

## Підвищення точності стохастичної САР розрідження пульпи в млинах з циркулюючим навантаженням фільтруванням сигналів

Однією з основних складових системи автоматичного регулювання розрідження пульпи в кульових млинах з циркулюючим навантаженням є блок ідентифікації співвідношення руда/вода, на вхід якого подається шість параметрів (вологівміст пісків класифікатора, густина руди, витрата води в пісковий жолоб, витрата води в млин, об'ємна витрата пульпи в пісковому жолобі, масова витрата руди в кульовий млин), а на виході формується одна величина – співвідношення руда/вода. Даний блок слугує інформаційним засобом в системі, що розглядається. Перші чотири вхідні величини практично є постійними при ідентифікації, а дві останні являють собою випадкові процеси. Це приводить до похибок при ідентифікації вихідної величини. Зменшити похибку ідентифікації до мінімуму можливо фільтрацією цих випадкових процесів. Встановлено, що необхідно застосовувати цифрову фільтрацію. В якості алгоритму фільтрації слід вибрати розрахунок середнього значення випадкового процесу. Доведено, що сигнал витратоміра пульпи у пісковому жолобі необхідно фільтрувати впродовж 10 с або 20 с, 30 с і т.д., а витратоміра руди – впродовж не менше 2 с з можливістю збільшення часового інтервалу до 4 с, 6 с і т.д.

**точність, розрідження пульпи, млин, ідентифікація, фільтрування сигналів, тривалість, алгоритм, витратоміри**

У світовій практиці збагачення руд чи не найширше розповсюдження при подрібненні корисних копалин отримали кульові млини з циркулюючим навантаженням, які споживають велику кількість електричної енергії, куль і футерівки. Найкраще вони працюють при певному співвідношенні руда/вода в барабані, яке залежить від крупності та особливостей руди, що переробляється. Відсутність точних засобів ідентифікації розрідження пульпи приводить до перевитрат електричної енергії, куль і футерівки на тону переробленої руди та до недоотримання готового продукту порівняно з оптимальними умовами роботи. Це не відповідає законодавству України про ресурсозберігаючі технології в енергетиці та промисловості. Оскільки дана стаття спрямована на розв'язання цих задач, її тема є актуальною. Вона також спрямована на виконання науково-дослідної роботи “Комп'ютерно інтегрована система автоматичного регулювання співвідношення руда/вода в кульових млинах з циркулюючим навантаженням” (реєстраційний номер 0105U008334), яка розв'язує частину даної проблеми.

Дослідженням і розробкою даних засобів займаються за кордоном і в Україні. В Україні в різні роки такі дослідження проводили А.Г. Астахов, М.В. Федорівський, В.О. Бунько, О.М. Марюта, Ю.Г. Качан, Є.В. Кочура, А.С. Давидкович, В.І. Дмитрієв та ін. По різних причинах розроблені засоби і підходи не отримали розповсюдження на рудозбагачувальних фабриках. Запропонований в останній час спосіб ідентифікації співвідношення руда/вода у млині з циркулюючим навантаженням [1] дозволяє більш ефективно організувати автоматичне регулювання цього технологічного параметра, однак, результати його визначення сильно залежать від точності подання сигналів витратомірів пульпи у пісковому жолобі та руди в кульовий млин, які є випадковими процесами. Підвищенням точності подання цих сигналів у блок ідентифікації співвідношення руда/вода, який реалізує запропонований алгоритм, ніхто не займався.

Метою даної роботи є підвищення точності САР розрідження пульпи в млинах з циркулюючим навантаженням фільтруванням сигналів витратомірів пульпи у піщовому жолобі та руди в технологічний агрегат.

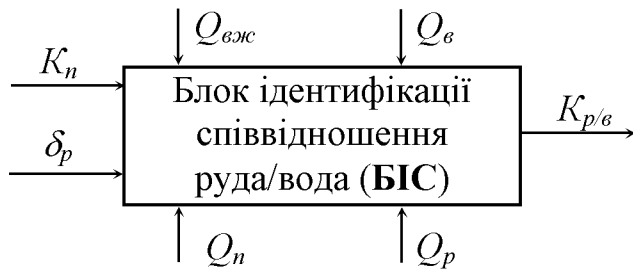


Рисунок 1 – Схематичне подання блока ідентифікації співвідношення руда/вода в кульовому млині

жолоб  $Q_{вж}$  є сталими, дві перші з яких вводяться задавачами, а остання заноситься до запам'ятовуючого пристрою блока. Витрата води в кульовий млин  $Q_v$  може змінюватися в часі, оскільки з магістралі подачі води відбувається її відбір багатьма споживачами. Оскільки всі споживачі здебільшого відрізняються певною витратою, то величина  $Q_v$  частіше всього мало змінюється або змінюється плавно і з достатньо малою частотою. Цього не можливо сказати про параметри масової витрати руди  $Q_p$  і об'ємну витрату пульпи в піщовому жолобі  $Q_n$  враховуючи те, що вони є випадковими процесами. Зміна  $Q_p$  і  $Q_n$  приводить до похибок визначення  $K_{p/v}$ . Попередніми дослідженнями встановлено, що єдиним підходом підвищення точності визначення співвідношення руда/вода на вході в кульовий млин є фільтрація цих випадкових процесів перед подачею на вхід БІС.

Під фільтрацією розуміють будь-яке перетворення сигналів з метою зміни співвідношення між їх різними компонентами. Таке перетворення може бути як лінійним, так і нелінійним. Однак по розповсюдженості і математичній обґрунтованості методи лінійної фільтрації значно перевершують методи нелінійної фільтрації. Крім того, в нелінійній фільтрації виникають труднощі строгого розв'язання задач [2]. Для кількісної характеристики якості фільтрації використовують кілька критеріїв. Найширше розповсюдження отримали критерій мінімуму середньоквадратичної помилки, критерій максимуму апостеріорної імовірності [2], максимуму відношення сигнал/перешкода [3]. Фільтри, що відповідають останньому критерію, називають оптимальними фільтрами. Їх теорія розроблена найбільш глибоко [4]. Оскільки корисний сигнал і перешкода в кожному каналі БІС не є їх простою сумою, даний спосіб фільтрації не забезпечує необхідного результату. Більш підходящим є критерій мінімуму середньоквадратичної помилки. Задача фільтрації розв'язується в два етапи – визначення передавальної функції фільтра, реалізація по знайденій передавальній функції структури та параметрів фільтра. Традиційно задачі розв'язувалися шляхом аналогової фільтрації [5]. Однак в більшості практично важливих випадків виміральної техніки реалізація фільтрів з заданою передавальною функцією у вигляді аналогових пристроїв виявляється достатньо складною задачею [5]. Це насамперед зв'язано з фізичною нездійсненністю фільтрів з заданими характеристиками [5]. Практичне розв'язання даної задачі ускладнюється ще й тим, що нестабільність параметрів аналогового пристрою обробки викликає неконтрольовані зміни вихідного сигналу і, як наслідок, вносить додаткову помилку.

Цифрові фільтри володіють рядом переваг, основною з яких є можливість отримання частотних характеристик, реалізація котрих за допомогою аналогових пристроїв практично не можлива [3]. Цифрові фільтри ефективно працюють до сотень кілогерц [5], що відповідає умовам функціонування БІС. В якості алгоритму фільтрації тут слід вибрати розрахунок поточного середнього значення сигналу на даному відрізку часу [5].

Однією з основних складових системи автоматичного регулювання розрідження пульпи в кульових млинах з циркулюючим навантаженням є блок ідентифікації співвідношення руда/вода (БІС) (рис. 1), на вхід якого подається шість параметрів, а на виході формується одна величина – співвідношення руда/вода  $K_{p/v}$ . БІС слугує інформаційним засобом у даній системі автоматичного регулювання. Три вхідні величини – густина  $\delta_p$ , вологість пісків класифікатора  $K_n$  і витрати води в піщовий

Реалізація цифрового фільтра випадкові процеси на вході БІС переводить у не випадкові функції часу, тому система автоматичного регулювання буде піддана не випадковим, а ступінчастим сигналам, які в часі змінюються циклічно [6]. Реалізація прийнятого алгоритму фільтрації передбачає визначення оптимального часового інтервалу згладжування сигналів. Всі три випадкові функції на вході БІС мають різні характеристики. Найбільш несприятливим є випадковий процес, що характеризує рух пульпи у пісковому жолобі класифікатора.

Потік пульпи у пісковому жолобі класифікатора має сталу і хвильову складові. Хвильова складова наближено може рахуватись синусоїдальною з амплітудою  $H_{ПМ}$  і коловою частотою  $\omega$ , тобто  $H_{ПМ} \sin(\omega t)$  [6]. Хвильовий потік в кінці пісового жолоба класифікатора вимірюється датчиком об'ємної витрати, який фіксує рівень пульпи. Оскільки процес вимірювання (відлік) розпочинається з впадини потоку, а не з центральної частини хвилі, сигнал витратоміра буде  $H_{ПМ} \cos(\omega t)$ . Хвиля потоку не є чисто гармонічною, оскільки її певним чином спотворюють особливості процесу сходження пісків через поріг класифікатора та процесу розтікання, заповнення матеріалом пісового жолоба класифікатора. Ці особливості виступають в якості перешкод, що діють на даний процес. Нехтуючи певним викривленням форми потоку пульпи, будемо рахувати сигнал витратоміра гармонічним  $H_{ПМ} \cos(\omega t)$ . Зважаючи на те, що при зміні циркулюючого навантаження зростає або зменшується швидкість руху матеріалу, при певній точці розвантаження пісків і деякому базовому віддаленню від неї витратоміра, хвильовий потік буде змінювати початкову фазу. Тоді випадкова функція прийме вигляд

$$Q_n(t) = H_{ПМ} \cos(\omega t + \varphi), \quad (1)$$

де  $\varphi$  – випадкова початкова фаза потоку пульпи в пісковому жолобі класифікатора. Корреляційна функція такого випадкового процесу дорівнює [2]

$$K_{Q_n}(\tau) = \frac{1}{2} H_{ПМ}^2 \cos(\omega \tau). \quad (2)$$

Оптимальний інтервал згладжування  $2T$  будемо визначати шляхом знаходження мінімуму дисперсії на виході фільтра. Помилку фільтрації згладжуванням можна визначити залежністю

$$\sigma_T^2 = \sigma_{Q_n}^2 - \frac{1}{T} \int_{-T}^T K_{Q_n}(\tau) d\tau + \sigma_{m_{Q_n}}^2 + \sigma_{m_\xi}^2, \quad (3)$$

де  $T$  – половина інтервалу згладжування;

$\sigma_{Q_n}^2$  – дисперсія корисного сигналу;

$K_{Q_n}(\tau)$  – корреляційна функція корисного сигналу;

$\sigma_{m_{Q_n}}^2, \sigma_{m_\xi}^2$  – дисперсії оцінки математичного сподівання корисного сигналу і перешкоди.

Дисперсії оцінки математичного сподівання корисного сигналу і перешкоди визначаються за залежністю

$$\sigma_m^2 = \frac{1}{2T^2} \int_0^{2T} K(\tau) [2T - \tau] d\tau. \quad (4)$$

Продиференціюємо (3) з врахуванням (4) і отримаємо

$$\frac{2}{T} \int_0^T K_{Q_n}(\tau) d\tau - 2K_{Q_n}(T) - \frac{1}{T^2} \int_0^{2T} (T - \tau) K_{Q_n}(\tau) d\tau = 0. \quad (5)$$

Рівняння (5) дозволяє визначити значення  $T$ .

Підставимо в (5) значення  $K_{Q_n}(\tau)$  (2), візьмемо інтеграли і виконаємо перетворення виразу. В результаті отримаємо

$$\sin(\omega T) - \omega T \cos(\omega T) + \sin(\omega T) \cos(\omega T) - \frac{1}{\omega T} \sin^2(\omega T) = 0. \quad (6)$$

Після ряду перетворень отримаємо

$$(\sin(\omega T) - \omega T \cos(\omega T)) \left( 1 - \frac{\sin(\omega T)}{\omega T} \right) = 0. \quad (7)$$

З (7) можна записати

$$1 - \frac{\sin(\omega T)}{\omega T} = 0, \quad (8)$$

$$\sin(\omega T) - \omega T \cos(\omega T) = 0. \quad (9)$$

Умови (8) і (9) практично однакові, розглянемо останню. Після перетворення отримаємо

$$\operatorname{tg}(\omega T) = \omega T. \quad (10)$$

Розв'язком рівняння (10) буде

$$\omega T = \alpha_{\text{рад}} + 3,14k, \quad (11)$$

де  $\alpha_{\text{рад}}$  – кут, що забезпечує справедливість співвідношення  $\operatorname{tg}(\omega T) = \omega T$ ;  
 $k$  – показник, що приймає значення 0, 1, 2, ...

Кут  $\alpha_{\text{рад}}$  – це малий кут, при якому найкраще забезпечується умова (10). Його доцільно приймати в межах  $1^\circ \dots 3^\circ$ . Зважаючи на малість  $\alpha_{\text{рад}}$  при  $k = 0$ , умову оптимального інтервалу фільтрації реалізувати не можливо. Тому  $k$  повинно приймати значення 1, 2, 3, ... .  
 Визначимо  $\omega T$  при мінімальному  $k = 1$  і  $\alpha_{\text{рад}} = 30$ ,

$$\omega T = 0,0523 + 3,14 = 3,1923,$$

звідки  $T = 3,1923/\omega$ , с.

Для даного процесу  $\omega = 0,628 \text{ с}^{-1}$ , тоді  $T = 5,08$  с, а  $2T = 10,16$  с.

Отже, найменшим оптимальним інтервалом осереднення буде 10 с, що відповідає повному періоду хвильового процесу руху матеріалу в пісковому жолобі класифікатора. Однак, відповідно (11) оптимальними будуть і два, три періоди..., або 10 с, 20 с, 30 с, ... і т.д.

Оптимальний інтервал фільтрації сигналу витрати руди в кульовий млин можна обґрунтувати аналогічно з деякими особливостями.

Корреляційна функція таких випадкових процесів може бути визначеною за залежністю

$$K_{Q_p}(\tau) = \sigma_{Q_p}^2 e^{-\alpha|\tau|} \cos(\beta\tau), \quad (12)$$

де  $\sigma_{Q_p}$  – середньоквадратичне відхилення випадкового процесу  $Q_p(t)$ ;

$\tau$  – тимчасовий інтервал між перерізами випадкового процесу;

$\alpha, \beta$  – сталі, які характеризують випадковий процес.

Використовуючи вирази

$$\frac{2}{T} \int_0^T K_{Q_n}(\tau) d\tau - 2K_{Q_n}(T) - \frac{1}{T^2} \int_0^{2T} (T - \tau) K_{Q_n}(\tau) d\tau = 0 \quad (13)$$

і (12), можна визначити оптимальний інтервал фільтрації випадкового сигналу  $Q_p(t)$ . Зважаючи на складність математичного апарату перетворень і незалежність поведінки експоненти і гармонічної складової в (12), розіб'ємо задачу визначення оптимального інтервалу фільтрації сигналу  $Q_p(t)$  на дві – дослідження впливу гармонічної складової і експоненти.

Дослідження впливу гармонічної складової зводиться до вже розглянутого випадку.

$$T_T = \frac{3,14 \cdot k}{\beta}, \quad (14)$$

де  $\beta$  – колова частота коливань.

Аналіз залежностей показує, що  $\beta$  може досягати в таких випадкових процесах до  $400 \text{ с}^{-1}$ , а  $\alpha$  до  $100 \text{ с}^{-1}$ . Менш коливальні випадкові процеси, до яких можна віднести і зміну маси руди на конвеєрних вагах, будуть мати менші значення цих сталих. Якщо  $k = 1$ , а  $\beta = 400 \text{ с}^{-1}$ , то  $T_\Gamma = 0,00785 \text{ с}$ , а оптимальний інтервал осереднення  $2T_\Gamma = 0,0157 \text{ с}$ , що відповідає одному періоду коливань. Оптимальним інтервал осереднення буде і при кількох періодах коливань. Зменшення колової частоти коливань  $\beta$  буде збільшувати інтервал осереднення сигналу.

Вплив експоненціальної складової встановимо за допомогою (13), враховуючи, що

$$K_{Q_p}(\tau) = \sigma_{Q_p}^2 e^{-\alpha|\tau|}. \quad (15)$$

Після підстановки (15) в (13) і ряду перетворень отримаємо

$$\left(\frac{1}{\alpha T} - \frac{2\alpha T + 1}{\alpha^2 T^2}\right)e^{-2\alpha T} - 2\left(\frac{1}{\alpha T} + 1\right)e^{-\alpha T} + \left(\frac{1}{\alpha T} + \frac{1}{\alpha^2 T^2}\right) = 0. \quad (16)$$

Покладемо  $x = e^{-\alpha T}$ ,  $x^2 = e^{-2\alpha T}$ , тоді

$$\left(\frac{1}{\alpha T} - \frac{2\alpha T + 1}{\alpha^2 T^2}\right)x^2 - 2\left(\frac{1}{\alpha T} + 1\right)x + \left(\frac{1}{\alpha T} + \frac{1}{\alpha^2 T^2}\right) = 0. \quad (17)$$

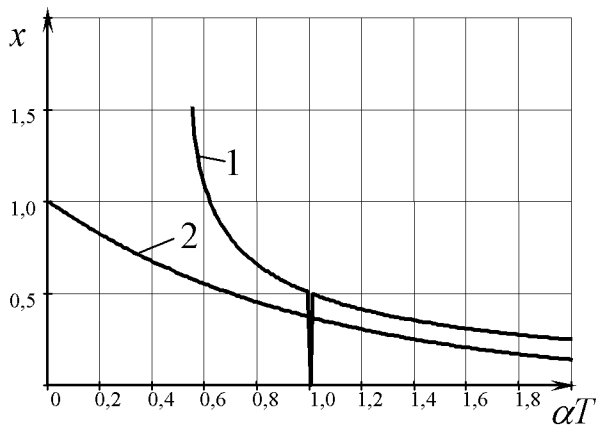
Розв'язавши (17) і виконавши перетворення, отримаємо

$$x = \frac{(1 + \alpha T) \pm \sqrt{(1 + \alpha T)^2 - \frac{1}{\alpha^2 T^2} + 1}}{\frac{(1 - \alpha T)}{\alpha T}}. \quad (18)$$

Аналіз (18) показує, що при знаку "+" перед радикалом рівняння не має сенсу. Отже, його слід подати у вигляді

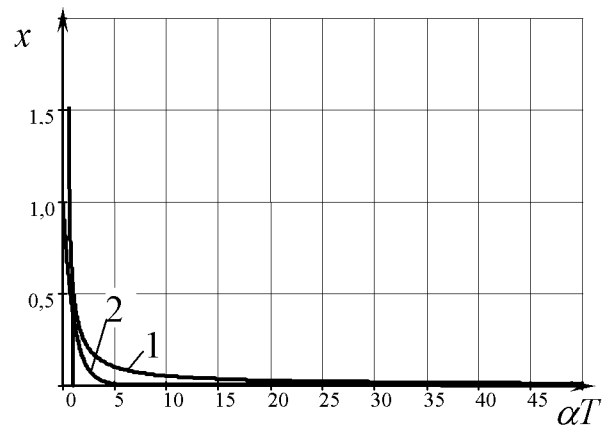
$$x = \frac{(1 + \alpha T) - \sqrt{(1 + \alpha T)^2 - \frac{1}{\alpha^2 T^2} + 1}}{\frac{(1 - \alpha T)}{\alpha T}}. \quad (19)$$

Отже, маємо функцію  $x$  (19) і  $x = e^{-\alpha T}$ . Обидві функції мають спільний аргумент  $\alpha T$ . Тому можна стверджувати, що (19) є апроксимуючою функцією для  $x = e^{-\alpha T}$ . На рис. 2 приведені дані залежності. Аналіз виразу (19) показує, що при  $\alpha T = 1$  відбувається розрив функції. При інших значеннях аргумента вона плавно змінюється. При малих  $\alpha T$  (рис. 2, а) функції практично не співпадають. Апроксимація відбувається практично після  $\alpha T = 20$ , де відхилення між кривими порівняно невелике. Достатньо невелика різниця між значеннями кривих при  $\alpha T$  порядку 100. Отже, при  $\alpha T = 100$  і  $\alpha = 100 \text{ с}^{-1}$ ,  $T_E = 1 \text{ с}$ . Якщо  $\alpha$  зменшується, то оптимальний інтервал фільтрації збільшується. Експоненціальна складова  $T_E$  оптимального інтервалу інтегрування строго не зафіксована, тому її можливо в певних межах змінювати, приймаючи кратне значення з  $T_\Gamma$ . Для розглянутого випадку  $2T_E = 2 \text{ с}$ ,  $2T_\Gamma = 0,0157 \text{ с}$ , що відповідає 127 періодам повних коливань. Більш точно  $2T_E = 2,0096 \text{ с}$ .



а)

а – при малих значеннях аргументу; б – при великих значеннях аргументу  
1 – апроксимуюча функція; 2 – основна функція



б)

Рисунок 2 – Залежність функцій від  $\alpha T$ 

Знання верхнього значення частоти спектра випадкового сигналу дозволяє встановити інтервал інтегрування  $\Delta t$  за залежністю [7]. Для похибки, що не перевищує 2 % він, дорівнює

$$\Delta t \leq \frac{1}{2f_e}, \quad (20)$$

де  $f_e$  – верхня частота спектра випадкового процесу.

Таким чином, для отримання високої точності керування розрідженням пульпи в кульовому млині сигнал витратоміра матеріалу у піщовому жолобі класифікатора необхідно фільтрувати впродовж 10,16 с або 20,32 с, 30,48 с, 40,64 с, ... , а витратоміра руди – не менше 2,0096 с.

З використанням сучасної мікропроцесорної техніки даний інтервал можна значно зменшувати.

Таким чином, підвищити точність системи автоматичного регулювання розрідження пульпи у кульовому млині з циркулюючим навантаженням можливо фільтруванням сигналів витратомірів пульпи в піщовому жолобі класифікатора і руди в кульовий млин. Точність автоматичного регулювання покращиться за рахунок зменшення похибки визначення співвідношення руда/вода в процесі фільтрування сигналів витратомірів. Необхідно застосовувати цифрову фільтрацію, реалізуючи алгоритм визначення середнього значення випадкових сигналів витратомірів. При цьому сигнал витратоміра пульпи необхідно фільтрувати впродовж 10 с або 20 с, 30 с і т.д. Тимчасовий інтервал фільтрації сигналу витратоміра руди повинен складати 2 с або 4 с, 6 с і т.д.

Проведені дослідження відкривають перспективу розробки блока ідентифікації співвідношення руда/вода на вході кульового млина з циркулюючим навантаженням, який забезпечить підвищення точності визначення технологічного параметра і, як наслідок, – точності системи його автоматичного регулювання.

## 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. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника /Тихонов В.И.– М.: Советское радио, 1966. – 678 с.
3. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы /Гоноровский И.С. – М.: Советское радио, 1971. – 672 с.
4. Бессонов Л.А. Линейные электрические цепи /Бессонов Л.А. – М.: Высшая школа, 1968. – 256 с.
5. Алиев Т.М. Измерительная техника /Т. Алиев, А. Тер-Хачатуров. – М.: Высшая школа, 1991. – 384 с.
6. Кондратець В.О. Комп'ютерно інтегрована система автоматичного управління співвідношенням руда/вода в кульових млинах з циркулюючим навантаженням /В. Кондратець, О. Сербул //Академический вестник. – 2006. – № 17-18. – С. 37-41.
7. Солодовников В.В. Статистическая динамика линейных систем автоматического управления /Солодовников В.В. – М.: Физматгиз, 1960. – 600 с.

*В. Кондратец, А. Сербул*

### **Повышение точности стохастической САР разжижения пульпы в мельницах с циркулирующей нагрузкой фильтрованием сигналов**

Одной с основных составляющих системы автоматического регулирования разжижения пульпы в шаровых мельницах с циркулирующей нагрузкой есть блок идентификации соотношения руда/вода, на вход которого подается шесть параметров (влагосодержание песков классификатора, плотность руды, расход воды в песковый желоб, расход воды в мельницу, объемный расход пульпы в песковом желобе, массовый расход руды в шаровую мельницу), а на выходе формируется одна величина – соотношение руда/вода. Данный блок служит информационным средством в рассматриваемой системе. Первые четыре входные величины практически являются постоянными в процессе идентификации, а две остальные представляют собой случайные процессы. Это приводит к погрешностям при идентификации выходной величины. Уменьшить погрешность идентификации до минимального значения возможно фильтрацией этих случайных процессов. Установлено, что необходимо применять цифровое фильтрование. В качестве алгоритма фильтрации необходимо избрать расчет среднего значения случайного процесса. Доказано, что сигнал расходомера пульпы в песковом желобе необходимо фильтровать в течение 10 с или 20 с, 30 с и т.д., а расходомера руды – на временном отрезке не менее 2 с с возможностью увеличения длительности часового интервала до 4 с, 6 с и т.д.

*V. Kondratec, A. Serbul*

### **Increase of exactness of stochastic SAR of dilution of pulp in mills with the circulatory loading by filtration of signals**

One of the basic constituents of the system of automatic control of dilution of pulp in ball mills with the circulatory loading there is a block of authentication of correlation ore/water, on the entrance of which six parameters (contents of moisture of sands of classifier, closeness of ore, expense of water in a sand chute, expense of water in a mill, volume expense of pulp in a sand chute, mass expense of ore in a ball mill) are given, and on an output one parameter is formed – this is correlation ore/water. This block serves as an informative mean in the considered system. First four entrance parameters practically are permanent in the process of authentication, and two other are casual processes. It results in errors during authentication of output parameter. To decrease the error of authentication to the minimum value possibly by filtration of these casual processes. It is set that it is necessary to apply digital filtration. As an algorithm of filtration it is necessary to choose the calculation of mean value of casual process. It is well-proven that signal of expense measure of pulp in a sand chute it is necessary to filter during 10 s or 20 s, 30 s et cetera, and expense measure of ore – on a temporal segment no less than 2 s with possibility of increase of duration of sentinel interval to 4 s, 6 s et cetera.

Одержано 22.01.10