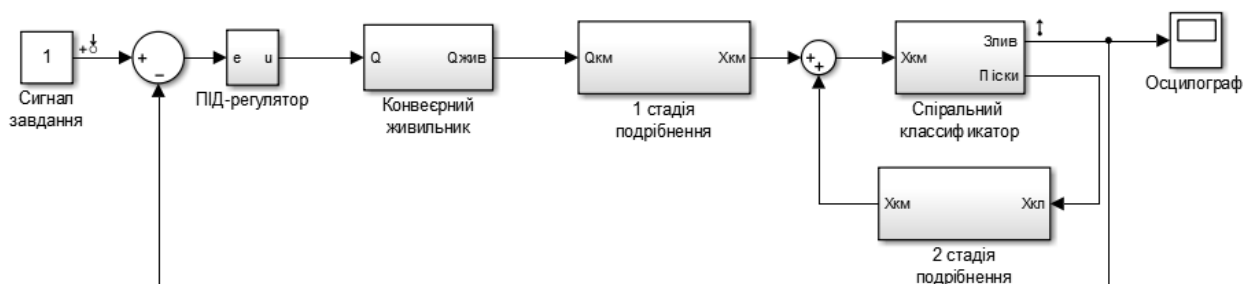


Рисунок 1 – Структура системи управління замкненим контуром подрібнення, що містить ПД-регулятор

Особливістю роботи таких систем є те, що налаштування регулятора не змінюються під час роботи системи. Однак система управління гранулометричним складом залізної руди є доволі динамічною та багатофакторною. Але ця динаміка ніяк не пов'язана з алгоритмом регулювання. За таких умов задовільних показників якості перехідного процесу можна досягти тільки у випадках, коли відсутні суттєві збурення, пов'язані зі зміною динамічних характеристик об'єкту або з наявністю завад по каналу зворотного зв'язку.

Одним із рішень розглянутої проблеми є інтеграція в контур регулювання ПД-регулятора з елементами адаптації його налаштувань (рис. 2). Процес адаптації може відбуватися шляхом застосування методів активного експерименту, під час якого в систему вводиться тестовий сигнал. Реакцією адаптивної моделі регулятора на такий сигнал буде зміна його параметрів, що призведе до виведення системи на межу стійкості.

Однак, методи активного експерименту не можна впроваджувати в умовах ведення безперервного технологічного процесу в реальному часі. В даному випадку, альтернативним варіантом є модифікація адаптивної складової регулятора шляхом введення рекурентної моделі оцінки вихідного значення (керуючого впливу), коли його поточне значення отримується на підставі попереднього. Тобто вводиться зворотній зв'язок по керуючому впливу.

Апробація подібної адаптивної системи відбувалась з використанням засобів моделювання середовища Simulink. В основі адаптивної складової моделі було використано алгоритм (контролер) Зіглера-Ніколса. Експеримент проводився шляхом внесення в систему регулювання комплексних координатних та параметричних збурень. Це означає, що під час роботи системи регулювання відбувалась зміна динамічних характеристик об'єкта та введення в канал зворотного зв'язку завад у вигляді «білого шуму» або випадкових значень, змодельованих за різними законами за допомогою блоків Random Number та Band-Limited White Noise середовища Simulink [6].

На рис. 2 представлена схема системи керування, яка використовує адаптивний ПІД-регулятор, налаштований за методом Зіглера-Ніколса. Ключовою особливістю цієї схеми є наявність фільтрації D-складової (диференціальної компоненти) в контурі управління. Фільтрація D-компоненти є необхідною для зменшення впливу високочастотного шуму (який особливо сильно впливає на диференціальну складову) та підвищення стійкості адаптивної системи керування. Контролер використовує три вхідні сигнали у дискретний момент часу k : $w(k)$ – сигнал еталонної моделі (або задане значення/уставка); $y(k)$ – сигнал на виході об'єкта керування; $U_{in}(k)$ – сигнал на вході об'єкта керування (керуючий вплив із попереднього кроку). На своєму виході контролер формує новий керуючий вплив для об'єкта керування, позначений як $u(k)$. Під час проведення досліджень будь-які параметри налаштування контролера можуть бути змінені у середовищі Simulink.

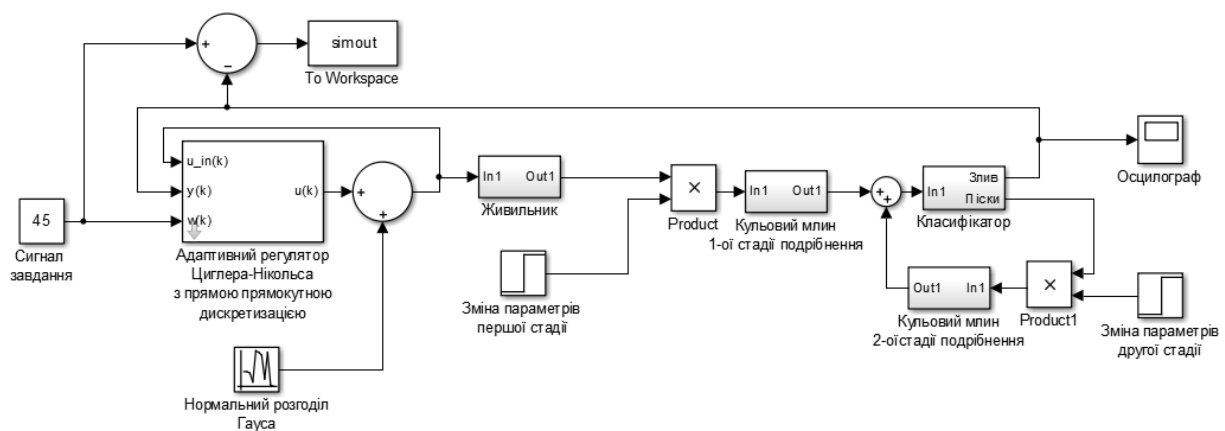
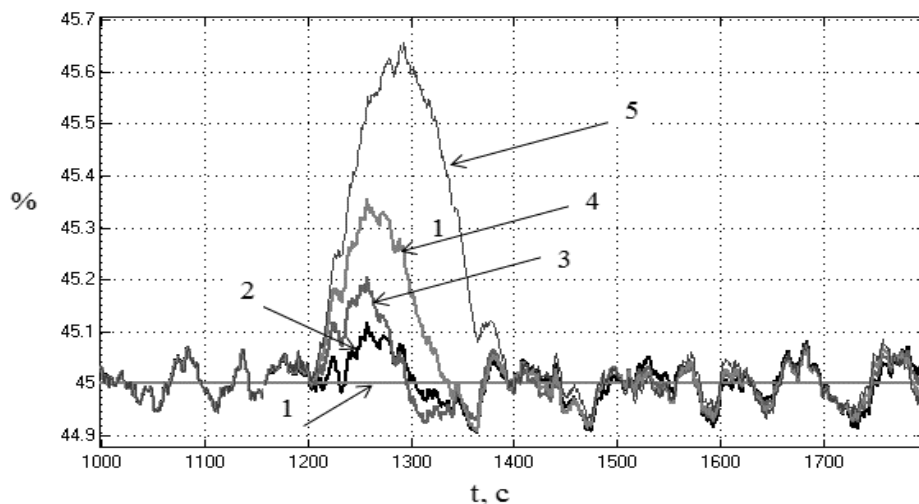


Рисунок 2 – Модель системи керування з адаптивним регулятором

Результати моделювання представлені на рис. 3. Графіки якісно відтворюють характер відхилення технологічного параметру від цільового (заданого) значення під час внесення комплексних збурень різної потужності. Аналіз показує, що амплітуда відхилення знаходиться в межах референтного інтервалу. Це підтверджує доцільність використання даної адаптивної моделі Зіглера-Ніколса в системах регулювання подібного класу.



1 – сигнал завдання; 2 – зміна параметрів на 10%, потужність шуму 0,2;
3 – на 20%, 0,4; 4 – на 30%, 0,6; 5 – на 40%, 0,8

Рисунок 3 – Апробація системи керування в умовах комплексних збурень

Металургія

Апробація запропонованого алгоритму управління не обмежувалась математичним моделюванням. Практичне дослідження забезпечувалося розробкою реальної системи автоматичного керування з використанням мікропроцесорних засобів.

Однією з задач роботи була розробка програмного забезпечення промислового контролера на базі PLC SIEMENS Simatic S 1500-H [7], який керує процесом подрібнення, а також конвеєрами фабрики.

Програма керуючого контролера була реалізована засобами мови програмування STEP7, що включає в себе головний організаційний блок OB1, функціональні блоки FB керування механізмами дробильної фабрики та блоки даних DB, в яких записані необхідні параметри керування двигунами, масляними станціями та іншим технологічним обладнанням.

ВИСНОВКИ

Аналіз наукових джерел, досліджень і практичних розробок у галузі збагачення залізорудної сировини підтверджує, що більшість чинних систем автоматизованого керування є застарілими. Вони не здатні адекватно враховувати багатовимірність об'єкта управління, його істотну нелінійність, нестационарність та постійну зміну технологічних параметрів у процесі експлуатації.

Системи автоматичного керування, в яких застосовано класичний ПІД-регулятор у контурі управління, демонструють задовільні показники якості керування лише за умови, що функціонують в усталеному стані, для якого було здійснено налаштування регулятора.

З огляду на цю ситуацію, провідним напрямом для розв'язання зазначеної проблеми є впровадження адаптивних систем керування. Ці системи забезпечують необхідне пристосування регулюючих впливів та налаштувань агрегатів до динамічних змін параметрів і характеристик як виробничого процесу, так і сировини, що переробляється.

Серед усіх досліджених алгоритмів адаптивного регулювання найкращі результати продемонстрував контролер Зіглера-Ніколса для процесів 3-го порядку з використанням апроксимації та фільтрації диференціальної складової.

Список використаних джерел

1. Попович М.Г., Ковальчук О.В. Теорія автоматичного керування. Підручник. - К.: Либідь, 1997. - 544 с.
2. Тютюнник, А. Г. Оптимальні і адаптивні системи автоматичного керування [Текст] : Навчальний посібник / А. Г. Тютюнник ; МОН України. – Житомир : ЖІТІ, 1998. – 512 с.
3. Morkun V., Tron V. Ecological and economic optimization of iron ore processing automated control, Metallurgical and Mining Industry, 2014, No5, p.p. 8-11.
4. Morkun V., Tron V. Ore preparation multi-criteria energy-efficient automated control with considering the ecological and economic factors, Metallurgical and Mining Industry, 2014, No5, p.p. 4-7.
5. Co, Tomas; Michigan Technological University (February 13, 2004). "Ziegler–Nichols Closed Loop Tuning" [Електронний ресурс]. – Режим доступу: URL: <http://www.chem.mtu.edu/~tbco/cm416/zn.html>.
6. Self-Tuning Controllers Simulink Library [Електронний ресурс]. – Режим доступу: URL: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/mlc-downloads/downloads/submissions/8381/versions/1/previews/help/html/zn2br.htm/>.
7. Офіційний сайт фірми Siemens [Електронний ресурс]. – Режим доступу URL: <https://www.cee.siemens.com/web/ua/ru/iadt/ia/sensors/instrumentation/batching-systems/milltronics/Pages/milltronics-1200-3600.aspx>.

OPTIMIZATION OF THE GRANULOMETRIC COMPOSITION OF IRON ORE GRINDING PRODUCT IN SYSTEMS WITH ADAPTIVE CONTROL

In a modern production environment, effective process management and control of process parameters are essential for producing a high-quality product. Implementing innovative solutions is a direct path to significantly improving production quality, increasing overall efficiency, enhancing industrial safety, and optimizing operating costs. Given the large volume of process parameters and the need for rapid decision-making, effective management is a key tool for achieving these goals.

The grinding and classification stage is a critical initial step in ore beneficiation technology. The ore material is refined to the required particle size, which depends on the specifics of subsequent processing. Since the first stage of grinding determines the quality of the final product, improving control efficiency and upgrading equipment (mills, feeders, pipelines) is a priority. This ensures the required concentrate quality while simultaneously reducing its cost.

This research is devoted to the analysis of adaptive closed-loop control methods for grinding various types of iron ore raw materials. A review of the scientific and technical literature is provided. A critical analysis of existing automatic grinding process control systems and methods for their practical implementation is conducted. Adaptive control systems are examined and their classification is presented. Based on the analysis, the objectives and goals of further research are formulated.

The performance of a grinding control system based on a standard PID controller is analyzed. The system's control performance indicators are studied under changing process parameters. Based on the obtained results, requirements for developing an effective system based on adaptive control methods are determined.

An experimental study of adaptive controllers based on optimization tuning methods is conducted. The dynamic performance indicators of the adaptive control system are analyzed under variable process parameters.

Keywords: *Ore crushing, closed technological cycle, computer modeling, control quality indicators, adaptive controller, microprocessor controls.*

Стаття надійшла 05.12.2025р.