

**В.О. Кондратець, проф., канд. техн. наук, О.М. Рева, проф., д-р техн. наук,
М.О. Карчевська, асп.**

Кіровоградський національний технічний університет

Дослідження кульового млина як керованого об'єкта по каналу продуктивності

Приведені результати розробки моделі кульового млина як керованого об'єкта по каналу продуктивності по готовому продукту. Показана можливість керування подрібненням з використанням вихідного живлення, циркулюючого навантаження, розрідженості пульпи та споживаної потужності. Для здійснення такого керування необхідно розробити засіб ідентифікації завантаження кульового млина рудою та підхід автоматичного формування й підтримання бажаної характеристики крупності кульового навантаження.

кульовий млин, модель, готовий продукт, циркулююче навантаження, ідентифікація завантаження, характеристика крупності, продуктивність

На рудозбагачувальних фабриках на подрібнення руди припадає майже 50% енергетичних витрат. Здебільшого його здійснюють у кульових млинах. Основним показником роботи кульового млина є кількість готового продукту у його розвантаженні. Ця величина є результатом впливу на процес багатьох факторів. Відпрацьовані на сьогодні підходи автоматичного керування кульовим млином не враховують багато з них. Поки що не знайдено єдиного найбільш ефективного підходу автоматичного керування даним об'єктом. Зокрема, не враховується розрідження пульпи, яке достатньо сильно впливає на дану вихідну величину і технічні засоби його забезпечення створюються в процесі виконання науково-дослідної роботи «Комп'ютерно-інтегрована система автоматичного регулювання співвідношення руда/вода в кульових млинах з циркулюючим навантаженням» (державний реєстраційний номер 0105U008334). Без системного дослідження кульового млина як керованого об'єкта по каналу продуктивності не можливо дати відповідь на ряд питань, що при цьому виникають. Тому тема даної статті є актуальною.

Моделюванням процесів у кульових млинах і їх автоматизацією у різні роки займаються Андрєєв С.Ю., Аршинський В.М., Бунько В.О., Воронов В.А., Давидкович А.С., Кочура Є.В., Марюта О.М., Разумов К.О., Тихонов О.М., Троп А.Ю., Утеуш Е.В., Шинкаренко С.Ф. та ін. В їх наукових працях викладені фундаментальні положення процесів у кульових млинах та підходів автоматичного керування ними. Однак не виконувалося системне дослідження кульового млина як керованого об'єкта по каналу продуктивності по готовому продукту з врахуванням останніх досягнень науки, практики, існуючих і створених засобів автоматизації цих процесів, в результаті яких було б обґрунтовано напрям подальшого удосконалення систем автоматичного управління подрібненням руди на збагачувальних фабриках.

Метою даної роботи є системне дослідження кульового млина як керованого об'єкта по каналу продуктивності з розробкою статичної моделі, що враховує всі важливі параметри, та визначенням необхідних засобів для здійснення такого автоматичного керування подрібненням руди.

Продуктивність кульових млинів залежить від багатьох факторів. Професором С.Андрєєвим введено три ряди факторів [1]. Перший ряд створюється факторами, які визначаються матеріалом, що подрібнюється: крупність вихідної руди, крупність подрібненого матеріалу, подрібнюваність руди. Другий ряд містить фактори, що

залежать від самого млина: конструкція кульового млина, його розміри, форма футеровки. Третій ряд подано факторами, що враховують умови експлуатації технологічного агрегату: відкритий або замкнутий цикл, ефективність роботи класифікуючого апарата, ступінь заповнення млина подрібнюючим середовищем, характеристика крупності, форма, густина, твердість подрібнюючих тіл, розрідження пульпи у млині, число обертів барабана. В процесі системного дослідження кульового млина як керованого об'єкта по каналу продуктивності нами отримана його математична модель (рис. 1).

Аналіз факторів, поданих на рис. 1, показує, що їх можливо представити у вигляді параметрів процесу, що оптимізується. При цьому звичайно за змістом виділяють вхідні, вихідні, збурюючі та керуючі параметри. Їх перерозподіл показано на рис. 2, а у вигляді загальної моделі кульового млина. Вхідні параметри можливо враховувати в процесі керування, а збурюючі – відхиляють керовану величину від приписаного значення, їх вплив здебільшого компенсують відповідними керуючими діями. В керованому об'єкті з'явилась ще одна вихідна величина – споживана потужність. Ця величина є допоміжною, вона характеризує стан кульового млина – чим вище значення даного параметра, тим більша продуктивність агрегату. Відповідно рис. 2, а кульовий млин має п'ять керуючих параметрів, тому необхідно обґрунтувати їх використання.

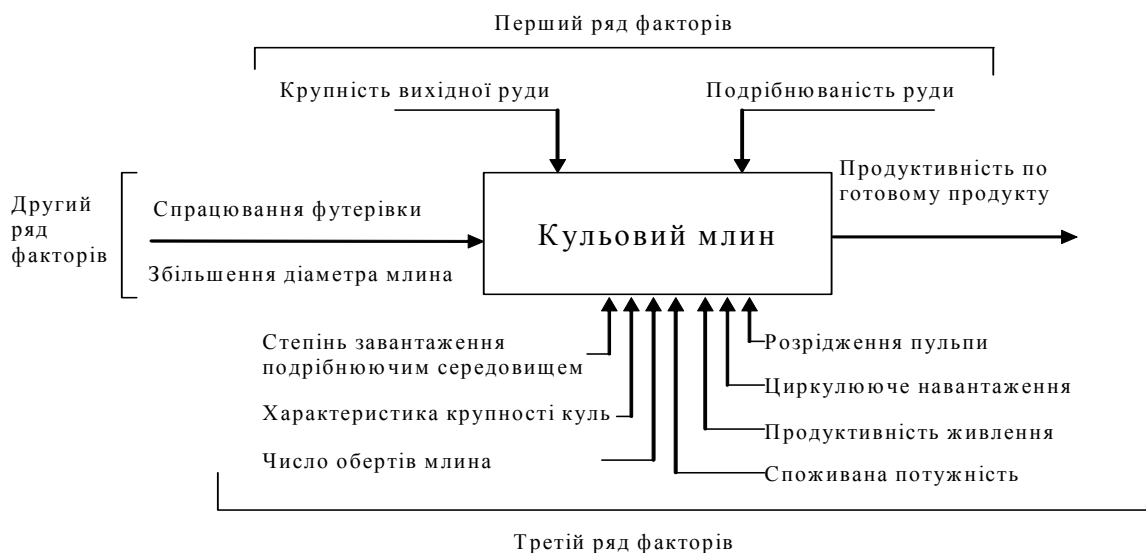


Рисунок 1 - Модель кульового млина як керованого об'єкта по каналу продуктивності по готовому продукту з факторами, що змінюються

Допустимо, що характеристика крупності куль відповідає заданій. Тоді збільшення внутрішнього діаметра барабана в наслідок спрацювання футеровки буде змінювати стан млина. Зокрема, буде змінюватися ступінь заповнення подрібнюючим середовищем і виникне невідповідність у швидкості обертання барабана. Результати розрахунків необхідної зміни швидкості обертання кульового млина наведені в табл. 1.

З даних табл. 1 видно, що при зменшенні товщини футеровки з 150 мм до 50 мм швидкість обертання барабана млина повинна зменшитися з 18,73 до 18,25 об/хв. Частка від критичного значення швидкості обертання складає 85,0...87,2%. Зміни швидкості обертання незначні, але виходять за межі вживаного діапазону. При спрацьованій футеровці оберти будуть перевищувати рекомендовані, що приводить до непродуктивної перевитрати електричної енергії. Запобігти цьому можливо, встановивши дещо меншу швидкість обертання млина при неспрацьованій футеровці.

Якщо при неспрацьованій футеровці встановити швидкість обертання барабана млина 18,25 об/хв., то при різній товщині футеровки частка критичного значення швидкості обертання барабана відповідно складе: 82,8% (150 мм), 83,33% (125 мм), 83,87% (100 мм), 84,4% (75 мм), 85,0% (50 мм). Оберти кульового млина не перевищують 85,0 % критичного значення. Однак дана проблема залишається. Покращити показники подрібнення можливо зміною швидкості обертання барабана млина. Використання даного показника в якості керуючого діяння запропоновано в роботі [2], однак тривалий час ця пропозиція не реалізується, хоч на початку 70-х років минулого століття Харківський електромеханічний завод розробляв і планував серійний випуск і впровадження таких електроприводів змінного струму. У сучасних дослідженнях відмічається, що млини зі змінною частотою обертання барабана розглядаються як необхідність в деяких, але не єдине рішення в інших випадках. Часто капітальні витрати на двигун зі змінною швидкістю переважають потенційну економічну вигоду від його використання [3]. При даному неширокому діапазоні зміни швидкості не можливо очікувати вигоди від реалізації такого управління.

Таблиця 1 - Потрібна і фактична швидкість обертання барабана кульового млина МШР 4,0 х 5,0 при спрацюванні футеровки

Товщина футеровки, мм	Внутрішній діаметр барабана, м	Критичне значення швидкості обертання, об/хв	Швидкість обертання барабана при 85% критичного значення об/хв	Частка критичного значення швидкості обертання при спрацюванні футеровки, %
150	3,70	22,04	18,73	85,00
125	3,75	21,90	18,62	85,53
100	3,80	21,76	18,50	86,08
75	3,85	21,61	18,37	86,67
50	3,90	21,47	18,25	87,20

В процесі спрацювання футеровки неперервно збільшується об'єм барабана кульового млина. При незмінному завантаженні куль у млині буде зменшуватися в ньому ступінь заповнення подрібнюючим середовищем. Результати розрахунку зміни об'ємів в млині приведені в табл. 2.

Таблиця 2 - Потрібний і фактичний об'єм куль в барабані кульового млина МШР 4,0 х 5,0 при спрацюванні футеровки

Товщина футеровки, мм	Внутрішній діаметр барабана, м	Об'єм барабана млина, м ³	Об'єм куль при 50% заповненні барабана, м ³	Частка, яку займають кулі в барабані, %
150	3,70	53,73	26,865	50,00
125	3,75	55,20	27,600	48,67
100	3,80	56,68	28,340	47,40
75	3,85	58,18	29,090	46,18
50	3,90	59,70	29,850	45,00

З даних табл. 2 видно, що при спрацюванні футеровки з 150 мм до 50 мм об'єм барабана збільшується з 53,73 м³ до 59,70 м³. При 50% заповненні барабана кулями їх об'єм приймав би значення в межах 26,865...29,85 м³. Оскільки первісний об'єм куль у млині не змінюється, при зростанні об'єму барабана ступінь заповнення його кулями зменшується з 50,00% до 45,00%. Така зміна знаходиться в межах допустимого діапазону 40...50%, однак при цьому дещо зменшується продуктивність млина. Зменшення продуктивності млина можна компенсувати керуванням по завантаженню – ступені заповнення млина подрібнюючим середовищем. Якщо при спрацюванні

футеровки вводити в барабан додаткові кулі до 50% заповнення об'єму, то в межах змін швидкості обертання млина 82,8...85,0% критичного значення подрібнення можна здійснювати на екстремумі залежності «споживана потужність – швидкість обертання барабана» [1]. При цьому отримуємо максимальну продуктивність кульового млина не змінюючи швидкості його обертання. Тобто, таким підходом можна повністю компенсувати вплив зміни діаметра барабана при спрацюванні футеровки. Однак здійснити таке керування технічно складно, особливо враховуючи необхідність забезпечення заданої характеристики крупності куль. З іншого боку, залежності «споживана потужність – швидкість обертання барабана» [1] показують, що в межах змін швидкості обертання і степені заповнення подрібнюваним середовищем, викликаних спрацюванням футеровки, продуктивність млина зменшується по точкам екстремумів, тобто, найменшим з можливих втрат значенням. Така зміна продуктивності млина незначна. Враховуючи, що первісний режим кульового млина при новій футеровці знаходиться в точці, максимально наближений до можливого перевантаження, а по мірі спрацювання футеровки дещо віддаляється від неї, такий підхід керування слід визнати ефективним. Тому, вибравши правильно початкову швидкість обертання кульового млина, можливо забезпечити його ефективну роботу при незмінних кульовому навантаженні і швидкості обертання. При цьому керуючі параметри – ступінь заповнення подрібнюючим середовищем і число обертів необхідно стабілізувати. Останній стабілізується синхронним електричним приводом, а перший – розробленими і випробуваними засобами автоматичного дозавантаження куль.

Виключивши параметри, які стабілізуються, отримаємо раціональну модель кульового млина як керованого об'єкта по каналу продуктивності по готовому продукту, що оптимізується (рис. 2, б). Раціональна модель кульового млина має один збурюючий, два вхідних, два вихідних і три керуючих параметра. Збурюючий параметр – характеристика крупності куль буде негативно впливати на продуктивність млина по готовому продукту у випадку відхилення від найкращого значення. Тому найкраще значення характеристики крупності куль необхідно відшукати і підтримувати на даному рівні. Цю задачу необхідно розв'язати.

Зміну вхідних параметрів – крупності вихідної руди і її подрібнюваності можливо компенсувати керуючими діями.

В кульовому млині не існує аналітичних зв'язків вихідної величини з керуючими діями та вхідними параметрами, їх можна розглядати лише як тенденції. Однак відомо, що в кульових млинах першої стадії подрібнення збільшення вмісту твердого в пульпі до межі, при якій вона ще залишається рухомою (80...85% руди), підвищує продуктивність процесу. Це відбувається завдяки збільшенню кількості зерен, які попадають в зону ударних дій куль в густій пульпі. У кульових млинах з розвантаженням через ґрати зменшення густини пульпи викликає зниження виходу дрібних класів у подрібненому продукті, що пояснюється більш швидким проходженням руди через барабан млина. Звичайно чим вищий вміст твердого у пульпі, тим більш тонкий злив млина. Найвищий вміст готового продукту отримують при 78...84% твердого у пульпі, яке збільшувати не можливо в наслідок великої імовірності злипання куль і стрімкого зменшення продуктивності млина. У кульових млинах з центральним розвантаженням більш тонкий продукт отримують при розріджених пульпах. Ці кульові млини можуть ефективно працювати при вмісті твердого 60...80%, однак в них оптимум здвигається у бік менших значень – 62...68% у зв'язку зі збільшенням опору густої пульпи дрібним кулям. Отож, регулювання кульовими млинами доцільно починати з найменшого вказаного вмісту твердого у пульпі.

Крім цього у кульових млинах для кожного різновиду руди (подрібнюваність, крупність) існують оптимальні величини валової продуктивності і циркулюючого

навантаження, при яких забезпечується найбільш висока продуктивність по готовому продукту. Для ефективної роботи млинів у замкнутому циклі циркулююче навантаження повинно бути не меншим 150...200% [4] – це є нижньою межею обмеження даного параметра. З іншого боку, оптимальне циркулююче навантаження при транспортуванні матеріалу між млином і класифікатором за допомогою завиткових живильників повинно складати 200...400%. Верхня границя цього діапазону повинна задовольняти умові $Q/V \leq 12 \text{ т/м}^3 \cdot \text{год}$, де Q – продуктивність млина по загальному живленню, т/год; V – об’єм млина м^3 [4]. Отож, оптимальні значення циркулюючого навантаження повинні знаходитись в межах 200...400%.



Рисунок 2 - Загальна (а) та раціональна (б) моделі кульового млина як керованого об’єкта по каналу продуктивності по готовому продукту, що оптимізується

Величина циркулюючого навантаження при заданій крупності подрібнення залежить від степені подрібнення (початкового розміру шматків вихідної руди) і подрібнюваності руди. При збільшенні степені подрібнення (крупності твердого на вході) і погіршенні подрібнюваності руди циркулююче навантаження зростає. Залежність питомої продуктивності млина по готовому продукту від величини циркулюючого навантаження має екстремальний характер з максимумом показника. Всі можливі сполучення крупності і подрібнюваності вихідної руди створюють достатньо широкий перелік її різновидів, які характеризуються сім’єю екстремальних залежностей. Оскільки циркулююче навантаження зростає при збільшенні продуктивності живлення, збільшуючи поетапно подачу матеріалу на вході млина при найменшому вмісті твердого у пульпі, можна при будь-якому різновиді руди відшукати

і підтримувати екстремальне значення питомої продуктивності технологічного агрегату по готовому продукту. Однак потік живлення вихідною рудою і циркулююче навантаження кульового млина не характеризують його стан. Кульовий млин працює найбільш ефективно, коли його об'єм на 50% заповнено різнорозмірними кулями і подрібнюваною рудою. При цьому руда повинна знаходитись у проміжках між кулями, які складають близько 38% загального об'єму, зайнятого подрібнюючим середовищем. Такий стан млина контролювати практично не можливо, тому звертаються до непрямих методів оцінювання його завантаження. Здебільшого використовують звукометричні підходи та методи, зв'язані з масою всього барабана, футеровки, куль та руди. Якість керування можна значно покращити, якщо визначати параметри безпосередньо руди, яка знаходиться у барабані млина. Даний підхід ідентифікації завантаження кульового млина рудою необхідно розробити.

Підтримуючи достатньо точно завантаження кульового млина рудою на найвищому рівні зміною продуктивності живлення, можливо підвищенням вмісту твердого у пульпі досягти максимального значення споживаної потужності. Це буде відповідати найвищій продуктивності млина по готовому продукту.

Таким чином, створена модель кульового млина як керованого об'єкта по каналу продуктивності по готовому продукту дозволяє організувати керування процесом подрібнення з використанням продуктивності живлення, циркулюючого навантаження та розрідження пульпи. Вихідним параметром є питома продуктивність по готовому продукту, а додатковою вихідною величиною – споживана потужність. Реалізація такого керування кульовим млином потребує розробки засобу ідентифікації його завантаження рудою та підходу автоматичного формування і підтримання необхідної характеристики крупності кульового навантаження.

На підставі проведених досліджень створюється перспектива розробки засобу ідентифікації завантаження кульового млина рудою, підходу автоматичного формування та підтримання необхідної характеристики крупності кульового навантаження та системи автоматичного керування кульовим млином за продуктивністю по готовому продукту

Список літератури

1. Андреев С.Е., Зверевич В.В., Перов В.А. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. – М.: Недра, 1966. – 396 с.
2. Утеуш З.В., Утеуш Э.В. Управление измельчительными агрегатами. – М.: Машиностроение, 1973. – 280 с.
3. Андреев Е.Е., Николаева Н.В. Исследование процесса измельчения на математических моделях // Обогащение руд. – 2007. - №2. – С.3 - 5.
4. Разумов К.А. Проектирование обогатительных фабрик. – М.: Недра, 1970. – 592 с.

Приведены результаты разработки модели шаровой мельницы как управляемого объекта по каналу производительности по готовому продукту. Показана возможность управления измельчением с использованием исходного питания, циркулирующей нагрузки, разжижения пульпы и потребляемой мощности. Для осуществления такого управления необходимо разработать средство идентификации загрузки шаровой мельницы рудой и подход автоматического формирования и поддержания требуемой характеристики крупности шаровой нагрузки.

Results of development of model of a spherical mill as controlled object on the channel of productivity on a ready product are resulted. The opportunity of management by crushing with use of the initial meal, circulating loading, dilution pulps and is shown power consumption. For realization of such management it is necessary to develop means of identification of loading of a spherical mill ore and the approach of automatic formation and maintenance of the required characteristic to the largeness spherical loading.