

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

МАЦУЙ АНАТОЛІЙ МИКОЛАЙОВИЧ



УДК 681.513.6:681.5.015:681.518.25

**МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ
ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО ІНВАРІАНТНОГО КЕРУВАННЯ
ПОДРІБНЕННЯМ-КЛАСИФІКАЦІЄЮ РУД
НА ОСНОВІ НЕПРЯМИХ ПРОГНОСТИЧНИХ ОЦІНОК
ХАРАКТЕРИСТИК СИРОВИНИ ТА ОБЛАДНАННЯ**

05.13.07 – автоматизація процесів керування

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Кривий Ріг – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі автоматизації виробничих процесів
Центральноукраїнського національного технічного університету
Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Кондратець Василь Олександрович,
Центральноукраїнський національний технічний
університет Міністерства освіти і науки України,
професор кафедри автоматизації виробничих процесів.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Купін Андрій Іванович,
Криворізький національний університет
Міністерства освіти і науки України,
завідувач кафедри комп'ютерних систем та мереж;

доктор технічних наук, професор
Мещеряков Леонід Іванович,
НТУ «Дніпровська політехніка»
Міністерства освіти і науки України,
професор кафедри програмного забезпечення
комп'ютерних систем;

доктор технічних наук, доцент
Цимбал Олександр Михайлович,
Харківський національний університет радіоелектроніки
Міністерства освіти і науки України,
професор кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій,
автоматизації та мехатроніки.

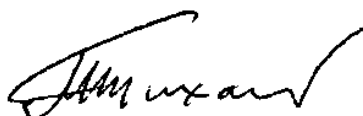
Захист відбудеться “15” грудня 2021 р. о 11⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 09.052.03 у Криворізькому національному університеті за адресою: 50027, м. Кривий Ріг, вул. В. Матусевича, 11, ауд.345.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Криворізького національного університету за адресою: 50002, м. Кривий Ріг, вул. Пушкіна, 37.

Автореферат розісланий

“11” листопада 2021 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради



М. П. Тиханський

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Україна виробляє значну частку продукції чорної металургії та сировини для неї – залізорудного концентрату, що складає переважну більшість доходів від експорту цієї продукції. Вища собівартість вітчизняної продукції порівняно з зарубіжними аналогами ставить Україну не в однакові умови на світовому ринку. Це викликано тим, що залізорудний концентрат, з якого нині виробляють більше половини металургійної продукції, відрізняється більш високою собівартістю внаслідок значних перевитрат електроенергії, матеріалів у вигляді куль і футеровки та отримання некондиційного продукту при подрібненні руди, особливо в перших стадіях рудопідготовки. Одним із шляхів покращення рудопідготовки є удосконалення автоматичного керування даним технологічним процесом (ТП), оскільки автоматизовані системи керування (АСК), що використовуються на вітчизняних рудозбагачувальних фабриках, багато в чому не відповідають сучасним вимогам. Водночас науковці і практики вказують на можливі шляхи покращення ситуації. Першочергово, це відноситься до удосконалення мольного середовища кульових млинів, переходу на прямі методи контролю об'ємного заповнення млинів рудою, використання таких важливих параметрів як в'язкість пульпи, швидкість переміщення пульпи вздовж барабана, розрідження пульпи в конкретних ситуаціях, енергоефективність руйнування руди тощо. Як показали перевірки на діючих підприємствах, через ризик перевантаження млинів і введення їх в аварійний режим оператори знижують продуктивність мінімум на 10...15%.

Сказане, насамперед, свідчить про те, що така ситуація загалом обумовлена недосконалістю існуючих методологічних підходів до вирішення проблеми, а також методів, моделей і засобів для автоматизованого керування процесом подрібнення руди кульовими млинами, що працюють у замкненому циклі з механічними односпіральними класифікаторами (МОК). Унаслідок цього погіршуються показники збагачення і в умовах збільшення собівартості залізорудних концентратів галузь несе величезні збитки. Тому переведення автоматизованого керування кульовим подрібненням руди на якісно вищий рівень шляхом реалізації прогресивних ідей організації керуючих систем на основі нових або вдосконалених математичних моделей і встановлених залежностей для даного обладнання, методів і систем інваріантного енергоефективного автоматизованого керування процесами в умовах залізорудних збагачувальних фабрик, підходів і засобів оцінювання основних технологічних параметрів є **актуальною науковою проблемою**.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана у Центральноукраїнському національному технічному університеті (ЦНТУ) і є складовою частиною держбюджетних науково-дослідних робіт: “Автоматизація процесів керування розділенням твердого по крупності у механічних спіральних класифікаторах” (номер державної реєстрації 0115U003602), “Оптимізація продуктивності кульових млинів по руді і готовому продукту при мінімальних енергетичних і матеріальних перевитратах” (номер державної реєстрації 0115U003942), “Моделювання технологічних процесів у механічних спіральних класифікаторах з метою вдосконалення математичних моделей” (номер державної реєстрації 0115U003962), “Комп'ютеризована система ідентифікації

завантаження кульового млина при управлінні подрібненням руди” (номер державної реєстрації 0109U007939).

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності функціонування ТП рудопідготовки шляхом застосування нової розробленої методології реалізації енергоефективного інваріантного керування подрібненням-класифікацією руд на основі непрямих прогностичних оцінок характеристик сировини та обладнання.

Сформульована мета роботи зумовила необхідність розв’язання таких *задач*:

- проаналізувати та дослідити сучасний стан методології реалізації енергоефективного інваріантного керування подрібненням-класифікацією руд на основі непрямих прогностичних оцінок характеристик сировини та обладнання;

- розробити методологію реалізації енергоефективного інваріантного керування подрібненням-класифікацією руд на основі непрямих прогностичних оцінок характеристик сировини та обладнання;

- з урахуванням запропонованої методології теоретично дослідити автоматизоване розділення твердого та його інформаційне забезпечення в МОК при енергоефективному інваріантному керуванні подрібненням руд на основі непрямих прогностичних оцінок характеристик сировини та обладнання;

- створити інформаційне забезпечення млина на розробленій методологічній базі при енергоефективному інваріантному керуванні подрібненням-класифікацією руд на основі непрямих прогностичних оцінок характеристик сировини та обладнання;

- виконати теоретичне дослідження і здійснити розробку систем енергоефективного інваріантного керування подрібненням-класифікацією руд на основі отриманої методології та непрямих прогностичних оцінок характеристик сировини та обладнання;

- провести експериментальні дослідження та здійснити практичну реалізацію енергоефективного інваріантного керування подрібненням-класифікацією руд на основі розробленої методології та непрямих прогностичних оцінок характеристик сировини та обладнання.

Об’єктом дослідження є процеси керування технологічними переділами кульового подрібнення залізної руди на рудозбагачувальних фабриках в замкнених циклах, що включають млин, МОК і завитковий живильник.

Предмет дослідження – комплекс автоматизованих систем для здійснення енергоефективного інваріантного керування подрібненням-класифікацією руд у складі АСК ТП першої стадії рудопідготовки на основі розробленої методології та непрямих прогностичних оцінок характеристик сировини і обладнання.

Ідея роботи полягає у методологічному визначенні базових показників подрібнення конкретного технологічного різнотипу руди найменшої середньозваженої крупності в кульовому млині з нормативними характеристиками на підставі апріорних даних родовища для створення систем керування з наступним оцінюванням цих характеристик для будь-якої крупності матеріалу з подальшою їх корекцією за ефективністю руйнування сировини та стану технологічного агрегату з паралельним автоматизованим керуванням стабілізацією оптимального кульового завантаження, розрідження пульпи у пісковому жолобі класифікатора та

розділенням продукту подрібнення на злив і піски з підвищеною ефективністю з використанням запропонованих моделей, методів і підходів на основі непрямих прогностичних оцінок характеристик сировини і обладнання.

Методи досліджень базуються на загальних положеннях наукового узагальнення і систематизації – для визначення сучасного стану автоматизації процесів керування подрібненням руди кульовими млинами; математичного програмування – для знаходження оптимальних рішень; математичного моделювання – для створення моделей технологічних процесів і агрегатів; метрології, похибок і чутливості – для розробки підходів прогнозування технологічних параметрів; статистичних досліджень – для встановлення закономірностей і залежностей між величинами; теорії радіотехніки – для розробки радіометоду передачі інформації з обертових частин об'єктів на нерухомі; статистичної динаміки систем керування, спектральної теорії сигналів, теорії фільтрування сигналів – для обґрунтування цифрових фільтрів випадкових сигналів; автоматичного керування – для розробки автоматизованих систем керування; інваріантних систем – для створення і удосконалення оптимального багаторозмірного кульового завантаження, автоматичної його стабілізації в процесі роботи; підвищення продуктивності кульового компенсацією початкових міцнісних властивостей молоткового середовища, впливом на неякісну його складову та при спрацюванні футеровки; для керування змочуванням сухих кусків руди, що подається на перероблення, визначення і забезпечення компенсації зміни середньозваженої крупності вихідного живлення млина автоматичним оцінюванням уставок на витрату руди і розрідження пульпи, компенсації впливу збурюючих факторів і перешкод на кінцевому етапі подрібнення руди; для стабілізації густини пульпи у пісковому жолобі класифікатора, покращення показників процесу розділення твердого при класифікації, компенсації впливу динаміки спіралі на результати класифікації, підвищення ефективності розділення твердого за встановленою крупністю; для підвищення точності ідентифікації середньозваженої крупності пісків класифікатора і розвантаження млина; для підвищення точності первинних перетворювачів енергоефективності подрібнення руди; слідкуючих систем автоматичного керування – для реалізації квазіінваріантного керування стабілізацією пульпи в пісковому жолобі класифікатора; адаптивних систем автоматичного керування – для реалізації завантаження млина рудою тощо. Статистична обробка результатів моделювання і експериментів, визначення залежностей між параметрами моделей базувалися на використанні пакетів прикладних програм та спеціально розроблених програм.

Наукова новизна одержаних результатів знайшла своє відображення в наукових положеннях і результатах роботи.

Наукові положення:

1. Автоматизоване інваріантне керування подрібненням-класифікацією руди певних технологічних різнотипів на основі непрямих прогностичних оцінок корисно витраченої енергії на подрібнення сировини, в'язкості пульпи в технологічних агрегатах і об'єму пісків у міжвитковому просторі спіралі класифікатора забезпечує енергоефективне подрібнення руди, оптимальну продуктивність за готовим продуктом та підвищену якість класифікації подрібненого матеріалу.

2. Енергоефективність подрібнення сировини у кульовому млині з боку молольного середовища забезпечується оптимізацією спрацювання куль і футеровки та автоматичною стабілізацією оптимального кульового завантаження в процесі роботи, що дозволяє завдяки наближенню реальної характеристики крупності кульового завантаження до ідеалізованої зменшити витрати куль і футеровки та збільшити продуктивність технологічного агрегату.

3. Параметри пісків, що знаходяться між двома витками спіралі при сходженні через пісковий поріг класифікатора, однозначно характеризують миттєву масову витрату твердого і через отримані математичні залежності дозволяють сформулювати оцінку циркулюючого навантаження та з урахуванням цього побудувати квазіінваріантну слідкуючу систему стабілізації розрідження пульпи в пісковому жолобі класифікатора і як наслідок підвищити якість подрібнення руди в кульовому млині.

Наукові результати:

1. Вперше розроблено метод автоматизованого керування розділенням подрібненої руди з розвантаження кульового млина на основі визначення усталеного значення в'язкості пульпи в зоні розділення твердого та відповідної до неї обраною константою співвідношення тверде/вода в односпіральному класифікаторі, осереднених впродовж часу руху пульпи через барабан млина співвідношень тверде/вода в ньому та масових витрат руди в млин і пісків класифікатора, який дозволяє стабілізувати вихід готового продукту на необхідному рівні та збільшити його на 13,2%.

2. Вперше розроблено математичну модель оперативного оцінювання в'язкості пульпи в потоках, яка базується на пропорційності цієї характеристики коефіцієнту в'язкості, що визначається експериментально для конкретної сировини, середньозваженій крупності твердого і складеному параметру, залежному від густини твердого, води і співвідношення тверде/вода, та дозволяє реалізувати автоматизоване керування кульовим млином і механічним односпіральним класифікатором з врахуванням стану технологічних агрегатів.

3. Вперше розроблено метод непрямого автоматичного визначення енергоефективності руйнування руди безпосередньо в барабані кульового млина за зруйнованим об'ємом на основі вимірювання змінних повних укорочень основного вимірювального стрижня, на внутрішньому торці якого руйнується падаючою молольною кулею руда, та допоміжного, що деформується лише під ударом кулі, які ідентифікують зруйнований об'єм крупного матеріалу з похибкою до $\pm 2,5\%$, що є параметром, інваріантним до зміни швидкості руху куль, їх маси і товщини футеровки, який дозволяє здійснити автоматичне керування енергоефективним подрібненням руди з економією енергетичних і матеріальних ресурсів.

4. Набув подальшого розвитку підхід щодо автоматизованого визначення середньозваженої крупності пісків класифікатора і розвантаження кульового млина за швидкістю зміни об'єму твердого в робочому магнітному полі магнітоелектричної системи, який полягає у встановленні її в конструктивні елементи цих технологічних агрегатів, що взаємодіють з незмінним вмістом твердого, мають незмінну швидкість переміщення, та передбачає здійснення корекції вмісту магнітного заліза в руді, що дозволяє зменшити відносну похибку вимірювання параметра до $\pm 2,91\%$.

5. Удосконалено математичну модель сходження пісків через поріг механічного односпірального класифікатора на основі математичного опису їх стереометрії, що забезпечує визначення миттєвих значень витрат їх об'єму та зменшення похибки вимірювання цього параметру до $\pm 2,5\%$, що дозволяє здійснити автоматичну стабілізацію розрідження пісків на рівні вимог технологічного процесу за точністю.

6. Удосконалено структуру автоматизованого ієрархічного керування рудною продуктивністю кульового млина і співвідношенням тверде/вода в ньому при зміні крупності вхідного живлення шляхом застосування запропонованих алгоритму і програми на основі оцінювання базових показників подрібнення руди, корисно витраченої енергії на подрібнення встановленої кількості руди, швидкості руху пульпи, в'язкості пульпи та в'язкості води і додаткової її витрати в технологічний агрегат, що забезпечує швидке осереднення пульпи за крупністю твердого і розрідженням, унаслідок чого покращується енергоефективність та зростає продуктивність подрібнення сировини за готовим продуктом відповідно на 12,5% та 10...15%.

Практичне значення одержаних результатів полягає у розробленні: алгоритмів і програмного забезпечення системи енергоефективного інваріантного керування подрібненням-класифікацією руд; технічних і програмно-технічних засобів формування інформаційної бази системи автоматичного керування ТП подрібнення вихідної руди; засобів вимірювання середньозваженої крупності пісків односпірального класифікатора і твердого в розвантаженні кульового млина; засобів непрямого оцінювання витрати пісків у пісковий жолоб МОК; засобів енергоефективності подрібнення руди всередині кульових млинів з двофазним і трифазним рухом куль; засобів непрямого прогнозування в'язкості пульпи у кульовому млині та середньозваженої крупності на його вході; радіометоду для передачі інформації з обертових частин об'єктів на нерухомі; квазіінваріантної системи автоматичної стабілізації розрідження пульпи в пісковому жолобі класифікатора; інваріантної автоматизованої системи формування і стабілізації оптимального кульового завантаження млина; системи енергоефективного інваріантного керування процесом розділення подрібненого твердого в класифікаторі за крупністю на злив і піски.

Запропоновані алгоритмічні й технічні рішення знаходять застосування в інженерній практиці. Представники ПрАТ “Полтавський ГЗК” прийшли до висновку стосовно доцільності впровадження системи енергоефективного інваріантного керування подрібненням-класифікацією руд на основі непрямих прогностичних оцінок характеристик сировини та обладнання. Розрахунковий економічний ефект становить 12020,27 тис.грн. на рік на збагачувальну фабрику з замкненим циклом подрібнення руди у першій стадії.

Теоретичні і практичні результати дисертації також використані у навчальному процесі кафедри автоматизації виробничих процесів Центральноукраїнського національного технічного університету шляхом включення матеріалів до шести лекційних курсів, лабораторного практикуму, курсового та дипломного проектування при підготовці фахівців, які навчаються за спеціальностями 151 “Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології”, 141 “Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка” та 172 “Телекомунікації та радіотехніка”, та

здобувачів освіти третього (освітньо-наукового) рівня за спеціальністю 151 “Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології”.

Обґрунтованість і достовірність наукових результатів, висновків та рекомендацій забезпечується коректністю постановки і вирішення сформульованих завдань; використанням апробованих фундаментальних закономірностей точних наук, зокрема, теорії автоматичного керування, теорії вимірювальних засобів, теорії інваріантності та слідкуючих систем, адаптивних систем та інших фундаментальних наук і доведених положень теорії ймовірностей, випадкових процесів, статистичного аналізу; задовільним збігом результатів теоретичних досліджень, експериментальних випробувань та комп’ютерного моделювання; отриманням достатнього обсягу статистичного матеріалу, який гарантує похибку не більше 5%.

Особистий внесок здобувача. Здобувач – єдиний автор усіх наукових ідей, що охоплюють теоретичні результати і наукові положення, винесені на захист. Дослідження, пов’язані з окремим застосуванням функціональних блоків та систем керування розрідженням пульпи, її в’язкістю, продуктивністю, завантаженням куль на заміну спрацьованих, розробкою і виготовленням стендів, технічних і програмних засобів, їх реалізацією, експериментальні дослідження і випробування здійснювалися разом зі співробітниками, які були основними співвиконавцями науково-дослідних робіт за темою дисертації, що виконувалися під керівництвом здобувача, та співавторами відповідних публікацій. У спільних зі співавторами публікаціях здобувачеві належать: обраний напрям досліджень, розробка теоретичних основ і математичних моделей, алгоритмів керування та ідентифікації параметрів, висновки за результатами досліджень, напрями подальшого розвитку відповідної роботи.

Апробація роботи. Основні положення дисертації та результати досліджень представлялися і отримали схвальні відгуки на 38 науково-технічних конференціях (11 закордонних) та на засіданнях наукового семінару кафедри автоматизації виробничих процесів Центральноукраїнського національного технічного університету (2011–2020 рр.); міжнародних наукових конференціях: “Контроль і управління в складних системах” (м. Вінниця, 2016 р., 2018 р.), “Сталий розвиток промисловості та суспільства” (м. Кривий Ріг, 2016–2020 рр.), “Міжнародна конференція з математичного моделювання” (м. Херсон, 2015–2019 рр.), “Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні” (м. Дніпропетровськ, 2016 р., 2019 р.), “Inzynieria i technologia. Teoretyczne i praktyczne aspekty rozwoju wspolczesnej nauki” (м. Ченстохова, Польща, 2016 р.), “Inzynieria i technologia. Nowoczesne badania podswawowe i stosowane” (м. Сопот, Польща, 2016 р.), “Inzynieria i technologia. Badania podstawowe i stosowane: wyzwania i wyniki” (м. Закопане, Польща, 2016 р.), “Електротехнічні і комп’ютерні системи: теорія і практика” (м. Одеса, 2017 р.), “Інформаційні технології в освіті та управлінні” (м. Херсон, 2017 р.), “Інформаційна безпека та комп’ютерні технології” (м. Кропивницький, 2018 р.), “The development of technical sciences: problems and solutions” (м. Брно, Чехія, 2018 р.), “Innovative development of resource-saving technologies of mineral mining and processing” (м. Петрошані, Румунія, 2018-2020 рр.), “International Conference of European Academy of Science” (м. Бонн, Німеччина, 2018 р.), “Science, research, development technics and technology” (м. Берлін, Німеччина, 2018 р.),

“Science, research, development. Technics and technology” (м. Берлін, Німеччина, 2019 р.), “Science, research, development. Technics and technology” (м. Лондон, Англія, 2019 р.), “Проблеми використання інформаційних технологій в освіті, науці та промисловості” (м. Дніпро, 2020 р.), “Modeling, control and information technologies” (м. Рівне, 2020 р.), “Прикладні науково-технічні дослідження” (м. Івано-Франківськ, 2020 р., 2021 р.); Всеукраїнських наукових конференціях “Проблеми математичного моделювання” (м. Дніпродзержинськ, 2016-2018 рр., 2020 р.), “Автоматика та комп’ютерно-інтегровані технології у промисловості, телекомунікаціях, енергетиці та транспорті” (м. Кропивницький, 2017 р.), “Перспективні напрямки інформаційних і комп’ютерних систем та мереж, комп’ютерно-інтегровані технології у промисловості, телекомунікаціях, енергетиці та транспорті” (м. Кропивницький, 2019 р.).

Публікації. Основний зміст дисертації відображено у 97 друкованих працях, з них 1 монографія; розділи у 2 колективних монографіях, виданих в країнах ЄС; 4 – у виданнях, що індексуються в міжнародних науково-метричних базах Scopus та WoS; 43 статті (у тому числі 7 одноосібних), з них 24 – у фахових наукових виданнях України, 2 – у закордонних періодичних наукових журналах; 35 – у збірниках матеріалів і тез доповідей наукових конференцій, 11 з яких закордонні. Новизна основних положень дисертації підтверджена 8 патентами України на корисну модель і 4 патентами на винахід.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з анотації, вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг роботи 672 сторінки, з них основна частина – 331 сторінка (22 повні сторінки відведені під рисунки та таблиці), список використаних джерел з 297 найменувань на 30 сторінках, 11 додатків на 286 сторінках. Робота містить 123 рисунки і 19 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

У **вступі** обґрунтована актуальність теми дисертації, розглянуто зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами, сформульована мета та ідея роботи, завдання досліджень, визначені об’єкт, предмет і методи дослідження, викладені основні наукові положення, новизна наукових і практичних результатів, апробація результатів, структура роботи.

У **першому розділі** виконано аналіз стану автоматизації керування ТП рудопідготовки кульовими млинами в першій стадії залізорудних збагачувальних фабрик.

Велике значення для розвитку теорії автоматизованого керування рудопідготовкою в першій стадії мають роботи авторів: А.А. Азаряна, В.А. Азаряна, М.О. Алексєєва, В.О. Бунька, В.А. Воронова, І.Г. Грінмана, В.З. Козіна, Ю.Г. Качана, В.І. Корнієнка, Є.В. Кочури, Б.Д. Кошарського, А.І. Купіна, О.М. Марюти, Л.І. Мещерякова, В.С. Моркуна, Н.В. Моркун, М.В. Назаренка, Г.С. Нестерова, І.В. Новицького, О.В. Поркуян, В.С. Процута, В.В. Ткачова, А.Ю. Тропа, К.Я. Улітенка, В.П. Хорольського, А.Дж. Лінча, J.A. Herbst та ін. Показано, що, не зважаючи на достатньо велику кількість розробок і досліджень, існуючі системи автоматичного контролю і керування не зовсім відповідають

сучасним вимогам і не забезпечують ефективного рішення складних завдань у реальних умовах роботи циклу подрібнення вихідної руди на залізородних збагачувальних фабриках в першій стадії рудопідготовки. Так, існуючі автоматизовані системи забезпечують порівняно низьку енергоефективність руйнування руди і продуктивність, яка значно нижче номінальної, та не ліквідували негативний вплив на подрібнення наступних факторів: зміни технологічного різнотипу руди, розріджених і згущених зон твердого, що створюються в пісковому потоці; зміни крупності вихідної руди на середньозважений розмір подрібненого продукту; зміни внутрішнього діаметра барабана внаслідок незмінності його обертів і можливого прослизання молоткового середовища в результаті заповнення барабана кулями на рівні менше 50%; великого запізнювання в класифікаторі при автоматичному керуванні розділенням твердого на злив і піски за відхиленням крупності готового продукту від приписаного значення; неоптимальності різнорозмірного кульового завантаження на якість і продуктивність подрібнення руди, що сильно погіршує показники рудопідготовки в першій стадії, не задовольняє вимогам технологічного процесу. Як результат – задачі покращення роботи самого розповсюдженого замкненого циклу подрібнення руди в першій стадії збагачувальних фабрик ставляться давно, але нині повністю не розв'язані і не існує загальної методології вирішення даної проблеми.

Аналіз показав, що удосконалення автоматичного керування кульовим подрібненням руди в замкненому циклі з спіральним класифікатором стало актуальною науковою проблемою, яка потребує термінового розв'язання і яку необхідно вирішувати з урахуванням запропонованого нового підходу енергоефективного інваріантного керування подрібненням-класифікацією руд на основі непрямих прогностичних оцінок характеристик сировини та обладнання і нової методології його реалізації, яку слід розробити.

У **другому розділі** вирішено завдання створення методології реалізації енергоефективного інваріантного керування кульовим подрібненням-класифікацією руд на основі непрямих прогностичних оцінок характеристик сировини та обладнання. Методологію можливо подати як сукупність прийомів дослідження, які застосовують у будь-якій науці відповідно до специфіки об'єкта її пізнання. Серед функцій, які реалізує методологія, в роботі в основному використані наступні: направлення, передбачення особливих шляхів, де досягається певна науково-дослідницька мета; забезпечення всебічності отримання інформації щодо процесу чи явища, які вивчаються; організацію використання нових знань у практичній діяльності.

Зважаючи на те, що кульовий млин і односпіральний класифікатор належать до складних об'єктів керування, використовувалася значна кількість методів їх пізнання. Їх основу складали загальнологічні методи, методи емпіричного і теоретичного дослідження.

Під час керування новими процесами або при переході на якісно більш високий рівень вже відомими об'єктами виникає необхідність в нових методах вимірювання параметрів. Аналіз показав, що при здійсненні енергоефективного інваріантного керування подрібненням-класифікацією руд на основі непрямих прогностичних оцінок характеристик сировини та обладнання необхідно розробити 21 новий метод вимірювання (рис.1). Крім класичних методів дослідження в роботі

використовувалося широке коло спеціальних методів, а саме методи теорії автоматичного керування, підвищення точності інформаційних систем, де превалюють власні підходи. Методи теорії автоматичного керування охоплюють всі технологічні агрегати циклу подрібнення і найбільш важливі процеси.

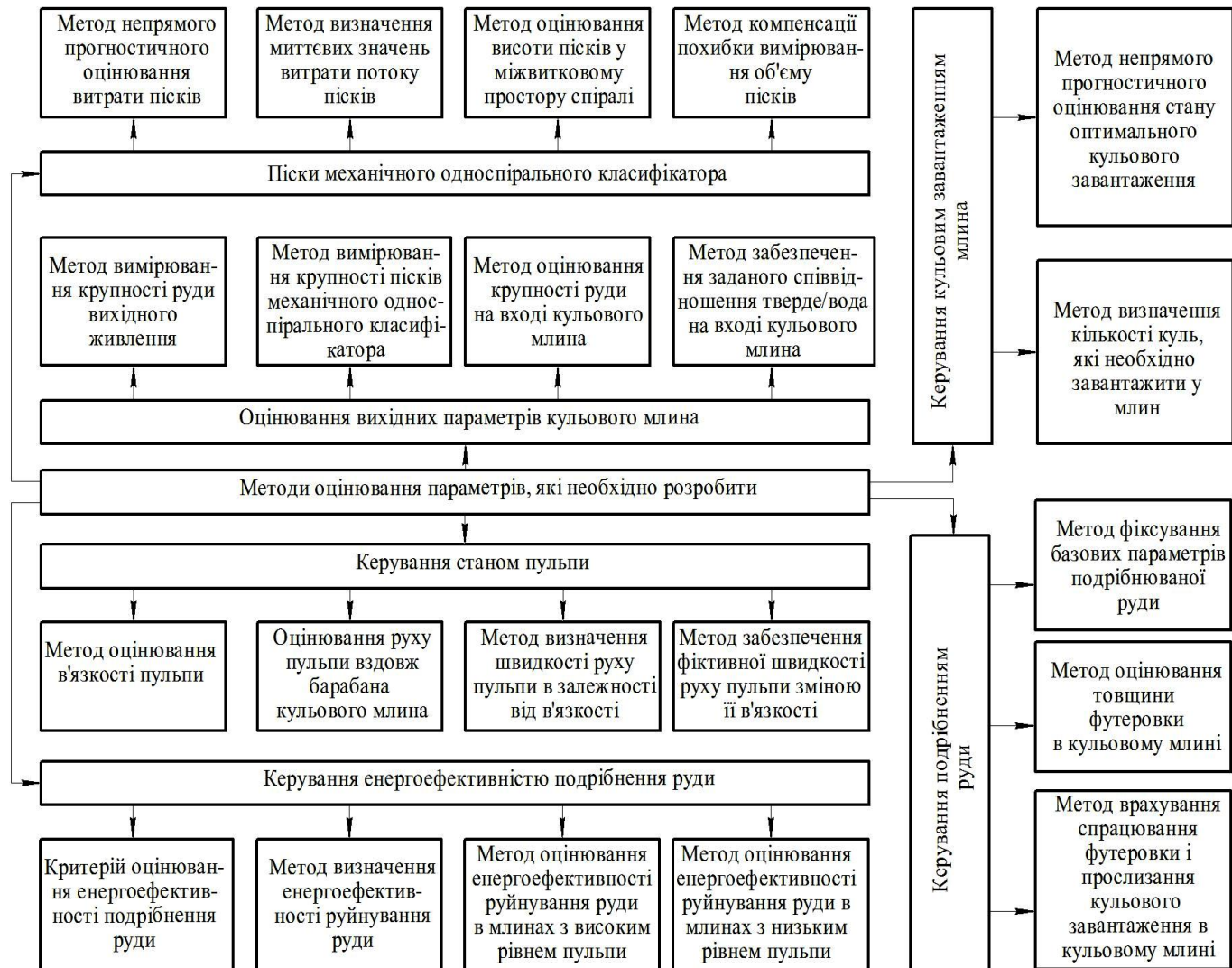


Рис.1. Методи оцінювання параметрів, яких не існує і їх необхідно розробити для енергоефективного інваріантного керування подрібненням-класифікацією руд на основі непрямих прогностичних оцінок характеристик сировини та обладнання

У роботі широко використано математичне моделювання. Методи математичного моделювання, які слід застосувати при розв'язанні поставлених завдань, приведені на рис.2. Даним видом дослідження охоплені всі технологічні процеси циклу подрібнення-класифікації руди. Лише три процеси моделювання базуються на відомих математичних моделях, дванадцять процесів моделювання повинні здійснюватися на нових математичних моделях, які необхідно розробити.

Метод декомпозиції ідеально підходить для дослідження таких ускладнених об'єктів як цикл подрібнення руди, що спрощує дослідження. Декомпозицію циклу можливо представити сімома складовими, які досліджувалися.



Рис.2. Методи математичного моделювання, які слід застосувати в процесі розробки енергоефективного інваріантного керування подрібненням-класифікацією руд на основі непрямих прогностичних оцінок характеристик сировини та обладнання

Аналіз показав, що базовим при виконанні досліджень за даною темою може бути інваріантний метод. Застосування інваріантного методу в процесі розробки енергоефективного інваріантного керування подрібненням-класифікацією руд на основі непрямих прогностичних оцінок характеристик сировини та обладнання подано на рис.3. Як видно з рис.3, інваріантний метод необхідно застосовувати до вихідної руди, кульового завантаження, радіометоду, безпосередньо кульового млина та механічного односпірального класифікатора. Він охоплює 23 процеси.

Вінцем проведених досліджень є композиція автоматизованих систем, що керують окремими незалежними складовими декомпозиції, у комплекс для здійснення енергоефективного інваріантного керування подрібненням-класифікацією руд у складі АСК ТП першої стадії рудопідготовки. Комплекс представлено

дев'ятьма АСК різного призначення. Ураховуючи сучасні погляди на технічну реалізацію розглянутих АСК встановлено, що ефективно і найбільш дешево керування можливо здійснити мікропроцесорними засобами. Це відкриває перспективу переведення рудопідготовки на якісно новий рівень з гарантованим отриманням як соціальної, так і економічної ефективності.

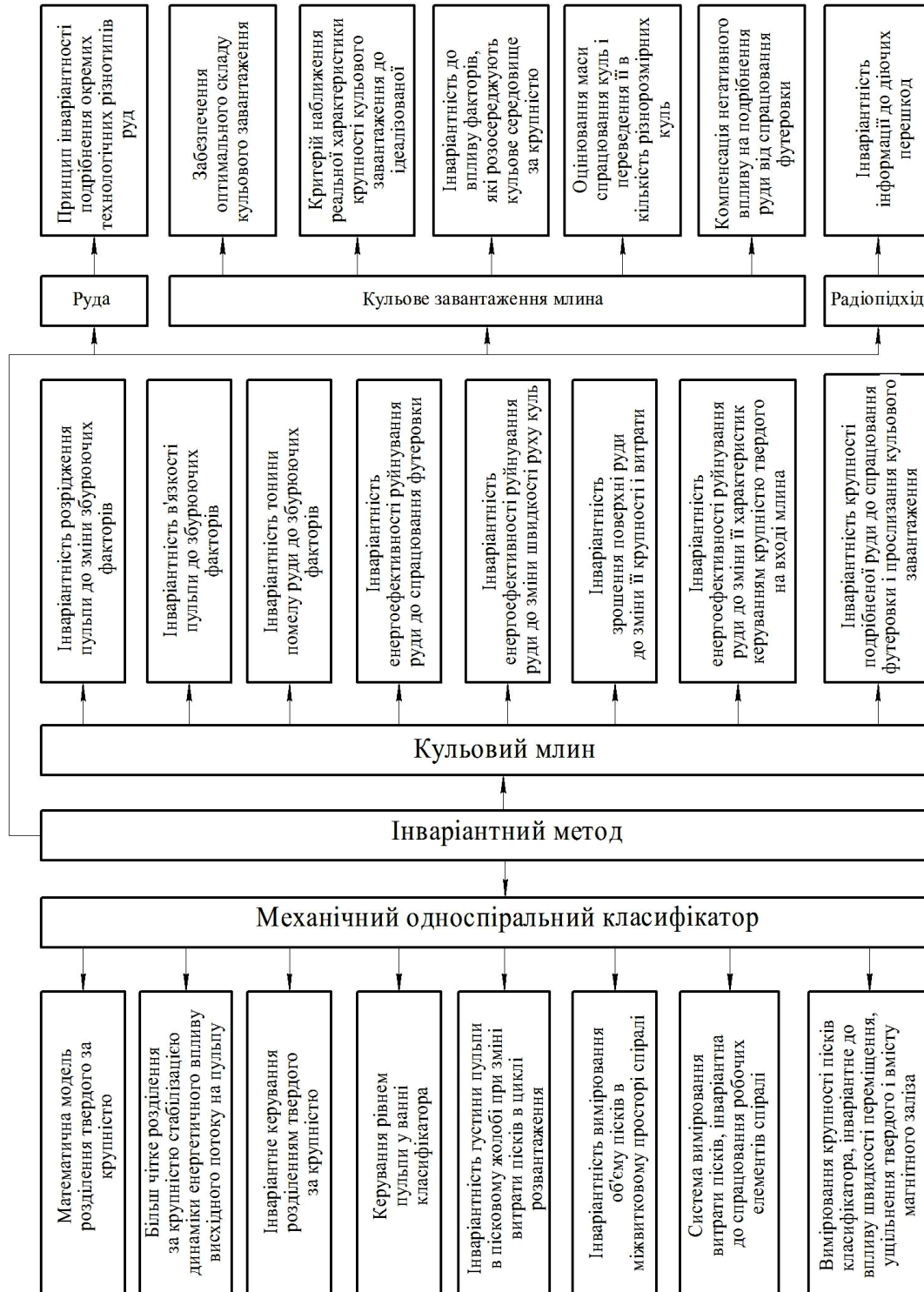


Рис.3. Інваріантний метод в процесі розробки енергоефективного інваріантного керування кульовим подрібненням-класифікацією руд на основі непрямих прогностичних оцінок характеристик сировини та обладнання

У третьому розділі виконано теоретичне дослідження автоматизованого розділення твердого та його інформаційного забезпечення в МОК при енергоефективному інваріантному керуванні подрібненням-класифікацією руд на основі непрямих прогностичних оцінок характеристик сировини та обладнання.

На прикладі самого розповсюдженого в Україні класифікатора 1КСН-30 в процесі аналітичних досліджень встановлені вертикальна складова швидкості потоку

$$v_B = \frac{B_C n_C}{60}, \quad (1)$$

тривалість його дії

$$t_B = \frac{60 h_C \operatorname{tg} \alpha}{B_C n_C}, \quad (2)$$

тривалість вільного падіння часток твердого

$$t_P = \frac{30}{B_C n_C} (B_C - 2 h_C \operatorname{tg} \alpha), \quad (3)$$

відношення тривалості висхідного потоку до тривалості вільного падіння

$$\frac{t_B}{t_P} = \frac{2 h_C \operatorname{tg} \alpha}{B_C - 2 h_C \operatorname{tg} \alpha}, \quad (4)$$

де B_C – крок спіралі; α – кут нахилу корпусу; h_C – висота робочих елементів спіралі; n_C – число обертів спіралі за одну хвилину.

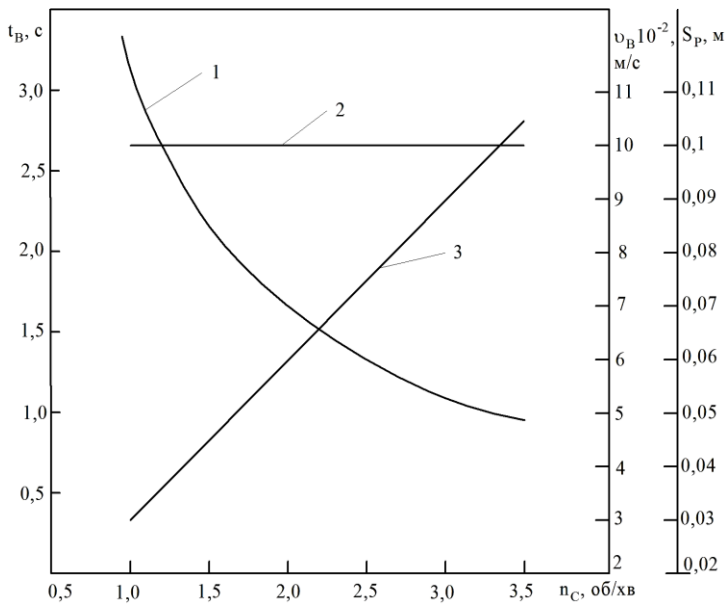


Рис.4. Залежність технологічних показників класифікатора від обертів спіралі:

- 1 – тривалості дії висхідного потоку t_B ;
- 2 – довжини умовного шляху, пройденого висхідним потоком S_P ;
- 3 – швидкості висхідного потоку v_B

Як видно з (4), відношення t_B/t_P не залежать від швидкості обертання спіралі. Швидкість висхідного потоку v_B і його тривалість t_B залежать від n_C , що подано на рис.4 при $\alpha = 18^\circ 30'$, $B_C = 1,8$ м, $h_C = 0,3$ м. Добуток швидкості висхідного потоку на його тривалість умовно виражає пройдений шлях. З рис.4 видно, що незалежно від швидкості обертання спіралі пройдений шлях S_P також залишається незмінним (залежність 2). З ростом n_C тривалість висхідного потоку нелінійно зменшується (залежність 1), а швидкість v_B лінійно збільшується, що дозволяє вибором n_C керувати скаламучуванням пульпи.

Отримана математична модель класифікації твердого за умови, коли обрана частка твердого не здійснює вертикального переміщення, має вигляд

$$v_B \cdot t_B = t_u \frac{(\delta_T - \gamma_{II})}{(\gamma_{II} - \delta_B)} \cdot a(\delta_T - \delta_B)(d_{S0} - d_0), \quad (5)$$

де t_u – тривалість циклу дії спіралі; δ_T, δ_B – відповідно густина твердого і води; γ_{II} – густина пульпи в зоні розділення; d_{S0} – розмір частки твердого, яка має нульове переміщення; a, d_0 – параметри формули Качана, яка удосконалена і діє на всьому діапазоні зміни крупності твердого.

Математична модель (5) при незмінних параметрах процесу розділення твердого за крупністю дозволяє визначати густину пульпи для розділення за розміром твердого d_{S0} . Математичне моделювання, проведене з використанням проміжних залежностей процесу, дозволило отримати графічну інтерпретацію, яка приведена на рис.5. При густині $\gamma_{II}=1700 \text{ кг/м}^3$ розділення буде відбуватися при крупності 0,175 мм. Менші частки мають висхідне переміщення, а більш крупні випадають в осад.

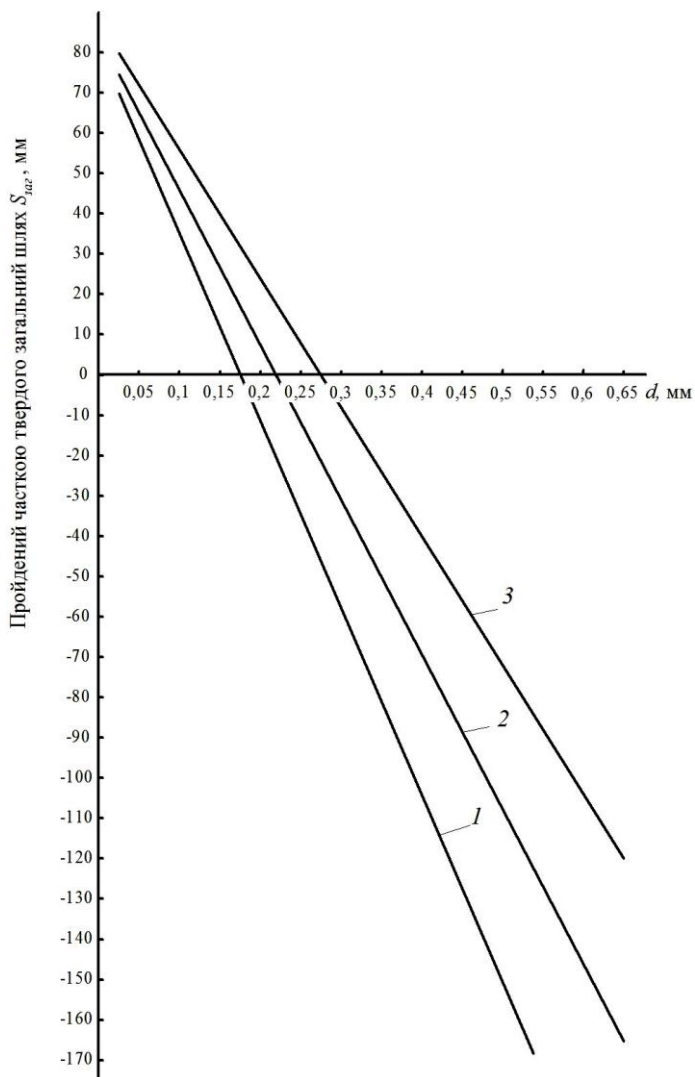


Рис.5. Залежність напрямку і пройденого шляху частками твердого в МОК в одному циклі дії витка спіралі від їх розміру при різних густинах пульпи: 1 – $\gamma_{II}=1700 \text{ кг/м}^3$; 2 – $\gamma_{II}=1800 \text{ кг/м}^3$; 3 – $\gamma_{II}=1900 \text{ кг/м}^3$

Для практичного використання зі зміною в'язкості пульпи від температури запропонована залежність визначення співвідношення тверде/вода в зоні розділення

$$K_{T/B} = \frac{\delta_T \cdot a(v)(\delta_T - \delta_B)(d_{S0} - d_0) \cdot t_u}{v_B \cdot t_B \cdot \delta_B}, \quad (6)$$

де $a(v)$ – параметр формули Качана, залежний від температури пульпи, який при керуванні відомий і визначається за температурою середовища.

Даний підхід дозволяє стабілізувати вихід готового продукту на необхідному рівні і збільшити його на 13,2%.

Запропонованим методом графоаналітичного моделювання визначено об'єми пісків у вертикальних стовпчиках матеріалу у міжвитковому просторі спіралі. Піски можливо подати у вигляді нижньої і верхньої частин. Відповідно знайденим об'ємам матеріалу у послідовно розташованих стовпчиках нижньої частини пісків на рис.6 побудована залежність 1, де висота колонок відповідає вмісту пісків. Отримана залежність апроксимована виразом

$$V = 8940 \exp \left[- (l - l_{cp})^2 / 909 \right], \text{ см}^3, \quad (7)$$

де l – довжина пісків; l_{cp} – середнє значення довжини; 8940, 909 – константи.

Графік 2 за даною залежністю приведено на рис.6. Коефіцієнт кореляції зв'язку між 1 і 2 склав $r=0,9911$, а коефіцієнт детермінації – $R^2=0.9823$.

Аналогічно була отримана залежність для верхньої частини пісків. Вона достатньо добре також апроксимується функцією Гауса, яка дорівнює

$$V = 4784 \exp\left[-(l - l_{cp})^2 / 47.31\right], \text{ см}^3. \quad (8)$$

Залежності приведені на рис.7. Коефіцієнт кореляції склав $r=0.9866$, а коефіцієнт детермінації – $R^2=0.9734$.

З рис.6 і рис.7 слідує, що між фактично визначеними об'ємами матеріалу і аналітичними залежностями існує тісний кореляційний зв'язок, що свідчить про функціональні зміни об'ємної витрати твердого при сходженні матеріалу через пісковий поріг класифікатора. Приведені залежності отримані для найбільших значень висоти нижньої і верхньої частин пісків. Їх аналогічно можливо визначити і для всіх проміжних значень умовних шарів матеріалу $1\Delta h, 2\Delta h, 3\Delta h, \dots, 9\Delta h$ нижньої частини і $10\Delta h$ верхньої частини пісків.

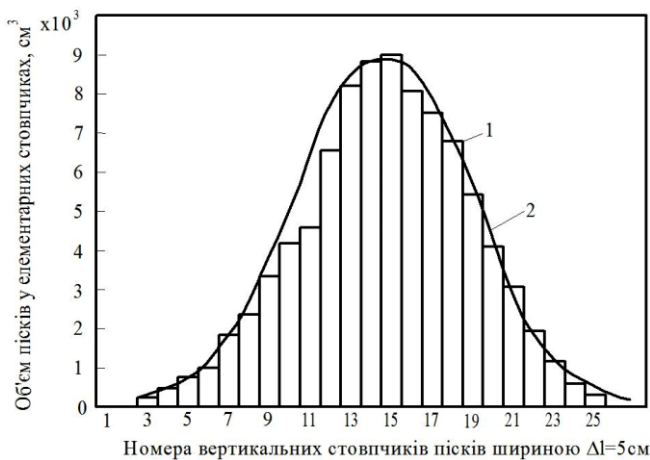


Рис. 6. Значення об'єму матеріалу в вертикальних стовпчиках і аналітична залежність, що характеризують закономірність розташування матеріалу вздовж нижньої частини пісків МОК:

1 – залежність, отримана в процесі моделювання; 2 – графік апроксимуючої функції

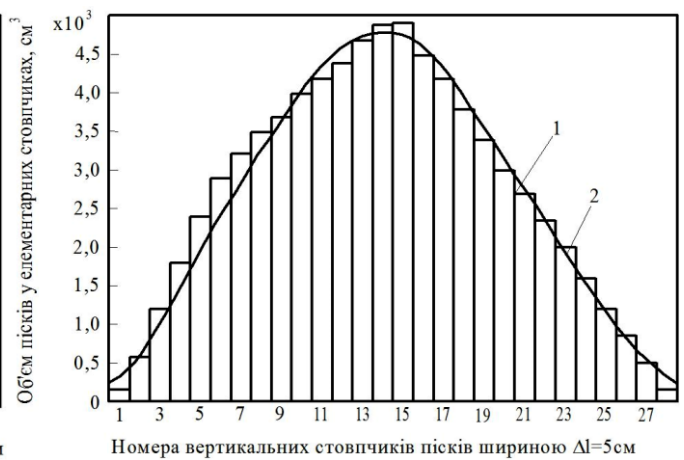


Рис. 7. Значення об'єму матеріалу в вертикальних стовпчиках і аналітична залежність, що характеризують закономірність розташування матеріалу вздовж верхньої частини пісків МОК:

1 – залежність, отримана в процесі моделювання; 2 – графік апроксимуючої функції

Зміну об'єму матеріалу у вертикальних шарах відносно середнього значення при різній висоті пісків показано на рис.8. Ці залежності однотипні, мають мінімум, максимум і середнє значення. При збільшенні висоти пісків зростають як середнє значення, так і значення мінімумів і максимумів. Дані залежності є носіями інформації про майбутнє розвантаження пісків у пісковий жолоб класифікатора. Зв'язок між параметрами залежностей подано на рис.9. Згідно з рис.9,а середнє значення витрати пісків у циклі сходження матеріалу нелінійно збільшується при зростанні висоти. Амплітуди першого A_{1min} і другого A_{2max} екстремумів лінійно залежать від висоти пісків. Відношення екстремумів характеризує нерівномірність сходження матеріалу. З рис.9,г видно, що воно функціонально змінюється з мінімумом в середині діапазону висоти пісків. Найбільш рівномірно матеріал

сходить в межах $7\Delta h, \dots, 9\Delta h$, тобто при середніх значеннях циркулюючого навантаження.

Важливим параметром є густина пульпи у пісковому жолобі. Зазвичай в нього подають незмінну витрату води $24,3 \text{ м}^3/\text{год} = \text{const}$. За цих умов зміна густини пульпи у пісковому жолобі при висоті пісків $8\Delta h$ (а) і $9\Delta h$ (б) приведена на рис.10. Характер зміни кривих густини пульпи за цикл розвантаження практично однаковий. Тривалість від'ємних півхвиль складає $5,555 \text{ с}$, а додатних – $4,444 \text{ с}$ при незмінному загальному періоді 10 с . Такий стан пульпи в млині створює розріджені та згущені зони твердого, що значно знижує ефективність роботи куль.

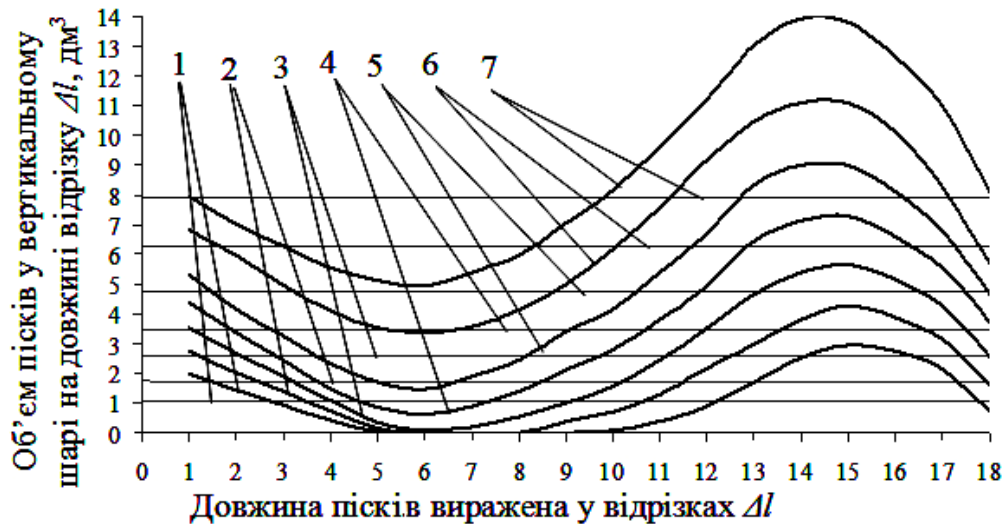


Рис. 8. Зміна об'єму матеріалу у вертикальних шарах відносно середнього значення вздовж пісків при зростанні їх висоти від $5\Delta h$ до $11\Delta h$:
1 – $5\Delta h$; 2 – $6\Delta h$; 3 – $7\Delta h$; 4 – $8\Delta h$; 5 – $9\Delta h$; 6 – $10\Delta h$; 7 – $11\Delta h$

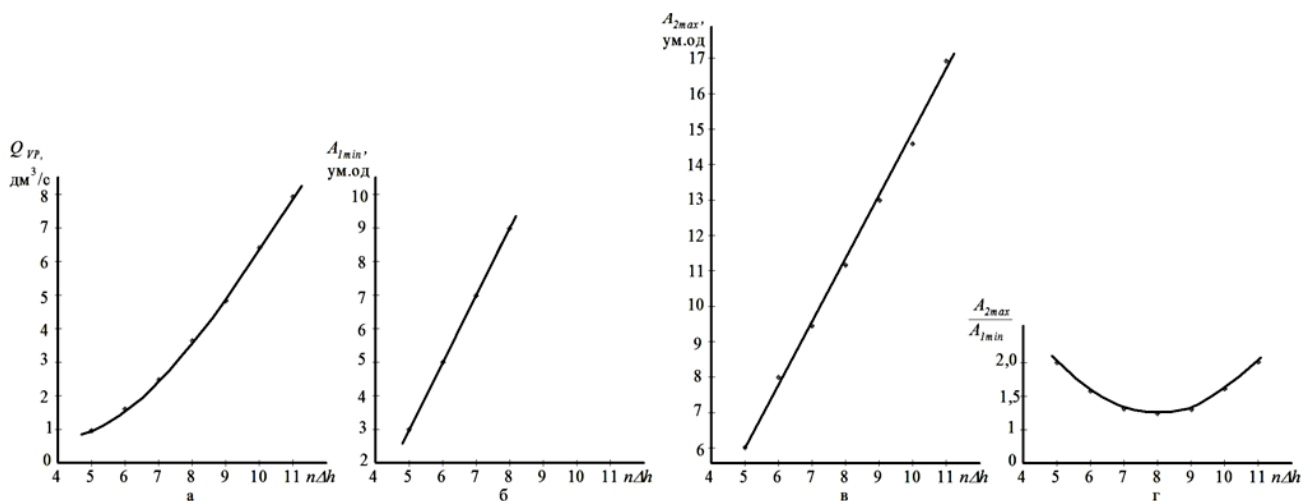


Рис. 9. Залежність параметрів перехідних процесів сходження пісків МОК від їх висоти у міжвитковому просторі:
а – середнього значення витрати у циклі сходження; б – амплітуди A_{1min} першого коливання; в – амплітуди A_{2max} другого коливання; г – відношення амплітуд A_{2max}/A_{1min}

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1 & \cos x_0 & \sin x_0 & \dots & \cos mx_0 \\ 1 & \cos x_1 & \sin x_1 & \dots & \cos mx_1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & \cos x_c & \sin x_c & \dots & \cos mx_c \end{vmatrix} = 2^{m^2} D \sin \frac{x_q - x_p}{2}, 0 \leq p < q \leq c \quad (12)$$

і, як наслідок, відмінний від нуля для даної системи точок, для якої $0 < x_q - x_p < c$. Зважаючи на це, дана інтерполяційна задача має єдиний розв'язок.

Це дозволяє знаходити аналітичні залежності об'єму пісків у вертикальних шарах вздовж пісків при фіксованих значеннях їх висоти та у загальному випадку при довільній висоті, а також залежності параметрів цього рівняння від висоти пісків, що слугує основою створення математичної моделі у формі алгебраїчних рівнянь, яка описує значення миттєвої витрати пісків в процесі їх розвантаження у пісковий жолоб.

Для цього використано залежності, приведені на рис.8. Апроксимація виконувалася за допомогою Curve Fitting Toolbox – наборі графічних інтерфейсів (GULs) і М-функцій для користувачів, які створені в обчислювальному середовищі MATLAB. Самі функції мають такий вигляд

$$V_1 = 0,6687 - 0,3472 \cos(0,2395x) + 0,1069 \sin(0,2395x) + 1,285 \cos(2 \cdot 0,2395x) + 0,9444 \sin(2 \cdot 0,2395x) + 0,5014 \cos(3 \cdot 0,2395x) - 0,4997 \sin(3 \cdot 0,2395x), \quad (13)$$

.....
 ...

 ...

$$V_7 = 7,215 - 2,751 \cos(0,2242x) + 1,105 \sin(0,2242x) + 3,807 \cos(2 \cdot 0,2242x) + 0,4311 \sin(2 \cdot 0,2242x) + 0,0721 \cos(3 \cdot 0,2242x) - 0,8681 \sin(3 \cdot 0,2242x), \quad (19)$$

де x – порядковий номер вертикального шару матеріалу вздовж пісків; V_1 – при $5\Delta h$; V_2 – при $6\Delta h$; V_3 – при $7\Delta h$; V_4 – при $8\Delta h$; V_5 – при $9\Delta h$; V_6 – при $10\Delta h$; V_7 – при $11\Delta h$.

Відповідно даним рівнянням для конкретного значення висоти пісків можливо записати вираз у загальному вигляді

$$V_{HT} = K_1 + K_2 \cos zx + K_3 \sin zx + K_4 \cos 2zx + K_5 \sin 2zx + K_6 \cos 3zx + K_7 \sin 3zx, \quad (20)$$

де $K_1, K_2, \dots, K_7$ – відповідно вільний член та коефіцієнти при другому, третьому, четвертому, п'ятому, шостому і сьомому членах; z – основа аргументу; $x=1, 2, \dots, 18$ – значення довжини пісків, виражені у одиницях Δl .

Закономірності зміни параметрів рівняння (20) можливо виразити залежностями, які отримані їх апроксимуванням при різних значеннях висоти пісків тим же періодом, забезпечуючи ту ж точність. За рівнянням (20) можливо записати формулу для визначення миттєвих значень циркулюючого навантаження

$$Q_{mHT} = \delta_T (K_1 + K_2 \cos zx + K_3 \sin zx + K_4 \cos 2zx + K_5 \sin 2zx + K_6 \cos 3zx + K_7 \sin 3zx) / K_P \cdot \Delta t, \quad (21)$$

де K_P – коефіцієнт розрідження пульпи, що дорівнює $(\delta_T - \gamma_{II}) / (\gamma_{II} - \delta_B)$; Δt – час сходження вертикального шару пісків, що дорівнює 0,5555 с.

Таким чином, отримана математична модель у формі алгебраїчного рівняння процесу сходження пісків через поріг класифікатора, що відповідає миттєвим

значенням циркулюючого навантаження. Для визначення цього параметра необхідно вимірювати висоту пісків у міжвитковому просторі спіралі, де відсутня динаміка матеріалу. Завдяки цьому реалізована одноканальна інваріантна система керування стабілізацією густини пульпи у пісковому жолобі класифікатора.

Аналіз показав, що в якості вимірювального пристрою найкраще використати радіохвильовий (радарний) рівнемір УЛМ-11-НЕ, абсолютна похибка якого складає ± 1 мм. Висоту пісків необхідно визначати за відстанню від локаційного пристрою до горизонтальної поверхні матеріалу. Особливості вимірювання висоти пісків показано на рис.11. Спрацювання спіралі вносить неоднозначність у результати вимірювання висоти пісків.

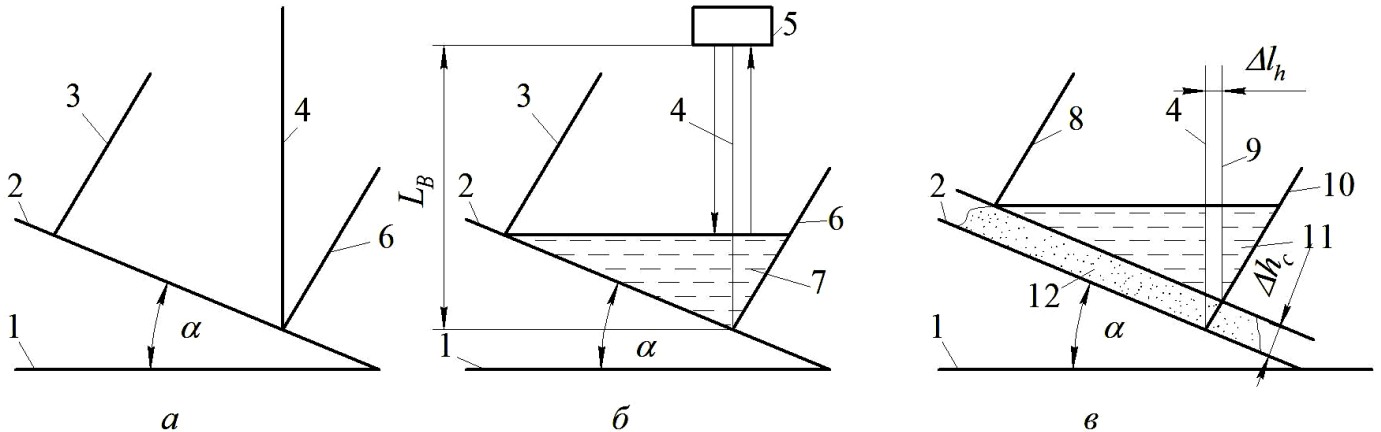


Рис. 11. Особливості вимірювання висоти пісків МОК:

- а – вертикаль вимірювання висоти; б – установка локаційного вимірювача відстані; в – механізм виникнення зміщення вертикалі вимірювання висоти пісків; 1 – горизонталь; 2 – основа циліндричної постелі при незношених робочих елементах спіралі; 3 – робочий елемент переднього витка незношеної спіралі; 4 – вертикаль вимірювання висоти пісків; 5 – локаційний вимірювач відстані; 6 – робочий елемент заднього витка незношеної спіралі; 7 – положення пісків при незношеній спіралі; 8 – робочий елемент переднього витка зношеної спіралі; 9 – зміщена вертикаль вимірювання висоти пісків; 10 – робочий елемент заднього витка зношеної спіралі; 11 – положення пісків при зношеній спіралі; 12 – додаткова циліндрична постіль, що утворюється при зношенні робочих елементів спіралі

Механізм виникнення систематичної похибки розкривається на рис.12. Як видно з рис.12, вимірювання висоти пісків необхідно здійснювати вздовж нової змінної вертикалі 5, однак воно повинно відбуватися відносно вертикалі 4 і цим вноситься систематична похибка.

Процедура вимірювання висоти пісків продемонстрована на рис.13. Аналіз показав, що перестановку вертикалі вимірювання при спрацюванні робочих елементів спіралі можливо не здійснювати. Тоді висоту пісків при зношених робочих елементах спіралі можна визначити за виразом

$$h_{PTZ} = L_B - l_p - \Delta h_C \cdot \cos \alpha, \quad (22)$$

де Δh_C – невідома величина, яку необхідно виміряти, використавши другий локаційний пристрій.

Величина Δh_C буде дорівнювати

$$\Delta h_C = l_B - l_{PC}, \quad (23)$$

де l_{PC} – початкова відстань від локаційного пристрою до спіралі; l_B – виміряна відстань до торця робочого елемента спіралі.

Тоді

$$h_{PTZ} = L_B - l_P - (l_B - l_{PC}) \cos \alpha. \quad (24)$$

Для визначення висоти пісків необхідно виміряти відстані l_P і l_B .

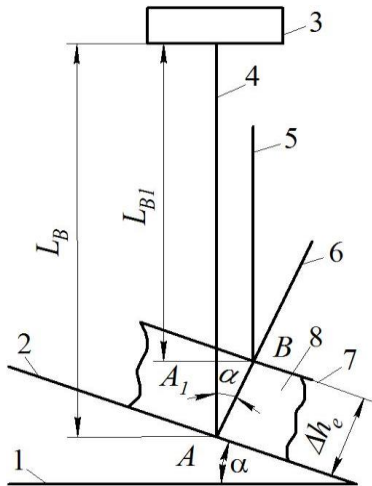


Рис. 12. Механізм виникнення систематичної похибки:

- 1 – горизонталь; 2 – основа базової постелі; 3 – пристрій вимірювання відстані; 4 – вертикаль вимірювання висоти пісків; 5 – зміщена вертикаль вимірювання висоти пісків; 6 – робочий елемент спіралі; 7 – основа зміщеної постелі; 8 – нарощена постіль

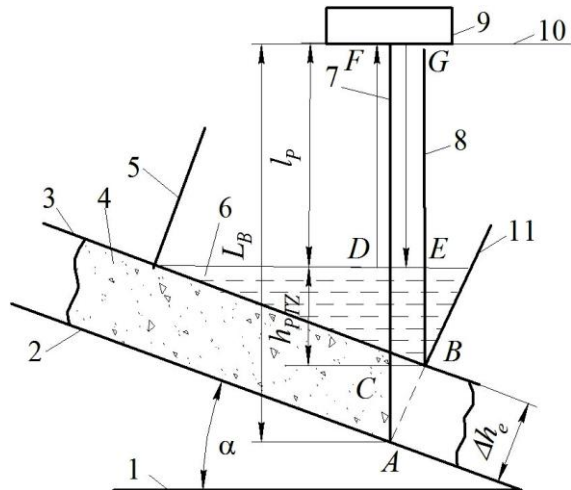


Рис. 13. Вимірювання висоти пісків МОК в умовах спрацювання робочих елементів:

- 1 – горизонталь; 2 – основа циліндричної постелі при вихідних робочих елементах спіралі; 3 – основа циліндричної постелі при спрацьованих робочих елементах спіралі; 4 – додаткова циліндрична постіль, що утворюється при спрацюванні спіралі; 5 – робочий елемент переднього витка зношеної спіралі; 6 – піски при спрацюванні спіралі; 7 – вертикаль вимірювання висоти пісків при неспрацьованій спіралі; 8 – зміщена вертикаль вимірювання висоти пісків; 9 – локаційний вимірювач відстані; 10 – базова горизонталь вимірювання відстані; 11 – робочий елемент заднього витка зношеної спіралі

Другою складовою похибки вимірювання об'єму пісків є зміна обсягу матеріалу (зменшення) в результаті спрацювання робочих елементів спіралі при тій же його висоті. Дана похибка нейтралізується корекцією недостаючого об'єму $\Delta V_{PT} = a \cdot h_{PTZ} \cdot \Delta h_C$, де коефіцієнт a визначають за h_{PTZ} .

Алгоритм визначення піскової продуктивності класифікатора при спрацюванні робочих елементів спіралі приведено на рис.14.

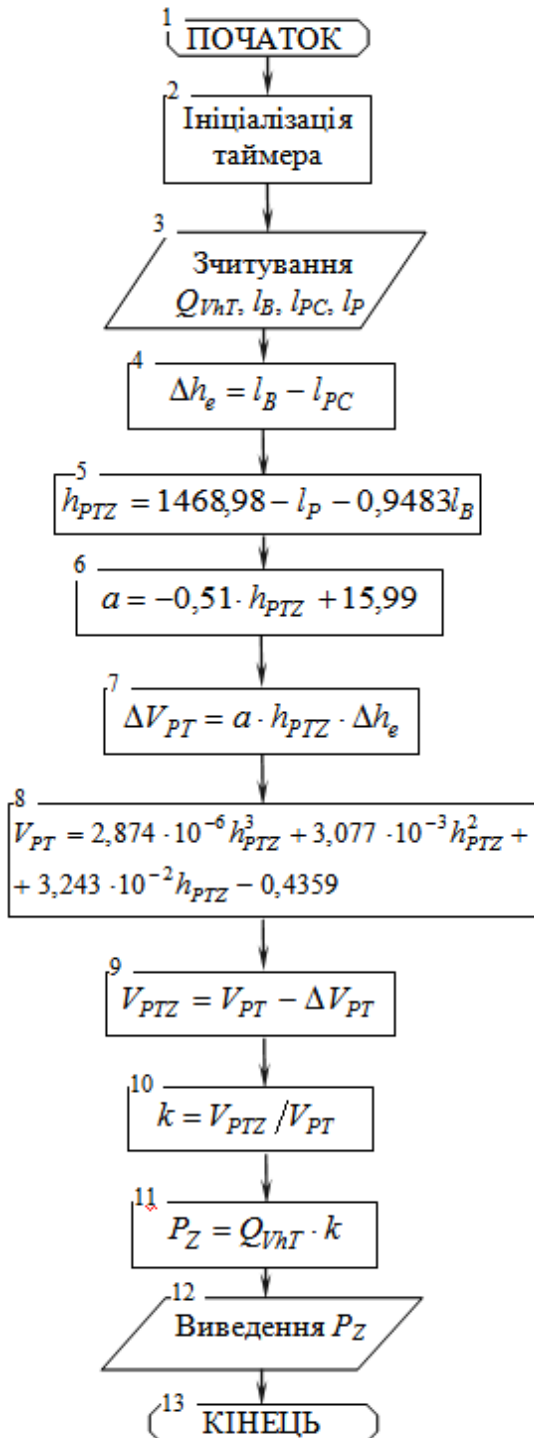


Рис.14. Алгоритм визначення піскової продуктивності МОК при спрацюванні робочих елементів спіралі

Середньозважена крупність пісків класифікатора визначається відповідно електрорушійній силі, що індукується в магнітоелектричній системі, яка взаємодіє з матеріалом. Вона дорівнює

$$E = -wK_{\phi}Fe_M(\%) \frac{v}{k_1k_2} \sqrt{\frac{\pi d^3 V_T}{12} (2k_2^2 + k_1^2)}, \quad (25)$$

де w – число витків в обмотці; K_{ϕ} , k_1 , k_2 – сталі величини, що залежать від параметрів магнітоелектричної системи; Fe_M – вміст магнетиту в твердому; v – швидкість переміщення матеріалу в контрольованому об'ємі магнітоелектричної системи; d – середньозважений розмір часток твердого в пісках; V_T – об'єм твердого в контрольованому об'ємі магнітоелектричної системи.

У **четвертому розділі** розглянуто інформаційне забезпечення млина при енергоефективному інваріантному керуванні подрібненням-класифікацією руд на основі непрямих прогностичних оцінок характеристик сировини та обладнання.

Для автоматичного керування млином необхідна інформація про сировину, обладнання і технологічний процес. Важливим параметром є середньозважена крупність руди, що надходить на переробку. Для оцінювання даного параметра запропонована залежність

$$D_{C3} = \frac{\delta_T g L}{k'_p} \cdot \frac{S_p(t)}{F(t)} - \frac{b}{k'_p}, \quad (26)$$

де g – прискорення земного тяжіння; L – базова відстань конвеєрних вагів; k'_p – коефіцієнт пропорційності, що має розмір 1/м; $S_p(t)$ – площа поперечного перерізу рудного потоку; $F(t)$ – погонне навантаження руди на конвеєрній стрічці.

Для визначення недостаючої витрати води в млин запропонована залежність

$$Q_{BP} = \frac{Q_{PM}}{K_{T/B}} + Q_P \left[\frac{1}{K_{T/B}} - \left(1 - \frac{\gamma_{II}}{\delta_T} \right) / \left(\frac{\gamma_{II}}{\delta_B} - 1 \right) \right], \quad (27)$$

де Q_{PM} , – витрата руди в млин; Q_P – витрата пісків; $K_{T/B}$ – співвідношення тверде/вода в млині.

Для забезпечення умов невиходу з допустимої похибки $\pm 3\%$ необхідно підтримувати достатню точність стабілізації густини пульпи в пісковому жолобі.

Середньозважену крупність дробленого матеріалу на вході кульового млина можливо визначити за запропонованою залежністю

$$d_{C3} = \frac{d_A Q_A + d_B Q_B}{Q_A + Q_B}, \quad (28)$$

де d_A, d_B – відповідно середньозважені крупності вихідного живлення та пісків; Q_A, Q_B – відповідно масові витрати вихідного живлення та пісків.

Тривалість подрібнення більш крупної руди порівняно з базовою мінімальною середньозваженою крупністю можливо визначити відповідно залежності

$$T_{P2} = \frac{E_{1П}}{E_{1min}} T_{P1}, \quad (29)$$

а рудну продуктивність млина при цій же крупності – за формулою

$$Q_{PM2} = \frac{T_{P1}}{T_{P2}} Q_{PM1}, \quad (30)$$

де $E_{1min}, E_{1П}$ – відповідно корисно витрачена енергія на подрібнення певного об'єму руди базової і більшої крупності до заданого значення розміру; Q_{PM1}, Q_{PM2} – відповідно продуктивність млина при подрібненні базової і більш крупної руди; T_{P1}, T_{P2} – відповідно час подрібнення базової і руди більшої крупності.

Аналіз показав, що витрату куль на подрібнення руди з достатньо високою точністю можливо визначити лише непрямим прогностичним оцінюванням витраченої енергії за формулою

$$E_K = k_R \left(\frac{1}{d_{CG}} - \frac{1}{D_{CG}} \right) Q_\phi, \text{ кВт} \cdot \text{г}, \quad (31)$$

де k_R – енергетичний коефіцієнт, що характеризує міцність матеріалу і є незмінним для певного технологічного різнотипу руди або суміші руд; d_{CG}, D_{CG} – відповідно середні гармонічні зважені крупності подрібненого матеріалу і вихідної руди; Q_ϕ – кількість тон фактично подрібненої руди.

Функціональна схема непрямого прогностичного оцінювання корисно витраченої енергії на подрібнення встановленого класу руди показана на рис.15. В ній датчик середньозваженої крупності подрібненої руди використовується той же, що і для пісків класифікатора.

Залежність (31) дозволяє точно визначити кількість спрацьованого матеріалу куль, оскільки на неї не впливають непродуктивні витрати енергії. Коефіцієнт k_R для конкретного різнотипу руди або суміші руд є величиною незмінною, а кількість подрібненої руди точно вимірюється конвеєрними вагами. Між середніми гармонічними зваженими і середньозваженими розмірами руди в певних технологічних точках існує тісний кореляційний зв'язок, який наближається до функціонального. Тому, вимірюючи середньозважені крупності сипких матеріалів, можливо однозначно характеризувати їх середні гармонічні зважені розміри.

У виробничих умовах на одній із збагачувальних фабрик виконувалися дослідження відповідності середньозважених і середніх гармонічних зважених розмірів продуктів в окремих технологічних точках технологічної схеми. Встановлено, що між цими параметрами існує практично функціональний зв'язок.

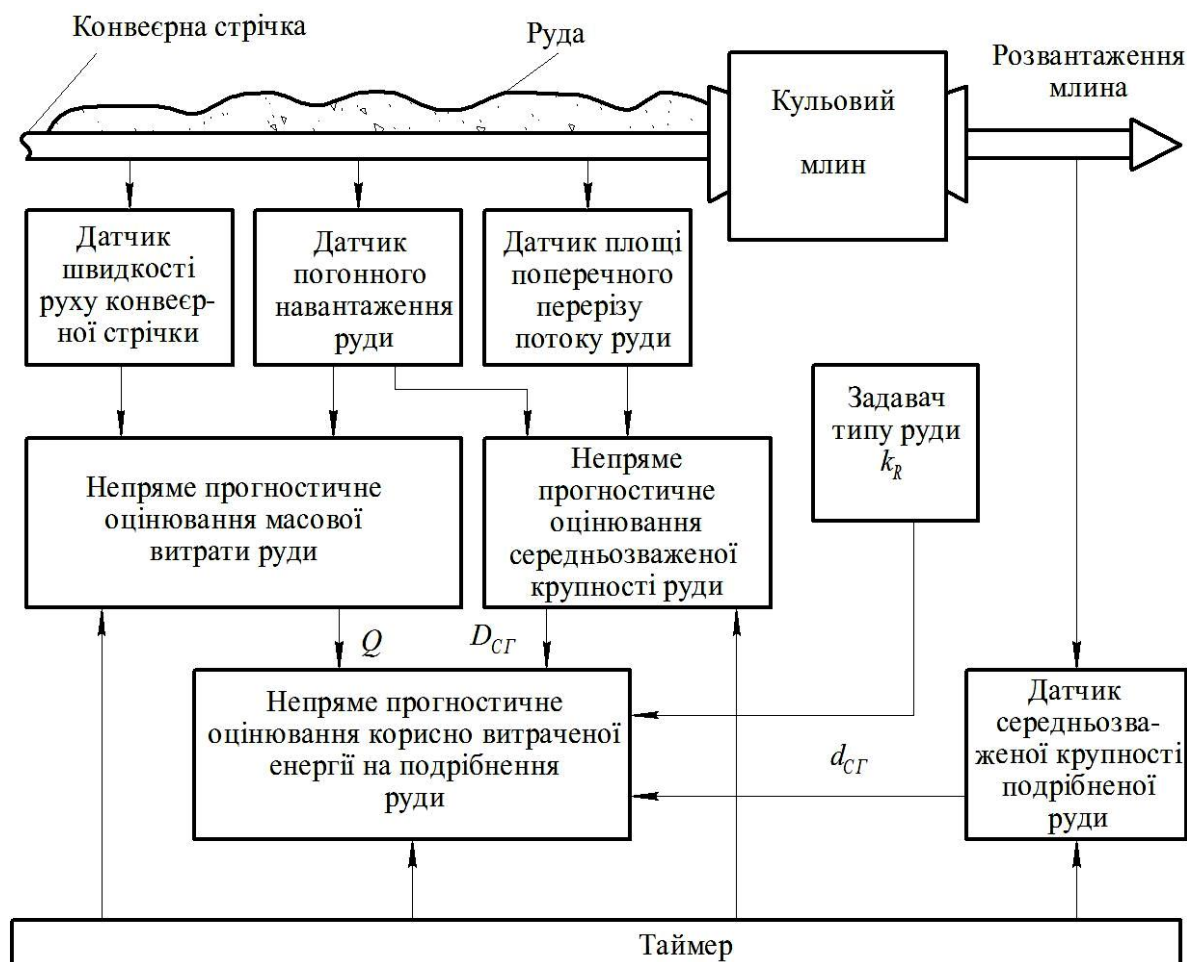


Рис.15. Функціональна схема непрямого прогностичного оцінювання корисно витраченої енергії на подрібнення встановленої маси руди в межах розробленої методології

Оперативне оцінювання в'язкості пульпи при енергоефективному інваріантному керуванні кульовим подрібненням руд можливо здійснити за запропонованою залежністю

$$l_T = d_q \left[\sqrt[3]{\frac{\pi}{6} \cdot \frac{(\delta_T - \delta_B)}{(\gamma_{II} - \delta_B)}} - 1 \right], \quad (32)$$

де l_T – відстань між сферичними частками d_q твердого.

Дана математична модель дозволяє оцінювати в'язкість пульпи за параметром l_T . Чим менше l_T , тим більша в'язкість пульпи. Залежність (32) при використанні необхідно «адаптувати» до конкретних технологічних умов і матеріалу, який подрібнюється. Вплив температури можливо врахувати за формулою Ж.Пуазейля.

В процесі дослідження отримана також математична модель руху пульпи вздовж барабана млина у вигляді

$$d[d\varepsilon^2 + 3,51g(1-\varepsilon)L]w_0^2 + 299,25g(1-\varepsilon)^2Lv_0 - 2gd^2\varepsilon^3h_{II} = 0, \quad (33)$$

де d – середньозважена крупність подрібненої руди; ε – параметр, який при полідисперсному кульовому завантаженні складає 0,38; L – довжина барабана млина; w_0 – фіктивна швидкість руху пульпи, що дорівнює $w_0 = w \cdot \varepsilon$, w – дійсна швидкість руху пульпи вздовж барабана млина; v – кінематичний коефіцієнт в'язкості пульпи; h_{II} – перевищення верхньої відмітки барабана над нижньою.

Математична модель (33) дозволяє при різних в'язкостях пульпи ν , які при подрібненні руди до середньозваженої крупності d залежать від її густини, визначати швидкість пересування рідкого в барабані кульового млина, тобто час подрібнення твердого.

Концентрація крупних шматків твердого в пульпі є мірою недовантаження, номінального завантаження та перевантаження кульового млина рудою. На концентрацію крупних шматків руди можливо впливати зміною вихідного живлення млина. Аналіз показав, що концентрацію крупного твердого найкраще визначати за енергетичними витратами при руйнуванні руди при певній енергії падаючої кулі. Тобто можливо оцінювати енергетичну ефективність руйнування руди безпосередньо в кульовому млині. У млинах з високим рівнем зливу швидкість падіння куль не змінюється, маса в певних перерізах також є практично незмінною. Це дозволяє вимірювати енергоефективність руйнування руди при її подрібненні на торці стержня, який проходить через футеровку і впирається на пружну пластину, кінці якої жорстко закріплені. Переміщення центра пластини при деформації визначає енергоефективність руйнування руди. При незмінних параметрах математичної моделі деформація пружної пластини залежить лише від об'єму зруйнованої руди. Даний перетворювач володіє інваріантністю до спрацювання стержня і нецентрального ударів, завдяки чому знижена відносна похибка вимірювання до 1,171%.

Для млинів з низьким рівнем зливу пульпи запропоновано двостержневий пристрій визначення енергоефективності руйнування руди. Один стержень є основним, на його торці руйнується руда, другий – допоміжний, у якого поперечний переріз значно менший. Математична модель такого пристрою має наступний вигляд

$$V_p = \frac{E}{k_{MP}k_1l_0}(S_2f_2^2 - S_1f_1^2), \quad (34)$$

де E – модуль Юнга (поздовжньої пружності); k_{MP} – коефіцієнт міцності руди; k_1 – коефіцієнт пропорційності; l_0 – повна довжина стержнів; S_1, S_2 – поперечні перерізи стержнів; f_1, f_2 – повні укорочення стержнів – основного і допоміжного.

З (34) видно, що об'єм зруйнованої руди не залежить від швидкості кулі. Він також не залежить від маси кулі. Тобто пристрій інваріантний до таких факторів. Тому даний перетворювач гарантує відносну похибку, яка не перевищує $\pm 2,5\%$.

У **п'ятому розділі** виконано теоретичне дослідження і розробку систем енергоефективного інваріантного керування подрібненням-класифікацією руд на основі непрямих прогностичних оцінок характеристик сировини та обладнання.

Розроблено метод побудови результуючої характеристики крупності різнорозмірного кульового завантаження млина і критерій оцінювання її наближення до ідеалізованої, а також подальше удосконалення кульового завантаження ущільненням його в окремих зонах зосередження молотильних тіл з наближено однією крупністю. Досягається збільшення продуктивності млина на 2,85% автоматичною компенсацією зносу футеровки молотильним середовищем. Розроблено систему автоматичної стабілізації оптимального складу і обсягу різнорозмірного кульового завантаження, що працює спільно з промисловим роботом і базується на розробленому енергетичному підході визначення спрацювання куль.

Для стабілізації густини пульпи в пісковому жолобі вперше створена квазіінваріантна слідкуюча система, яка має структурну схему зображену на рис.16, де $W_1(p)$ – передаточна функція автоматичного регулятора; $W_2(p)$ – результуюча передаточна функція, складена з передаточних функцій тиристорного перетворювача, виконавчого електродвигуна, редуктора, перетворювального механізму, регулювального органа і витратоміра води, $W_{zx}(p)=1/W_2(p)$. Вона гарантує високу точність стабілізації густини пульпи в пісковому жолобі і відповідає вимогам технологічного процесу і системи енергоефективного інваріантного керування подрібненням руд.

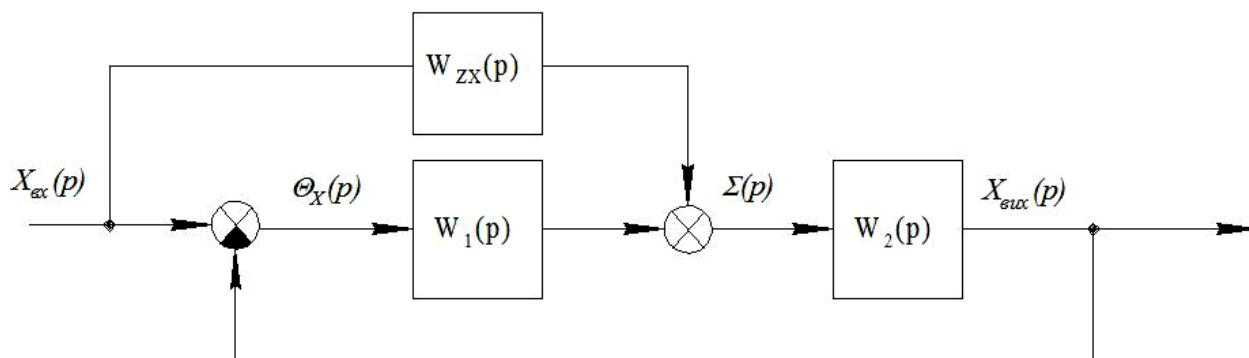


Рис.16. Структурна схема квазіінваріантної слідкуючої системи подачі води в пісковий жолоб односпірального класифікатора з впливом за уставкою

При зміні середньозваженої крупності вихідного живлення слід адекватно змінювати фіктивну швидкість переміщення пульпи вздовж барабана млина для забезпечення певного значення часу подрібнення руди. Це можливо забезпечити лише зміною в'язкості пульпи ν_{II} згідно з отриманим рівнянням

$$6,4049w_0^2 + 6770,7659\nu_{II}w_0 - 0,000563594 = 0. \quad (35)$$

Оскільки в'язкість пульпи l_T визначається параметром $K_{T/B}$

$$l_T = d_u \left[\sqrt[3]{\frac{\pi}{6} \cdot \left(1 + \frac{\delta_T}{\delta_B \cdot K_{T/B}} \right)} - 1 \right], \quad (36)$$

то відповідно необхідній в'язкості пульпи слід забезпечити цілком визначене співвідношення тверде/вода в барабані млина встановленням уставки. Для такого керування запропоновано інваріантний підхід, який реалізується розробленим алгоритмом і програмою, представленою на рис.17. Програма автоматично визначає уставки на рудну продуктивність і розрідження пульпи в млині в залежності від середньозваженої крупності вихідного живлення. АСК вищого ієрархічного рівня розрідженням пульпи у кульовому млині і завантаженням його рудою реалізовано на мікроконтролері MITSUBISHI FX2N-16MR-ES/UL. Система нижчого ієрархічного рівня розрідження пульпи в кульовому млині реалізує витрати води на поверхню руди і безпосередньо у кульовий млин, забезпечуючи інваріантність до пісового продукту.

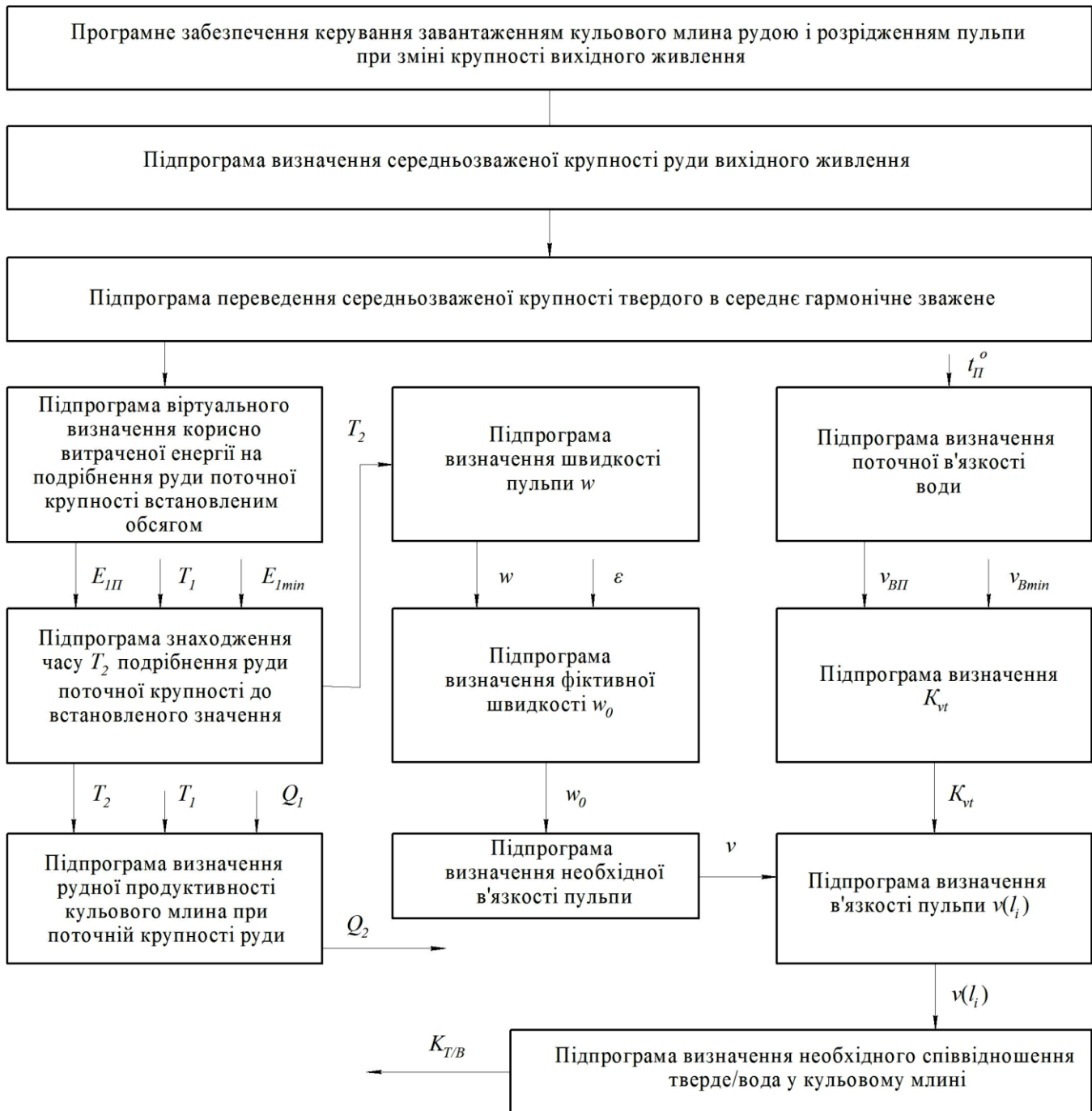


Рис.17. Структура програмного забезпечення визначення рудної продуктивності кульового млина, що працює в замкненому циклі з МОК, і розрідження пульпи в ньому при зміні крупності вихідного живлення

Зміна витрати руди у кульовий млин забезпечується АСК з ПІД-регулятором, параметри якого налагоджені за методом Куна. Результати керування високі. Однак поряд з подачею руди ще необхідно забезпечити енергоефективність її руйнування. Додаткове введення в систему двох камер змішування і перехід на керування концентрацією твердого різко погіршує показники АСК. Тому застосовано інваріантний прогностичний підхід з формуванням вмісту крупного твердого на вході млина таким чином, щоб в зоні контролю отримувати необхідну концентрацію крупного твердого.

На подрібнення руди суттєво впливають і діючі перешкоди – зміна характеристик вихідного живлення, можливе прослизання кульового завантаження відносно футеровки, незмінність обертів барабана млина при спрацюванні футеровки. Для компенсації їх впливу запропонована АСК інваріантного керування за середньозваженою крупністю твердого в розвантаженні кульового млина. Вона покращує якість подрібнення руди і збільшує продуктивність за готовим продуктом.

Для передачі сигналів крупності пісків, крупності розвантаження млина та енергоефективності руйнування руди запропоновано радіометод, який в нерухомій радіоприймальній частині містить автоматичний регулятор, систему циклового керування, що узгоджує роботу рухомої і нерухомої частин, де перед кожним актом передачі інформації з оберткової частини на нерухому автоматично встановлюється заданий режим підсилення, що гарантує високу точність передачі вимірюваних даних.

Функціональна схема розробленої АСК розділенням твердого в класификаторі приведена на рис.18. В ній використані всі динамічні елементи, що створюють передаточну функцію $W_2(p)$ (рис.16). Перехідний процес АСК з ПІ-регулятором з передаточною функцією $W_p(p) = \left(5 + \frac{1}{0.05p}\right)$, отриманий в середовищі MathCAD, забезпечує час регулювання 0,1 с, а максимальне перегулювання – 5%. Запаси стійкості АСК відповідають вимогам. Система з такими характеристиками відповідає вимогам технологічного процесу, забезпечує якісне розділення твердого та підвищує ефективність класифікації на 19,4%.

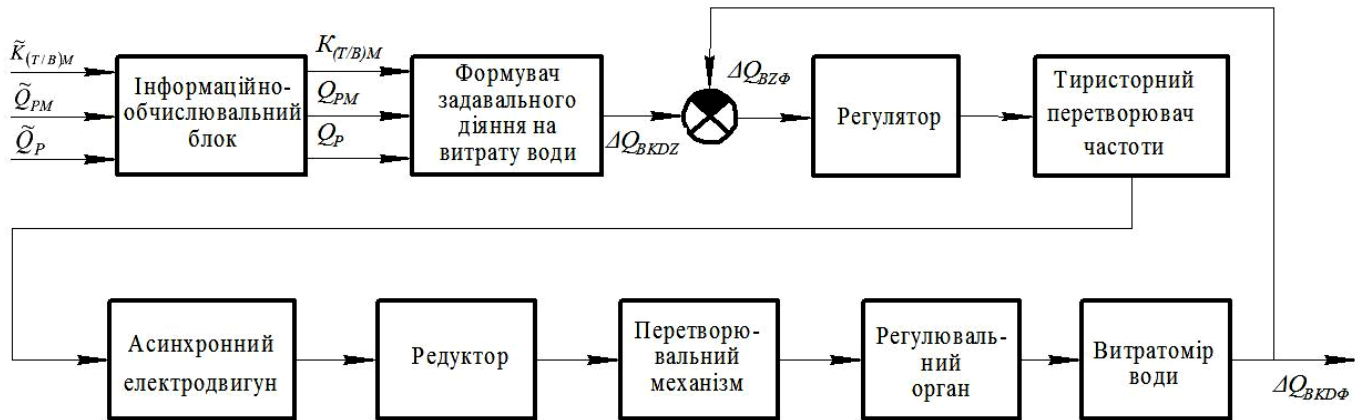


Рис.18. Функціональна схема АСК розділенням твердого в МОК

У шостому розділі виконані експериментальні дослідження та практична реалізація енергоефективного інваріантного керування подрібненням-класифікацією руд на основі непрямих прогностичних оцінок характеристик сировини та обладнання.

Перш за все в межах створеної методології була розроблена методика експериментального випробування окремих вузлів і систем. Комплекс автоматизованих систем створювався на базі схеми композиції їх складових у АСК ТП першої стадії рудопідготовки, яка запропонована у розробленій методології. Тому досліджувалася як базова система комплексу, так і окремі його складові.

Експериментальними дослідженнями складових комплексу енергоефективного інваріантного керування подрібненням-класифікацією руд встановлено, що вимірювач середньозваженої крупності пісків і розвантаження кульового млина має

відносну похибку $\pm 2,91\%$, запропонований радіометод забезпечує передачу інформації з обертових частин на нерухомі практично без спотворень, енергоефективність подрібнення руди визначається з допустимими похибками $\pm 2,5\%$ та $\pm 1,76\%$ безпосередньо в кульовому млині, система автоматичної стабілізації розрідження пісків гарантовано забезпечує похибку в межах $\pm 2,95\%$, система автоматичної стабілізації складу і обсягу оптимального кульового завантаження різнорозмірних куль працює в межах 100% співпадіння молоткових одиниць, а система керування класифікатором гарантовано забезпечує розділення розвантаження кульового млина на злив і піски за заданою крупністю твердого, що відповідає вимогам технологічного процесу.

Створена на підставі результатів виконаних досліджень базова складова комплексу енергоефективного інваріантного керування подрібненням-класифікацією руд дозволяє відповідно до середньозваженої крупності рудного живлення аналітично визначати і забезпечувати виконання уставок на витрату руди в млин і розрідження пульпи в барабані, а також, залежності від середньозваженої крупності розвантаження технологічного агрегату, керувати розрідженням пульпи, чим досягається інваріантність до спрацювання футеровки і можливого прослизання кульового завантаження. Перехідні процеси в базовій системі показані на рис.19. З рис.19 слідує, що система достатньо точно відпрацьовує створені на її вході уставки як за рудною продуктивністю, так і розрідженням пульпи в усьому діапазоні їх зміни. Система має високі якісні показники стосовно точності і швидкодії, які розглянуті раніше.

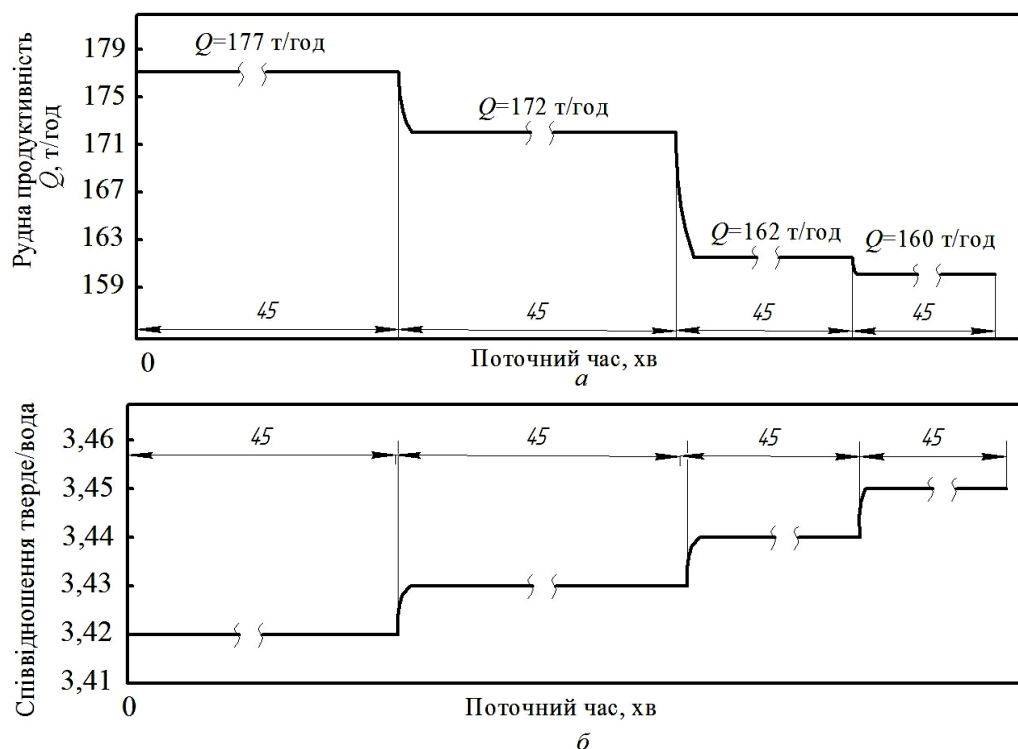


Рис.19. Перехідні процеси в системі енергоефективного інваріантного керування подрібненням-класифікацією руд на основі непрямих прогностичних оцінок характеристик сировини та обладнання за рудною продуктивністю (а) і співвідношенням тверде/вода (б)

Розроблений комплекс енергоефективного інваріантного керування подрібненням-класифікацією руд виконаний на серійних комплектуючих елементах, складається з блоків, які легко монтуються в умовах збагачувальних фабрик, практично не потребують налагодження і обслуговування у виробничих умовах та спеціальної підготовки персоналу, що гарантує його високу ефективність. При використанні комплексу річний економічний ефект очікується в розмірі 12020,27 тис.грн. в межах однієї збагачувальної фабрики.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

Дисертація є завершеною науковою роботою, в якій вирішена актуальна наукова проблема, яка полягає у розробленні нової методології керування циклом подрібнення руди кульовим млином в першій стадії, переведені автоматизованого керування подрібненням руди на якісно вищий рівень шляхом реалізації прогресивних ідей організації керуючих систем на основі нових або вдосконалених математичних моделей і встановлених залежностей для даної сировини, обладнання, методів і систем інваріантного енергоефективного автоматизованого керування процесами в умовах залізрудних збагачувальних фабрик, підходів і засобів оцінювання основних технологічних параметрів. В реалізації керування подрібненням-класифікацією руд веде місце, охоплюючи 23 процеси, займає інваріантний метод. Комплекс розроблених в роботі систем реалізує АСК ТП першої стадії рудопідготовки, до якого входять 9 інваріантних АСК.

Основні наукові й практичні результати роботи можуть бути узагальнені в таких висновках:

1. Встановлено, що подрібнення сировини в перших стадіях рудозбагачувальних фабрик здебільшого відбувається за умов не оптимально змішаних технологічних різнотипів руди, нераціональної структури і обсягу кульового завантаження, недовантаження технологічних агрегатів на 10...15%, а інколи і на 35...40% від гранично можливого рівня в наслідок недосконалості автоматизованих систем керування, що приводить до зниження продуктивності, значних енергетичних і матеріальних перевитрат і робить кінцеву продукцію підприємства – залізрудний концентрат і вироби з нього неконкурентоспроможними на світовому ринку.

2. Показано, що автоматизоване інваріантне керування подрібненням-класифікацією руди певних технологічних різнотипів на основі непрямих прогностичних оцінок корисно витраченої енергії на подрібнення сировини, в'язкості пульпи в технологічних агрегатах і об'єму пісків у міжвитковому просторі спіралі класифікатора забезпечує енергоефективне подрібнення руди, оптимальну продуктивність за готовим продуктом та підвищену якість класифікації подрібненого матеріалу.

3. Теоретично доведено, що енергоефективність подрібнення сировини у кульовому млині з боку молотного середовища забезпечується оптимізацією спрацювання куль і футеровки та автоматичною стабілізацією оптимального кульового завантаження в процесі роботи, що дозволяє завдяки наближенню реальної

характеристики крупності кульового завантаження до ідеалізованої зменшити витрати куль і футеровки та збільшити продуктивність технологічного агрегату.

4. Обґрунтовано, що параметри пісків, що знаходяться між двома витками спіралі при сходженні через пісковий поріг класифікатора, однозначно характеризують миттєву масову витрату твердого і через отримані математичні залежності дозволяють сформулювати оцінку циркулюючого навантаження та на даній основі побудувати квазіінваріантну слідкуючу систему стабілізації розрідження пульпи в пісковому жолобі класифікатора і за рахунок цього підвищити якість подрібнення руди в кульовому млині.

5. Вперше розроблено метод автоматизованого керування розділенням подрібненої руди з розвантаження кульового млина на основі визначення усталеного значення в'язкості пульпи в зоні розділення твердого та відповідної до неї обраною константою співвідношення тверде/вода в односпіральному класифікаторі, осереднених впродовж часу руху пульпи через барабан млина співвідношень тверде/вода в ньому та масових витрат руди в млин і пісків класифікатора, який дозволяє стабілізувати вихід готового продукту на необхідному рівні та збільшити його на 13,2%.

6. Удосконалено математичну модель сходження пісків через поріг механічного односпірального класифікатора на основі математичного опису їх стереометрії, яка забезпечує визначення миттєвих значень витрат їх об'єму та зменшення похибки вимірювання цього параметру до $\pm 2,5\%$, що дозволяє здійснити автоматичну стабілізацію розрідження пісків на рівні вимог технологічного процесу за точністю.

7. Удосконалено структуру автоматизованого ієрархічного керування рудною продуктивністю кульового млина і співвідношенням тверде/вода в ньому при зміні крупності вхідного живлення шляхом застосування запропонованих алгоритму і програми на основі оцінювання базових показників подрібнення руди, корисно витраченої енергії на подрібнення встановленої кількості руди, швидкості руху пульпи, в'язкості пульпи та в'язкості води і додаткової її витрати в технологічний агрегат, що забезпечує швидке осереднення пульпи за крупністю твердого і розрідженням, в результаті чого покращується енергоефективність та зростає продуктивність подрібнення сировини за готовим продуктом відповідно на 12,5% та 10...15%.

8. Вперше розроблено математичну модель оперативного оцінювання в'язкості пульпи в потоках, яка базується на пропорційності цієї характеристики коефіцієнту в'язкості, що визначається експериментально для конкретної сировини, середньозважених крупності твердого і складеному параметру, залежному від густини твердого, води і співвідношення тверде/вода, яка дозволяє реалізувати автоматизоване керування кульовим млином і механічним односпіральним класифікатором з врахуванням стану технологічних агрегатів.

9. Вперше розроблено метод непрямого автоматичного визначення енергоефективності руйнування руди безпосередньо в барабані кульового млина за зруйнованим об'ємом на основі вимірювання змінних повних укорочень основного вимірювального стрижня, на внутрішньому торці якого руйнується падаючою молотковою кулею руда, та допоміжного, що деформується лише під ударом кулі, які ідентифікують зруйнований об'єм крупного матеріалу з похибкою до $\pm 2,5\%$, що є параметром, інваріантним до зміни швидкості руху куль, їх маси і товщини

футеровки, який дозволяє здійснити автоматичне керування енергоефективним подрібненням руди з економією енергетичних і матеріальних ресурсів.

10. Набув подальшого розвитку підхід щодо автоматизованого визначення середньозваженої крупності пісків класифікатора і розвантаження кульового млина за швидкістю зміни об'єму твердого в робочому магнітному полі магнітоелектричної системи, який полягає у встановленні її в конструктивні елементи цих технологічних агрегатів, що взаємодіють з незмінним вмістом твердого, мають незмінну швидкість переміщення, та передбачає здійснення корекції вмісту магнітного заліза в руді, що дозволяє зменшити відносну похибку вимірювання параметра до $\pm 2,91\%$.

11. Запропоновані у роботі методи прогнозування, непрямого прогностичного оцінювання параметрів та енергоефективного інваріантного керування процесами рудопідготовки в першій стадії подрібнення руди показали, що системи, створені на їх базі і об'єднанні в керуючий комплекс, відповідають вимогам технології і їх застосування на рудозбагачувальних фабриках дозволяє підвищити точність керування, за даними експертів зменшити витрати куль на 25%, футеровки – на 3,125% та підвищити рудну продуктивність млина до 34,35%. Завдяки цьому обсяг випуску залізорудного концентрату може зрости до 12,35%, а його собівартість за оцінкою експертів зменшиться на 10...15%. При використанні комплексу на збагачувальній фабриці з продуктивністю за концентратом 4505,33 тис. тон річний економічний ефект очікується в розмірі 12020,27 тис. грн. Окремі результати дисертації використовуються у навчальному процесі ЦНТУ (Центральноукраїнського національного технічного університету).

СПИСОК ОСНОВНИХ ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

*Наукові праці, в яких містяться
основні наукові результати дисертації*

Монографії

1. Кондратець В.О., Сербул О.М., Мацуї А.М. Автоматизація процесів керування розрідженням пульпи при подрібненні руди барабанными млинами. Кіровоград: КОД, 2013. 368 с.

2. Kondratets V., Matsui A., Abashina A. Virtual assessment of the state of the optimal ball load of the mill grinding ore dressing plants. Modernization and engineering development of resource-saving technologies in mineral mining and processing. Petrosani, Romania: UNIVERSITAS Publishing. 2019. P. 163–185 (*розділ колективної монографії опублікованої в країнах ЄС*).

3. Kondratets V., Matsui A., Pikilniak A., Artiukhov A. The study of ore breakage in ball mill to assess the energy efficiency of its grinding. Energy- and resource-saving technologies of developing the raw-material base of mining regions. Petrosani, Romania: UNIVERSITAS Publishing. 2021. P. 370–385 (*розділ колективної монографії опублікованої в країнах ЄС*).

Публікації у фахових виданнях

4. Мацуй А.М., Кондратець В.О. Дослідження нелінійної системи автоматичного управління подачею води у кульовий млин, що подрібнює піски класифікатора. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. 2013. №26. С. 161–168.

5. Кондратець В.О., Мацуй А.М. Розширення можливості застосування формули Качана для визначення швидкості стісненого падіння мінеральних зерен. *Вестник ХНТУ*. 2015. №3. С. 138–144.

6. Мацуй А.М. Математичне моделювання формування піскового тіла у міжвитковому просторі механічного односпірального класифікатора. *Автоматизація технологічних і бізнес-процесів*. 2015. Вип. 7. С. 9–17.

7. Кондратець В.О., Мацуй А.М. Моделювання розподілу дробленої руди вздовж конвеєрної стрічки при розвантаженні бункерів. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2015. №3. С. 42–50.

8. Кондратець В.О., Мацуй А.М. Моделювання закономірностей розташування матеріалу вздовж нижньої частини піскового тіла механічного спірального класифікатора. *Автоматизація технологічних і бізнес-процесів*. 2016. №8. С. 84–92.

9. Мацуй А.М. Моделювання закономірностей розташування матеріалу вздовж верхньої частини піскового тіла механічного односпірального класифікатора. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2016. №1 (56). С. 154–162.

10. Мацуй А.М., Кондратець В.О. Дослідження втрат точності вимірювання об'єму піскового тіла при експлуатаційному спрацюванні спіралі класифікатора. *Методи та прилади контролю якості*. 2016. №2 (37). С. 30–37.

11. Мацуй А.М., Кондратець В.О. Моделювання закономірностей сходження пісків у механічному односпіральному класифікаторі. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2017. №1 (60). С. 206–214.

12. Кондратець В.О., Мацуй А.М. Математичне моделювання процесів адаптивної квазіінваріантної слідкуючої системи стабілізації розрідження пісків односпірального класифікатора. *Проблеми інформаційних технологій*. 2017. №1(21). С. 116–124.

13. Мацуй А.М. Моделювання розрідженості пульпи у пісковому жолобі односпірального класифікатора при незмінній витраті води. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2017. №3 (62). Т.1. С. 186–191.

14. Мацуй А.М., Кондратець В.О. Теоретичне і експериментальне дослідження магнітоелектричної системи, що сприймає крупність пісків односпірального класифікатора. *Електротехніка та електроенергетика*. 2017. №2. С. 38–47.

15. Кондратець В.О., Мацуй А.М. Оптимізація прогнозування розрідження пульпи у кульових млинах при змінній витраті води в піски класифікатора. *Вісник Житомирського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2017. №1. С. 171–181.

16. Мацуй А.М., Кондратець В.О. Аналіз роботи кульового млина першої стадії подрібнення руди як об'єкта оптимального керування. Вчені записки *Таврійського національного університету ім. В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2018. Том 29 (68). №4. С. 180–188.

17. Matsui A., Kondratets V. Mathematical model of operative estimation of viscosity of a pulp in a ball mill at grinding an ore. *Вісник Тернопільського національного технічного університету*. 2018. №3 (91). С. 115–124.

18. Мацуї А.М., Кондратець В.О. Теоретичне дослідження системної стабілізації підсилювальних властивостей радіоканалу для агрегатів з обертовими частинами. *Вісник Житомирського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2018. №1. (81) С. 191–201.

19. Мацуї А.М., Кондратець В.О. Математичне моделювання автоматичного контролю енергоефективності подрібнення руди кульовими млинами при спрацюванні футеровки. *Проблеми інформаційних технологій*. 2018. №23. С. 111–117.

20. Мацуї А.М., Кондратець В.О. Радіоканал для передачі інформації з обертючих частин агрегатів на нерухомі. *Вчені записки Таврійського національного університету ім. В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2018. Том 29 (68). №2. С. 64–72.

21. Мацуї А.М., Кондратець В.О. Базова математична модель оперативного оцінювання в'язкості пульпи при подрібненні руди кульовими млинами. *Математичне моделювання*. 2018. №2 (39). С. 135–146.

22. Мацуї А.М. Математичне моделювання характеристик різномірного кульового навантаження млина першої стадії подрібнення вихідної руди. *Вісник КНУ*. 2018. Вип. 47. С. 8–14.

23. Мацуї А.М. Теоретичне дослідження ідентифікації середньозваженої крупності розвантаження кульового млина і пісків односпірального класифікатора. *Гірничий вісник*. 2018. Вип. 103. С. 197–203.

24. Мацуї А.М., Кондратець В.О. Математичне моделювання зв'язків показників процесу подрібнення з параметрами концентрації крупних фракцій руди. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2018. №3 (66). Т.2. С. 266–274.

25. Мацуї А.М., Кондратець В.О. Моделювання отримання і оцінювання результуючих характеристик кульового навантаження рудорозмельного млина першої стадії. *Математичне моделювання*. 2019. №1. С. 57–68.

26. Мацуї А.М., Кондратець В.О., Абашина А.А. Системний аналіз роботи механічного односпірального класифікатора як об'єкта керування. *Вісник КНУ*. 2019. Вип. 48. С. 8–13.

27. Мацуї А.М., Кондратець В.О., Абашина А.А. Підвищення енергетичної ефективності кульового завантаження циклу «млин-класифікатор» в першій стадії рудопідготовки. *Вісник ХНТУ*. 2019. №2 (69). С. 86–95.

Статті у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз

28. Matsui A. The features of the specific ore types grinding automated control in the ore preparation process. *Metallurgical and Mining Industry*. 2015. №1. P. 18–21 (SCOPUS).

29. Кондратець В.О., Мацуї А.М. Віртуальне визначення характеристик потоку в піщовому жолобі односпіральних класифікаторів. *Радіоелектроніка. Інформатика. Управління*. 2017. №1. С. 24–32 (Web of Science).

30. Kondratets V.A., Matsui A.N., Surtel W. et. al. Research and neutralizing of spiral deterioration impact to the accuracy of measuring of the volume of sand classifier. *Proceeding of SPIE. Photonics Applications in Astronomy, Communications,*

Industry, and High Energy Physics Experiments. 2017. № 1044565. doi: 10.1117/12.2280955 (SCOPUS та Web of Science).

31. Kondratets V., Matsui A., Yatsun V., Lichuk M. Identification of energy efficiency of ore grinding and the liner wear by a threephase motion of balls in a mill. *Eastern-european journal of enterprise technologies*. 2019. №3/5(99). P. 21–28 (SCOPUS).

Патенти

32. Спосіб визначення продуктивності спірального класифікатора по пісках: пат. 107479 Україна: МПК В03В 13/00. №u201511828; заявл. 30.11.15; опубл. 10.06.16, Бюл. № 11. 5 с. (*патент на корисну модель*).

33. Спосіб автоматичної стабілізації розрідження пульпи в млинах з циркулюючим навантаженням: пат. 111027 Україна: МПК В03В 11/00, В02С 25/00. №u201604986; заявл. 04.05.16; опубл. 25.10.16, Бюл. №20. 6 с. (*патент на корисну модель*).

34. Конвеєрні ваги: пат. 113083 Україна: МПК G01G 11/00. №u201607168; заявл. 02.07.16; опубл. 10.01.17, Бюл. № 1. 7 с. (*патент на корисну модель*).

35. Спосіб визначення продуктивності спірального класифікатора по пісках: пат. 114305 Україна: МПК В03В 13/00. №u201607832; заявл. 15.07.16; опубл. 10.03.17, Бюл. № 5. 6 с. (*патент на корисну модель*).

36. Конвеєрні ваги для сипкого матеріалу зі змінними характеристиками: пат. 118205 Україна: МПК G01G 11/00. №u201701647; заявл. 20.02.17; опубл. 25.07.17, Бюл. № 14. 8 с. (*патент на корисну модель*).

37. Спосіб визначення продуктивності спірального класифікатора по пісках при експлуатаційному спрацюванні робочих елементів спіралі: пат. 121446 Україна: МПК В03В 13/00. №u201704916; заявл. 22.05.17; опубл. 11.12.17, Бюл. № 23. 7 с. (*патент на корисну модель*).

38. Спосіб ідентифікації завантаження кульового млина рудою в умовах експлуатаційного спрацювання футеровки: пат. 122858 Україна: МПК В02С 25/00. №u201708827; заявл. 04.09.17; опубл. 25.01.18, Бюл. № 2. 9 с. (*патент на корисну модель*).

39. Спосіб визначення крупності пісків механічного односпірального класифікатора: пат. 121251 Україна: МПК G01N 15/10, G01N 27/74. №a201802604; заявл. 15.03.18; опубл. 27.04.20, Бюл. №8. 6 с. (*патент на винахід*).

40. Пристрій вимірювання середньозваженого розміру пісків з феромагнітними включеннями в механічному односпіральному класифікаторі: пат. 121594 Україна: МПК В02С 25/00, G01N 27/72, G01N 15/02. №a201802955; заявл. 25.06.18; опубл. 25.06.20, Бюл. №12. 6 с. (*патент на винахід*).

41. Спосіб визначення крупності дробленого матеріалу на вході кульового млина з циркулюючим навантаженням: пат. 121590 Україна: МПК В02С 25/00, В02С 17/00. №a201802591; заявл. 10.07.18; опубл. 25.06.20, Бюл. №12. 5 с. (*патент на винахід*).

42. Спосіб визначення середньозваженої крупності руди в технологічному потоці: пат. 143234 Україна: МПК В02С 25/00, G01N 15/00, G01G 11/00. №a201802601; заявл. 15.03.18; опубл. 27.07.20, Бюл. №14. 5 с. (*патент на корисну модель*).

43. Спосіб автоматичного визначення кульового завантаження барабанних млинів: пат. 122994 Україна: МПК В02С 17/18, В02С 25/00, F23K 1/02, G01L 3/26. №a201909799; заявл. 13.09.19; опубл. 28.01.21, Бюл. №4. 7 с. (*патент на винахід*).

*Наукові праці, які засвідчують
апробацію матеріалів дисертації*

44. Кондратець В.О., Мацуї А.М. Отримання технологічних параметрів керованого об'єкта методами інформаційних технологій. *Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні (ІТММ-2016)*: матеріали Міжн. наук.-техн. конф. (Дніпропетровськ, 29–31 бер. 2016 р.). Дніпропетровськ, 2016. С. 21.

45. Кондратець В.О., Мацуї А.М. Математичне моделювання взаємодії спіралі механічного класифікатора з пульпою. *Проблеми математичного моделювання*: матеріали Всеукр. наук.-метод. конф. (Дніпродзержинськ, 25–27 трав. 2016 р.). Дніпродзержинськ, 2016. С. 39–43.

46. Мацуї А.М. Підхід до вивчення нерівномірності розташування пісків у міжвитковому просторі спіралі механічного класифікатора. *Розвиток промисловості та суспільства*: матеріали Міжн. наук.-техн. конф. (Кривий Ріг, 25–27 трав. 2016 р.). Кривий Ріг, 2016. Том 1. С. 306.

47. Кондратець В.О., Мацуї А.М. Дослідження рівномірного руху неньютоновських рідин у нахилених потоках. *Розвиток промисловості та суспільства*: матеріали Міжн. наук.-техн. конф. (Кривий Ріг, 25–27 травня, 2016 р.). Кривий Ріг, 2016. Том 1. С. 308.

48. Кондратець В.О., Мацуї А.М. Дослідження можливості застосування адаптивного фільтра Калмана-Б'юсі при вимірюванні рудного потоку конвеєрними вагами. *Inzynieria i technologia. Teoretyczne i praktyczne aspekty rozwoju wspolczesnej nauki*: zbior artik. nauk. (Czestochowa, 29–30 черв. 2016 р.). Czestochowa, 2016. С. 10–16.

49. Matsui A.N., Kondratets V.A. A concept of the adaptive distributed control of optimum slurry dilution in a ball mill. *Inzynieria i technologia. Nowoczesne badania podstawowe i stosowane*: zbior artyk. nauk. konf. Miedz. nauk.-prakt. (Sopot, 30–31 лип. 2016 р.). Sopot, 2016. С. 25–31.

50. Мацуї А.М. Теоретичне дослідження формування піскового потоку у механічному односпіральному класифікаторі як керованому об'єкті. *Inzynieria i technologia. Badania podstawowe i stosowane: wyzwania i wyniki*. (Zakopane, 30–31 серп. 2016 р.). Zakopane, 2016. С. 5–12.

51. Кондратець В.О., Мацуї А.М. Теоретичне дослідження впливу зносу спіралі на точність вимірювання об'єму піскового тіла класифікатора. *Контроль і управління в складних системах (КУСС-2016)*: тези допов. XIII Міжн. конф. (Вінниця, 3–6 жовт. 2016 р.). Вінниця, 2016. С. 143–145.

52. Мацуї А.М., Кондратець В.О. Розробка математичних моделей конічних бункерів для дослідження точнісних характеристик їх технологічних параметрів. *Проблеми математичного моделювання*: матеріали Всеукр. наук.-метод. конф. (Кам'янське, 24–26 трав. 2017 р.). Кам'янське, 2017. С. 36–39.

53. Мацуї А.М., Кондратець В.О. Слідуюча система автоматичної стабілізації густини пульпи у пісковому жолобі механічного односпірального класифікатора. *Розвиток промисловості та суспільства*: матеріали Міжн. наук.-техн. конф. (Кривий Ріг, 24–26 трав. 2017 р.). Кривий Ріг, 2017. С. 378.

54. Мацуї А.М. Моделювання розрідженості пульпи у пісковому жолобі односпірального класифікатора при незмінній витраті води. *Міжнародна конференція з математичного моделювання (МКММ-2017)*: матеріали XVIII

Межд. конф. по матем. модел., посв. 100-летию со дня рожд. акад. Ю.А. Митропольского (Херсон, 18–22 сент. 2017 г.). Херсон, 2017. С. 75–76.

55. Мацуй А.М., Кондратець В.О. Автоматичне формування задавальних діянь при зміні крупності руди, що переробляється кульовими млинами. *Автоматика та комп'ютерно-інтегровані технології у промисловості, телекомунікаціях, енергетиці та транспорті*: матеріали Всеукр. наук.-практ. інтерн.-конф. (Кропивницький, 16–17 лист. 2017 р.). Кропивницький, 2017. С. 21–23.

56. Мацуй А.М. Алгоритми визначення середньозваженого розміру руди в процесах подрібнення-класифікації. *Інформаційна безпека та комп'ютерні технології (INFOSEC & COMPTech)*: матеріали III Міжн. наук.-практ. конф. (Кропивницький, 19–20 квіт. 2018 р.). Кропивницький, 2018. С. 230–233.

57. Мацуй А.М., Кондратець В.О. Контроль енергетичної ефективності руйнування руди кульовим млином. *The development of technical sciences: problems and solutions: proceedings of the conf.* (Brno, 27–28 Apr. 2018). Brno, 2018. С. 115–118.

58. Мацуй А.М., Кондратець В.О. Доцільність роздільного подрібнення і забезпечення автоматичного розпізнавання технологічних різнотипів руд конкретного родовища. *Розвиток промисловості та суспільства*: матеріали Міжн. наук.-техн. конф. (Кривий Ріг, 23–25 трав. 2018 р.). Кривий Ріг, 2018. С. 135.

59. Мацуй А.М., Кондратець В.О. Математичне моделювання вихідного сигналу перетворювача крупності пісків механічного односпірального класифікатора. *Проблеми математичного моделювання*: матеріали Всеукр. наук.-метод. конф. (Кам'янське, 23–25 трав. 2018 р.). Кам'янське, 2018. С. 92–94.

60. Мацуй А.М., Кондратець В.О. Реалізація і забезпечення автоматичного контролю енергоефективності подрібнення руди кульовими млинами. *Science, research, development technics and technology: monogr. rokonf.* (Berlin, 30–31 серп. 2018 р.). Berlin, 2018. С. 28–35.

61. Мацуй А.М., Кондратець В.О. Теоретичне дослідження зв'язків показників процесу подрібнення з параметрами концентрації крупних фракцій руди. *Міжнародна конференція з математичного моделювання (МКММ-2018)*: матеріали XIX Міжн. конф., присвяч. 250-річчю Ж.Б.Ж. Фур'є (Херсон, 17–21 вер. 2018 р.). Херсон, 2018. С. 76.

62. Мацуй А.М., Кондратець В.О. Віртуальне оцінювання стану оптимального кульового навантаження млина, що подрібнює руду збагачувальних фабрик. *Контроль і управління в складних системах (КУСС-2018)*: тези допов. XIV Міжн. конф. (Вінниця, 15–17 жовт. 2018 р.). Вінниця, 2018. С. 65.

63. Matsui A.N., Kondratets V.A. Analysis of the operation of a mechanical single-spiral classifier as a control object. *Innovative development of resource-saving technologies of mineral mining and processing: proceeding Intern. scient. and techn. internet conf.* (Petrosani, Romania, 14 Dec. 2018). Petrosani, 2018. P. 165–168.

64. Matsui A.N., Abashina A.A. Features of modern industrial robots. *Third International Conference of European Academy of Science: Proceedings.* (Bonn, 20–30 груд. 2018 р.). Bonn, 2018. P. 33–34.

65. Мацуй А.М., Кондратець В.О., Абашина А.А. Теоретичне дослідження первинного перетворювача засобу автоматичного контролю енергоефективності

руйнування руди кульовими млинами. *Science, research, development #13. Technics and technology*: monogr. rokonf. (Berlin, 30–31 січ. 2019 р.). Berlin, 2019. С. 75–85.

66. Мацуї А.М., Кондратець В.О., Абашина А.А. Теоретичне дослідження інваріантності первинного перетворювача енергоефективності подрібнення руди до впливу експлуатаційних факторів. *Science, research, development #14. Technics and technology*: monogr. rokonf. (London, 27–28 лют. 2019 р.). London, 2019. С. 9–18.

67. Мацуї А.М., Кондратець В.О., Абашина А.А. Прогресивні інформаційні технології та організація сучасного виробництва молотильних куль і залізрудного концентрату. *Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні*: матеріали Міжн. наук.-техн. конф. (Дніпро, 26–28 бер. 2019 р.). Дніпро: Національна металургійна академія України, 2019. С. 32.

68. Мацуї А.М., Кондратець В.О., Абашина А.А. Реалізація структурних зв'язків технологічних параметрів в механічному односпіральному класифікаторі. *Розвиток промисловості та суспільства*: матеріали Міжн. наук.-техн. конф. (Кривий Ріг, 22–24 трав. 2019 р.). Кривий Ріг, 2019. С. 124.

69. Мацуї А.М., Кондратець В.О., Абашина А.А. Дослідження енергоефективності кульового завантаження млинів при подрібненні вихідної руди на збагачувальних фабриках. *Міжнародна конференція з математичного моделювання (МКММ-2019)*: матеріали XX Міжн. конф. (Херсон, 16–20 вер. 2019 р.). Херсон, 2019. С. 71.

70. Кондратець В.О., Мацуї А.М., Абашина А.А. Оптимальне кульове завантаження барабанних млинів віртуальним оцінюванням їх стану. *Перспективні напрямки інформаційних і комп'ютерних систем та мереж, комп'ютерно-інтегровані технології у промисловості, телекомунікаціях, енергетиці та транспорті*: матеріали Всеукр. наук.-практ. інтерн.-конф. (Кропивницький, 13–14 лист. 2019 р.). Кропивницький, 2019. С. 42–43.

71. Matsui A.N., Kondratets V.A., Abashina A.A. Loading device for ball mills with different sized grinding bodies. *Innovative development of resource-saving technologies of mineral mining and processing*. Proceeding 2nd Intern. scien. and techn. intern. conf. (Petrosani, Romania, 18 Nov. 2019). Petrosani, 2019. P. 150–152.

72. Мацуї А.М., Кондратець В.О., Абашина А.А. Обґрунтування вибору діаметра кулі перетворювача енергоефективності подрібнення руди в кульовому млині. *Прикладні науково-технічні дослідження*: матеріали IV Міжнар. наук.-практ. конф. (Івано-Франківськ, 1–3 квітн. 2020 р.). Івано-Франківськ, 2020. С. 106–108.

73. Мацуї А.М., Кондратець В.О., Абашина А.А. Математичне моделювання зв'язку середньогармонічної зваженої крупності та середньозваженої крупності в технологічних процесах рудопідготовки. *Проблеми математичного моделювання*: матеріали Всеукр. наук.-метод. конф. (Кам'янське, 25–28 трав. 2020 р.). Кам'янське, 2020. С. 68–70.

74. Kondratets V.A., Matsui A.N., Abashina A.A. Substantiation of the approach to increasing the accuracy of the information supply of the mechanical single-spiral classifier during crushing-classification of ore. *Innovative development of resource-saving technologies and sustainable use of natural resources*. Proceeding 3rd Intern. scien. and techn. conf. (Petrosani, Romania, 26 Oct. 2020). Petrosani, 2020. P. 155–158.

75. Matsui A., Kondratets V., Abashina A. Energy efficiency optimization of ore grinding by ball mills in a closed cycle with a single-spiral classifier. *Modeling, control*

and information technologies. Proceeding IV Intern. scien. and pract. conf. (Rivne, 5–7 Nov. 2020). Rivne, 2020. P. 96–99.

76. Мацуї А.М., Кондратець В.О., Абашина А.А. Віртуальне оцінювання стану оптимального кульового завантаження млина, що подрібнює руду збагачувальних фабрик. *Розвиток промисловості та суспільства: матеріали Міжн. наук.-техн. конф. (Кривий Ріг, 17–20 листопада, 2020 р.)*. Кривий Ріг, 2020. С. 252.

77. Мацуї А.М. Теоретичні основи інформаційно-вимірювальної системи оцінювання роботи кульових млинів з метою енергозбереження. *Проблеми використання інформаційних технологій в освіті, науці та промисловості: матеріали XV Міжнар. наук.-практ. конф. (Дніпро, 15–17 груд. 2020 р.)*. Дніпро, 2020. С. 142–148.

78. Kondratets V., Matsui A. Automatic indirect predictive estimation of the useful energy expended for grinding ore with ball mills. *Прикладні науково-технічні дослідження: матеріали V Міжнар. наук.-практ. конф. (Івано-Франківськ, 5–7 квітн. 2021 р.)*. Івано-Франківськ, 2021. С. 198–200.

*Наукові праці, які додатково відображають
наукові результати дисертації*

79. Кондратець В.А., Мацуї А.Н. Технологические предпосылки и экспериментальная основа создания средств идентификации характеристик измельчаемой руды. *Гірничий вісник*. 2015. Вип. 99. С. 35–41.

80. Кондратець В.О., Мацуї А.М. Теоретичне дослідження активного і пасивного сканування поверхні відкритих матеріальних потоків. *Гірничий вісник*. 2015. Вип.100. С. 52–57.

81. Мацуї А.М. Математичне моделювання взаємозв'язку конструктивних параметрів і факторів впливу на пульпу у механічному спіральному класифікаторі. *Вісник КрНУ ім. Михайла Остроградського*. 2015. Вип. 6 (95), Ч. 1. С. 67–73.

82. Мацуї А.М. Обґрунтування підходу математичного моделювання закономірностей розташування матеріалу вздовж піщового тіла спірального класифікатора. *Гірничий вісник*. 2016. Вип. 101. С. 93–98.

83. Кондратець В.О., Мацуї А.М. Математичне моделювання рівномірного руху пульпи у піщовому жолобі односпірального класифікатора. *Вісник Криворізького національного університету*. 2016. Вип.41. С. 6–12.

84. Кондратець В.О., Мацуї А.М. Метод автоматизованого керування подрібненням руди кульовим млином з оптимізацією динаміки розрідження пульпи. *Вісник КНУ*. 2016. Вип.42. С. 83–88.

85. Кондратець В.О., Мацуї А.М. Дослідження умов формування потоку пульпи у піщовому жолобі односпірального класифікатора. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ"*. 2016. Вип. 6 (1178). С. 24–30.

86. Кондратець В.О., Мацуї А.М. Сферична частинка твердого певного розміру як основа процесу моделювання розпушення гірських порід. *Математичне моделювання*. 2016. №2 (33). С. 55–59.

87. Мацуї А.М., Кондратець В.О. Моделювання формування піщового потоку у піщовому жолобі механічного односпірального класифікатора. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. 2016. Вип. 16. С. 53–59.

88. Кондратець В.О., Мацуї А.М. Моделювання формування піскового тіла механічного класифікатора в умовах спрацювання робочих елементів спіралі. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2016. №3 (58). С. 238–244.
89. Kondratets V.A., Matsui A.N. A concept of the top level automated system for adaptive control of slurry dilution in a ball mill. *Computer Science, Information Technology, Automation*. 2016. №2 (3). P. 26–30.
90. Кондратець В.О., Мацуї А.М. Система адаптивного керування розрідженням пульпи у кульовому млині першої стадії подрібнення руди. *East European Scientific Journal*. 2016. №7 (11). Vol. 2. P. 26–30.
91. Мацуї А.М., Кондратець В.О. Моделювання середньозваженої крупності твердого в завантаженні кульового млина рудою і пісками класифікатора. *Математичне моделювання*. 2017. №1 (36). С. 59–66.
92. Мацуї А.М., Кондратець В.О. Синтез квазіінваріантної слідкуючої системи стабілізації розрідження пульпи в пісковому жолобі односпірального класифікатора. *Вісник Криворізького національного університету*. 2017. Вип.45. С. 27–33.
93. Мацуї А.М., Кондратець В.О. Моделювання підходів подрібнення різнотипів руд конкретного родовища у кульових млинах замкненого циклу. *Математичне моделювання*. 2017. №2 (37). С. 43–49.
94. Мацуї А.М., Кондратець В.О. Математичне моделювання зв'язку об'єму і висоти сипкого матеріалу у промислових ємкостях. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ"*. 2017. № 6. С. 70–76.
95. Kondratets V.A., Matsui A.N. Mathematical modeling of concentration of coarse ore as a measure for possible overload of ball mill. *Computer Science, Information Technology, Automation*. 2018. №4 (1). P. 36–49.
96. Мацуї А.М., Кондратець В.О. Обґрунтування вторинного перетворювача системи контролю енергоефективності кульового подрібнення руди оптимізацією, аналізом, моделюванням. *Прикладні питання математичного моделювання*. 2018. №2. С. 81–95.
97. Kondratets V.A., Matsui A.N. Theoretical and experimental studies of an elastic plate as a means of identification of the energy-efficient fracturing of the ore. *Computer Science, Information Technology, Automation*. 2018. №4 (3). P. 12–26.

Особистий внесок автора в роботах, опублікованих у співавторстві: [1, 4, 33, 44, 49, 84, 89] обґрунтовано підхід автоматичної стабілізації розрідження пульпи в млинах; [2, 62, 67, 69, 72, 76] обґрунтовано підхід оцінювання стану оптимального кульового завантаження млина; [3, 31, 43, 57, 65, 66, 75, 96] досліджено контроль енергетичної ефективності подрібнення руди кульовими млинами; [5] визначено швидкість стисненого падіння мінеральних частинок у водному середовищі; [7, 52, 55] запропоновано моделі конічного бункера для сипких продуктів; [8, 68] досліджено формування і розташування пісків класифікатора у міжвитковому просторі; [10, 29, 45, 88] досліджено аналітичні залежності об'ємної витрати пульпи та швидкості її руху від висоти потоку; [11] встановлено залежності між параметрами піскового потоку і висотою пісків у міжвитковому просторі; [12, 53, 92] запропоновано квазіінваріантну слідкуючу систему для керування процесом розрідження; [14] обґрунтовано, що стан контрольованого об'єму матеріалу

найкраще оцінювати магнітним методом; [15, 25, 90] розроблено методику експериментального дослідження системи; [16, 60] обґрунтовано структуру заходів для оптимального керування кульовим млином; [17, 21, 74] отримано та досліджено математичну модель оперативного визначення в'язкості пульпи; [18, 20] досліджено роботу радіометоду при передачі інформації з обертових об'єктів на нерухомі; [19, 38] запропоновано математичну модель контролю параметрів млина при спрацюванні футеровки; [70, 71] досліджено підхід оцінювання стану оптимального кульового завантаження млина; [24, 80, 97] досліджено засіб ідентифікації рудного потоку за допомогою пружного перетворювача; [26, 27, 32] досліджено закономірності розташування пісків в міжвитковому просторі спіралі класифікатора та його роботи в цілому; [30, 37, 51, 63] отримано та досліджено аналітичні залежності об'ємної витрати пульпи від спрацювання спіралі класифікатора; [34, 36] досліджено конвеєрні ваги; [35, 39–41, 59] запропоновано способи та пристрій визначення крупності пісків класифікатора та твердого на вході млина; [42, 91, 95] створено математичну модель середньозваженої крупності живлення кульового млина; [47, 85] досліджено рух пульпи в пісковому жолобі класифікатора; [48] обґрунтовано використання фільтру Калмана-Б'юсі; [58, 93] доведено можливість і доцільність подрібнення окремого типу руд; [61, 79] обґрунтовано засоби ідентифікації характеристик подрібнюваної руди; [64] проведено аналіз роботи і використання промислових роботів; [73] моделювання зв'язку середньогармонічної зваженої крупності та середньозваженої крупності; [78] обґрунтовано підхід непрямого прогностичного оцінювання корисно витраченої енергії; [83, 87] отримано аналітичні залежності об'ємної витрати пульпи та швидкості її руху від висоти потоку; [86] отримано аналітичні залежності для визначення коефіцієнта розпушення твердого матеріалу.

АНОТАЦІЯ

Мацуй А.М. Методологічні засади енергоефективного інваріантного керування подрібненням-класифікацією руд на основі непрямих прогностичних оцінок характеристик сировини та обладнання. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – автоматизація процесів керування (технічні науки) (15 – Автоматизація та приладобудування). – Криворізький національний університет МОН України, Кривий Ріг, 2021.

Метою роботи є підвищення ефективності керування технологічним процесом рудопідготовки в першій стадії застосуванням нової розробленої методології. Вона базується на реалізації прогресивних ідей інваріантного керування, нових математичних моделей і встановлених залежностей для сировини і обладнання, методів і систем автоматичного керування, підходів і засобів оцінювання основних технологічних параметрів.

Запропоновано методи непрямого прогностичного оцінювання оптимального кульового завантаження млина, маси і кількості спрацьованих в процесі подрібнення руди куль, кількості різнорозмірних куль, які необхідно довантажити в технологічний агрегат на заміну спрацьованих.

Метод автоматичного оцінювання середньозваженої крупності пісків класифікатора і розвантаження млина побудовано на базі магнітоелектричної системи шляхом забезпечення інваріантності до вмісту твердого в зоні вимірювання, швидкості переміщення матеріалу та вмісту магнітного заліза в твердому, що зменшило похибку вимірювання до $\pm 2,91\%$.

Запропоновано новий критерій оцінювання циркулюючого навантаження, який полягає в тому, що за знайденою висотою пісків у міжвитковому просторі спіралі класифікатора слідує непряме прогностичне визначення параметра за отриманими математичними моделями, завдяки чому можливо значно підвищити точність ідентифікації масової витрати пісків і побудувати нову квазіінваріантну слідкуючу систему стабілізації розрідження пульпи в пісковому жолобі.

Запропоновано інваріантний підхід керування енергоефективності руйнування руди, де критерієм оцінювання енергоефективності виступає не концентрація твердого в зоні контролю, а середньозважений його розмір на вході кульового млина, що дозволило реалізувати АСК масовою витратою руди в млин з найбільшою енергоефективністю її подрібнення.

Запропоновано метод непрямої прогностичної оцінки недостаючої витрати води в класифікатор для забезпечення розділення матеріалу за заданою крупністю, завдяки чому розроблено нову АСК технологічним процесом.

Розроблені теоретичні положення дозволили визначити принципи вдосконалення методів автоматизованого керування циклом з врахуванням дії збурюючих факторів і створити комплекс автоматичних систем цільового призначення. Він забезпечує зростання продуктивності за готовим продуктом на 13,2%, збільшення ефективності класифікації на 19,4%.

Ключові слова: рудопідготовка, енергоефективне інваріантне керування, непрямі прогностичні оцінки, математичні моделі, методи, автоматизовані системи.

SUMMARY

Matsui A.N. Methodological foundations of energy efficient invariant control of ore grinding-classification based on indirect predictive assessment of characteristics of raw materials and equipment. – Manuscript.

Thesis for a Doctor of Engineering degree (Speciality 05.13.07 “Automation of Control Processes (Engineering)”, 15 – “Automation and Instrumentation”). – Kryvyi Rih National University of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kryvyi Rih, 2021.

The research aims to increase efficiency of ore preparation by applying a new methodology to implementing energy-efficient invariant control over ore grinding-classification based on indirect predictive assessment of characteristics of raw materials and equipment. The new methodology is based on invariance of grinding raw materials of specific technological variances, basic ore parameters, the energy consumed proportionate to the volume of ore destructed by a movable ball, the established regularity of ball wear, indirect predictive assessment of the useful energy spent on grinding raw materials, assessment of slurry viscosity and the volume of sand in the inter-turn space of the classifier spiral, formation of the conditions for separating solids by a given size in the

classifier, a developed radio-approach to transmitting information from rotating parts of machines to stationary ones which are subject to the invariant approach.

There are suggested methods for indirect predictive assessment of the ball optimal loading in the mill, mass and quantity of balls engaged in ore grinding, a variety of ball sizes and their number to be added into the technological unit to replace the worn ones.

The method of automated assessment of the weighted average size of the classifier sands and the mill discharge based on a magnetoelectric system is improved by ensuring invariance of the solid content in the measurement zone, the speed of material movement and the magnetic iron content in the solid, this reducing the measurement error to $\pm 3\%$.

The author suggests a new criterion for assessing the circulating load, which implies that the revealed sand height in the inter-turn space of the classifier spiral is followed by indirect predictive determination of the parameter by obtained mathematical models, which enable a significant increase of accuracy when identifying the mass flow rate of sands and building a new quasi-invariant tracking system for stabilizing slurry dilution in a sand chute.

The invariant approach to controlling energy efficiency of ore destruction is proposed with a developed criterion for assessing energy efficiency not by solid concentration in the control zone, but its weighted average size at the ball mill inlet, this enabling implementation of the automated control system over ore mass consumption in the mill characterized by the highest energy efficiency of its grinding.

The indirect predictive assessment of low water consumption in the classifier is proposed to ensure material separation by a given size, due to which a new automated control system over the technological process is developed to increase the end product output up to 5%, improve classification efficiency by 19,4%, and reduce energy consumption per tonne of the end product by 5%.

By modelling the distance between identical spherical particles of solids with unvaried density, a mathematical model is obtained for assessing slurry viscosity depending on their diameter, liquid temperature and the solid-water ratio, which makes it possible to promptly assess a parameter when controlling technological processes. The resulted mathematical model for automatic assessment of ore destruction efficiency in a ball mill with the disintegrated volume at the end of the main elastic rod under the action of a falling ball which connects technological parameters of the ground material and design parameters of main and additional rods and makes the result invariant to changes in density, ball speed and lining wear.

The mathematical model is proposed to automatically assess energy efficiency of ore destruction at the end of the elastic rod connected to the centre of the elastic plate, the deformation value of which enables a conclusion about the measured parameter. When a section of a hollow cylinder of significant mass and diameter is coaxially connected to it, the result is invariable to the rod and off-centre blows of the ball. The mathematical model is developed to ensure the ore input into the mill and expressed by an algebraic equation, which, besides constructive and functional constants, includes technological constants and measured parameters – the weighted average size of the input feed, classifier sands and their mass consumption, this providing the basis for indirect predictive assessment of the mass flow rate of the input ore into the mill to guarantee predetermined concentration of coarse solids for energy-efficient grinding. The mathematical model is improved to provide the required slurry dilution in the ball mill represented by an algebraic equation,

which includes constants, actions set for ore consumption in the mill, the solid-water ratio, slurry density in the sand chute, and the mass flow rate of sands, due to which control accuracy of slurry dilution is increased.

A radio approach is suggested to transmit information from rotating equipment parts to stationary ones, which includes a cycle-based control system that coordinates operation of rotating and stationary parts, and an automatic regulator that sets a particular amplification mode before each information transmission cycle to reduce the signal transmission error by up to $\pm 1\%$ under interference.

The elaborated theoretical statements allow determining principles of improving methods of automated control of the cycle considering the action of disturbing factors and create a set of target-oriented automated systems, this providing increased output of the end product by 13,2% and improvement of classification efficiency by 19,4%.

Key words: ore preparation, energy-efficient invariant control, indirect predictive assessment, mathematical models, methods, automated systems.

МАЦУЙ Анатолій Миколайович

**Методологічні засади
енергоефективного інваріантного керування
подрібненням-класифікацією руд
на основі непрямих прогностичних оцінок
характеристик сировини та обладнання**

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
за спеціальністю 05.13.07 – автоматизація процесів керування

Підписано до друку 10.11.2021.

Формат 60×84/16. Ум. друк. арк. – 2,51. Авт. арк. – 1,90.

Тираж 100 пр.

Друкарня С. Г. Щербенка «Літерія»
вул. Рокоссовського, 5/3, м. Кривий Ріг, 50027.

Тел. 097-192-20-77

Свідоцтво суб'єкта видавничої діяльності ДК № 4561 від 13.06.2013.