

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

Кіровоградський національний технічний університет

Стендові дослідження системи автоматичної стабілізації витрати води

У статті приведені методика та результати стендових досліджень системи автоматичної стабілізації витрати води в пісковий жолоб класифікатора. Встановлено, що в межах експлуатаційних змін тиск і температура води практично не впливають на точність системи. Відносна похибка дозування склала $\pm 0,85\%$.

система автоматичної стабілізації, стенд, мірна ємкість, відносна помилка дозування, витрата

Подрібнення вихідної руди на магнітозбагачувальних фабриках є одним з важливих технологічних процесів, оскільки на нього витрачається майже 50 % енергетичних затрат [1]. В Україні найбільшого поширення отримали подрібнювальні агрегати, що включають кульовий млин і спіральний класифікатор, які працюють в замкнутому циклі. У кульових млинах одним з найважливіших технологічних параметрів є розрідження пульпи, яке визначає як умови подрібнення руди, так і транспортування готового продукту. Відхилення розрідження пульпи від необхідного значення приводить до зниження виходу готового продукту та перевитрати електричної енергії, футерівки та куль, що не відповідає реалізації напряму введення ресурсозберігаючих технологій в промисловості, який передбачає законодавство України. Ці ж задачі розв'язуються і в процесі виконання науково-дослідної роботи “Комп’ютерно-інтегрована система автоматичного регулювання співвідношення руда/вода в кульових млинах з циркулюючим навантаженням” (державний реєстраційний номер 0105U008334). А.М. Бонч-Бруєвич, В.Л. Биков, П.І. Чінаєв вказують, що оптимальну продуктивність подрібнювального агрегату, при якій забезпечується максимальний вихід готового продукту, можливо отримати лише при певному завантаженні кульового млина та певному співвідношенні руда/вода [2]. Тому забезпечення автоматичного регулювання співвідношення руда/вода в кульовому млині є актуальною задачею.

Зміна циркулюючого навантаження у згаданих циклах подрібнення руди не дозволяє розв'язати дану задачу. Автоматичне регулювання технологічного параметра безпосередньо в барабані кульового млина [3] не забезпечує необхідної точності, оскільки не враховує циркулююче навантаження. Велике транспортне запізнювання, низька точність густиномірів та невідповідність параметрів на вході та виході технологічного агрегату не дозволяють реалізувати системи автоматичного регулювання з контролем густини пульпи в розвантаженні кульового млина [4]. Не відрізняються запізнюванням та формують середовище безпосередньо перед початком технологічного процесу системи автоматичного регулювання заданого співвідношення руда/вода на вході кульового млина. Відмічені переваги привели до розробки кількох підходів автоматичної стабілізації даного параметра, наприклад [5]. Однак аналіз показує, що жодна з запропонованих систем автоматичної стабілізації співвідношення руда/вода по різним причинам реалізованою бути не може. Авторами даної статті запропоновано спосіб автоматичної стабілізації співвідношення руда/вода, який не має відмічених вад [6], однак він потребує автоматичної стабілізації витрати води в

пісковий жолоб класифікатора з достатньо високою точністю, що відповідає похибці не більше $\pm 1,0\%$.

Аналіз засобів автоматичної стабілізації витрати води, розглянутих в [7], показав, що вони не забезпечують необхідної точності. Авторами запропонований такий спосіб і пристрій [7, 8], які повинні забезпечити вказану точність стабілізації, а в [9, 10] розроблена теорія даних технічних засобів, однак їх стендові дослідження не здійснювалися.

Метою даної роботи є стендові дослідження створеної системи автоматичної стабілізації витрати води з визначенням відносної похибки та впливу перешкод на результати роботи.

У типовій технологічній схемі циклу подрібнення руди в пісковий жолоб класифікатора необхідно подавати $24,3 \text{ м}^3/\text{год}$. При цьому система автоматичної стабілізації витрати води може мати конструктивні дані, наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Конструктивні параметри системи автоматичної стабілізації витрати рідини $24,3 \text{ м}^3/\text{год}$ в пісковий жолоб класифікатора

Діаметри, мм					Рівень рідини H , мм	Висота поплавка $H_{\text{П}}$, мм
труби d_T	поплавка $d_{\text{П}}$	накопичувача d_H	каналу d_K	випускного патрубку $d_{\text{ВП}}$		
50	106,5	150	100	63,5	1027,6	110

Фактичне значення витрати води можна визначити шляхом використання мірної ємкості та фіксування часу її заповнення. Об'ємна витрата води, яку забезпечує система автоматичної стабілізації дорівнює

$$Q = \frac{V_{\text{МС}}}{t_3}, \quad (1)$$

де $V_{\text{МС}}$ – об'єм мірної ємкості;

t_3 – час заповнення мірної ємкості.

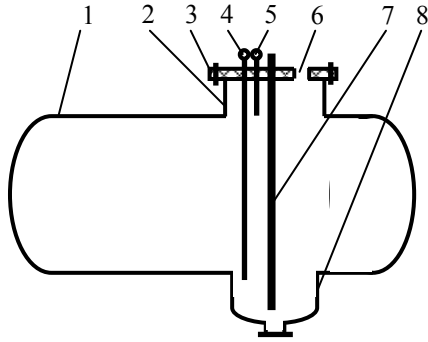
Розрахована витрата води залежить від похибки системи автоматичної стабілізації та похибки самого методу, який характеризується точністю визначення $V_{\text{МС}}$, а точніше введеного об'єму $V_{\text{ВО}}$ рідини, та t_3 . Причому, $V_{\text{МС}} \cong V_{\text{ВО}}$. Для оцінки точності системи автоматичної стабілізації витрати води необхідно звести до мінімуму похибку методу, тобто, якомога точніше визначити $V_{\text{ВО}}$ і t_3 . Шляхами удосконалення методу є реалізація заходів підвищення точності фіксування об'єму, збільшення абсолютного значення об'єму, точності фіксування часу, збільшення часу заповнення об'єму, автоматизація процесу фіксування об'єму та часу. Цим вимогам в основному відповідає мірна ємкість (рис. 1), розроблена для випробування системи автоматичної стабілізації витрати рідини. В якості мірної ємкості використано резервуар 1 зі значним об'ємом 5 м^3 з нижньою циліндричною камерою 8 діаметром 320 мм. Він має верхню горловину 2 діаметром 455 мм, закриту кришкою 3, в якій встановлені електрод 4 нижнього і 5 верхнього рівня та екран 7, який запобігає випадковому замиканню електродів з водою. Завдяки вузькій циліндричній камері 8 і екрану 7 забезпечується точне фіксування початку відліку об'єму мірної ємкості. Кінець відліку об'єму мірної ємкості також забезпечується точно завдяки порівняно вузькій горловині 2 та екрану 7.

Абсолютна похибка вимірювання об'єму ΔV визначається залежністю

$$\Delta V = \Delta h_1 S_{\text{ЦК}} + \Delta h_2 S_{\text{Г}}, \quad (2)$$

де Δh_1 , Δh_2 – відповідно висота хвилі в циліндричній камері і горловині при заповненні мірної ємкості;

$S_{\text{ЦК}}$, $S_{\text{Г}}$ – відповідно площі поперечного перерізу циліндричної камери і горловини.



- 1 – резервуар;
- 2 – горловина;
- 3 - електроізоляційна кришка;
- 4 – електрод нижнього рівня;
- 5 – електрод верхнього рівня;
- 6 – отвір для встановлення системи стабілізації витрати води;
- 7 – екран;
- 8 – циліндрична камера

Рисунок 1 – Мірна ємкість

Дослідження показали, що при заповненні мірної ємкості водою з системи автоматичної стабілізації витрати створюється хвильовий процес. Середня висота хвилі в основному складає 10 мм і практично однакова у циліндричній камері та горловині, тобто, $\Delta h_1 = \Delta h_2 = \Delta h$. З врахуванням цього залежність (2) прийме вигляд

$$\Delta V = \Delta h (S_{цк} + S_T). \quad (3)$$

Замикання ланцюга електрод-вода-резервуар відбувається випадково. Тобто, електрод може з'єднатись з вершиною гребня хвилі, впадиною або в іншій точці хвилі. Імовірність замикання електрода з будь-якою точкою хвилі однакова. Тому дисперсія абсолютного відхилення рівня води в циліндричній камері, яка характеризує похибку, буде дорівнювати 5 мм. Абсолютна похибка в об'ємі складе $0,009438 \text{ м}^3$. Відносна помилка визначення об'єму в циліндричній камері або горловині складе 11,74 %, а загальна – 0,189 %.

Час заповнення можна визначати у відповідності з частотою змінного струму в електричній мережі, яка дорівнює 50 Гц і підтримується достатньо точно. Максимальна похибка буде характеризуватись одним неврахованим імпульсом в залежності від фази замикання контакту водою і фазою початку хвилі напруги в електричній мережі. Ця похибка буде дорівнювати

$$\Delta t_{e1} = \frac{0,02 \cdot Q_{II}}{V_{MC}} \cdot 100\% = 2 \cdot \frac{Q_{II}}{V_{MC}}, \% \quad (4)$$

де 0,02 – тривалість одного періоду коливань в електричній мережі, с;
 Q_{II} – витрата, яку забезпечує система автоматичної стабілізації, $\text{м}^3/\text{с}$.

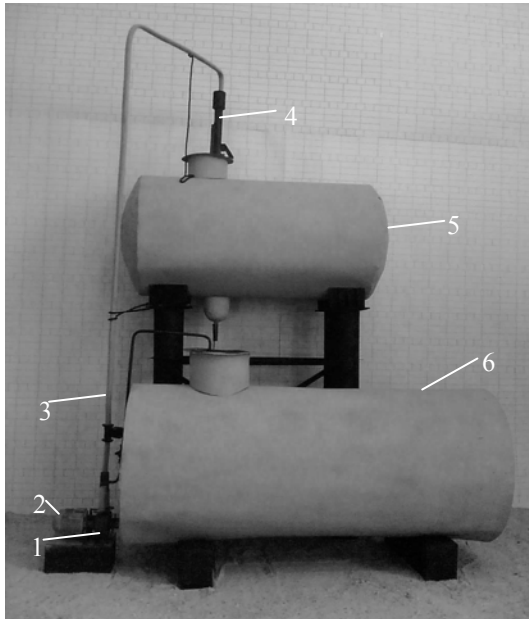
З врахуванням похибки в часі, що виникає в циліндричній камері і горловині, відносну похибку визначення часу заповнення мірної ємкості можна подати у вигляді

$$\Delta t_{e3} = \frac{4 \cdot Q_{II}}{V_{MC}}, \% \quad (5)$$

Відхилення в часі Δt також є випадковою величиною і будуть характеризуватись дисперсією, яка визначає похибку вимірювання часу заповнення мірної ємкості. Для даного випадку Δt складає 0,02 с, а максимальна абсолютна помилка $t_{e3} = 0,04$ с. Дисперсія буде дорівнювати $\sigma_t = 0,0133$ с, а абсолютна помилка визначення часу при довірчій імовірності у $\pm 3\sigma_t$ дорівнює 0,324 %.

На похибку визначення витрати води, що забезпечується системою автоматичної стабілізації, може впливати також її температура. При певній температурі навколишнього середовища мірна ємкість, виготовлена зі сталі, прийме певний об'єм. Конкретний об'єм при цій же температурі буде мати і вода об'ємом V_{MC} при базовому рівні температури + 20°C. Порівняння цих об'ємів при різних значеннях температури показує, що різниця зовсім невелика. Невідповідність об'єму води і об'єму мірної ємкості складає лише 0,05 %, що дозволяє знехтувати впливом цього фактору.

Як видно, похибки визначення об'єму введеної води у мірну ємкість та часу її заповнення достатньо малі і ними можна в першому наближенні знехтувати,



1 – насос; 2 – електродвигун; 3 – магістральний трубопровід; 4 – система автоматичної стабілізації витрати води; 5 – мірна ємкість; 6 – резервуар

Рисунок 2 – Стенд для проведення експериментів

визначаючи розрахункову витрату води за формулою $Q = V_{BO} / t_3$ з достатньо високим наближенням. Більш точне визначення витрати води системою автоматичної стабілізації можна здійснити за залежністю

$$\sigma_{II} = \sqrt{\sigma_e^2 - \sigma_m^2}, \quad (6)$$

де σ_{II} , σ_e , σ_m – відповідно середні квадратичні відхилення системи автоматичної стабілізації витрати, експерименту та методу.

Середнє квадратичне відхилення σ_{II} характеризує безпосередньо похибку системи автоматичної стабілізації витрати води. Середнє квадратичне відхилення σ_e визначається з експерименту, де розраховану витрату води визначають за формулою $Q = V_{BO} / t_3$, вважаючи, що t_3 і V_{BO} – час заповнення і кількість введеної рідини визначають без похибки. Середнє квадратичне відхилення σ_m характеризує помилку визначення V_{BO} і t_3 .

Для проведення дослідів було виготовлено стенд (рис. 2), базовим елементом якого є мірна ємкість (рис. 1), і панель автоматики (рис. 3). Стенд (рис. 2) вміщує два насосних агрегати типу К-50-32-125-С, які мають насос 1 і електродвигун 2. Кожний агрегат забезпечує продуктивність 12,5 м³/год і підйом води на висоту 20 м. Разом два агрегати забезпечують продуктивність 25 м³/год, яка дещо більша витрати води, що забезпечується системою автоматичної стабілізації 4. Вода насосами 1 подається по магістральному трубопроводу 3 в систему автоматичної стабілізації витрати, а далі – в мірну ємкість 5. Після експерименту вода зливається в резервуар 6. Об'єм мірної ємкості складає 5 м³, а резервуара – 7 м³. Автоматизація процесів вимірювання у стенді забезпечується панеллю автоматики (рис. 3). Тут же розташовані засоби керування стендом.

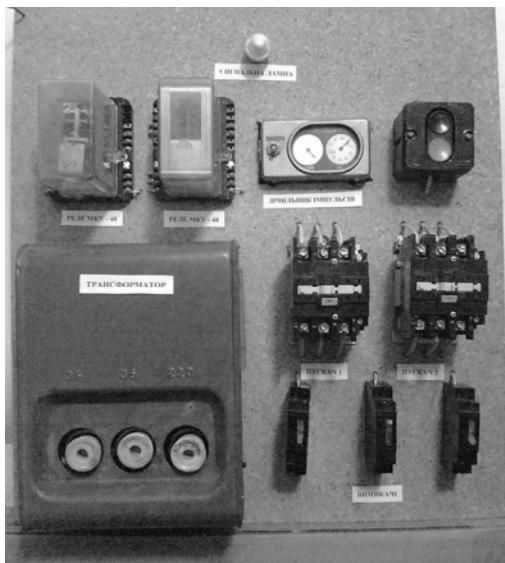


Рисунок 3 – Панель автоматики

Стенд готовий до роботи при закритому зливному вентилі мірної ємкості. Про включенні насосів 1 (рис. 2) за допомогою панелі автоматики (рис. 3) з резервуара 6 по магістральному трубопроводу 3 вода подається в систему автоматичної стабілізації витрати води 4, заповнює її і витікає в мірну ємкість 5. За цей початковий час встановлюється нормальний режим руху рідини в системі автоматичної стабілізації витрати 4. Після підходу рівня води до електрода нижнього рівня 7 (рис. 1) замикається електричне коло вимірювання часу і починається заповнення вимірюваного об'єму рідини, який дорівнює 5 м³. Коли в мірну

ємкість надійде 5 м³ води замкнеться електрод 5 (рис. 1) верхнього рівня, фіксуючи як введений об'єм рідини, так і час заповнення. Це також є сигналом для відключення насосів за допомогою панелі автоматики і видалення води з мірної ємкості в резервуар відкриванням зливного вентиля. Стенд після стікання рідини і закриття зливного вентиля готовий до проведення наступного експерименту.

Засоби, якими обладнано стенд, дозволяють фіксувати тиск води в магістралі і її температуру. Для зміни тиску води в магістралі в дослідах її частина могла направлятися, не поступаючи в систему автоматичної стабілізації витрати, в резервуар. Для цього передбачено лінію відведення води з вентиляем. Температура води змінювалася в залежності від умов навколишнього середовища, що забезпечувалося достатньо довгою тривалістю випробувань і вибором пори року – з 12.04.2005 р. по кінець липня 2005 р.

Стенд працює в напівавтоматичному режимі роботи. Панель автоматики (рис. 3) реалізує електричну схему (рис. 4). В якості лічильника імпульсів використано пристрій СБ-1М/100, реле Р1 і Р2 – МКУ-48, електромагнітних пускачів – ПМЛ-4 1000×4В. В стенді встановлені агрегати з трифазними електродвигунами типу АИР 80В 2ЖУ2, які здійснюють 2850 об/хв. і їх вали прямо з'єднані з валами відцентрових насосів.

Перед початком роботи вмикають на панелі автоматики автоматичні вимикачі, які подають живлення на трансформатор, випрямляч живлення реле, ланцюг керування приводами насосів. Цю операцію виконують після подачі напруги на панель автоматики, про що свідчить загоряння сигнальної лампочки. Після цього натискають

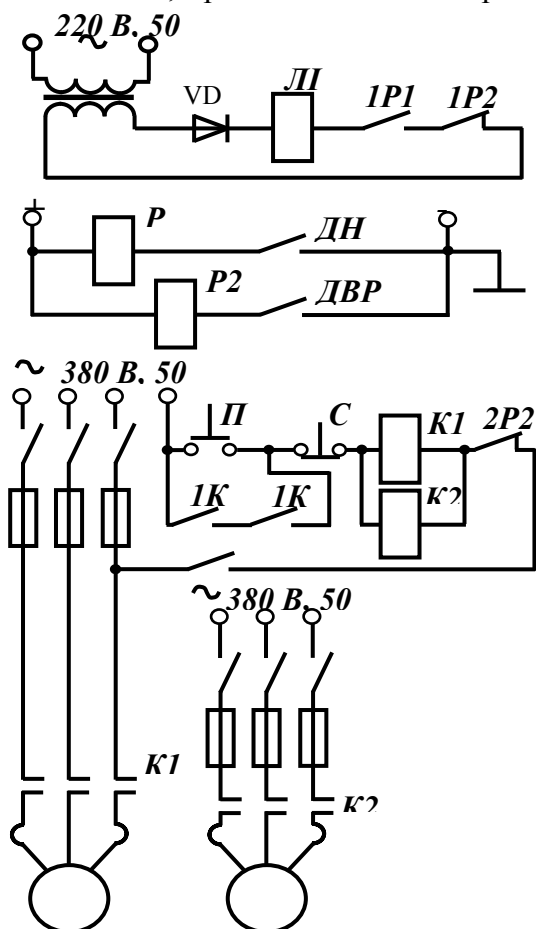


Рисунок 4 – Електрична схема автоматизації процесів у стенді для випробування системи стабілізації витрати води у кульовий млин

кнопку “Пуск” на кнопочній станції (рис. 3). Електромагнітні пускачі К1 і К2 (рис. 4) спрацьовують і стають на самоблокування, замикаючи контакти 1К1 і 1К2. В такому режимі насоси можуть працювати як завгодно довго. Аварійну чи планову зупинку можна здійснити натисканням кнопки “Стоп”.

При проведенні експерименту закривають зливний вентиль, попередньо встановивши необхідний тиск води в магістралі. В нормальному режимі роботи електродвигунів і насосів вода починає заповнювати мірну ємкість. При замиканні з електродом нижнього рівня ДНР спрацьовує реле Р1, вмикаючи лічильник імпульсів ЛІ контактом 1Р1, який замикається (рис. 4). Лічильник імпульсів визначає час заповнення мірної ємкості водою. При замиканні з електродом верхнього рівня ДВР спрацьовує реле Р2, яке відмикає лічильник імпульсів контактом 1Р2 і зупиняє насоси контактом 2Р2. На табло лічильника по положенню стрілок можна відрахувати кількість імпульсів. Час спрацювання реле Р1 і Р2 вибрано однаковим, що гарантує не внесення похибок у визначення часу заповнення мірної ємкості. При відкриванні зливного вентиля вода протікає в резервуар, електрод верхнього рівня

вивільняється від рідини, реле P2 знеструмлюється, контакти 1P2 і 2P2 повертаються у замкнутий стан, а схема – у вихідне положення. Вона готова до нового експерименту після закінчення витікання води і закривання зливного вентиля.

В експериментах об'єм мірної ємкості V_{MC} не змінювався і дорівнював 5 м^3 , час заповнення визначався по числу імпульсів n_i , а витрата системи автоматичної стабілізації визначалася за формулою

$$Q_{II} = 18 \cdot 10^4 \frac{V_{MC}}{n_i}, \text{ м}^3/\text{год.} \quad (7)$$

Похибка визначення Q_{II} виникає в наслідок зміни умов дозування системою автоматичної стабілізації витрати рідини та коливань зафіксованих об'ємів V_{BO} води в окремих експериментах, які не точно відповідають об'єму мірної ємкості. Певний вплив здійснюють і неточності фіксування часу заповнення мірної ємкості.

В процесі дослідження було проведено 120 експериментів при різних значеннях тиску води в магістралі та її температури. Температура навколишнього середовища і рідини змінювалася від 5°C до 45°C , тиск рідини – від 0,34 до 0,45 МПа. Дані експериментів заносилися в робочий журнал.

В процесі обробки експериментальних даних методами математичної статистики отримано рівняння регресії

$$Q_P = -2 \times 10^{-11} Q_{II} + 24,3, \quad (8)$$

де Q_P – розрахункова (проектна) витрата води системою автоматичної стабілізації, $\text{м}^3/\text{год}$;

Q_{II} – витрата води, яка мала місце в експерименті, $\text{м}^3/\text{год}$.

Коефіцієнт кореляції по витратам склав $r_B = 1,82 \times 10^{-14}$. Його мале значення викликано тим, що вимірювання здійснювалися лише при одному значенні витрати води і не охоплювали певний достатньо широкий діапазон її зміни. Встановлено, що на систему автоматичної стабілізації витрати води практично не впливають температура та тиск рідини в діапазоні їх зміни.

Методом дисперсійного аналізу оцінювалися точнісні показники системи автоматичної стабілізації витрати води. Середнє квадратичне відхилення витрати води за результатами експериментів дорівнює $\sigma_Q = 0,0678557 \text{ м}^3/\text{год}$. Оцінимо похибку помилки визначення витрати води $\sigma_{\sigma_Q} = 0,0043984 \text{ м}^3/\text{год}$. Встановимо довірчий інтервал помилки

визначення витрати води з імовірністю 0,995 ($t = 2,85$). При цьому маємо $\sigma_Q \pm t \frac{\sigma_{\sigma_Q}}{\sqrt{120}}$,

візьмемо його праве значення $+\sigma_Q = 0,069 \text{ м}^3/\text{год}$. За законом Гауса потроєному значенню середньої квадратичної похибки відповідає довірна імовірність 0,9973. В даному випадку $3\sigma_Q = 0,207 \text{ м}^3/\text{год}$, а відносна похибка автоматичної стабілізації витрати води склала $\pm 0,85 \%$, що відповідає умовам роботи в системі автоматичного регулювання співвідношення руда/вода в кульовому млині.

Таким чином, в процесі стендових досліджень системи автоматичної стабілізації витрати води встановлено, що на точність дозування рідини практично не впливають температура і тиск в межах їх експлуатаційних коливань. Відносна похибка автоматичної стабілізації витрати води склала $\pm 0,85 \%$, що значно менше допустимого рівня $\pm 1,0 \%$.

На підставі проведених досліджень створюється можливість розробки системи автоматичного регулювання співвідношення руда/вода на вході кульового млина, яка буде відповідати вимогам технологічного процесу.

Список літератури

1. Андреев С.Е., Зверевич В.В., Перов В.А. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. Изд. 2-е, испр. и доп. – М.: Недра, 1966. – 396 с.
2. Бонч-Бруевич А.М., Быков В.Л., Чинаев П.И. Бесконтактные элементы самонастраивающихся систем. – М.: Машиностроение, 1967. – 292 с.
3. А. с. 977022 СССР, МКИ В 02 С 25/00. Способ автоматического регулирования плотности пульпы в мельнице рудного самоизмельчения /Е.Е. Андреев, О.Н. Савинов (СССР); Всесоюзный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский и проектный институт механической обработки полезных ископаемых “Механообр”. – № 3300480/29-33; Заявлено 05.06.81; Опубл. 30.11.82, Бюл. № 44.
4. А. с. 1688920 СССР, МКИ В 02 С 25/00. Способ управления плотностью пульпы в потоке на сливе барабана мельницы /В.И. Дмитриев, Д.А. Клименко и А.Л. Яровицын (СССР); Днепропетровский горный институт им. Артема и Лебединский горно-обогатительный комбинат. – № 4728489/33; Заявлено 14.08.89; Опубл. 07.11.91, Бюл. № 41.
5. А. с. 1563757 СССР, МКИ В 02 С 25/00. Способ регулирования соотношения расходов потоков твердой и жидкой фаз в загрузке мельницы /Г.Г. Кононенко, В.В. Дядюра, В.Г. Дейнега, Ю.М. Кайгородцев (СССР); Криворожское отделение Украинского государственного проектного и проектно-конструкторского института “Металлургавтоматика”. – № 4459214/23-33; Заявлено 21.06.88; Опубл. 15.05.90, Бюл. № 18.
6. Пат. 59644 Україна, МКВ 7 В 03 б 11/00, В 02 с 25/00. Спосіб автоматичної стабілізації розрідження пульпи в млинах з циркулюючим навантаженням /В.О. Кондратець, О.М. Сербул (Україна); Кіровоградський національний технічний університет. – № 2002118758; Заявл. 15.11.2002; Опубл. 15.04.2005, Бюл. № 4.
7. Пат. 62627 Україна, МКВ 7 G 05 D 7/01, В 03 б 11/00. Спосіб автоматичної стабілізації витрат рідини /В.О. Кондратець, О.М. Сербул (Україна); Кіровоградський національний технічний університет. – № 2003043482; Заявл. 17.04.2003; Опубл. 15.07.2005, Бюл. № 7.
8. Пат. 74393 Україна, МКВ 7 G 05 D 9/02, G 05 D 7/01. Пристрій автоматичної стабілізації витрат рідини /В.О. Кондратець, О.М. Сербул (Україна); Кіровоградський національний технічний університет. – № 2003043879; Заявлено: 25.04.2003; Опубл. 15.12.2005, Бюл. № 12.
9. Сербул О.М., Кондратець В.О. Теоретичне дослідження гідравлічного перетворювача потоку рідини як регульованого об'єкта системи стабілізації витрат //Збірник наукових праць Кіровоградського державного технічного університету (техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація). – Вип. 12. – Кіровоград: КДТУ, 2003. – С. 325-330.
10. Кондратець В.О., Сербул О.М. Теоретичні дослідження статичної інваріантності САР рівня рідини в гідравлічному перетворювачі //Збірник наукових праць Кіровоградського державного технічного університету (техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація). – Вип. 13. – Кіровоград: КДТУ, 2003. – С. 251-257.

В статье приведены методика и результаты стендовых исследований системы автоматической стабилизации расхода воды в песковый желоб классификатора. Установлено, что в диапазоне эксплуатационных изменений давление и температура воды практически не влияют на точность системы. Относительная погрешность дозирования составила $\pm 0,85\%$.

In article are brought methods and results of the stand studies of the system of automatic stabilization of the consumption of water in sand chute of the classifier. It is installed that within the range of working change the pressure and the temperature of water practically do not influence upon accuracy of the system. Relative inaccuracy of measure has formed $\pm 0,85\%$.