

УДК 681.513.6

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ В ЗАДАЧАХ СТАБІЛІЗАЦІЇ РОЗРІДЖЕННЯ ПІСКІВ ОДНОСПІРАЛЬНОГО КЛАСИФІКАТОРА

А. М. Мацуї*

Кіровоградський національний технічний університет, 25006, м. Кропивницький, просп. Університетський, 8

Метою роботи є математичне моделювання процесів і створення на цій основі адаптивної системи автоматичного керування розрідженням пісків. Дослідження виконувалися запропонованим методом поетапного розрідження. Розглянуто двоступеневий принцип керування. Перший принцип інваріантного керування забезпечує розрідження пісків у приймальному пристрої завиткового живильника з заданою похибкою. Друга ступінь реалізує принцип слідування і ліквідує допущену похибку в процесі підготовки пісків до завантаження у кульовий млин. Знайдені аналітичні залежності і алгоритм для здійснення цих принципів. Визначені налагоджувальні параметри для здійснення інваріантного керування. Отримало подальший розвиток теоретичне обґрунтування процесів автоматичної стабілізації розрідження пісків механічних односпірально класифікаторів. Вперше теоретично обґрунтовано двоступеневий принцип та запропоновано функціональні схеми реалізації адаптивної самоналагоджувальної системи керування розрідженням пісків односпірального класифікатора. Це гарантує підвищення ефективності роботи кульового млина. Ключові слова: пісковий желоб, завитковий живильник, співвідношення тверде/рідке, двоступеневий принцип керування.

Целью работы является математическое моделирование процессов и создание на этой основе адаптивной системы автоматического управления разжижением песков. Исследования выполнялись предложенным методом поэтапного разжижения. Рассмотрен двухступенчатый принцип управления. Первый принцип инвариантного управления обеспечивает разжижение песков в приемном устройстве улиткового питателя с заданной погрешностью. Вторая ступень реализует принцип слежения и ликвидирует допущенную ошибку в процессе подготовки песков к загрузке в шаровую мельницу. Найденны аналитические зависимости и алгоритм для осуществления этих принципов. Определены наладочные параметры для осуществления инвариантного управления. Получило дальнейшее развитие теоретическое обоснование процессов автоматической стабилизации разжижения песков механических односпиральных классификаторов. Впервые теоретически обоснован двухступенчатый принцип и предложены функциональные схемы реализации адаптивной самонастраивающейся системы управления разжижением песков односпирального классификатора. Это гарантирует повышение эффективности работы шаровой мельницы. Ключові слова: песковый желоб, улитковый питатель, соотношение твердое/жидкое, двухступенчатый принцип управления.

The aim of the work is mathematical modeling of processes and the creation on this basis of an adaptive system for automatic control of the liquefaction of sands. The studies were carried out by the proposed method of phased liquefaction. The two-stage principle of control is considered. The first principle of invariant control ensures the liquefaction of sands in the receiver of the cochlear feeder with a given error. The second stage realizes the principle of tracking and eliminates the error in the process of preparing sands for loading into a ball mill. Analytical dependencies and an algorithm for implementing these principles are found. Set up parameters for the implementation of invariant control. The theoretical substantiation of the processes of automatic stabilization of the sand liquefaction of mechanical single-spiral classifiers has been further developed. For the first time, a two-step principle is theoretically justified and functional schemes for the implementation of an adaptive self-adjusting control system for liquefying sand of a single-spiral classifier have been proposed. This ensures more efficient operation of the ball mill. Key words: sand gutter, cochlear feeder, solid / liquid ratio, two-stage control principle.

Україна займає ведучі місця у світовому виробництві залізорудної сировини для металургійної промисловості. Низький вміст (в середньому 35%) корисного компонента в рудах вимагає їх збагачення, де на подрібнення приходиться до 50% всіх енергетичних витрат і значна кількість молоткових тіл і футеровки. Тому зменшення енергоємності процесів подрібнення і підвищення технологічної ефективності подрібнення необхідно розглядати як найбільш важливу складову на шляху інтенсифікації процесів рудопідготовки [1]. Одним з основних напрямів є критичний аналіз переваг і недоліків існуючого подрібнювального обладнання з метою виявлення подальшого покращення його показників, у тому числі завдяки оптимізації конструкції та технологічних схем, удосконалення режимів подрібнення та автоматичного управління [2]. Ефективність подрібнення, крім того, визначається як вибором оптимальної системи параметрів механічного режиму, так і набором технологічних параметрів, серед яких найбільш важливим є співвідношення твердого до рідкого у млині [1]. Певне розрідження пульпи у кульових млинах дозволяє мінімізувати вказані витрати й зменшити собівартість металургійної сировини, яка значно вища зарубіжних показників. Однак необхідне розрідження пульпи не підтримується, що приводить до значних перевитрат і не узгоджується з законодавством України щодо застосування ресурсозберігаючих технологій у виробництві.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій. Автоматизацією рудопідготовки як в Україні, так і в близькому та далекому зарубіжжі вчені займаються давно. Нині одним з напрямів значного зменшення втрат в рудопідготовці є удосконалення автоматизованих систем керування цими технологічними процесами [2]. Розвиток автоматичних систем керування за останні роки розглянуто в роботі [2]. Системи, що нині діють у виробничих умовах описані і проаналізовані в монографії [3]. Єдиним засобом розрідження пульпи в пісковому жолобі односпірального класифікатора є пристрій автоматичної стабілізації витрати рідини [4] в пісковий жолоб односпірального класифікатора. Теоретичне дослідження розрідження пісків односпірального класифікатора джерелом з незмінною витратою води показало, що працездатність обладнання вибором витрати води можливо забезпечити, однак при цьому густина пульпи змінюється в широких межах [5]. Моделюванням формування піскового потоку у пісковому жолобі механічного

односпірального класифікатора встановлено гармонічний характер розвантаження твердого зі зміною амплітудних і середніх значень [6]. Це підтверджує нерівномірність співвідношення тверде/рідке в пісковому жолобі, а отже і в кульовому млині. Пульпа циклічно формується або сильно розрідженою, або занадто згущеною.

Висвітлення невирішених раніше частин проблеми. Для ефективного подрібнення пульпа в млині повинна бути осередненою за вмістом твердого і мати певне найкраще розрідження для даного технологічного різновиду руди. Якщо тверде розташоване в пульпі нерівномірно, кулі наносять удари у занадто згущеному середовищі, непродуктивно втрачаючи енергію, або в розрідженому, де енергія не гаситься при виконанні корисної роботи і вони практично не зустрічаючи частинок руди, наносять удари по футеровці, марно руйнуючи її і саморуйнуючись. При цьому непродуктивно перевитрачається електроенергія, кулі і футеровка та мало створюється подрібненого готового продукту. Як було показано, існуючий спосіб розрідження пісків при стабілізації витрати води в пісковий жолоб не відповідає вимогам технологічного процесу. Аналіз показує, що необхідно стабілізувати не витрату води, а розрідження пульпи (співвідношення тверде/рідке) в пісковому жолобі односпірального класифікатора, однак таких досліджень ніхто не проводив.

Мета роботи. Метою даної роботи є математичне моделювання процесів і створення на цій основі адаптивної системи автоматичного керування розрідженням пісків механічного односпірального класифікатора.

Поставлена мета досягалася запропонованим методом поетапного розрідження пісків.

Основний матеріал дослідження. Розрідження пульпи у кульовому млині на заданому рівні необхідно підтримувати регулюванням витрати води Q_{wg} у пісковий жолоб класифікатора. Однією особливістю кульового млина є те, що у ньому не можливо досягнути задовільної якості керування розрідженням пульпи шляхом подачі практично повної витрати води безпосередньо в технологічний агрегат. Зважаючи на це, задане співвідношення тверде/рідке K_z необхідно підтримувати на вході у кульовий млин, тобто, керованим об'єктом стає приймальний пристрій завиткового живильника.

Завитковий живильник має дві вихідні величини – рівень пульпи H_y і співвідношення тверде/рідке K_y в приймальній пристрої. За обома вихідними величинами він є динамічною ланкою першого порядку з незмінною сталою

часу, яка при типовому обладнанні складає $T_{ж}=65,2$ с. Вхідні величини у завитковому живильнику можливо подати масовою витратою пісків (твердого) Q_p і води Q_{wg} у пісковий жолоб, однак можливо розглядати і об'ємну витрату Q пульпи, і співвідношення тверде/рідке K_g у пісковому жолобі. В усталеному режимі співвідношення тверде/рідке в приймальному пристрої завиткового живильника і в пісковому жолобі однакові, а рівень пульпи H_y визначається залежністю

$$H_y = \frac{1}{k_2} \left[\left(\frac{1}{\delta_p} + \frac{k_1}{\delta_w} \right) Q_p + \frac{1}{\delta_w} Q_{wg} \right], \quad (1)$$

де δ_p, δ_w – відповідно густина твердого та рідкого (води); k_1 – коефіцієнт, що враховує вміст вологи в пісках класифікатора; k_2 – константа, що характеризує завитковий живильник, м²/с.

З рівняння (1) видно, що в усталеному режимі конкретним масовим витратам Q_p і Q_{wg} відповідає певне значення рівня пульпи H_y в приймальному пристрої завиткового живильника. Якщо миттєво зменшити Q_{wg} , розпочнеться перехідний процес зменшення відповідно експоненті рівня пульпи H_y і таким же зростанням K_y до їх нових усталених значень. Перехідний процес триває достатньо довго, оскільки стала часу завиткового живильника дорівнює 65,2с.

Пісковий жолоб класифікатора є запізнюючою динамічною ланкою зі змінними параметрами, оскільки змінюється витрата пісків, а разом з нею і середня швидкість руху пульпи. Як показує аналіз, час запізнювання знаходиться в межах 2,6...5,6с.

Отже, завитковий живильник є об'єктом з запізнюванням. Розрізняють об'єкти з запізнюванням в керуючих сигналах і об'єкти, що містять запізнювання у координатах, до яких відносяться процеси в подрібнювальних агрегатах [7]. Об'єкт, що розглядається, характеризується двома видами запізнювання, однак по каналу розрідження пульпи він має запізнювання лише у керуючому сигналі.

Найбільш просто було б розв'язати дану задачу, використавши регулятор співвідношення [8], однак у даному випадку відсутня можливість виміряти піськове навантаження класифікатора.

Більш просто виміряти об'ємну витрату пульпи у пісковому жолобі класифікатора. При цьому масова витрата пісків Q_p буде дорівнювати

$$Q_p = \frac{\delta_p}{1 + k_1 \delta_p / \delta_w} (Q - Q_{wgv}), \quad (2)$$

де Q_{wgv} – об'ємна витрата води у пісковому жолобі.

Використовуючи регулятор співвідношення [8], за Q_p і $Q_{wg} = Q_{wgv} \cdot \delta_w$ можливо визначити параметр, що відшукується. Однак даний ефективний підхід керування розрідженням пульпи, що виключає негативний вплив чистого і емкісного запізнювання, реалізувати не можливо в наслідок порівняно низької точності об'ємних витратомірів, які вимірюють параметр у відкритих потоках. Зважаючи на це необхідно враховувати вплив чистого і емкісного запізнювання, контролюючи технологічні параметри в приймальному пристрої завиткового живильника. Для визначення розрідження пульпи в приймальному пристрої завиткового живильника можливо використати алгоритм

$$K_y = \frac{\delta_p}{\delta_w} \cdot \frac{(P_n - \delta_w g H_y)}{(\delta_p g H_y - P_n)}, \quad (3)$$

де P_n – наднормальний тиск пульпи у донній частині приймального пристрою; g – прискорення вільного падіння.

Вираз (3) дозволяє ідентифікувати співвідношення тверде/рідке у приймальному пристрої завиткового живильника та організувати керування за відхиленням, тобто замкненою системою. Розроблений ряд методів керування об'єктами з запізнюванням, запропонований кінцевовимірний модальний регулятор для таких об'єктів [9], однак за його допомогою достатньо складно забезпечити стійкість і необхідну якість системи.

Позбавитись впливу транспортного і значного емкісного запізнювання можливо застосуванням інваріантного управління, оскільки в керованому об'єкті існує зв'язок вихідних величин з витратою пісків і доданої води у пісковий жолоб. Аналіз показує, що регулювання можливо здійснити східчастою подачею води у пісковий жолоб класифікатора при зміні співвідношення тверде/рідке на встановлену величину $\Delta K_y = const$. Однак при цьому точність регулювання обмежується величиною ΔK_y , пред'являються високі вимоги щодо точності інформаційних засобів, виникає необхідність у створенні значної кількості керованих магістралей подачі додаткової води у пісковий жолоб класифікатора, які вимагають точного налагодження витрати різних значень. Виявлення проблем створення та експлуатації ефективних систем регулювання, які зводяться

до головної вади промислових систем регулювання – «слабким» настройкам регуляторів для забезпечення працездатності [10], не дозволяють ефективно реалізувати даний підхід, оскільки «слабко» налагоджені контури практично не виконують своїх функцій, не забезпечують необхідну якість регулювання. Все це примушує повсюдно переходити до адаптивних пристроїв, регуляторів з адаптацією до умов, які змінюються. Один з універсальних підходів самоналагодження типового ПІ-регулятора для широкого класу промислових об'єктів управління розглянуто у роботі [11], однак для даних умов він не підходить. Найкращих результатів можливо досягти, використовуючи принципи адаптації та враховуючи особливості конкретного об'єкта керування. Виходячи з цього, доцільно розробити оригінальний підхід до керування розрідженням пісків механічного односпірального класифікатора, наприклад використовуючи самоналагоджувальні системи (СНС), які розташовані ланцюгом.

Розробка оригінального підходу до керування розрідженням пісків потребує уточнення вимог до якості процесу. Аналіз показує, що якість стабілізації розрідження пісків буде високою при змінах масової витрати води в межах 0...3% відносно усього продукту, 0...15% відносно витрати води і 0...6,0% відносно об'ємної витрати суміші, що поступає до кульового млина.

Одночасно позбутись шкідливого впливу транспортного і ємкісного запізнювання та вилучити складні операції налагодження і переналагодження гідравлічної системи при керуванні розрідженням пісків у приймальному пристрої завиткового живильника можливо побудовою адаптивної СНС, що реалізує принцип інваріантності, у якій магістралі подачі води в пісковий жолоб виконані з незмінною витратою води, тобто, $\Delta Q_{wg} = const$. Побудова такої СНС повинна спиратись на конкретні характеристики керованого об'єкта. Практикою встановлено, що витрата пісків у циклах подрібнення практично не виходить за межі $Q_{\Gamma} = 62,5 \dots 187,5$ кг/с (225...675 т/год). Задане значення співвідношення тверде/рідке у кульовому млині звичайно підтримують на рівні $K_{zm} = 4,88$. Тоді у приймальному пристрої завиткового живильника, враховуючи двопозиційне регулювання, необхідно також встановити мінімальне $K_{zmin} = 5,0$ (4,95) і максимальне $K_{zmax} > 5,2$ задані значення співвідношення тверде/рідке, які дещо більші K_{zm} . Аналіз показує, що даним умовам

задовольняє витрата води у кожній магістралі $\Delta Q_{wg} = const = 2$ кг/с. Для даного процесу справедлива залежність визначення співвідношення тверде/рідке у приймальному пристрої завиткового живильника

$$K_y = \frac{Q_p}{k_1 Q_p + Q_{wg}}, \quad (4)$$

з якої витікають

$$Q_p = \frac{K_y Q_{wg}}{1 - k_1 K_y}, \quad (5)$$

$$Q_{wg} = \frac{Q_p (1 - k_1 K_y)}{K_y}. \quad (6)$$

Використовуючи залежності (1), (4), (5) і (6), промодельємо процес включення магістралей подачі додаткової води в пісковий жолоб класифікатора (табл.1). Нехай піскова продуктивність дорівнює мінімальному значенню 62,5 кг/с. При цьому продуктивність вихідної магістралі подачі води складає 5,0 кг/с, а співвідношення тверде/рідке – 5,0, рівень пульпи – 0,2096 м. Якщо витрата пісків у часі буде неперервно зростати, то при тій же загальній витраті води 12,5 кг/с співвідношення тверде/рідке почне зростати, а одночасно і рівень пульпи у приймальному пристрої завиткового живильника. Включення першої магістралі подачі додаткової витрати води 2 кг/с доцільно здійснити в мить, коли витрата пісків досягне значення, що разом з доданою водою буде відповідати співвідношенню тверде/рідке 5,0. Це, як видно з даних табл.1, буде при $Q_p = 87,5$ кг/с і загальній продуктивності подачі води 15,5 кг/с. Рівень пульпи у завитковому живильнику при цьому становить $H_y = 0,28$ м, а $K_{zmax} = 5,645$. З іншого боку, ці дані $H_y = 0,28$ м і $K_{zmax} = 5,645$ дозволяють сформувати сигнал для включення першої магістралі подачі додаткової води у пісковий жолоб класифікатора. Далі процес відбувається аналогічно до збільшення витрати пісків до $Q_p = 187,5$ кг/с. Дані переключень наведені в табл.1. Допустимо, що, досягнувши 187,5 кг/с, витрата пісків у часі починає неперервно зменшуватись.

Таблиця 1 – Результати моделювання включення магістралей подачі додаткової води в пісковий жолоб класифікатора при $Q_w=const$

Найменування магістралі	Продуктивність магістралі, кг/с	Продуктивність пісків, кг/с	Продуктивність води, кг/с	Параметри включення		Рівень зміни співвідношення тверде/рідке
				Рівень пульпи, м	Співвідношення тверде/рідке	
Вихідна	5,0	62,5	12,5	0,2096	-	5,0
Перша	2,0	87,5	15,5	0,2800	5,645	5,0
Друга	2,0	112,5	20,5	0,3639	5,4878	5,0
Третя	2,0	137,5	25,5	0,4478	5,3922	5,0
Четверта	2,0	162,5	30,5	0,5316	5,3279	5,0
П'ята	2,0	187,5	35,5	0,6154	5,2817	5,0

Дані моделювання такого процесу приведені в табл.2. При загальній продуктивності води в пісковому жолобі класифікатора 35,5кг/с і $K_{ymin}=5,0$ зменшення витрати пісків на незначну величину приведе до зменшення співвідношення тверде/рідке до значення, яке нижче 5,0. Встановивши $K_{yp}=4,95$ – порогове значення виключення магістралей, можливо забезпечити за даними $H_y=0,6154m$, $K_{yp}=4,95$ виключення п'ятої магістралі подачі додаткової води. При виключенні магістралі співвідношення тверде/рідке прийме значення, близьке до 5,2817 (табл.2). Подальше зменшення витрати пісків при

загальній витраті води 30,5кг/с приводить до зменшення співвідношення тверде/рідке і рівня пульпи в приймальному пристрої завиткового живильника. При досягненні значень $H_y=0,5316m$, $K_{yp}=4,95$ в процесі зменшення витрати пісків створюються умови для виключення четвертої магістралі подачі додаткової води. Далі процес буде продовжуватись відповідно даним, приведеним в табл.2, до ситуації, коли працювати буде лише вихідна магістраль подачі води в пісковий жолоб класифікатора.

Таблиця 2 – Результати моделювання виключення магістралей подачі додаткової води в пісковий жолоб класифікатора при $Q_w=const$

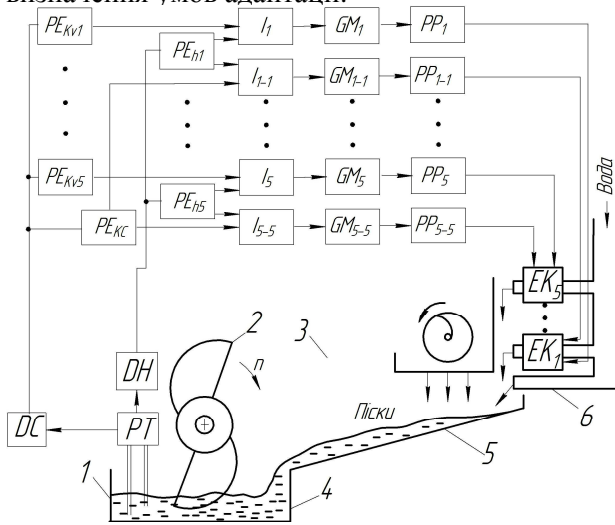
Найменування магістралі	Продуктивність магістралі, кг/с	Продуктивність пісків, кг/с	Продуктивність води, кг/с	Параметри виключення		Рівень зміни співвідношення тверде/рідке
				Рівень пульпи, м	Співвідношення тверде/рідке	
Вихідна	5,0	62,5	12,5	0,2096	5,0	5,645
Перша	2,0	87,5	15,5	0,2800	4,95	5,645
Друга	2,0	112,5	20,5	0,3639	4,95	5,4878
Третя	2,0	137,5	25,5	0,4478	4,95	5,3922
Четверта	2,0	162,5	30,5	0,5316	4,95	5,3279
П'ята	2,0	187,5	35,5	0,6154	4,95	5,2817

Параметри включення і параметри виключення в табл.1 і табл.2 дозволяють здійснити адаптивну СНС, що реалізує інваріантний принцип керування. Її функціональна схема подана на рис.1. Дана адаптивна СНС забезпечує керування розрідженням пульпи у приймальному пристрої завиткового живильника в межах зміни співвідношення тверде/рідке від 4,95 до дещо більшого 5,2 значення. Це суттєва похибка регулювання, якої необхідно позбавитись.

Друга ступінь адаптації призначена

ліквідувати похибку стабілізації густини пульпи $0...ΔK_y$ в завитковому живильнику. Регулюванням розрідження пісків у приймальному пристрої необхідної точності досягти не можливо в наслідок значного впливу його ємкісного запізнювання. Східчаста зміна витрати води в пісковий жолоб переводить систему в інший клас – систем з адаптацією в особливих фазових станах. Тобто, створений корисний режим східчастої подачі води одночасно слугує додатковим джерелом робочої інформації щодо зміни умов функціонування

системи. Він, зокрема, при ліквідації похибки $0... \Delta K_y$, дозволяє здійснювати перехід від регульованої величини співвідношення тверде/рідке до іншої регульованої величини – витрати води у пульпу на вході кульового млина. При цьому ліквідується вплив сталої часу $T_{жс}$ на результати регулювання, які можливо отримати з високою точністю, оскільки відсутня інерційність, а витрата води незначна і не впливає на стан кульового млина. Таке керування також доцільно здійснити адаптивною безпошуковою самоналагоджувальною системою, оскільки можливо застосувати аналітичні методи визначення умов адаптації.



1 – приймальний пристрій завиткового живильника; 2 – завиток; 3 – односпіральный класифікатор; 4 – розріджені піски; 5 – пісковий жолоб; 6 – магістралі подачі води; PT – перетворювач тиску; DH – датчик рівня; DC – датчик співвідношення тверде/рідке; $PE_{kv1}...PE_{kv5}$ – порогові елементи співвідношення тверде/рідке зі змінним сигналом спрацювання; PE_{KC} – пороговий елемент співвідношення тверде/рідке, що спрацьовує на виключення магістралей; $PE_{h1}...PE_{h5}$ – порогові елементи, що спрацьовують від сигналу рівнеміра пульпи; $I_1...I_5$ – логічні елементи «І»; $GM_1...GM_{5-5}$ – чекаючі мультівібратори; $PP_1...PP_{5-5}$ – підсилювачі потужності; $EK_1...EK_5$ – електромагнітні клапани

Рисунок 1 – Функціональна схема адаптивної СНС керування розрідженням пісків в приймальному пристрої завиткового живильника, що реалізує принцип інваріантності.

Для піскового жолоба класифікатора справедлива залежність, що визначає

співвідношення твердого до рідкого

$$K_{pg} = K_y = \frac{Q_{vp} \cdot \delta_p}{Q_{vw} \cdot \delta_w}, \quad (7)$$

де Q_{vp} – об'ємна витрата твердого; Q_{vw} – об'ємна витрата води.

Загальна об'ємна витрата води Q_{vw} в пісковому жолобі класифікатора складається з витрати води, що винесена пісками з класифікатора Q_{vwp} , і доданої води Q_{wgs} , тобто

$$Q_{vw} = Q_{vwp} + Q_{wgs} = k_1 Q_{vp} \delta_p / \delta_w + Q_{vws}. \quad (8)$$

Об'ємна витрата пульпи дорівнює

$$Q_{vM} = Q_{vp} (1 + k_1 \delta_p / \delta_w) + Q_{vws}. \quad (9)$$

З іншого боку, об'ємна витрата пульпи дорівнює

$$Q_{vM} = k_2 H_y = Q_{vp} + Q_{vw}, \quad (10)$$

звідки $Q_{vp} = k_2 H_y - Q_{vw}$, що на підставі (7) дозволяє записати

$$K_y = \frac{(k_2 H_y - Q_{vw}) \cdot \delta_p}{Q_{vw} \cdot \delta_w}. \quad (11)$$

Загальна об'ємна витрата води у пісковому жолобі класифікатора і у приймальному пристрої завиткового живильника на підставі (11) дорівнює

$$Q_{vw} = \frac{k_2 \delta_p H_y}{K_y \delta_w + \delta_p}. \quad (12)$$

Співвідношення тверде/рідке у кульовому млині K_{zm} , яке задане технологічним процесом, можливо визначити залежністю

$$K_{zm} = \frac{Q_{vp} \cdot \delta_p}{Q_{vw\Sigma} \cdot \delta_w}, \quad (13)$$

де $Q_{vw\Sigma}$ – сумарна об'ємна витрата води у процес, включаючи кульовий млин.

Визначивши з (7) Q_{vp} і підставивши в отриманий вираз відоме значення Q_{vw} (12), отримуємо

$$Q_{vp} = \frac{k_2 \delta_w K_y H_y}{(K_y \delta_w + \delta_p)}. \quad (14)$$

Підставивши (14) в (13), отримаємо

$$K_{zm} = \frac{k_2 \delta_p K_y H_y}{Q_{vw\Sigma} (K_y \delta_w + \delta_p)}. \quad (15)$$

Сумарна об'ємна витрата води у процес, включаючи кульовий млин, з залежності (15) дорівнює

$$Q_{vw\Sigma} = \frac{k_2 \delta_p K_y H_y}{K_{zM} (K_y \delta_w + \delta_p)} \quad (16)$$

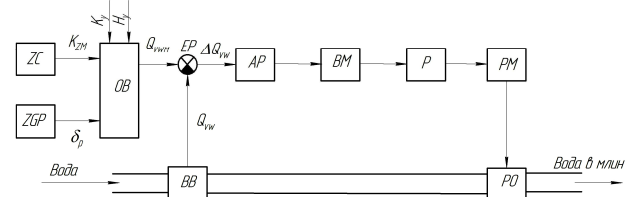
Враховуючи, що об'ємна витрата води в кульовий млин $Q_{vwM} = Q_{vw\Sigma} - Q_{vw}$, запишемо

$$Q_{vwM} = \frac{k_2 \delta_p H_y}{(K_y \delta_w + \delta_p)} \left(\frac{K_y}{K_{zM}} - 1 \right) \quad (17)$$

Отриманий алгоритм (17) дозволяє здійснити адаптивну СНС, що реалізує принцип слідкування. Вона відрізняється високими якісними показниками, оскільки виключає шкідливий вплив значного ємкісного запізнювання завиткового живильника. Функціональна схема адаптивної СНС, яка реалізує принцип слідкування, приведена на рис.2. Обчислювальний блок ОВ, виконаний на засобах мікропроцесорної техніки, неперервно здійснює розрахунки відповідно залежності (17), оцінюючи поточне значення витрати води Q_{vwM} у кульовий млин. В ньому враховується значення коефіцієнта k_2 завиткового живильника і густини води δ_w . На вхід обчислювального блока ОВ поступають задане значення співвідношення тверде/рідке у кульовому млині K_{zM} , поточне значення співвідношення тверде/рідке K_y у приймальному пристрої завиткового живильника, поточне значення рівня пульпи H_y в приймальному пристрої завиткового живильника та задане значення густини твердого δ_p . Обчислювальний блок ОВ знаходить поточне значення витрати води в кульовий млин, яке відпрацьовується цифровою системою автоматичного регулювання. Обчислювальний блок фактично являє собою пристрій слідкування за параметром Q_{vwM} .

Витрата води в кульовий млин змінюється від деякого найменшого до певного найбільшого значення. Найменше значення витрати води у циклі здійснюється при $K_y = 5,0$, коли води необхідно додати до розрідження пульпи у кульовому млині на рівні $K_{zM} = 4,88$. Найбільше значення витрати води у кульовий млин – при K_{ymax} , що дещо більше 5,2. Така ситуація формується безпосередньо перед включенням кожної магістралі подачі додаткової води в пісковий жолоб класифікатора. Результати моделювання даного процесу приведені в табл.3. З даних табл.3 видно, що у найбільш несприятливих ситуаціях подачі води у кульовий млин її витрата відносно

масової витрати пульпи не перевищує 3,0%. Це відповідає вимогам і забезпечує високу якість стабілізації розрідження пульпи у кульовому млині та підтверджує правильність вибору кількості і витрати води в магістралях. Підтримання витрати регульованої води у млин відносно її загальної витрати на рівні близько 10% забезпечує ефективне перемішування матеріалу. Сприяє якісному осередненню пульпи і об'ємний вміст регульованої води в матеріалі на рівні, який не перевищує 5,5%.



ZC – задавач співвідношення тверде/рідке в кульовому млині; ZGP – задавач густини твердого; OB – обчислювальний блок; EP – елемент порівняння; AP – автоматичний регулятор; BM – виконавчий механізм; P – редуктор; PM – перетворювальний механізм; PO – регульовальний орган; BB – витратомір води

Рисунок 2 – Функціональна схема адаптивної СНС керування розрідженням пісків на вході в кульовий млин, що реалізує принцип слідкування.

Отже, теоретичним обґрунтуванням показано, що запропоновані принципи та адаптивна система автоматичного керування розрідженням пісків механічного односпірального класифікатора на їх основі реально здійсненні і можуть гарантовано забезпечити якість керування, яку вимагає даний технологічний процес.

ВИСНОВКИ

В процесі виконаних досліджень встановлено наступне. Позбутись шкідливого впливу транспортного і ємкісного запізнювання та вилучити складні операції налагодження і переналагодження гідравлічної системи при керуванні розрідженням пісків у приймальному пристрої завиткового живильника можливо побудовою адаптивної СНС, що реалізує принцип інваріантності, у якій магістралі подачі води в пісковий жолоб виконані з незмінною витратою води.

Знайдені аналітичні залежності для здійснення принципу інваріантного керування розрідженням пісків односпірального класифікатора та налагоджувальні параметри для його здійснення.

Таблиця 3 – Частка витрати води, що подається у кульовий млин, відносно масової витрати пульпи, води та об'ємної витрати пульпи

Мить визначення витрати води у млин: перед включенням додаткової магістралі	Частка витрати води, що подається у кульовий млин, %		
	Відносно масової витрати пульпи	Відносно масової витрати води у пульпі	Відносно об'ємної витрати пульпи
Першої	2,3	13,55	5,74
Другої	1,88	11,08	4,47
Третьої	1,62	9,5	3,83
Четвертої	1,43	8,41	3,39
П'ятої	1,29	7,6	3,07

Отримано алгоритм для здійснення принципу слідкування при керуванні розрідженням пісків на вході кульового млина і ліквідації похибки при реалізації керування відповідно інваріантному принципу.

Отримало подальший розвиток теоретичне обґрунтування процесів автоматичної стабілізації розрідження пісків механічних односпіральних класифікаторів при подрібненні руди кульовими млинами.

Вперше теоретично обґрунтовано двоступеневий принцип та запропоновано функціональні схеми побудови адаптивних самоналагоджувальних систем керування розрідженням пісків механічних односпіральних класифікаторів і підтверджено практичне його застосування, що відкриває можливість значного зменшення витрати електричної енергії, молільних тіл і футеровки з одночасним підвищенням продуктивності за готовим продуктом, а як наслідок, зниження собівартості металургійної сировини.

Перспективою подальших розробок є відпрацювання конструкції окремих вузлів системи для використання їх в умовах рудозбагачувальних фабрик.

1. Маляров П.В. Основы интенсификации процессов рудоподготовки / Маляров П.В. – Ростов-на-Дону: Ростиздат, 2004. – 320с. 2. Измельчение. Энергетика и технология: [учебн. пособие для вузов] / [Пивняк Г.Г., Вайсберг Л.А., Кириченко В.И. и др.]. – М.: Изд. дом "Руда и Металлы", 2007. – 296с. 3. Разработка и применение автоматизированных систем управления процессами обогащения полезных ископаемых / [Морозов В.В., Топчаев В.П., Улитенко К.Я. и др.]. – М.: Изд. дом «Руда и металлы», 2013. – 512 с. 4. Пат. 74393 Україна, МПК G 05 D 9/02, G 05 D 7/01. Пристрій автоматичної стабілізації витрат рідини / Кондратець В.О., Сербул О.М.; заявник і

патентовласник Кіровоградський національний техн. університет. – № 2003043879; заявл. 25.04.03; опубл. 15.12.05, Бюл. № 12. 5. Кондратець В.О. Теоретичне дослідження розрідження пісків односпірального класифікатора джерелом з незмінною витратою води / В.О. Кондратець, О.М. Сербул // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: зб. наук. праць КНТУ. – 2013. – №26. – С.173-180. 6. Мацуї А.М. Моделювання формування піскового потоку у пісковому жолобі механічного односпірального класифікатора / А.М. Мацуї, В.О. Кондратець // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях: зб. наук. праць. – 2016. – №16. – С.53-59. 7. Системы автоматического управления с запаздыванием / [Громов Ю.Ю., Земской Н.А., Лагутин А.В. и др.]. – Тамбов: Изд. ТГТУ, 2007. – 76с. 8. Денисенко В. ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации // Современные технологии автоматизации. – 2007. – №3. – С.78-88. 9. Дылевский А.В. Конечномерный модальный регулятор для объектов с запаздыванием / А.В. Дылевский, Г.И. Лозгачев // Вестник ВГУ. Серия: Физика. Математика. – 2005. – №1. – С.158-162. 10. Проблемы создания и эксплуатации эффективных систем регулирования / Ш.Е. Штейнберг, Л.П. Серезин, И.Е. Залуцкий [и др.] // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2004. – №7. – С.2-7. 11. Страшинин Е.Э. Адаптивный ПИД регулятор для систем промышленной автоматики / Е.Э. Страшинин, К.А. Утешев, Д.В. Андреев // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2007. – №5. – С.15-19.

Поступила в редакцію 20.04.2017 р.

Рекомендували до друку: докт.техн.наук, проф. Юрчишин В.М., докт. техн. наук, проф. Олійник А.П.