

Теоретичне дослідження динаміки САР розрідження пульпи в млинах з циркулюючим навантаженням

В статті приведені результати теоретичних досліджень динаміки системи автоматичного регулювання розрідження пульпи в млинах з циркулюючим навантаженням. Показано, що розроблена система є стійкою при вибраних параметрах лінійної та нелінійної частини, автоколивання в якій не можливі. Запропонований ідеальний релейний елемент, що може спрацьовувати і відпускати при різниці в сигналах всього на 1,0 % від заданого значення співвідношення руда/вода, забезпечує високу якість автоматичного регулювання. Система забезпечує найкращу якість при максимально можливому в ній передавальному відношенні редуктора виконавчого механізму, що дорівнює 0,02.

теоретичне дослідження, динаміка САР, розрідження пульпи, млин з циркулюючим навантаженням

В Україні збагачення бідних залізних руд отримало широке розповсюдження. Зокрема, тут розміщені найбільші у світі гірничозбагачувальні комбінати, де корисні копалини здебільшого у першій стадії подрібнюються кульовими млинами з циркулюючим навантаженням, які споживають велику кількість куль, футерівки та електричної енергії. Найкращі показники при номінальному завантаженні рудою вони забезпечують в умовах певного співвідношення руда/вода, що визначається

© В.О. Кондратець, О.М. Сербул, 2011

особливостями руди та її крупністю. Відсутність ефективних засобів автоматичного підтримання даного параметра на заданому рівні приводить до значних непродуктивних втрат електричної енергії, куль і футерівки та до недоотримання готового продукту. Нерозв'язання даної задачі гальмує реалізацію Державної науково-технічної програми «Ресурсозберігаючі технології нового покоління в гірничо-металургійному комплексі», затвердженої Законом України «Про основи державної політики у сфері науки і науково-технічної діяльності», по напрямку 5.3.1 «Розробка технологій видобутку та збагачення сировинних матеріалів для металургійного виробництва, в тому числі з використанням відходів виробництва» та вимагає розробки теми «Комп'ютерно інтегрована система автоматичного регулювання співвідношення руда/вода в кульових млинах з циркулюючим навантаженням» (реєстраційний номер 0106U000981), яка входить до плану наукової тематики Кіровоградського національного технічного університету і присвячена даній проблемі. Враховуючи, що САР розрідження пульпи займає одне з центральних місць у розв'язанні даної задачі, тема статті є актуальною.

Дослідженням і розробкою даних засобів в різні роки займається ряд науковців – це А.Г. Астахов, В.О. Бунько, В.А. Воронов, Ю.Г. Качан, В.З. Козін, Є.В. Кочура, О.М. Марюта, В.С. Моркун, О.М. Тихонов, В.В. Ткачов, А.Є. Троп, М.В. Федоровський, К.А. Шумілов, Д. Гілберт, А. Лінч та ін. Розроблені пристрої з різних причин не отримали розповсюдження на рудозбагачувальних фабриках. Запропоновані в останні роки підходи ідентифікації співвідношення руда/вода у млині з циркулюючим навантаженням [1] та автоматичної стабілізації параметра [2] дозволяють більш ефективно розв'язати дану задачу, однак система автоматичного регулювання (САР) подачею води в кульовий млин повинна володіти високими динамічними властивостями, забезпеченням яких ніхто не займався.

Метою даної роботи є забезпечення високих динамічних властивостей системи автоматичного регулювання подачі води в кульовий млин і якості процесу керування без втрати стійкості в умовах широких меж зміни витрати матеріальних потоків.

Керованим об'єктом в системі автоматичного регулювання розрідження пульпи в млинах з циркулюючим навантаженням є відрізок магістрального трубопроводу подачі води в кульовий млин з регулювальним органом (двосідловим клапаном) та датчиком витрати води – електромагнітним витратоміром. Крім цього до складу системи входить релейний цифровий регулятор, безконтактний реверсивний пускач ПБР-2, виконавчий механізм типу ПР1-М, перетворювальний механізм з лінійною статичною характеристикою. Він узгоджує характер руху вихідної ланки виконавчого механізму та вхідної регулювального органу. Регульована величина – співвідношення руда/вода задається здавачем, а визначається блоком ідентифікації по сигналам здавачів вологовмісту в пісках, густини твердого, витрати води у пісковий жолоб класифікатора та витратоміра води в кульовий млин, конвеєрних вагів вихідної руди, вимірювача витрати пульпи у пісковому жолобі. Автоматичний регулятор визначає різницю сигналів блока ідентифікації і задавача співвідношення руда/вода, формує командний імпульс у випадку їх неспівпадіння та підсилює його амплітуду.

Релейний цифровий регулятор має релейну характеристику. Таку ж характеристику має і безконтактний реверсивний пускач. Їх характеристики можна привести до однієї еквівалентної. Систему автоматичного регулювання при цьому слід розглядати як нелінійну. Оскільки нелінійні системи автоматичного регулювання можливо досліджувати лише з однією (або однією еквівалентною) нелінійністю, всі останні технічні засоби повинні бути лінійними. Це особливо стосується вузла: витратомір води – відрізок магістрального трубопроводу – регулювальний орган, оскільки статичні характеристики останнього часто нелінійні. Проведені теоретичні дослідження показали, що в якості узагальненого регульованого об'єкта системи автоматичного регулювання розрідження пульпи в кульовому млині виступає відрізок магістралі подачі води діаметром 80 мм, який містить задвижку, коліно під кутом 90°, вхід зі скругленими кромками, регулювальний орган (двосідловий клапан) та індукційний витратомір з такими ж умовними діаметрами. При даних параметрах узагальнений регульований об'єкт забезпечує необхідну пропускну спроможність і є безінерційною лінійною динамічною ланкою [3].

Ідентифікація співвідношення руда/вода в цифровому вигляді являє собою незалежну задачу і не впливає на характер поведінки системи. Цифрові засоби ідентифікації, задавання регульованої величини, порівняння сигналів можна віднести до лінійної частини. Засоби формування порогового рівня, узгоджуючи ланцюги і безконтактний реверсивний пускач ПБР-2 являють собою нелінійний елемент релейного типу. Всі інші ланки є неперервними і лінійними – реверсивний двофазний асинхронний виконавчий двигун, редуктор, перетворювальний механізм, регулювальний орган разом з відрізком труби, по якій подається вода у кульовий млин, і витратоміром. Таким чином, система автоматичного регулювання співвідношення руда/вода в кульовому млині є нелінійною і її можна подати у вигляді двох складових – лінійної та нелінійної частини.

Лінійна частина системи вміщує ряд елементів. Визначимо її передавальну функцію. Оскільки в лінійній частині всі динамічні ланки з'єднані послідовно, її результуюча передавальна функція дорівнює добутку передавальних функцій окремих елементів, тобто

$$W_L(p) = W_{ed}(p) \cdot W_P(p) \cdot W_{IM}(p) \cdot W_{PO}(p) \cdot W_{ВП}(p), \quad (1)$$

де $W_{ed}(p)$, $W_P(p)$, $W_{IM}(p)$, $W_{PO}(p)$, $W_{ВП}(p)$ – відповідно передавальні функції електродвигуна виконавчого механізму, редуктора, перетворювального механізму, регулювального органу з трубою і витратоміром та вимірювального пристрою.

Передавальна функція електродвигуна виконавчого механізму, як показали дослідження, дорівнює

$$W_{ed}(p) = \frac{9900 \text{град}}{p(0,2p+1)} \quad (2)$$

Знижувальний редуктор виконавчого механізму є пропорційною динамічною ланкою. Відповідно даним виконавчого механізму його передавальний коефіцієнт може бути встановлений на наступних дискретних рівнях: 0,02; 0,0067; 0,0033; 0,0022; 0,00167 відповідно для часу півоберту вихідного вала 10; 30; 60; 90; і 120 с.

Перетворювальний механізм обертові рухи вихідного вала редуктора перетворює у поступальні його вихідної ланки, тобто у поступальні рухи штока регульовального органу. Він також є пропорційною динамічною ланкою. При повному ході штока 25 мм передавальний коефіцієнт перетворювального механізму складає 0,1389 мм/град.

Регульовальний орган, відрізок труби і датчик витрати води мають передавальний коефіцієнт, що дорівнює одиниці. Отже, даний вузол є пропорційною динамічною ланкою з передавальним коефіцієнтом $k_{YO} = 1$, В/мм.

Вимірювальний пристрій системи (датчик співвідношення $K_{(p/\phi)}$, порівняльний пристрій і задавач) можна вважати підсилювальною ланкою, що характеризується рівнянням

$$\Delta K_{(p/\phi)} = k_{ВП} \Delta Q_B, \quad (3)$$

де $\Delta K_{(p/\phi)}$ – зміна співвідношення руда/вода після порівняння сигналів;

$k_{ВП}$ – передавальний коефіцієнт вимірювального пристрою;

ΔQ_B – зміни витрати води в регульованому об'єкті, подані сигналом витратоміра води. Коефіцієнт $k_{ВП} = 1$, 1/В, оскільки перетворення ΔQ_B в $K_{(p/\phi)\phi}$ здійснюється з коефіцієнтом, що дорівнює 1, 1/В, а $K_{(p/\phi)\phi}$ в $\Delta K_{(p/\phi)}$ – з безрозмірним коефіцієнтом 1.

Таким чином, результуюча передавальна функція лінійної частини системи дорівнює

$$W_L(p) = W_{ed}(p) \cdot k_P \cdot k_{ПМ} \cdot k_{YO} \cdot k_{ВП}, \quad (4)$$

з врахуванням чисельних значень

$$W_L(p) = \frac{1375,11 \cdot k_P}{p(0,2p+1)}, \quad (5)$$

де k_P – передавальний коефіцієнт редуктора, який можна ступінчасто змінювати.

Рівняння амплітудно-фазової частотної характеристики лінійної частини системи відповідно (5) буде

$$W_L(p) = \frac{1375,11 \cdot k_P}{j \cdot \omega \cdot (0,2 \cdot j \cdot \omega + 1)}. \quad (6)$$

Нелінійна частина системи включає безконтактний реверсивний пускач ПБР-2, узгоджувальні ланцюги контролера та цифрову операцію формування порогового рівня по сигналу $\pm \Delta K_{p/\phi}$ з наступним цифровим формуванням вихідного сигналу контролера + 5 В. Цифрове формування вихідного сигналу контролера при досягненні певного значення $\Delta K_{p/\phi}$, миттєве спрацювання узгоджувальних ланцюгів і ПБР-2 створюють ідеальний релейний елемент, який спрацьовує і відпускає практично при одному і тому ж сигналі на вході. Його характеристика буде мати вигляд, показаний на рис. 1. При досягненні порогового значення $\pm \Delta K_{(p/\phi)\Pi}$ релейний елемент спрацьовує і на виході формується сигнал $U = 220$ В прямої або оберненої фази.

В нелінійних системах часто виникають стійкі автоколивальні режими. У таких випадках найбільш зручно досліджувати нелінійну систему методом гармонічного балансу. Даний метод можна застосовувати, якщо періодичний розв'язок, який відшукують, наближений до синусоїдального, тобто, якщо можливо знехтувати вищими гармоніками розкладу періодичного розв'язку в тригонометричний ряд.

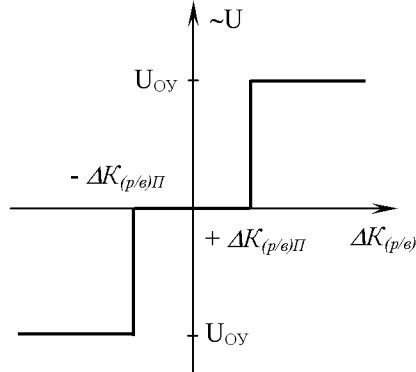


Рисунок 1 - Характеристика нелінійного елемента системи автоматичної стабілізації співвідношення руда/вода

Умови, яким повинна задовольняти нелінійна система у випадку застосування методу гармонічного балансу, зводяться до наступного [4]:

- характеристичне рівняння лінійної частини $p(0, 2p+1)=0$ не повинно мати чисто умовних коренів і коренів з додатною дійсною частиною (наявність нульових коренів допускається);

- повинна виконуватись так звана узагальнена властивість низькочастотного фільтра

$$\left| \frac{1375,11 \cdot k_p}{j \cdot n \cdot \omega (0,2 j \cdot n \cdot \omega + 1)} \right| \ll \left| \frac{1375,11 \cdot k_p}{j \cdot \omega (0,2 j \cdot \omega + 1)} \right| \quad (7)$$

де n – номер вищої гармоніки;

- модуль частотної функції лінійної частини при зростанні номера вищої гармоніки повинен прагнути до нуля. Дану вимогу можна записати виразом

$$\left| \frac{1375,11 \cdot k_p}{j \cdot n \cdot \omega (0,2 j \cdot n \cdot \omega + 1)} \right| \rightarrow 0 \text{ при } n \rightarrow \infty, \quad (8)$$

- коефіцієнти розкладу поблизу періодичного режиму, що відшукується, повинні змінюватися достатньо плавно.

Як показує аналіз, дані умови виконуються.

Коефіцієнти розкладу для отриманої релейної характеристики мають вигляд

$$q(A) = \frac{4B}{\pi A} \sqrt{1 - \left(\frac{a}{A}\right)^2}; \quad b(A) = 0; \quad a < A, \quad (9)$$

де B – параметр релейної характеристики;

a – порогове значення вхідної величини релейного елемента;

A – амплітуда автоколивань нелінійної системи.

Для даної системи $B = U_y = 220$ В, $a = \Delta K_{(p/\epsilon)\Pi}$. З врахуванням конкретних значень

$$q(A) = \frac{4U_y}{\pi A} \sqrt{1 - \left(\frac{\Delta K_{(p/\epsilon)\Pi}}{A}\right)^2}, \quad (10)$$

де A – амплітуда автоколивань, виражена в одиницях співвідношення руда/вода.

Еквівалентний комплексний коефіцієнт підсилення в даному випадку є дійсним числом

$$J(A) = \frac{4U_y}{\pi A} \sqrt{1 - \left(\frac{\Delta K_{(p/\epsilon)\Pi}}{A}\right)^2}. \quad (11)$$

Зворотна амплітудна характеристика

$$\frac{1}{J(A)} = \frac{\pi A}{4U_y \sqrt{1 - \left(\frac{\Delta K_{(p/\epsilon)\Pi}}{A}\right)^2}}. \quad (12)$$

Перетворивши вираз (12), отримаємо

$$\frac{1}{J(A)} = \frac{\pi \cdot A^2}{4U_y \sqrt{A^2 - \Delta K_{(p/\epsilon)\Pi}^2}}. \quad (13)$$

Частотні характеристики лінійної частини системи і нелінійного елемента приведені на рис. 2. Вони отримані за виразами (6) і (12) при різних значеннях k_p і $\Delta K_{(p/\epsilon)\Pi} = 0,5$. В даних залежностях A змінювалася від 0,5 до ∞ , а колова частота ω від 0 до ∞ . Передавальному коефіцієнту k_p редуктора надавались дані відповідно паспортним характеристикам.

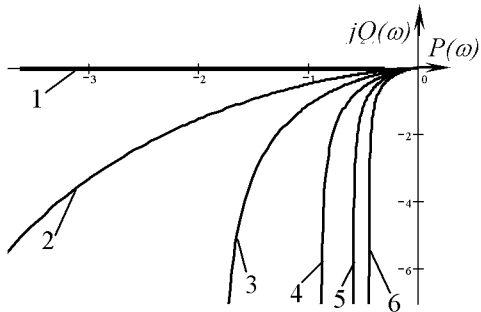


Рисунок 2 - Частотні характеристики лінійної частини системи і нелінійного елемента:
 1 – зворотна амплітудна характеристика; 2; 3; 4; 5;
 6 – амплітудно-фазові частотні характеристики лінійної частини при значеннях k_p відповідно 0,02; 0,0067; 0,0033; 0,0022; 0,00167

З рис. 2 слідує, що характеристики $-\frac{1}{J(A)}$ і $W_d(j\omega)$ не перетинаються ні при яких параметрах системи. Це свідчить про те, що автоколивальний режим в САР відсутній, а вона стійка.

При спрацюванні релейного елемента система автоматичного регулювання здійснює перехідний процес. Він визначається рівнянням, що описує динаміку лінійної частини системи. Воно може бути отримане з залежності (5)

$$p(0,2p+1) \cdot \bar{K}_{(p/\epsilon)\epsilon} = 1375,11 \cdot k_p \cdot \bar{U}_y, \quad (14)$$

звідки

$$\bar{K}_{(p/\epsilon)\epsilon} = \frac{1375,11 \cdot k_p \cdot \bar{U}_y}{p(0,2p+1)}. \quad (15)$$

Здійснивши перехід від зображення за Лапасом до оригіналу при подачі на вхід ступінчастого діяння $\bar{U}_y = const$ і при нульових початкових умовах, отримуємо вираз перехідної функції

$$K_{(p/\epsilon)\epsilon} = \left[1375,11 \cdot k_p \cdot t - 1375,11 \cdot k_p \cdot 0,2(1 - e^{-5t}) \right] U_y. \quad (16)$$

Вихідна величина системи в перехідному процесі $K_{(p/\epsilon)\epsilon}$ є функцією часу. Чим швидше буде змінюватись $K_{(p/\epsilon)\epsilon}$, тим скоріше в системі буде наступати відповідність між заданим значенням співвідношення руда/вода $K_{(p/\epsilon)\epsilon}$ і фактичним значенням $K_{(p/\epsilon)\epsilon}$. Тобто, чим буде швидша зміна $K_{(p/\epsilon)\epsilon}$ в часі, тим вищою буде якість регулювання системи.

Відповідно (16) візьмемо першу похідну $K_{(p/\epsilon)\epsilon}$ по часу t . Вона буде дорівнювати

$$\frac{dK_{(p/\epsilon)\epsilon}}{dt} = 1375,11 \cdot k_p \cdot U_y (1 - e^{-5t}). \quad (17)$$

Вираз (17) характеризує чутливість $K_{(p/\epsilon)\epsilon}$ до часу. Чим вища чутливість, тим швидша зміна $K_{(p/\epsilon)\epsilon}$ в перехідних процесах. При небалансі на вході системи перехідний процес кожного разу проходить однаково. З виразу (17) видно, що найкращих результатів регулювання можна досягнути при максимальному значенні k_p . Отже, передавальне співвідношення редуктора необхідно вибирати якомога вищим, тобто, $k_p = 0,02$. Це забезпечить найкращу якість регулювання.

З іншого боку, якість регулювання буде визначатися зоною нечутливості релейного елемента $\pm \Delta K_{(p/\epsilon)}$, оскільки ввімкнення двигуна буде здійснюватися при досягненні значення $+\Delta K_{(p/\epsilon)}$ або $-\Delta K_{(p/\epsilon)}$, а відключення – при досягненні певного меншого значення. Чим вужчою буде зона нечутливості релейного елемента, тим якість регулювання буде вищою. В розробленій конструкції релейного елемента поріг спрацювання $\Delta K_{(p/\epsilon)II}$ може бути встановленим практично на будь-якому рівні, однак нульовим він бути не може. Його доцільно встановити на рівні, що відповідає зміні базового значення $K_{(p/\epsilon)з}$ на один відсоток, тобто $\Delta K_{(p/\epsilon)II} = 0,043$. тоді система буде підтримувати $K_{(p/\epsilon)}$ в межах зміни на $\pm 1,0\%$ відносно базового значення 4,3.

Таким чином, розроблена система автоматичного регулювання співвідношення руда/вода є стійкою при вибраних параметрах лінійної та нелінійної частини. Автоколивання в ній не можливі. Реалізований ідеальний релейний елемент, який може спрацювати і відпустити при різниці в сигналах всього на 1,0% від заданого значення співвідношення руда/вода, забезпечує високу якість автоматичного регулювання. Система буде мати найкращу якість при максимально можливому в ній

передавальному відношенні редуктора виконавчого механізму, що дорівнює 0,02, та найвужчій зоні нечутливості релейного елемента, яка технічно може бути здійсненою.

Проведені дослідження відкривають перспективу розробки діючого зразка комп'ютеризованої системи ідентифікації та регулювання розрідження пульпи в млинах з циркулюючим навантаженням.

Список літератури

1. Кондратець В.О. Ідентифікація співвідношення руда/вода на вході кульового млина /В. Кондратець, О. Сербул //Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: Зб. наук. праць КНТУ. – 2006. – № 17. – С. 265-272.
2. Патент на корисну модель 40465 України МПК В 03 В 11/00, В 02 С 25/00. Пристрій автоматичної стабілізації розрідження пульпи в млинах з циркулюючим навантаженням /Кондратець В.О., Сербул О.М.; заявник и патентовласник Кіровоград. нац. техн. ун-т. - № 200813005; заявл. 10.11.2008; опубл. 10.04.2009, Бюл. № 7.
3. Кондратець В.О. Дослідження узагальненого регульованого об'єкта системи автоматичної стабілізації розрідження пульпи в кульовому млині /В.О. Кондратець, О.М. Сербул //Матеріали ІХ Міжнародної науково-практичної конференції . Том 17. Технічні науки. [“Наука та освіта '2006”], (Дніпропетровськ, 23-31 січня 2006р.) /Дніпропетровський нац. ун-т, Вид-во “Наука і освіта”. – Дніпропетровськ: Наука і освіта, 2006. – С. 127-131.
4. Попов Е.П. Приближенные методы исследования нелинейных автоматических систем /Е. Попов, И. Пальтов. – М.: Физматгиз, 1960. – 792 с.
5. Зайцев Г.Ф. Теорія автоматичного управління /Зайцев Г.Ф., Стеклов В.К., Бріцький О.І. – К.: Техніка, 2002. – 688 с.

В. Кондратець, А. Сербул

Теоретические исследования динамики САР разжижения пульпы в мельницах с циркулирующей нагрузкой

В статье приведены результаты теоретических исследований динамики системы автоматического регулирования разжижения пульпы в мельницах с циркулирующей нагрузкой. Показано, что разработанная система является устойчивой при выбранных параметрах линейной и нелинейной части, автоколебания в которой невозможны. Предложенный идеальный релейный элемент, который может срабатывать и отпускать при разнице в сигналах всего на 1,0 % от заданного значения соотношения руда/вода, обеспечивает высокое качество автоматического регулирования. Система обеспечивает наилучшее качество при максимально возможном в ней передаточном отношении редуктора исполнительного механизма, который равняется 0,02.

V. Kondratets, A. Serbul

Theoretical researches of dynamics of SAR dilution of pulp in mills with the circulatory loading

In the article are presented results over of theoretical researches of dynamics the system of automatic control dilution of pulp in mills with the circulatory loading. It is shown that the worked out system is steady at the chosen parameters of linear and nonlinear part, self-excited oscillations in which are impossible. The offered ideal relay element which can work and release at a difference in signals only on 1,0 % from the set value of correlation ore/water, provides high quality of automatic control. The system provides the best quality at the maximally possible in her transmission relation of reducing gear of executive mechanism which is evened 0,02.

Одержано 07.02.11