

**В.О. Кондратець, д.т.н., проф.  
А.М. Мацуй, к.т.н., доц.**

*Кіровоградський національний технічний університет*

### **ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОГНОЗУВАННЯ РОЗРІДЖЕННЯ ПУЛЬПИ У КУЛЬОВИХ МЛИНАХ ПРИ ЗМІННІЙ ВИТРАТІ ВОДИ В ПІСКИ КЛАСИФІКАТОРА**

*Зменшити собівартість залізорудного концентрату можливо стабілізацією в кульовому млині співвідношення руда/вода, знаходженню якого присвячена дана робота. Використовувались алгоритмічний підхід визначення регульованої величини, методи динамічного програмування та Гауса-Зайделя, метод аналітичних розрахунків з використанням математичної моделі процесу, теорія точності, теорія фільтрації сигналів, теорія чутливості оптимуму, моделювання процесів у пісковому жолобі односпірального класифікатора при оцінюванні режимів подачі води в піски. Прогнозування співвідношення руда/вода при незмінній витраті води в піски класифікатора оптимізацією вибору інформаційних засобів за точністю виконано на рівні допустимої похибки  $\pm 3,0$  % зі значним запасом в умовах великої похибки вимірювання витрати пульпи, воно покращує показники кульового млина, однак має виявлені недоліки. Набагато кращі результати забезпечує режим стабілізації розрідження пульпи у пісковому жолобі. Прогнозування показника за цих умов вдалося забезпечити на рівні похибки  $\pm 3,0$ % у разі підвищення точності конвеєрних вагів. Тут вперше доведена можливість створення пристроїв прогнозування співвідношення руда/вода у кульовому млині при стабілізації розрідження пульпи у пісковому жолобі реалізацією алгоритмічного підходу і оптимізацією вибору вимірювальних засобів за точністю. Практична значущість результатів полягає у підвищенні продуктивності кульового млина і неперевитрачання електроенергії, сталевих куль і футеровки.*

**Ключові слова:** кульовий млин; співвідношення руда/вода; оптимізація; точність; вимірювальні засоби; вибір.

#### **Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок з важливими практичними завданнями.**

Магнетитовий концентрат – продукт збагачення бідних залізних руд є сировинною основою чорної металургії України, однак відрізняється підвищеною собівартістю порівняно з зарубіжною продукцією в наслідок значних перевитрат електричної енергії, куль і футеровки при подрібненні руди у кульових млинах з наступним розділенням продукту в механічних односпіральних класифікаторах. Як вказано в роботі [1, с. 5], одним з найбільш важливих напрямів зменшення цих витрат є автоматизація даних технологічних процесів. На важливість реалізації даного напрямку досліджень вказується і в роботі [2, с. 275] та інших наукових працях. Оптимальну продуктивність подрібнювального агрегату, при якій забезпечується максимальний вихід готового продукту, можливо отримати лише при певному завантаженні кульового млина і певному співвідношенні руда/вода [3, с. 266]. Не дивлячись на те, що ці задачі поставлені достатньо давно, вони на задовільному рівні нині не розв'язані і галузь несе величезні збитки. Це не відповідає положенням Державної науково-технічної програми «Ресурсозберігаючі технології нового покоління в гірничо-металургійному комплексі» та наступних Державних документах, які приймалися після неї. На реалізацію поставлених урядових задач також спрямовані плани наукової тематики Кіровоградського національного технічного університету за темами «Комп'ютеризована система ідентифікації завантаження кульового млина при управлінні подрібненням руди» (державний реєстраційний номер (0109U7939), «Автоматизація процесів керування розділенням твердого по крупності у механічних спіральних класифікаторах» (0115U003602), «Оптимізація продуктивності кульових млинів по руді і готовому продукту при мінімальних енергетичних і матеріальних перевитратах» (0115U003942), «Моделювання технологічних процесів у механічних спіральних класифікаторах з метою вдосконалення математичних моделей» (0115U003962). Оскільки дана публікація спрямована на розв'язання частини згаданих задач, її тему слід рахувати актуальною.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Автоматизацією процесів подрібнення вихідної руди в перших стадіях займаються достатньо давно як вітчизняні [4, 5, 6], так і вчені з близького [7–10] та далекого зарубіжжя [11, 12], однак ряд важливих задач залишився ще не розв'язаним, що спричиняє повернення до цих проблем ряду відомих вчених і в наш час. Наприклад, робастне автоматизоване управління замкнутим циклом подрібнення на основі  $H_{\infty}$ -норми розглянуто в роботі [13], а в умовах невизначеності характеристик об'єкта пропонується застосовувати адаптивне керування процесом подрібнення залізорудної сировини [14]. У роботах [15, 16] розглянуто керування в умовах усієї збагачувальної технології. При цьому особливо акцентується увага на відсутності надійних засобів контролю необхідної точності або на значній їх вартості [15, с. 13], а також на необхідності розробки

інформаційних засобів [1, с.173]. Слід підкреслити, що засобів контролю співвідношення руда/вода ніколи не існувало. Високоєфективними є сучасні ультразвукові засоби контролю [17, 18], однак для вимірювання даного технологічного параметра вони не придатні. Все ширше починають застосовуватись алгоритмічні або віртуальні методи визначення параметрів [19], у тому числі і у збагачувальних технологіях [20, с. 180]. Цьому сприяють порівняно прості принципи і техніка вимірювань при їх реалізації [21, с. 212]. Як стверджується у роботі [22, с. 374], задачі адаптації систем вимірювання найбільш ефективно можуть бути розв'язаними за рахунок алгоритмічних і програмних засобів, без звернення до апаратного забезпечення. Алгоритмічний підхід прогнозування співвідношення руда/вода на вході кульового млина, що працює у замкненому циклі з односпіральним класифікатором, розглянуто в роботі [23], однак можливі режими роботи технологічної схеми і технічних засобів ніхто не досліджував і не знаходив найкращі шляхи розв'язання задачі.

**Постановка завдання.** Метою даної публікації є дослідження і вибір найбільш характерного режиму роботи технологічного вузла подрібнення-класифікації вихідної руди на збагачувальній фабриці та оптимізація в ньому засобу прогнозування розрідження пульпи на вході кульового млина, що працює в замкненому циклі з односпіральним класифікатором.

**Викладення основного матеріалу.** Дослідження спрямовані на автоматизацію розрідження пульпи у кульовому млині, що працює у замкненому циклі з односпіральним класифікатором (рис.1). У кульовий млин одночасно надходять вихідна руда витратою  $Q_{PM}$ , вода витратою  $Q_{BM}$  та розріджені піски витратою  $Q_{VP}$ , які створюються з густих пісків односпірального класифікатора, що розвантажуються у пісковий жолоб, та доданої у нього води витратою  $Q_{VBG}$ . Ці три складові у кульовому млині створюють певне співвідношення руда/вода. Лише конкретне його значення забезпечує найкращу роботу технологічного агрегату і найкращий вихід у злив готового продукту, який містить задану кількість розкритих зерен магнетиту. Односпіральний класифікатор розділяє розвантаження кульового млина на цей готовий продукт і більш крупний – піски, які повертаються на вхід млина і створюють циркулююче навантаження.

Для автоматичного підтримання на заданому рівні співвідношення руда/вода або тверде/рідке необхідно насамперед визначити його фактичне значення, що можливо здійснити відповідно запропонованому алгоритму [23]

$$K_{P/B} = \frac{A(Q_{VP} - Q_{VBG}) + Q_{PM}}{Q_{BM} + Q_{BGM} + K_n[A(Q_{VP} - Q_{VBG})]}, \quad (1)$$

де  $A = \delta_P / (1 + K_n \delta_P / \delta_B)$ ;  $\delta_P$ ,  $\delta_B$  – відповідно густини руди і води;  $K_n$  – коефіцієнт, що визначає вміст вологи в пісках класифікатора;  $Q_{PM}$ ,  $Q_{BM}$ ,  $Q_{BGM}$  – відповідно масові витрати руди в млин, води в млин, води в пісковий жолоб класифікатора;  $Q_{VP}$ ,  $Q_{VBG}$  – відповідно об'ємні витрати пульпи в пісковому жолобі та води в пісковий жолоб класифікатора.

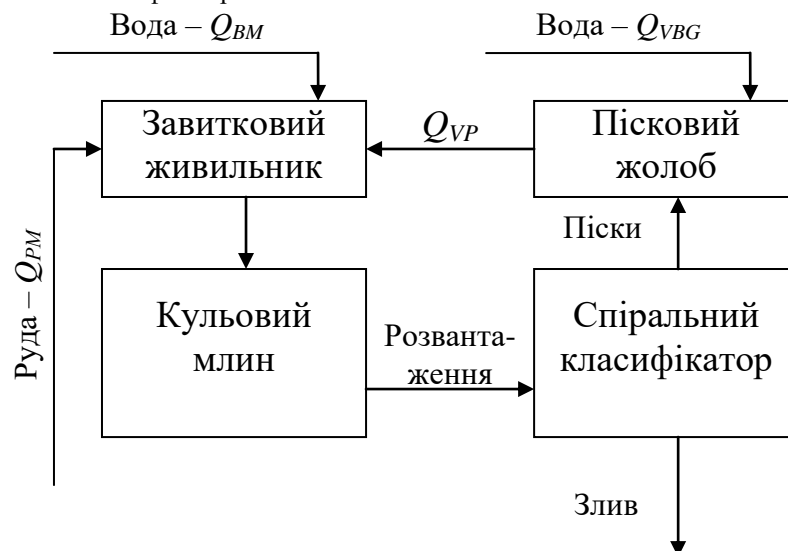


Рис. 1. Технологічна схема типового вузла подрібнення-класифікації руди

Даний спосіб автоматичної стабілізації розрідження пульпи в млинах з циркулюючим навантаженням захищено патентом на винахід [24]. Спосіб розроблявся стосовно типового вузла подрібнення-класифікації, який використовують у промисловості. В ньому вода у пісковий жолоб подається при умові  $Q_{VBG} = const$ , інколи дану витрату дещо змінює оператор. Призначення цієї води зводиться до гарантованого транспортування пісків. Дослідженнями встановлена можливість подачі незмінної витрати води у пісковий жолоб класифікатора за будь-яких технологічних умов [25].

Отриманий алгоритм (1) володіє властивістю компенсації абсолютного значення похибки вимірювання об'ємної витрати пульпи у пісковому жолобі класифікатора, води у пісковий жолоб і зміни  $A$  під впливом параметрів  $\delta_P$  і  $K_n$ , що сприяє підвищенню точності визначення результуючого параметра  $K_{P/V}$  – співвідношення руда/вода. Більш конкретну інформацію можливо отримати в процесі визначення цих похибок. В процесі моделювання їх впливу на  $K_{P/V}$  [26] встановлено, що при прогнозуванні співвідношення руда/вода в кульовому млині всі параметри вносять певний вплив. Без спеціальних заходів результуюча похибка прогнозування  $K_{P/V}$  може бути достатньо високою. Зменшити її можливо шляхом підвищення точності вимірювання певних параметрів. Особливо високу точність бажано забезпечити при вимірюванні витрати води в млин, витрати руди в млин, об'ємної витрати пульпи у пісковому жолобі класифікатора. Суттєвий вплив здійснює і похибка вимірювання витрати води в пісковий жолоб. Ситуація ускладнюється ще й тим, що на вологовміст пісків класифікатора вплинути не можливо, а витрату пульпи існуючими засобами точно виміряти також не має можливості. Досягти бажаного результату прогнозування співвідношення руда/вода в кульовому млині можливо лише конкретним аналізом впливу кожного з перерахованих факторів.

Найкращі результати прогнозування можливо отримати в процесі оптимізації при одночасному врахуванні впливу на співвідношення руда/вода усіх факторів. При цьому допустиму похибку прогнозування  $K_{P/V}$  можливо забезпечити за рахунок високої точності вимірювання одних параметрів і більш низької точності контролю інших. Виходячи з того, що при певному типі руди, що переробляється, її густина  $\delta_P$  відома, при незмінних умовах її класифікації вологовміст пісків також буде постійним, ці технологічні параметри не будуть вносити похибки. Враховуючи, що  $Q_{VBG} = const$ , спеціально розроблялися засоби стабілізації витрати рідини в технологічний процес. На спосіб автоматичної стабілізації витрати рідини [27] і пристрій автоматичної стабілізації витрати рідини [28], який забезпечує дозування з похибкою не більше  $\pm 1,0\%$ , отримані патенти на винахід. Це полегшує розв'язання задачі оптимізації прогнозування  $K_{P/V}$ . Удосконалювалися також пристрої вимірювання об'ємної витрати пульпи у пісковому жолобі односпірального класифікатора. Результати цих досліджень викладено в роботах [29, 30]. Ці пристрої дозволяють вимірювати об'ємну витрату пульпи у пісковому жолобі односпірального класифікатора з похибкою, що знаходиться в межах  $\pm(3...4)\%$ . Конвеєрні ваги забезпечують похибку вимірювання масової витрати руди на рівні  $\pm 1,0\%$  [1, с.173]. З такою ж похибкою можливо виміряти і витрату води в кульовий млин, наприклад, магніто-індуктивним витратоміром 8045. Якщо витратомір пульпи в пісковому жолобі класифікатора буде мати похибку  $\pm 3,0\%$ , то сума частинних критеріїв за трьома параметрами у відносному поданні складає  $1,9\%$ . Тобто, прогнозувати  $K_{P/V}$  відповідно алгоритму (1) запропонованими засобами можливо з похибкою, що не перевищує  $\pm 1,9\%$ . Це значно менше допустимої відносної похибки в технологічних процесах збагачення  $\pm 3,0\%$  [7, с. 78]. На такий пристрій автоматичної стабілізації розрідження пульпи в млинах з циркулюючим навантаженням отримано патент на корисну модель [31]. Отже, з достатнім запасом прогнозовано співвідношення руда/вода в кульовому млині, що подрібнює вихідну руду з пісками класифікатора. Реалізація керування розрідженням пульпи в автоматичному режимі забезпечує покращення показників роботи технологічного вузла подрібнення-класифікації, який працює в умовах роботи збагачувальної фабрики.

Оскільки конкретна руда з певною середньою крупністю шматків найкраще подрібнюється лише при налагодженні параметрів кульового млина саме на цей вид сировини, все частіше почали звертати увагу на таку організацію технологічних процесів. При цьому забезпечується сама висока продуктивність по готовому класу крупності і найменші перевитрачання електроенергії, сталевих куль і футеровки. Крім того, тут забезпечується умова  $\delta_P = const$ , що сприяє покращенню умов прогнозування  $K_{P/V}$ . Таким же фактором стали результати дослідження вологовмісту пісків односпіральних класифікаторів, якими підтверджено, що вміст вологи в пісках в певному родовищі є незмінною величиною [32, с. 171]. Порівняно зменшений очікуваного результат автоматичного підтримання на необхідному рівні співвідношення руда/вода в кульовому млині сприяв розвитку наукових досліджень у цьому напрямі. Зокрема, встановлено, що на початковій ділянці барабана кульового млина протяжністю  $25...35\%$  його довжини матеріал – вихідна руда, піски, вода погано перемішані, що негативно впливає як на продуктивність, так і перевитрату електроенергії, куль і футеровки. Запропонований спосіб автоматичної стабілізації розрідження пульпи в млинах з циркулюючим навантаженням практично повністю ліквідує вказані вади [33]. Він передбачає розрідження пісків до гранично можливого значення.

Граничне значення співвідношення руда/вода в пісковому жолобі на вході в приймальний пристрій завиткового живильника дорівнює

$$K_{(P/V)\phi} = Q_{PP} / Q_{VPG} , \quad (2)$$

де  $Q_{PP}$ ,  $Q_{VPG}$  – відповідно масові витрати твердого і води на вході в завитковий живильник.

За цих умов об'ємна витрата пульпи складе:

$$Q_{VP} = \frac{Q_{PP}}{\delta_P} + \frac{K_n \cdot Q_{PP}}{\delta_B} + Q_{VBG} , \quad (3)$$

звідки

$$Q_{PP} = (Q_{VP} - Q_{VVG}) / \left( \frac{1}{\delta_p} + \frac{K_n}{\delta_B} \right). \quad (4)$$

Масова витрата води на вході в приймальний пристрій завиткового живильника з врахуванням доданої води  $Q_{BD}$  буде дорівнювати

$$Q_{BPM} = K_n Q_{PP} + Q_{VVG} \cdot \delta_B + Q_{BD} \cdot \delta_p. \quad (5)$$

За цих же умов залежність (2) прийме вигляд

$$K_{(P/B)\phi} = \frac{Q_{VP} - Q_{VVG}}{\left( \frac{1}{\delta_p} + \frac{K_n}{\delta_B} \right) (K_n Q_{PP} + Q_{VVG} \cdot \delta_B + Q_{BD} \cdot \delta_p)} \quad (6)$$

Підставимо в (6)  $Q_{PP}$  з (4), в наслідок чого отримаємо

$$K_{(P/B)\phi} = \frac{(Q_{VP} - Q_{VVG})}{\left[ K_n (Q_{VP} - Q_{VVG}) + Q_{VVG} \left( \frac{\delta_B}{\delta_p} + K_n \right) + Q_{BD} \left( \frac{\delta_B}{\delta_p} + K_n \right) \right]}, \quad (7)$$

звідки після перетворення знайдемо витрату додаткової води на вході приймального пристрою завиткового живильника

$$Q_{BD} = \frac{(Q_{VP} - Q_{VVG})}{\left( \frac{\delta_B}{\delta_p} + K_n \right)} \left[ \frac{1}{K_{(P/B)\phi}} - K_n \right] - Q_{VVG}. \quad (8)$$

Залежність (8) дозволяє визначити витрати додаткової води, яку необхідно подати на вхід завиткового живильника для отримання необхідного розрідження пульпи і створення сприятливих умов для перемішування матеріалів на вході кульового млина. Зрозуміло, що ця витрата води знаходиться в загальному балансі для створення необхідного розрідження пульпи у кульовому млині, але подається не безпосередньо на його вхід, а через завитковий живильник.

Моделюванням формування пісового потоку у пісовому жолобі механічного односпіралного класифікатора встановлено, що піски розвантажуються нерівномірно, маючи мінімум продуктивності, який може доходити до нуля, і її максимум, що перевищує у два рази середнє значення [34, с. 54]. Це приводить до того, що при  $Q_{VVG} = const$  створюються вздовж пісового жолоба зони з нерівномірним розрідженням пульпи. При відсутності пісків на таких ділянках практично знаходиться вода, а у місцях максимумів – пульпа з занадто великою густиною. Подача води на вході завиткового живильника не змінює структури пісового потоку. Практично не змінює її і завитковий живильник. Такий пісовий потік, який за обсягом значно більший рудного потоку, створює нерівномірність у барабані кульового млина. При цьому кулі наносять удари майже по воді, руйнуючись і руйнуючи футеровку, а також по згущеним ділянкам, де даремно втрачається їх енергія і подрібнювання здійснюється неефективно. Поправити ситуацію можливо подачею усїєї витрати води у пісовий жолоб безпосередньо в зону розвантаження пісків. Однак при цьому необхідно здійснювати автоматичне регулювання витрати води у відповідності з розвантаженням пісків. Це ускладнює прогнозування співвідношення руда/вода на вході кульового млина, оскільки вимірювання витрати води  $Q_{BD} + Q_{VVG}$  буде здійснюватись тепер з більшою похибкою звичайними засобами. Додаткова похибка буде вноситься і системою автоматичного регулювання витрати води. У зв'язку з цим задачу оптимізації вибору вимірювальних засобів при прогнозуванні співвідношення руда/вода необхідно розглянути заново, більш детально, щоб не вийти за межі допустимої похибки визначення технологічного параметра.

Спочатку розглянемо вплив похибок визначення параметрів у алгоритмі (1) на точність прогнозування співвідношення руда/вода. При цьому прийmemo наступні технологічні параметри:  $Q_{PM} = 240$  т/год,  $K_n = 0,12$ ,  $\delta_p = 3,3$  кг/дм<sup>3</sup>,  $\delta_B = 1,0$  кг/дм<sup>3</sup>,  $Q_{VVG} = 24,3$  м<sup>3</sup>/год,  $Q_{BGM} = 24,3$  т/год, циркулююче навантаження 125%,  $Q_{BM} = 65,28$  т/год. Введемо поняття базового значення  $K_{(P/B)B}$ , яке визначається при значеннях параметрів без похибок. У даному випадку воно дорівнює  $K_{(P/B)B} = 4,3$ . Якщо будь-який з шести параметрів (1) не буде відповідати базовому значенню, співвідношення руда/вода буде прогнозовано з похибкою. При комп'ютерному моделюванні даного процесу отримані залежності відносно похибки прогнозування співвідношення руда/вода за алгоритмом (1) від відносно похибки визначення одного з параметрів для випадку, коли останні відповідають базовому значенню (рис. 2). З залежностей, які подані на рисунку 2, видно, що алгоритм (1) володіє властивістю компенсації за всіма змінними параметрами, однак степінь компенсації за кожним з них різна.

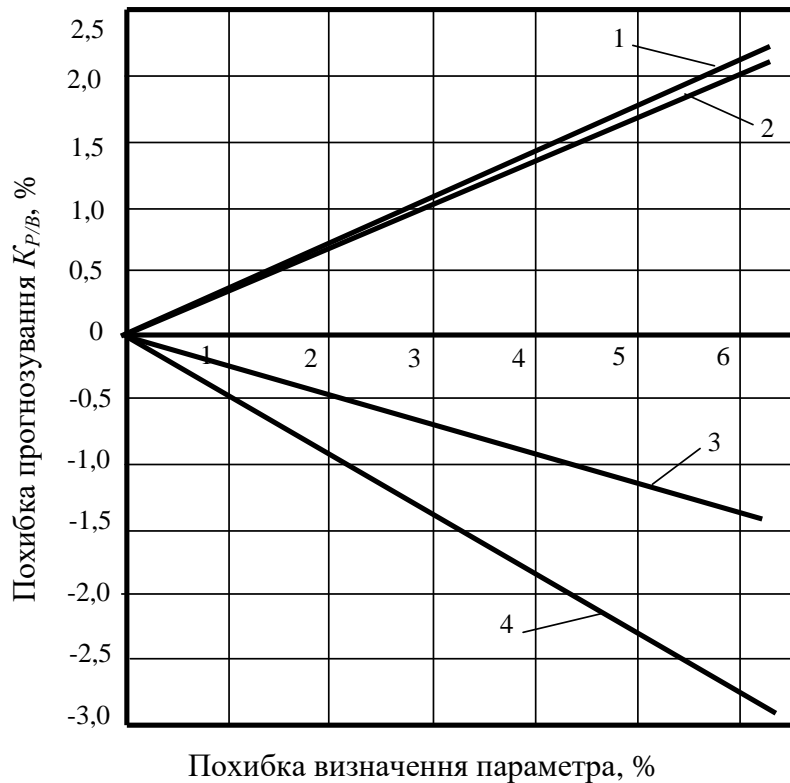


Рис.2. Залежність відносної похибки прогнозування співвідношення руда/вода в кульовому млині від похибки визначення одного з параметрів:  
1 –  $Q_{PM}$ ; 2 –  $Q_{VP}$ ; 3 –  $Q_{VBG}$ ; 4 –  $Q_{BM}$

Найбільший вплив на похибку прогнозування  $K_{P/B}$  здійснює неточність вимірювання витрати води в млин, найменший – витрати води в пісковий жолоб класифікатора. При певному напрямі відхилення похибки вимірювання параметрів два фактори в результат прогнозування  $K_{P/B}$  вносять від'ємну похибку і два – додатну. Всі ці фактори попарно вносять практично однаковий вплив на прогнозування  $K_{P/B}$ , оскільки будь-яке вимірювання здійснюється з певною похибкою і різниця у відносних похибках звичайно незначна. Враховуючи, що знаки впливів попарно протилежні, це в певній мірі забезпечує компенсацію неточностей вимірювальних засобів. Найкращі результати прогнозування  $K_{P/B}$  в кульовому млині, можливо отримати на основі оптимізації вибору вимірювальних засобів за їх допустимою похибкою.

Задача оптимізації є актуальною тому, що існують проблеми з точністю вимірювання усіх чотирьох відмічених параметрів, особливо об'ємної витрати пульпи в пісковому жолобі класифікатора і води в нього. Метою оптимізації в даній задачі є забезпечення необхідної точності прогнозування співвідношення руда/вода на вході кульового млина при обмежених ресурсах точності засобів вимірювання технологічних параметрів. При цьому допустиму похибку прогнозування  $K_{P/B}$  можливо забезпечити за рахунок високої точності вимірювання одних параметрів і більш низької точності контролю інших. Дана задача відноситься до статичної оптимізації.

Об'єктом оптимізації тут виступає процес прогнозування співвідношення руда/вода в кульовому млині. Об'єкт оптимізації передбачає виокремлення чотирьох груп параметрів – вхідних, керуючих, збурюючих і вихідних (рис. 3). До вхідних параметрів у даному процесі необхідно віднести витрату руди та води в кульовий млин, витрату пульпи у пісковому жолобі та води в нього. Керуючі параметри, як відомо, це ті, на які можливо здійснювати прямий вплив у відповідності з тими чи іншими вимогами, що дозволяє керувати процесом. За змістом даної задачі до керуючих параметрів слід віднести похибки вимірювання витрати руди та води в кульовий млин, витрати пульпи у пісковому жолобі класифікатора та витрату води у пісковий жолоб. Збурюючі параметри змінюють свої значення в часі випадковим чином. Вони звичайно не доступні для вимірювання. За змістом у даній задачі збурюючими параметрами могли б виступати густина руди і вміст вологи в пісках класифікатора, однак вони тут є практично незмінними. У даному випадку замість вихідних параметрів доцільніше використовувати термін «параметр стану», оскільки саме ця величина характеризує стан матеріалу у кульовому млині. Таким параметром є співвідношення руда/вода в кульовому млині. Як видно, даний процес оптимізації містить чотири змінних –  $\Delta Q_{PM}$ ,  $\Delta Q_{BM}$ ,  $\Delta Q_{VP}$  і  $\Delta Q_{VBG}$ . Математичною моделлю даного об'єкта оптимізації є

залежність (1). Обмеження на вхідні величини тут задаються у вигляді нерівностей:  $Q_{PMmin} \leq Q_{PM} \leq Q_{PMmax}$ ;  $Q_{BMmin} \leq Q_{BM} \leq Q_{BMmax}$ ;  $Q_{VPmin} \leq Q_{VP} \leq Q_{VPmax}$ ;  $Q_{VBGmin} \leq Q_{VBG} \leq Q_{VBGmax}$ .

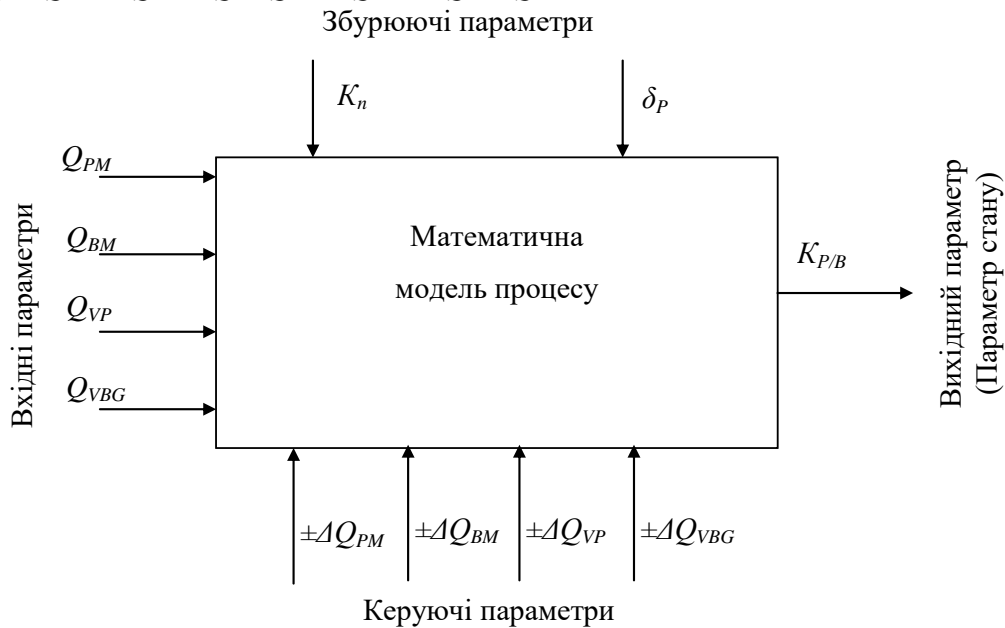


Рис.3. Прогнозування розрідження пульси у кульовому млині при змінній витраті води в піски класифікатора як об'єкт оптимізації

Для розв'язання задачі необхідно визначитись з критерієм оптимальності. В якості критерію оптимальності може бути висунута вимога забезпечення відносної похибки прогнозування співвідношення руда/вода в кульовому млині, що дорівнює деякому максимально допустимому значенню. В процесах збагачення таку величину приймають на рівні  $\pm 3,0\%$  [7, с. 78]. Тому критерій оптимальності в даній задачі встановимо  $J = \delta_{K_{P/B}}, \% \leq 3,0\%$ .

Виходячи з розглянутого та враховуючи число змінних, вид математичної моделі та вид обмежень, приходимо до висновку, що для розв'язання даної задачі оптимізації підходить метод динамічного програмування.

Метод динамічного програмування є ефективним засобом розв'язання задач оптимізації дискретних багатостадійних процесів, для яких загальний критерій оптимальності описується адитивною функцією критеріїв оптимальності окремих стадій. Тут виокремлюємо чотири стадії оптимізації, розуміючи під стадією один з вимірвальних засобів, тобто його вибір.

Задачу оптимізації багатостадійного процесу можливо сформулювати як задачу пошуку оптимальної стратегії, для якої критерій оптимальності  $J$  приймає максимальне або мінімальне значення. У даній задачі критерій оптимальності може зростати, але не перевищувати  $|3,0\%$  заданого нормативного значення співвідношення руда/вода. В основу методу динамічного програмування покладено принцип оптимальності, суть якого можливо звести до наступного. Оптимальна стратегія володіє тією властивістю, що яким би не був початковий стан багатостадійного процесу і керуючий вплив на першій стадії, наступні керування на усіх стадіях повинні складати оптимальну стратегію відносно стану першої стадії, який визначається початковим станом процесу і керуванням на першій стадії. Процедура застосування принципу оптимальності для оптимізації багатостадійного процесу, звичайно, повинна починатися з останньої стадії, для якої не існує наступних стадій, які можуть впливати на вибір керування на стадії, що розглядається. У багатьох практичних задачах, як і в даній, така послідовність не обов'язкова.

Метод динамічного програмування фактично являє собою алгоритм визначення оптимальної стратегії керування на усіх стадіях процесу. Закон керування на кожній стадії звичайно знаходять шляхом розв'язання частинних задач оптимізації послідовно для усіх стадій процесу за допомогою інших методів дослідження. В переважній більшості практичних задач кінцевий розв'язок отримують лише в чисельній формі. Результати розв'язання звичайно зводять в таблиці. Скористаємося методом Гауса-Зайделя. У цьому методі по чергово змінюють усі незалежні змінні так, щоб на кожній з них досягалося найбільше (найменше) значення критерію оптимальності. Черговість варіювання незалежних змінних при цьому можливо встановлювати довільно.

Динамічне програмування використовують для оптимізації математично описаних процесів. У даному випадку це буде залежність (1), де величини  $Q_{PM}$ ,  $Q_{BM}$ ,  $Q_{VP}$  і  $Q_{VBG}$  вимірюються певними засобами

з похибками і ці засоби необхідно вибрати так, щоб результуючий критерій  $J = \delta_{K_{P/B}}$ ,  $\% \leq |3,0\%|$ . Результуючий критерій оптимальності буде дорівнювати сумі критеріїв оптимальності, отриманих у кожній стадії. На підставі (1) можливо записати вираз для критерію оптимальності однієї з стадій, наприклад для  $Q_{PM}$

$$K_{(P/B)\delta} = \frac{A_{\delta}(Q_{VP} - Q_{VBG}) + (Q_{PM} \pm \Delta Q_{PM})}{Q_{BM} + Q_{BGM} + K_n [A_{\delta}(Q_{VP} - Q_{VBG})]}, \quad (9)$$

де  $K_{(P/B)\delta}$  – співвідношення руда/вода визначене з абсолютною похибкою;  $J_i = (K_{(P/B)V} \pm K_{(P/B)\delta i})$  – критерій оптимальності в  $i$ -й стадії;  $\Delta Q_{PM}$  – абсолютна похибка вимірювання масової витрати руди.

Аналогічно можливо знайти критерії оптимальності для інших стадій. Величина критерію оптимальності буде залежати лише від стану входу першої стадії. У даній задачі вхід першої стадії відповідає нульовому значенню критерію оптимальності.

У даній задачі в процесі оптимізації необхідно вибрати вимірювальні засоби так, щоб  $J \leq |3,0\%|$ . Оцінки будемо визначати відповідно залежності (1) в абсолютних значеннях похибок в кожній стадії оптимізації. Їх значення зведено в таблиці 1. Сумарне абсолютне значення похибки переведемо у відносну похибку, враховуючи  $K_{(P/B)V} = 4,3$ .

Таблиця 1

*Абсолютні похибки прогнозування співвідношення руда/вода в кульовому млині при вимірюванні варійованих параметрів з різними похибками*

Варійований параметр	Відносні похибки вимірювання варійованих параметрів, %				
	1	2	3	4	5
Витрата руди в млин	<b>0,01580</b>	0,03159	0,04730	0,06321	0,07912
Витрата води в млин	0,02069	<b>0,04110</b>	0,06106	0,08084	0,10105
Витрата пульпи в пісковий жолоб	-	0,03038	<b>0,04515</b>	0,06020	0,07482
Витрата води в пісковий жолоб	-	0,02100	<b>0,03200</b>	0,04200	0,05300

Оптимізацію тут можливо розпочати з будь-якої величини. В першій стадії розглянемо вибір засобу вимірювання витрати руди в млин. В таблиці 1 при прийнятих значеннях параметрів в залежності (1) приведені абсолютні похибки, що виникають при прогнозуванні  $K_{P/B}$  під дією вимірювання технологічних параметрів з певною відсною похибкою. З даних табл.1 витікає, що абсолютна похибка прогнозування  $K_{P/B}$  при збільшенні відносної похибки вимірювання витрати руди зростає. Найкращі результати будуть при найменшій похибці вимірювання. Конвеєрні ваги можуть забезпечити похибку вимірювання витрати руди на рівні одного відсотку [1, с. 173]. Тому відхилення фактичного значення  $K_{(P/B)\phi}$  від базового  $K_{(P/B)V}$  складе 0,01580, тобто  $J_{abc} = 0,01580$  у першій стадії оптимізації. Оптимізацію у другій стадії здійсимо відносно вимірювання витрати води в кульовий млин. Оскільки для модернізованих індукційних витратомірів останніх зразків підтверджують відносну похибку  $\pm 2,0\%$ , то критерій оптимальності у другій стадії оптимізації складе  $J_{abc} = 0,04110$  (табл. 1). Третя стадія оптимізації зв'язана з вибором витратоміра пульпи у пісковому жолобі класифікатора. Такий витратомір є самим неточним пристроєм. Нехай він забезпечить відносну похибку вимірювання об'ємної витрати пульпи на рівні  $\pm 3,0\%$ . У зв'язку з цим на даній стадії оптимізації абсолютна похибка прогнозування  $K_{P/B}$  збільшиться на саму більшу величину. Критерій оптимальності тут буде  $J_{abc} = 0,04515$  (табл.1). Четверта стадія оптимізації зв'язана з вибором засобу вимірювання витрати води в пісковий жолоб односпірального класифікатора. Тут також буде порівняно велика відносна похибка, оскільки характеристики витратоміра будуть ще погіршуватись системою автоматичного регулювання витрат води. При відносній похибці витратоміра води  $\pm 2,0\%$  її можливо прийняти збільшеною на 1%, тобто  $\pm 3,0\%$ . Тоді критерій оптимальності в четвертій стадії оптимізації відповідно табл.1 складе  $J_{abc} = 0,03200$ .

Графічна інтерпретація оптимізації вибору вимірювальних засобів при прогнозуванні співвідношення руда/вода на вході кульового млина показана на рис.4. З нього видно, що перед оптимізацією похибка відсутня і абсолютне значення критерію оптимальності дорівнює нулю. Потім похибка від стадії до стадії зростає і в четвертій стадії оптимізації критерій приймає найбільше значення, яке дорівнює 0,13405. Оскільки результуючий критерій оптимальності дорівнює сумі абсолютних значень частинних критеріїв то  $J_{abc,рез} = 0,13405$ , а його відносне значення складає  $J_{відн} = 3,12\%$ , що дещо перевищує допустимі 3,0%. Критерій оптимальності  $J_{відн}$  можливо дещо зменшити і наблизити до 3,0% підвищенням точності вимірювання масової витрати руди у кульовий млин. Цього можливо досягти подвійною фільтрацією сигналу погонного навантаження руди на конвеєрній стрічці, застосувавши спочатку фільтр Калмана-Б'юсі, а потім цифрову фільтрацію з знаходженням середнього значення сигналу [35].

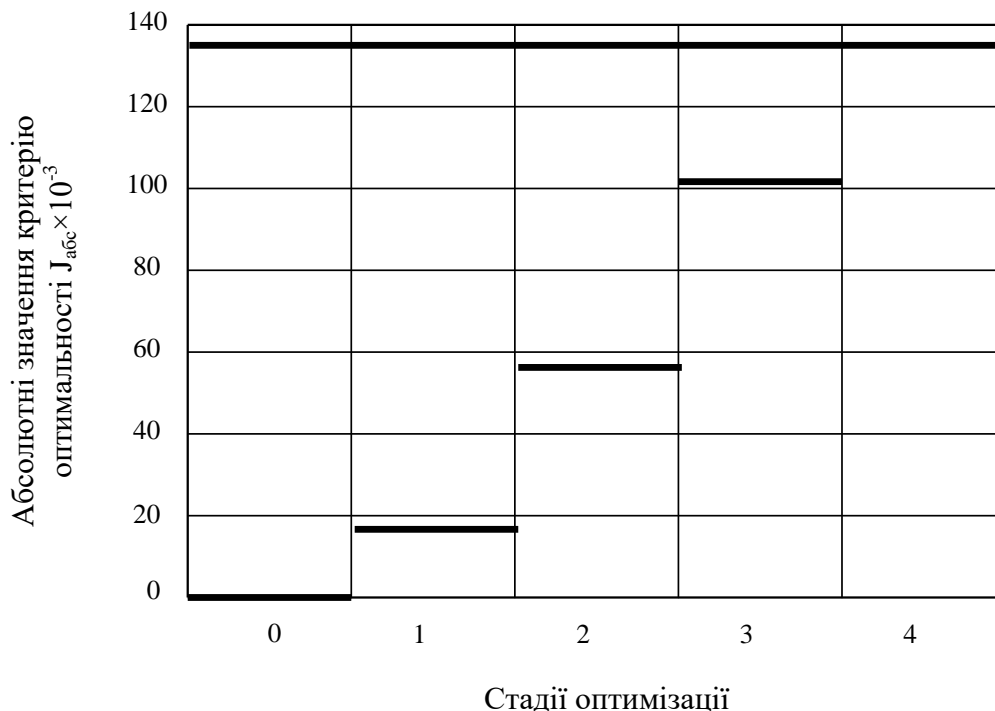


Рис. 4. Оптимізація вибору вимірювальних засобів при прогнозуванні співвідношення руда/вода на вході кульового млина, що подрібнює вихідну руду з пісками класифікатора

Раніше ніж перейти до практичної реалізації оптимального режиму оцінимо чутливість оптимального розв'язку до зміни параметрів. Під чутливістю оптимуму перш за все розуміють величину відносної зміни критерію оптимальності при відхиленні керуючих діянь від оптимальних значень. Однак в поняття чутливості оптимуму звичайно відносять не лише залежність критерію оптимальності від керуючих діянь, але також і від останніх параметрів математичної моделі, для яких в процесі моделювання необхідно задавати чисельні значення. До таких параметрів відносять вхідні та збурюючі впливи процесу оптимізації. Як було показано, згадані параметри змінюються неістотно і похибкою, що зв'язана з цим, можливо знехтувати. Дослідження показали, що відбувається компенсація зміни вмісту вологи в пісках класифікатора. Розрахунки, проведені на персональному комп'ютері, показали, що при зміні вмісту вологи в пісках класифікатора від 10 до 14 % похибка визначення  $K_{P/B}$  не виникає. Ефект стабілізації забезпечується і відносно густини руди  $\delta_r$ . Розрахунки, виконані на персональному комп'ютері для різних режимів роботи, показують, що в межах максимально можливих змін густини бідних залізних руд від 3100 до 3500  $\text{кг/м}^3$  співвідношення руда/вода не змінюється.

Вплив на  $K_{P/B}$  керуючих параметрів – вимірюваних величин більш суттєвий. Це стосується похибок вимірювання витрати руди і води в кульовий млин  $\pm \Delta Q_{PM}$ ,  $\pm \Delta Q_{BM}$ , об'ємної витрати пульпи у пісковому жолобі класифікатора  $\pm \Delta Q_{VP}$  і витрати води у пісковий жолоб  $\pm \Delta Q_{VBG}$ . Цей вплив на  $K_{P/B}$  видно з даних таблиці 1. Чутливість оптимуму до зміни керуючих параметрів тут достатньо висока і точність вимірювальних засобів, які використовуються, необхідно надійно забезпечувати. В той же час прогнозування  $K_{P/B}$  здійснюється доступними засобами, які не є прецизійними і мають доступну вартість.

Вимірювальні засоби працюють в динамічних умовах. Оскільки вимірювальні величини незалежні і мають випадковий характер зміни, то  $K_{P/B}$ , яке визначається за окремими фіксованими значеннями  $Q_{PM}$ ,  $Q_{BM}$ ,  $Q_{VP}$  і  $Q_{VBG}$ , буде також випадковим процесом, що формується під впливом похибок вимірювання параметрів. Це потребує фільтрування даного сигналу. В процесі визначення фактичного значення  $K_{P/B}$  виконується достатньо багато вимірювань параметрів з похибками. Додатні похибки з'являються так же часто, як і від'ємні похибки, що дорівнюють їм за абсолютною величиною. В наслідок цього при достатньо великій кількості вимірювань в ряді випадкових похибок можливо очікувати рівномірну появу похибок, які однакові або близькі за абсолютною величиною і різні за знаком. Тоді можливо стверджувати, що позитивні і негативні похибки будуть компенсуватися, значно покращуючи результат прогнозування.

Інформаційні засоби звичайно характеризуються середньою квадратичною похибкою. Така похибка буде притаманна і засобу прогнозування співвідношення руда/вода, яка визначається за його конкретними значеннями. При цьому абсолютна похибка  $\pm 0,13405$  буде найбільшою, в умовах компенсації вона буде зменшуватись в деяких випадках теоретично до нуля. Це дозволяє стверджувати, що даний алгоритм гарантовано може забезпечити допустиму відносну похибку  $\pm 3,0$  % прогнозування співвідношення руда/вода в кульових млинах при вимірюванні об'ємної витрати пульпи у пісковому



жолобі класифікатора і води у пісковий жолоб з порівняно низькою точністю. Оптимізація процесу в інших технологічних умовах роботи вузла подрібнення-класифікації дає близькі результати. Їх можливо закріпити розробкою більш точного підходу вимірювання об'ємної витрати пульпи у пісковому жолобі односпірального класифікатора та автоматичного регулятора подачі води у пісковий жолоб.

**Висновки та перспективи подальших розвідок.** Отже, при незмінній витраті води у пісковий жолоб односпірального класифікатора погіршуються умови подрібнення руди в кульовому млині в наслідок створення зон з нерівномірним розрідженням пульпи. Ліквідувати цей недолік можливо переходом на стабілізацію не витрати води, а розрідження пульпи у пісковому жолобі односпірального класифікатора. Однак при цьому погіршується точність прогнозування співвідношення руда/вода у кульовому млині в наслідок відносно великої похибки дозування води у пісковий жолоб односпірального класифікатора. Забезпечити достатню точність прогнозування співвідношення руда/вода у кульовому млині можливо зменшенням похибки вимірювання витрати руди конвесрними вагами застосуванням подвійної фільтрації сигналу погонного навантаження спочатку фільтром Калмана-Б'юсі, а потім цифровим фільтром з пошуком середнього значення. Результати оптимізації можливо закріпити розробкою більш точного підходу вимірювання об'ємної витрати пульпи у пісковому жолобі односпірального класифікатора та якісної системи керування подачею води у пісковий жолоб.

Проведені дослідження відкривають перспективу розробки засобу прогнозування розрідження пульпи у кульових млинах при змінній витраті води в піски класифікатора з оптимізацією точності вибором вимірювальних пристроїв, автоматизованої системи керування стабілізацією розрідження пульпи у пісковому жолобі односпірального класифікатора з покращеними характеристиками та підходу більш ефективного і точного вимірювання об'ємної витрати пульпи у пісковому жолобі класифікатора.

#### Список використаної літератури:

1. Измельчение. Энергетика и технология / Пивняк Г.Г., Вайсберг Л.А., Кириченко В.И. и др. – М. : Изд. дом «Руда и Металлы», 2007. – 296 с.
2. Азарян А.А. Автоматизация первой стадии измельчения, классификации и магнитной сепарации – реальный путь повышения эффективности обогащения железных руд / А.А. Азарян, Ю.Ю. Кривенко, В.Г. Кучер // Вісник Криворізького національного університету. – 2014. – Вип. 36. – С. 276–280.
3. Бонч-Бруевич А.М. Бесконтактные элементы самонастраивающихся систем / А.М. Бонч-Бруевич, В.Л. Быков, П.И. Чинаев. – М. : Машиностроение, 1967. – 292 с.
4. Марюта А.Н. Автоматическая оптимизация процесса обогащения руд на магнитообогатительных фабриках / А.Н. Марюта. – М. : Недра, 1987. – 230 с.
5. Процунто В.С. Автоматизированные системы управления технологическими процессами обогатительных фабрик / В.С. Процунто. – М. : Недра, 1987. – 253 с.
6. Автоматический контроль и регулирование технологических процессов на железорудных обогатительных фабриках / Ю.Г. Гончаров, А.С. Давидкович, Б.Е. Гейзенблазен, Г.В. Гуленко. – М. : Недра, 1968. – 227 с.
7. Нестеров Г.С. Управление технологическими процессами на обогатительных фабриках / Г.С. Нестеров, Н.А. Нестерова, А.И. Батанов. – М. : Недра, 1966. – 220 с.
8. Трон А.Е. Автоматическое управление технологическими процессами обогатительных фабрик / А.Е. Трон, В.З. Козин, Е.В. Прокофьев. – М. : Недра, 1987. – 303 с.
9. Гринман И.Г. Автоматизация процессов обогащения руд цветных металлов / И.Г. Гринман. – Алма-Ата : Изд. Акад. Наук Казахской ССР, 1964. – 212 с.
10. Автоматизация управления обогатительными фабриками / Б.Д. Кошарский, А.Я. Ситковский, А.В. Красномовец и др. – М. : Недра, 1977. – 525 с.
11. Herbst J.A. Model-based control of mineral processing operations / J.A. Herbst, W.T. Pate, A.E. Oblad // Powder Technology. – 1992. – Vol. 69. – Pp. 21–32.
12. Линч А.Дж. Циклы дробления и измельчения / А.Дж. Линч ; пер. с англ. – М. : Недра, 1981. – 342 с.
13. Моркун В.С. Формирование робастного автоматизированного управления замкнутым циклом измельчения на основе Н<sub>2</sub>-нормы / В.С. Моркун, Н.В. Моркун, В.В. Тронь // Гірничий вісник. – 2014. – Вип. 98. – С. 83–85.
14. Тронь В.В. Формування адаптивного керування процесом подрібнення залізорудної сировини в умовах невизначеності характеристик об'єкта / В.В. Тронь, К.В. Маєвський // Гірничий вісник. – 2015. – Вип. 99. – С. 27–32.
15. Купін А.І. Інтелектуальна ідентифікація та керування в умовах процесів збагачувальної технології / А.І. Купін. – Кривий Ріг : Вид-во КТУ, 2008. – 204 с.
16. Назаренко М.В. Прогнозуюче адаптивне керування стохастичною системою для забезпечення раціональних техніко-економічних показників на прикладі залізорудного гірничо-збагачувального комбінату / М.В. Назаренко. – Кривий Ріг : Діоніс (ФОП Чернявський Д.Д.). – 2010. – 309 с.
17. Моркун В.С. Ультразвуковые поверхностные волны Лэмба и Лява в измерительных системах / В.С. Моркун, О.В. Поркуня. – Кривой Рог : Изд. центр КТУ, 2006. – 261 с.
18. Ультразвуковой контроль характеристик измельченных материалов в АСУ ТП обогатительного производства / В.С. Моркун, В.Н. Потапов, Н.В. Моркун, Н.С. Подгородецкий. – Кривой Рог : Изд. центр КТУ, 2007. – 283 с.
19. Боднер В.А. Приборы первичной информации / В.А. Боднер. – М. : Машиностроение, 1981. – 344 с.

20. Разработка и применение автоматизированных систем управления процессами обогащения полезных ископаемых / В.В. Морозов, В.П. Топчаев, К.Я. Улитенко и др. – М. : Изд. дом «Руда и Металлы», 2013. – 512 с.
21. Шурков В.Н. Основы автоматизации производства и промышленные роботы / В.Н. Шурков. – М. : Машиностроение, 1989. – 240 с.
22. Алиев Т.М. Измерительная техника / Т.М. Алиев, А.А. Тер-Хачатуров. – М. : Высшая шк., 1991. – 384 с.
23. Кондратець В.О. Ідентифікація співвідношення руда/вода на вході кульового млина / В.О. Кондратець, О.М. Сербул // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація : зб. наук. праць КНТУ. – 2006. – № 17. – С. 265–272.
24. Пат. 59644 Україна, МКВ 7 В 03 В 11/00, В 02 С 25/00. Спосіб автоматичної стабілізації розрідження пульпи в млинах з циркулюючим навантаженням / Кондратець В.О., Сербул О.М. ; заявник і патентовласник Кіровоград. нац. техн. ун-т. – № 2002118758 ; заявл. 15.11.02 ; опубл. 15.04.05, Бюл. № 4.
25. 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. – 2013. – Вип. 26. – С. 173–180.
26. Кондратець В.А. Обеспечение идентификации соотношения руда/вода в мельницах с циркулирующей нагрузкой / В.А. Кондратець // Вестник ИрГТУ. – 2013. – № 11. – С. 95–102.
27. Пат. 62627 Україна, МПК G 05 D 7/01, В 03 В 11/00. Спосіб автоматичної стабілізації витрат рідини / Кондратець В.О., Сербул О.М. ; заявник і патентовласник Кіровоград. нац. техн. ун-т. – № 2003043482 ; заявл. 17.04.03 ; опубл. 15.07.05, Бюл. № 7.
28. 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 Кіровоград. нац. техн. ун-т. – № 2003043879 ; заявл. 25.04.03 ; опубл. 15.12.05, Бюл. № 12.
29. Кондратець В.О. Теоретичне дослідження сканування поверхні відкритих матеріальних потоків променями незмінної довжини / В.О. Кондратець // Вісник Криворізького національного університету. – 2013. – Вип. 35. – С. 174–178.
30. Кондратець В.О. Теоретичне дослідження активного і пасивного сканування поверхні відкритих матеріальних потоків / В.О. Кондратець, А.М. Мацуї // Гірничий вісник. – 2015. – Вип. 100. – С. 52–57.
31. Пат. 40465 Україна, МКВ 7 В 03 В 11/00, В 02 С 25/00. Пристрій автоматичної стабілізації розрідження пульпи в млинах з циркулюючим навантаженням / Кондратець В.О., Сербул О.М. ; заявник і патентовласник Кіровоград. нац. техн. ун-т. – № 200813006 ; заявл. 10.11.08 ; опубл. 10.04.09, Бюл. № 7.
32. Кондратець В.А. Исследование влагосодержания песков двухспиральных механических классификаторов в промышленных условиях / В.А. Кондратець // Вісник Криворізького національного університету. – 2014. – Вип. 36. – С. 168–172.
33. Пат. 90851 Україна, МКВ 7 В 03 В 11/00, В 02 С 25/00. Спосіб автоматичної стабілізації розрідження пульпи в млинах з циркулюючим навантаженням / Кондратець В.О. ; заявник і патентовласник Кіровоград. нац. техн. ун-т. – № 201400514 ; заявл. 20.01.14 ; опубл. 10.06.14, Бюл. № 11.
34. 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. – 2016. – Вип. 16 (1188). – С. 53–59.
35. Кондратець В.О. Вимірювання рудного завантаження млинів конвеєрними вагами з подвійною фільтрацією погонного навантаження / В.О. Кондратець // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – К. : Техніка, 2014. – № 13. – С. 62–69.

#### References:

1. Pivnjak, G.G., Vajsberg, L.A. and Kirichenko, V.I. (2007), *Izmel'chenie. Jenergetika i tehnologija*, Izd. dom «Ruda i Metally», Moskva, 296 p.
2. Azarjan, A.A., Krivenko, Ju.Ju. and Kucher, V.G. (2014), «Avtomatizacija pervoj stadii izmel'chenija, klassifikacii i magnitnoj separacii – real'nyj put' povyshenija jeffektivnosti obogashhenija zheleznyh rud», *Visnik Krivoriz'kogo nacional'nogo universitetu*, Vol. 36, pp. 276–280.
3. Bonch-Bruevich, A.M., Bykov, V.L. and Chinaev, P.I. (1967), *Beskontaknye jelementy samonastrajvajushhihsja system*, Mashinostroenie, Moskva, 292 p.
4. Marjuta, A.N. (1987), *Avtomaticheskaja optimizacija processa obogashhenija rud na magnitobogatitel'nyh fabrikah*, Nedra, Moskva, 230 p.
5. Procuto, V.S. (1987), *Avtomatizirovannye sistemy upravlenija tehnologicheskimi processami obogatitel'nyh fabric*, Nedra, Moskva, 253 p.
6. Goncharov, Ju.G., Davidkovich, A.S., Gejzenblazen, B.E. and Gulenko, G.V. (1968), *Avtomaticheskij kontrol' i regulirovanie tehnologicheskijh processov na zhelezorudnyh obogatitel'nyh fabrikah*, Nedra, Moskva, 227 p.
7. Nesterov, G.S., Nesterova, N.A. and Batanov, A.I. (1966), *Upravlenie tehnologicheskimi processami na obogatitel'nyh fabrikah*, Nedra, Moskva, 220 p.
8. Trop, A.E., Kozin, V.Z. and Prokof'ev, E.V. (1987), *Avtomaticheskoe upravlenie tehnologicheskimi processami obogatitel'nyh fabric*, Nedra, Moskva, 303 p.
9. Grinman, I.G. (1964), *Avtomatizacija processov obogashhenija rud cvetnyh metallov*, Izd. Akad. Nauk Kazahskoj SSR, Alma-Ata, 212 p.
10. Kosharskij, B.D., Sitkovskij, A.Ja. and Krasnomovec, A.V. (1977), *Avtomatizacija upravlenija obogatitel'nyimi fabrikami*, Nedra, Moskva, 525 p.
11. Herbst, J.A., Pate, W.T. and Oblad, A.E. (1992), «Model-based control of mineral processing operations», *Powder Technology*, Vol. 69. – pp. 21–32.

12. Linch, A.Dzh. (1981), *Cikly droblenija i izmel'chenija*, Translated from English, Nedra, Moskva, 342 p.
13. Morkun, V.S., Morkun, N.V. and Tron', V.V. (2014), «Formirovanie robstnogo avtomatizirovannogo upravlenija zamknutym ciklom izmel'chenija na osnove  $N_{\infty}$ -normy», *Girnichij visnik*, Vol. 98, pp. 83–85.
14. Tron', V.V. and Majevs'kyj, K.V. (2015), «Formuvannja adaptivnogo keruvannja procesom podribnennja zalizorudnoi' syrovyny v umovah nevyznachenosti harakterystyk ob'jekta», *Girnychij visnyk*, Vol. 99, pp. 27–32.
15. Kupin, A.I. (2008), *Intelektual'na identyfikacija ta keruvannja v umovah procesiv zbagachuval'noi' tehnologii'*, Vyd-vo KTU, Kryvyj Rig, 204 p.
16. Nazarenko, M.V. (2010), *Prognozujuche adaptivne keruvannja stohastychnoju systemoju dlja zabezpechennja racional'nyh tehniko-ekonomichnyh pokaznykiv na prykladi zalizorudnogo girnycho-zbagachuval'nogo kombinatu*, Dionis (FOP Chernjavs'kyj D.D.), Kryvyj Rig, 309 p.
17. Morkun, V.S. and Porkujan, O.V. (2006), *Ul'trazvukovyje poverhnostnye volny Ljemba i Ljava v izmeritel'nyh sistemah*, Izd. centr KTU, Krivoj Rog, 261 p.
18. Morkun, V.S., Potapov, V.N., Morkun, N.V. and Podgorodeckij, N.S. (2007), *Ul'trazvukovoj kontrol' harakteristik izmel'chennyh materialov v ASU TP obogatitel'nogo proizvodstva*, Izd. centr KTU, Krivoj Rog, 283 p.
19. Bodner, V.A. (1981), *Pribory pervichnoj informacii*, Mashinostroenie, Moskva, 344 p.
20. Morozov, V.V., Topchae, V.P. and Ulitenko, K.Ja. (2013), *Razrabotka i primenenie avtomatizirovannyh sistem upravlenija processami obogashhenija poleznyh iskopaemyh*, Izd. dom «Ruda i Metally», Moskva, 512 p.
21. Shurkov, V.N. (1989), *Osnovy avtomatizacii proizvodstva i promyshlennye roboty*, Mashinostroenie, Moskva, 240 p.
22. Aliev, T.M. and Ter-Hachaturov, A.A. (1991), *Izmeritel'naja tehnika*, Vysshaja shkola, Moskva, 384 p.
23. Kondratec', V.O. and Serbul, O.M. (2006), «Identifikacija spivvidnoshennja ruda/voda na vhodi kul'ovogo mlina», *Tehnika v sil's'kogospodars'komu virobniectvi, galuzeve mashinobuduvannja, avtomatizacija*, zb. nauk. prac', KNTU, No. 17, pp. 265–272.
24. Kondratec', V.O. and Serbul, O.M., Kirovograds'kij nacional'nij tehnicnij universitet (2005), *Sposib avtomatichnoi stabilizacii rozridzhennja pul'pi v mlinah z cirkuljujuchim navantazhennjam* [Method of automatic stabilization dilution in pulp mill circulating load], State Register of Patents of Ukraine, Kiiv, UA, Pat. N 59644.
25. Kondratec', V.O. and Serbul, O.M. (2013), «Teoretichne doslidzhennja rozridzhennja piskiv odnospiral'nogo klasifikatora dzherelom z nezminnoju vitratoju vodi», *Tehnika v sil's'kogospodars'komu virobniectvi, galuzeve mashinobuduvannja, avtomatizacija*, Vol. 26, pp. 173–180.
26. Kondratec', V.A. (2013), «Obespechenie identifikacii sootnoshenija ruda/voda v mel'nicah s cirkulirujushhej nagruzkoj», *Vestnik IrGTU*, No. 11, pp. 95–102.
27. Kondratec', V.O. and Serbul, O.M., Kirovograds'kij nacional'nij tehnicnij universitet (2005), *Sposib avtomatichnoi stabilizacii vytrat ridyny* [Method of automatic stabilization costs liquids], State Register of Patents of Ukraine, Kiiv, UA, Pat. N 62627.
28. Kondratec', V.O. and Serbul, O.M., Kirovograds'kij nacional'nij tehnicnij universitet (2005), *Prystrij avtomatichnoi stabilizacii vytrat ridyny* [The unit cost of liquid automatic stabilization], State Register of Patents of Ukraine, Kiiv, UA, Pat. N 74393.
29. Kondratec', V.O. (2013), «Teoretichne doslidzhennja skanuvannja poverhni vidkrytyh material'nyh potokiv promenjamy nezminnoi' dovzhyny», *Visnyk Kryvoriz'kogo nacional'nogo universitetu*, Vol. 35, pp. 174–178.
30. Kondratec', V.O. and Macuj, A.M. (2015), «Teoretichne doslidzhennja aktyvnogo i pasyvnoho skanuvannja poverhni vidkrytyh material'nyh potokiv», *Girnychij visnyk*, Vol. 100, pp. 52–57.
31. Kondratec', V.O. and Serbul, O.M., Kirovograds'kij nacional'nij tehnicnij universitet (2009), *Prystrij avtomatichnoi stabilizacii rozridzhennja pul'py v mlynah z cyrkuljujuchym navantazhennjam* [The device automatically stabilize dilution in pulp mill circulating load], State Register of Patents of Ukraine, Kiiv, UA, Pat. N 40465.
32. Kondratec', V.A. (2014), «Issledovanie vlagosoderzhanija peskov duhsipiral'nyh mehanicheskikh klassifikatorov v promyshlennyh uslovijah», *Visnik Krivoriz'kogo nacional'nogo universitetu*, Vol. 36, pp. 168–172.
33. Kondratec', V.O., Kirovograds'kij nacional'nij tehnicnij universitet (2014), *Sposib avtomatichnoi stabilizacii rozridzhennja pul'pi v mlinah z cirkuljujuchim navantazhennjam* [Method of automatic stabilization dilution in pulp mill circulating load], State Register of Patents of Ukraine, Kiiv, UA, Pat. N 90851.
34. Macuj, A.M. and Kondratec', V.O. (2016), «Modeljuvannja formuvannja piskovogo potoku u piskovomu zholobi mehanichnogo odnospiral'nogo klasifikatora», *Visnik Nacional'nogo tehnicnogo universitetu «HPI», Serija Matematichne modeljuvannja v tehnici ta tehnologijah*, Vol. 16 (1188), pp. 53–59.
35. Kondratec', V.O. (2014), «Vimirjuvannja rudnogo zavantazhennja mliniv konveernimi vagami z podvijnoju fil'tracieju signalu pogonnogo navantazhennja», *Elektrotehnicni ta komp'juterni sistemi*, Tehnika, Kiiv, No. 13, pp. 62–69.

КОНДРАТЕЦЬ Василь Олександрович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри автоматизації виробничих процесів Кіровоградського національного технічного університету.

Наукові інтереси:

– інформаційні технології, автоматика.

E-mail: kondratetsva@gmail.com.

МАЦУЙ Анатолій Миколайович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації виробничих процесів Кіровоградського національного технічного університету.

Наукові інтереси:

– інформаційні технології, автоматика.

E-mail: matsuyan@mail.ru.

Стаття надійшла до редакції 10.02.2017.