

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

Кіровоградський національний технічний університет

Теоретичне дослідження стохастичної САР розрідження пульпи в кульовому млині з циркулюючим навантаженням

У статті приведені результати теоретичних досліджень стохастичної САР розрідження пульпи у кульових млинах з циркулюючим навантаженням. Показано, що забезпечити необхідну точність визначення співвідношення руда/вода на вході кульового млина можливо лише фільтрацією випадкових сигналів витратоміра пульпи у піщовому жолобі класифікатора та вихідної руди перед подачею на вхід блока ідентифікації даного технологічного параметра.

стохастична САР, розрідження пульпи, кульовий млин, фільтрування сигналів, ідентифікація, співвідношення руда/вода

Подрібнення вихідної руди на залізорудних збагачувальних комбінатах є важливим технологічним процесом, оскільки споживає майже 50 % всіх енергетичних витрат. Найбільшого поширення в Україні отримали подрібнювальні цикли, що включають кульовий млин і спіральний механічний класифікатор, який виділяє готовий продукт, а піски направляє у кульовий млин на доподрібнення. Найвища ефективність подрібнювання руди в кульовому млині досягається лише за певних умов, зокрема, необхідно підтримувати співвідношення руда/вода на певному рівні який визначається характеристиками руди. З узагальненого викладення даної проблеми [1] видно, що вона залишається до кінця не розв'язаною. З останніх публікацій по даному напрямку досліджень також витікає, що дана задача залишається не розв'язаною, не дивлячись на те, що їй приділяється значна увага.

Розв'язання даної проблеми спрямовано на реалізацію напрямку “Нові технології та ресурсозберігаючої технології в енергетиці, промисловості та агропромисловому комплексі”, передбаченого Законом України від 11 липня 2001 року № 2623-III “Про пріоритетні напрямки розвитку науки і техніки”, а також на виконання теми “Комп'ютерно-інтегрована система автоматичного регулювання співвідношення руда/вода в кульових млинах з циркулюючим навантаженням” (0105U008334).

Оскільки задане співвідношення руда/вода в кульовому млині з циркулюючим навантаженням в ручному режимі підтримати не можливо, а автоматичні системи даного призначення по різних причинах реалізувати не можливо, здійснення автоматичної стабілізації співвідношення руда/вода в такому технологічному агрегаті є актуальною задачею. Складовою даної задачі є стохастична система автоматичного регулювання (САР) розрідження пульпи, до складу якої входить ідентифікатор співвідношення руда/вода, що визначає дану величину по іншим технологічним параметрам. Однак умови роботи САР даного призначення ніхто не досліджував.

Метою даної роботи є встановлення умов забезпечення необхідної точності визначення співвідношення руда/вода та автоматичного регулювання параметра стохастичною САР.

Система автоматичного регулювання (САР) розрідження пульпи формує співвідношення руда/вода на вході кульового млина зміною витрати води в технологічний агрегат. Витрата води в кульовий млин не має ні транспортного (якщо не

використовується транспортуючий лотік), ні ємнісного запізнювання. За таких умов магістраль подачі води в кульовий млин стає регульованим об'єктом. Узагальнений регульований об'єкт вміщує відрізок труби для подачі води (РОПВ), датчик витрати води $D_в$, регульовальний орган РО. При автоматичному регулюванні даного процесу задане співвідношення руда/вода $K_{(p/в)з}$ задає оператор, а регульовану (вихідну) величину $K_{(p/в)в}$ визначають за допомогою блока ідентифікації співвідношення руда/вода (БІС) за формулою

$$K_{p/в} = \frac{A(K_n, \delta_p) \cdot (Q_n - Q_{вжс}) + Q_p}{Q_{вм} + Q_{вжс} + K_n [A(K_n, \delta_p) \cdot (Q_n - Q_{вжс})]} \quad (1)$$

по витраті руди Q_p , пульпи в пісковому жолобі класифікатора Q_n , води в млин $Q_в$ та води в пісковий жолоб класифікатора $Q_{вжс}$. Крім того, враховують коефіцієнт, що визначає вміст вологи K_n в пісках класифікатора та густину руди δ_p .

Схема узагальненого регульованого об'єкта подачі води разом з автоматичним регулятором розрідження пульпи та блоком ідентифікації співвідношення руда/вода показана на рис. 1 [2]. Матеріальні комунікації формують осереднений матеріальний потік на вході кульового млина з певним значенням $K_{(p/в)ф}$, яке визначається фактичним співвідношенням твердого та рідкого. Блок ідентифікації співвідношення руда/вода (БІС) формує вихідну величину $K_{(p/в)в}$ системи автоматичного регулювання, враховуючи сигнали датчиків витрати $D_{вжс}$, D_n , D_p і $D_в$ та задавачів величини коефіцієнта вмісту вологи K_n і густини руди δ_p . Вихідний сигнал $K_{(p/в)в}$ блока БІС на елементі порівняння ЕП порівнюється з задаючим діянням $K_{(p/в)з}$ задавача співвідношення руда/вода 3, створюючи керуюче діяння $\Delta K_{p/в}$. Якщо $\Delta K_{p/в} \neq 0$, приводиться в дію автоматичний регулятор АР, який за допомогою регульовального органа РО змінює витрату води через РОПВ у кульовий млин, вирівнюючи співвідношення руда/вода до рівня заданого.

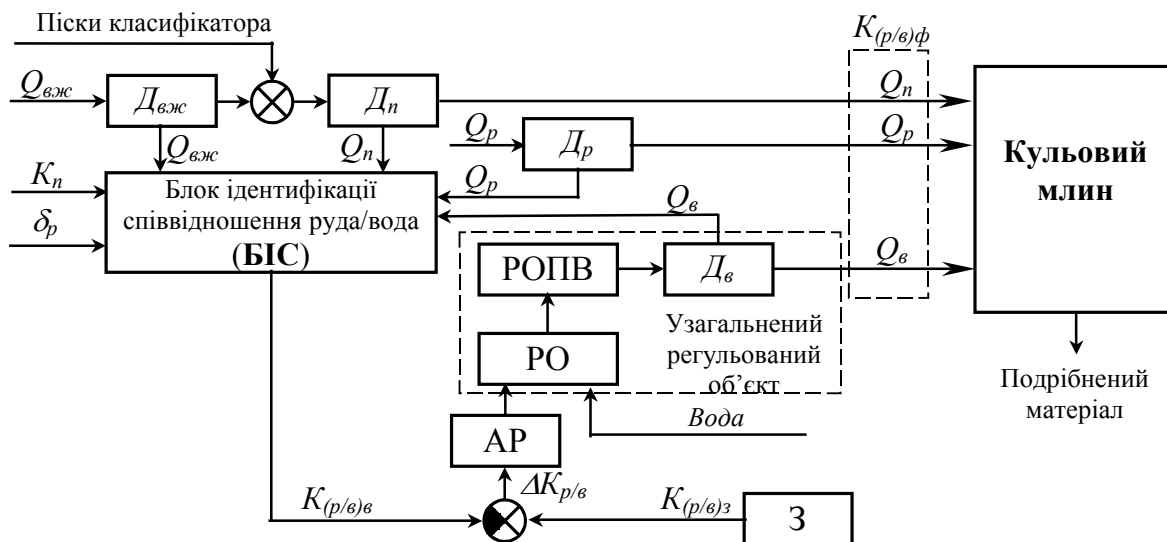


Рисунок 1 – Схема узагальненого регульованого об'єкта подачі води в кульовий млин з блоком ідентифікації співвідношення руда/вода та автоматичним регулятором розрідження пульпи

На вхід блока ідентифікації співвідношення руда/вода БІС поступають сигнали датчика D_n витрати пульпи Q_n , датчика D_p витрати руди Q_p , датчика $D_в$ витрати води $Q_в$, які є випадковими функціями в результаті дії внутрішніх і зовнішніх перешкод. Зокрема, на витрату пульпи Q_n в пісковому жолобі класифікатора впливають завантаження кульового млина, режим класифікації, подрібнюваність і крупність руди, характер розвантаження та руху пісків. Оскільки перешкоди накладаються на корисні

сигнали, вихідна величина даної системи автоматичного регулювання буде випадковим процесом – випадковою функцією часу [3]. Випадковим процесом буде і керуюче діяння $\Delta K_{p/с}$. Зважаючи на те, що система автоматичного регулювання співвідношення руда/вода знаходиться під впливом випадкових діянь, її слід досліджувати статистичними методами. В таких системах критерієм якості є середньоквадратична похибка [4].

Враховуючи те, що випадковий процес формується в інформаційній частині системи, дослідимо блок ідентифікації співвідношення руда/вода (БІС). Він має шість входів і один вихід. На три входи подаються незмінні сигнали – $Q_{вж}$, K_n , δ_p . Інші три величини мають перешкоди і змінюються як випадкові функції часу – це Q_v , Q_p , Q_n . Таким чином, БІС являє собою багатоканальну динамічну систему, яка в загальному випадку має кілька вхідних функцій, по яким необхідно отримати кілька функцій на виході [5]. Рахуючи БІС лінійною системою, вихідні функції $Y_j(t)$ можна визначити через вхідні функції $X_i(t)$ у вигляді співвідношень [5].

$$Y_j(t) = \sum_{i=1}^n \int_0^t l_{ji}(t-t_1) X_i(t_1) dt_1, \quad (2)$$

де t – верхня границя інтегрування, що відповідає умовам, коли надходження реалізацій випадкових функцій $X_i(t)$ розпочинається одночасно з ввімкненням системи;

n – число вхідних величин;

$l_{ji}(t-t_1)$ – вагові функції, які у випадку стаціонарних систем дорівнюють $l_{ji}(t-t_1)$.

Формула (2) показує, що для кожного виходу системи необхідно визначати n вагових функцій $l_{ji}(t-t_1)$, а вся їх сукупність для багатоканальної системи такого виду з m виходами складає nm .

В конкретному випадку маємо багатоканальну систему, коли різні вхідні величини використовують для отримання з найбільшою точністю однієї вихідної величини. Тоді залежність (2) стане більш простішою. В цілому для БІС необхідно враховувати і той факт, що серед вхідних сигналів є як випадкові функції часу, так і незмінні в часі константи. Тому розглянемо проходження через БІС будь-яких сигналів. Оскільки БІС є лінійною системою і здійснює лінійні перетворення над кожною з вхідних величин, для нього справедливий принцип суперпозиції. У відповідності з принципом суперпозиції лінійному поєднанню будь-яких вхідних сигналів відповідає та ж лінійна комбінація відповідних вихідних сигналів [6]. Це дозволяє розглядати окремо ефект впливу на вихідну величину БІС випадкових функцій часу і констант, які в часі не змінюються.

Для визначення впливу випадкових функцій часу на вихідну величину БІС перетворимо залежність (2) у відповідності з однією вихідною величиною. Вона прийме вигляд

$$K_{(p/с)BB\Sigma} = \sum_{i=1}^3 \int_0^t l_i(t-t_1) X_i(t_1) dt_1, \quad (3)$$

або

$$K_{(p/с)BB\Sigma} = \int_0^t l_p(t-t_1) Q_p(t) dt + \int_0^t l_n(t-t_1) Q_n(t) dt + \int_0^t l_v(t-t_1) Q_v(t) dt, \quad (4)$$

де $l_p(t-t_1)$, $l_n(t-t_1)$, $l_v(t-t_1)$ – відповідно вагові функції по витраті руди, пульпи у пісковому жолобі та води у кульовий млин.

Враховуючи, що вагова функція дорівнює зворотному лапласівському зображенню передавальної функції динамічної системи [7], знайдемо їх для БІС по кожній вхідній величині. БІС реалізує алгоритм ідентифікації, який полягає у виконанні арифметичних операцій. Якщо він реалізований на аналогових безінерційних

елементах, то являє собою підсилювальну ланку, яка характеризується передавальним коефіцієнтом по кожній вхідній величині – K_{Q_p} , K_{Q_n} , K_{Q_e} . Оскільки для підсилювальних ланок передавальні коефіцієнти дорівнюють передавальним функціям, а їх зворотні лапласівські зображення – передавальним коефіцієнтам, вагові функції у (4) відповідно будуть дорівнювати – K_{Q_p} , K_{Q_n} , K_{Q_e} . Зважаючи на те, що передавальні коефіцієнти лінійних елементів є величинами незмінними і що сталі можна виносити за знак інтеграла, рівняння (4) подамо у вигляді

$$K_{(p/e)BB\Sigma} = K_{Q_p} \int_0^t Q_p(t) dt + K_{Q_n} \int_0^t Q_n(t) dt + K_{Q_e} \int_0^t Q_e(t) dt. \quad (5)$$

Оскільки інтегрування та множення на сталу є лінійними операціями, в (5) праворуч будемо мати три нові випадкові функції, які однозначно характеризуються вхідними випадковими процесами.

Виходячи з принципу суперпозиції та його умови про те, що сумі будь-яких кількох вхідних збурень відповідає сума відповідного числа вихідних змінних [6], можна визначити результуючий вплив вхідних змінних констант на вихідний сигнал БІС. Він буде дорівнювати

$$K_{(p/e)BK\Sigma} = \sum_{i=1}^3 K_i X_{K_i} \quad (6)$$

або

$$K_{(p/e)BK\Sigma} = K_{Q_{\text{вж}}} Q_{\text{вж}} + K_{K_n} K_n + K_{\delta_p} \delta_p, \quad (7)$$

де $K_{Q_{\text{вж}}}$, K_{K_n} , K_{δ_p} – відповідно передавальні коефіцієнти по витраті води в пісковий жолоб класифікатора, вмісту вологи в пісках класифікатора, густині руди.

Отже, можна стверджувати, що вихідний сигнал БІС містить постійну складову, яка характеризує вплив витрати води в пісковий жолоб, вмісту вологи в пісках класифікатора та густини руди, і три випадкових процеси, еквівалентні дії випадкових функцій часу на вході – зміни витрати руди $Q_p(t)$, пульпи $Q_n(t)$ та води $Q_e(t)$.

Випадкові процеси на вході БІС формуються незалежно один від одного, вони фізично ніяк не зв'язані один з одним, тому є незалежними. Враховуючи, що математичне сподівання інтеграла від випадкової функції дорівнює інтегралу від її математичного сподівання [8], відповідно для випадкових функцій (5) можливо по математичним сподіванням вхідних сигналів $Q_p(t)$, $Q_n(t)$, $Q_e(t)$ знайти їх математичні сподівання $m_p(t)$, $m_n(t)$, $m_e(t)$. Оскільки при додаванні до випадкової функції не випадкового доданка до її математичного сподівання додається та ж не випадкова величина [8], усталене значення вихідного сигналу на виході БІС можна подати як суму

$$K_{(p/e)e} = K_{(p/e)BK\Sigma} + m_p(t) + m_n(t) + m_e(t). \quad (8)$$

Ця не випадкова величина $K_{(p/e)e}$ характеризує сигнал на виході БІС і може бути знайденою за відповідними передавальними коефіцієнтами, незмінними в часі сигналами на вході та математичними сподіваннями випадкових функцій $Q_p(t)$, $Q_n(t)$, $Q_e(t)$.

Дисперсія сигналу $K_{(p/e)e}$ (8) характеризує похибку ідентифікації співвідношення руда/вода, вона в основному викликана випадковими процесами на вході БІС. Дисперсії складових вихідного сигналу БІС можна отримати по їх кореляційним функціям. Кореляційна функція суми некорельованих випадкових функцій дорівнює сумі кореляційних функцій складових [9]. Оскільки випадкові процеси на виході БІС являють собою інтеграли від відповідних вхідних випадкових функцій (5), то кореляційні функції складових вихідного сигналу можна отримати шляхом подвійного

інтегрування кореляційної функції вхідних випадкових функцій [8]. Тоді результуюча кореляційна функція вихідного сигналу БІС буде дорівнювати

$$K_{K_{(p/e)}}(t_1 t^1) = K_p(t_1 t^1) + K_n(t_1 t^1) + K_e(t_1 t^1), \quad (9)$$

де $K_p(t_1 t^1)$, $K_n(t_1 t^1)$, $K_e(t_1 t^1)$ – відповідно кореляційні функції складових вихідного сигналу БІС.

Поклавши у виразі (9) $t = t^1$, отримаємо дисперсію вихідного сигналу БІС. Складові дисперсії залежать не лише від дисперсій вхідних випадкових процесів, а і від параметрів їх кореляційних функцій.

Таким чином, знаючи кореляційні функції вхідних випадкових процесів, можливо оцінити дисперсію вихідного сигналу БІС, яка характеризує точність ідентифікації співвідношення руда/вода на вході у кульовий млин.

Модель БІС отримана при допущенні, що система ідентифікації співвідношення руда/вода є лінійною. Зважаючи на це, необхідно перевірити її на лінійність. Оцінка степені нелінійності достатньо складна і значно ускладнюється для багатовимірних систем, а строга перевірка гіпотези лінійності відпрацьована практично лише для систем з однією вхідною і вихідною величинами і, як правило, вимагає проведення експерименту [3]. Зважаючи на це, здійсимо перевірку на лінійність безпосередньо по виду статичних характеристик БІС.

Визначимо статичні характеристики БІС відповідно алгоритму ідентифікації (1).

Статичні характеристики БІС отримувалися в процесі комп'ютерного моделювання технологічного процесу подрібнення в кульовому млині МШЦ. Моделювання здійснювалося стосовно робочої точки на характеристиках, яка відповідає показникам: $Q_p = 240$ т/год; $K_{p/e} = 4,3$; $K_n = 0,12$; $\delta_p = 3,3$ т/м³; $Q_{вж} = 24,3$ т/год; $Q_{цн} = 125\%$ Q_p ; $\delta_e = 1,0$ т/м³; $Q_e = 65,28$ м³/год.

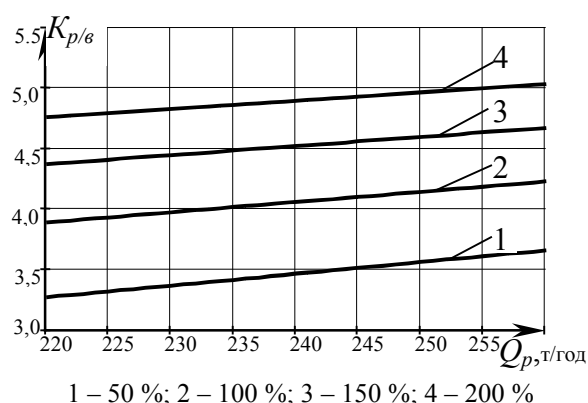


Рисунок 2 – Залежність співвідношення руда/вода $K_{p/e}$ від масової витрати руди Q_p в кульовий млин в усталеному режимі роботи при різних значеннях циркулюючих навантажень

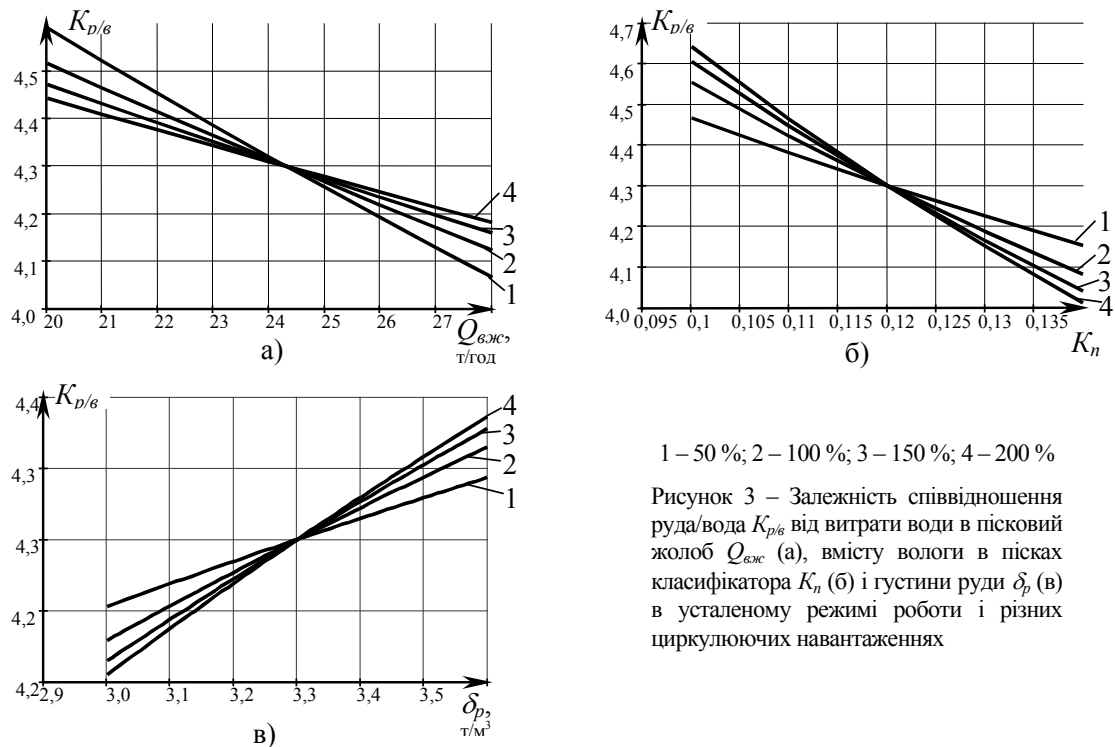
На рис. 2 приведені залежності співвідношення руда/вода на вході кульового млина від масової витрати руди в усталеному режимі при різних значеннях циркулюючого навантаження, якому надавались рівні – 50%; 100%, 150% і 200% номінального навантаження млина $Q_p = 240$ т/год. З рис. 2 видно, що при всіх циркулюючих навантаженнях співвідношення руда/вода зростає лінійно при збільшенні витрати руди в млин. З залежностей, зображених на рис. 3, витікає, що співвідношення руда/вода лінійно змінюється від витрати води в пісковий жолоб класифікатора, вмісту вологи в пісках, густини руди при

будь-яких значеннях циркулюючого навантаження.

На рис. 4 показані статичні характеристики БІС по зміні об'ємної витрати пульпи в пісковому жолобі класифікатора та води в кульовий млин при різній масовій витраті вихідної руди. З даних графіків видно, що вихідна величина БІС під впливом цих параметрів змінюється нелінійно. Отже, блок ідентифікації співвідношення руда/вода в цілому є не строго лінійною системою.

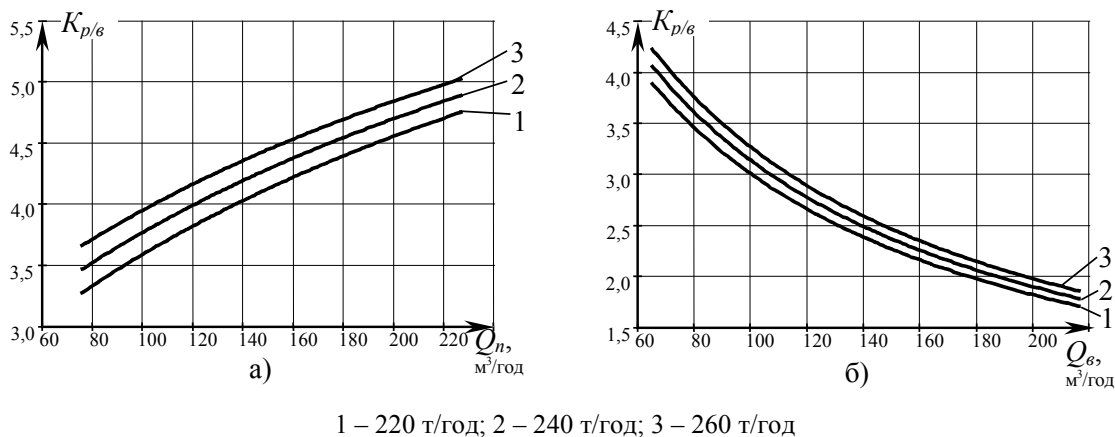
Не строго лінійні системи в певних межах допускають лінеаризацію. Прийом наближеної лінеаризації диференціальних рівнянь широко використовують в теорії похибок динамічних систем. Якщо випадкові функції на вході системи достатньо малі, то практично будь-яка система може розглядатися в межах цих малих відхилень як

наближено лінійна [8]. Зважаючи на значні відхилення випадкових процесів, особливо $Q_n(t)$, від математичного сподівання, БІС не можливо визнати лінійною системою з наступною оцінкою дисперсії вихідного сигналу по отриманим залежностям. Тому БІС необхідно розглядати як нелінійну систему перетворення інформації.



1 – 50 %; 2 – 100 %; 3 – 150 %; 4 – 200 %

Рисунок 3 – Залежність співвідношення руда/вода $K_{p/в}$ від витрати води в пісковий жолоб $Q_{вжс}$ (а), вмісту вологи в пісках класифікатора K_n (б) і густини руди δ_p (в) в усталеному режимі роботи і різних циркулюючих навантаженнях



1 – 220 т/год; 2 – 240 т/год; 3 – 260 т/год

Рисунок 4 – Залежність співвідношення руда/вода $K_{p/в}$ від об'ємної витрати пульпи Q_n в пісковому жолобі класифікатора (а) і об'ємної витрати води $Q_в$ в кульовий млин (б) в усталеному режимі роботи при різній масовій витраті вихідної руди

Дослідження нелінійних динамічних систем є значно більш складною задачею, порівняно з дослідженням лінійних систем. Здебільшого відпрацьовані підходи дослідження так званих “зведених нелінійних систем” і “незведених нелінійних систем”, однак БІС не може бути приведеним до таких систем, оскільки в ньому не можливо вичленувати лінійну і нелінійну частини [5]. Одна з можливостей ідентифікації нелінійних систем полягає у використанні дисперсійних методів, які оперують математичними сподіваннями, кореляційними і дисперсійними функціями [3]. Дані методи базуються на стаціонарності випадкових функцій, причому поняття

стаціонарності в широкому розумінні недостатньо при ідентифікації нелінійних систем, додатково висуваються вимоги стаціонарності в дисперсійному розумінні [3]. Оскільки вихідний сигнал БІС містить інтеграли від входних випадкових функцій, а інтеграл від стаціонарної функції властивістю стаціонарності не володіє [5], в досліджуваній інформаційній системі умова стаціонарності не виконується і описати її з певним наближенням як нелінійну систему немає можливості.

Ще більш важливішою є задача забезпечення мінімуму середньої квадратичної помилки вихідного сигналу БІС. Такі задачі добре відпрацьовані в теорії лінійних систем автоматичного регулювання, що знаходяться під випадковими впливами [4]. Їх також реалізують в інформаційній техніці при кількох входних випадкових функціях [5]. В даному випадку забезпечити мінімум середньої квадратичної помилки вихідного сигналу БІС не можливо не стільки в наслідок нелінійності, скільки зважаючи на неможливість змінювати структуру і параметри БІС, які реалізують розроблений алгоритм ідентифікації співвідношення руда/вода. Тому єдиним підходом підвищення точності визначення співвідношення руда/вода на вході у кульовий млин є вплив на характеристики випадкових процесів – фільтрація випадкових сигналів перед подачею на вхід БІС [2].

Таким чином, забезпечити необхідну точність визначення співвідношення руда/вода на вході у кульовий млин можливо лише впливом на характеристики випадкових процесів, тобто, фільтрацією випадкових сигналів перед подачею на вхід блока ідентифікації співвідношення. Особливо це стосується сигналу витратоміра пульпи у піщовому жолобі та витратоміра вихідної руди.

Отримані результати досліджень відкривають перспективу розробки заходів фільтрування сигналів, що є випадковими процесами в даній системі, з метою забезпечення необхідної точності ідентифікації співвідношення руда/вода в кульовому млині, який працює у замкнутому циклі з механічним спіральним класифікатором.

Список літератури

1. Козин В.З., Тихонов О.Н. Опробование, контроль и автоматизация обогатительных процессов. – М.: Недра, 1990. – 343 с.
2. Кондратець В.О., Сербул О.М. Комп'ютерно інтегрована система автоматичного управління співвідношенням руда/вода в кульових млинах з циркулюючим навантаженням //Академический вестник. – 2006. – № 17-18. – С. 37-41.
3. Бессонов А.А., Свердлов Л.З. Методы статистического анализа погрешностей устройств автоматики. – Л.: Энергия, 1974. – 144 с.
4. Попович М.Г., Ковальчук О.В. Теорія автоматичного керування. – К.: Либідь, 1997. – 544 с.
5. Свешников А.А. Прикладные методы теории случайных функций. – М.: Наука, 1968. – 464 с.
6. Основы автоматического управления /Под ред. В.С. Пугачева – М.: Наука, 1968. – 680 с.
7. Иващенко Н.Н. Автоматическое регулирование. Теория и элементы систем. – М.: Машгиз, 1962. – 628 с.
8. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Наука, 1969. – 576 с.
9. Пугачев В.С. Введение в теорию вероятностей. – М.: Наука, 1968. – 368 с.

В статье приведены результаты теоретических исследований стохастической САР разжижения пульпы в шаровых мельницах с циркулирующей нагрузкой. Показано, что обеспечить необходимую точность определения соотношения руда/вода на входе шаровой мельницы возможно только фильтрацией случайных сигналов расходомера пульпы в песковом желобе классификатора и исходной руды перед подачей на вход блока идентификации данного технологического параметра.

In article are brought results of the theoretical researches stochastic SAR dilutions of the pulp in ball mill with circulating load. It is shown that to provide necessary accuracy of the determination the correlation ore/water at the input ball mill possible only filtering casual signal device of consumption pulps in sand chute classifier and source ore before presenting on entering the block of identifications this technological parameter.