



Прийнято 13.04.2026. Прорецензовано 28.04.2026. Опубліковано 30.05.2026.

УДК 004.4:681.518:620.179.1:622.73

DOI: 10.31471/1993-9981-2026-1(56)-79-87

ПРОГРАМНЕ ТА АЛГОРИТМІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ РЕЧОВИННОГО СКЛАДУ ЗАЛІЗОРУДНОЇ СИРОВИНИ ДЛЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО ПОДРІБНЕННЯ

Швець Д. В. *

Кандидат технічних наук, доцент
Криворізький національний університет
50027, вул. Віталія Матусевича, 11, м. Кривий Ріг, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-5126-6405>
e-mail: shvets@knu.edu.ua

Котов І. А.

Доктор технічних наук, професор
Криворізький національний університет
50027, вул. Віталія Матусевича, 11, м. Кривий Ріг, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-2445-6259>
e-mail: rioexito@knu.edu.ua

Карабут Н. О.

Старший викладач
Криворізький національний університет
50027, вул. Віталія Матусевича, 11, м. Кривий Ріг, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-2327-4595>
e-mail: karabut@knu.edu.ua

Мокійчук В. М.

Кандидат технічних наук, доцент
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
03056, Берестейський проспект (Перемоги), 37, м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-7400-4467>
e-mail: uncertainty@ukr.net

Запропоноване посилання: Швець, Д. В., Котов, І. А., Карабут, Н. О. & Мокійчук, В. М. (2026). Програмне та алгоритмічне забезпечення інформаційно-виміральної системи неруйнівного контролю речовинного складу залізорудної сировини для енергоефективного подрібнення. *Методи та прилади контролю якості*, 1(56), 79-87. doi: 10.31471/1993-9981-2026-1(56)-79-87

* Відповідальний автор



Copyright © The Author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Анотація. У статті вирішується актуальне науково-практичне завдання підвищення ефективності переробки залізорудної сировини в умовах об'єктивного виснаження ресурсної бази та значної стохастичності хіміко-мінералогічних властивостей руд шляхом створення спеціалізованої інформаційно-виміральної системи для оперативного неруйнівного контролю. Продемонстровано, що існуючі підходи не здатні повною мірою забезпечити необхідну точність вимірювань. Натомість обґрунтовано доцільність комплексного застосування ядерно-фізичного та магнітометричного методів для контролю речовинного складу руд. Такий підхід нівелює недоліки окремих методів та дозволяє з високою достовірністю визначати масові частки магнітного та загального заліза, а також масу мінеральної сировини безпосередньо на конвеєрній стрічці в режимі безперервного потоку. Запропоновано архітектуру апаратно-програмного комплексу, яка забезпечує збір сигналів від первинних перетворювачів, їх обробку та алгоритмічну конвертацію на основі визначених калібрувальних співвідношень. Приділено увагу питанням забезпечення надійності, що передбачає захищену передачу опрацьованих результатів вимірювань до обчислювальної мережі підприємства. Впровадження розробленої інформаційно-виміральної системи оперативного неруйнівного контролю формує інформаційне підґрунтя для автоматизації керування технологічним процесом переробки залізорудної обчислювальної мережі підприємства. Впровадження розробленої інформаційно-виміральної системи оперативного неруйнівного контролю формує інформаційне підґрунтя для автоматизації керування технологічним процесом переробки залізорудної сировини. Безперервний моніторинг динаміки речовинного складу руди дозволяє своєчасно коригувати роботу засобів живлення подрібнювальних агрегатів залежно від поточних властивостей вихідної сировини. Це дозволяє запобігати переподрібненню матеріалу, оптимізує енерговитрати, мінімізує втрати корисного компонента та сприяє зниженню загальної собівартості готового концентрату.

Ключові слова: залізорудна сировина, оперативний контроль, ядерно-фізичний метод, магнітометричний метод, автоматизоване керування.

Вступ

Гірничо-збагачувальна галузь є однією зі стратегічно важливих складових національної економіки України, яка формує значну частину валового внутрішнього продукту та забезпечує стабільні надходження від експорту. Такий стан речей зумовлений потужним ресурсним потенціалом: на частку держави припадає близько 20 % світових розвіданих запасів залізних руд та близько 6 % загальносвітового виробництва товарної продукції.

В умовах інтенсифікації гірничо-металургійного виробництва та високої конкуренції на ринку нагальною проблемою є забезпечення стабільних якісних характеристик залізорудної сировини на всіх етапах її переробки. Масова частка загального заліза у вихідній руді та кінцевому концентраті безпосередньо визначає техніко-економічні показники подальшого металургійного переділу.

Водночас підтримання необхідної якості продукції наразі ускладнюється поступовою зміною характеристик ресурсної бази. На сьогодні більшість вітчизняних гірничо-збагачувальних комбінатів виробили поклади залізорудної сировини зі стабільними фізичними властивостями й перейшли до переробки руд зі значною стохастичністю хіміко-мінералогічних властивостей, використовуючи в низці випад-

ків шихтову суміш із кількох кар'єрів. Це призводить до погіршення якості як вихідної залізорудної сировини, так і отримувального концентрату.

Процеси подрібнення та класифікації значною мірою визначають продуктивність рудозбагачувальної фабрики, рівень вилучення заліза та собівартість концентрату. Витрати на подрібнення вихідної залізорудної сировини становлять понад половину собівартості кінцевого продукту.

Подрібнювальні агрегати сучасних рудозбагачувальних фабрик (зокрема, кульові млини) зазвичай працюють у замкнутому циклі з класифікуючим апаратом. Дослідження демонструють, що кульові млини та класифікатори належать до класу складних багатовимірних об'єктів керування.

Поряд із вмістом магнітного та загального заліза, одним із найважливіших параметрів, що впливає на якість концентрату, є гранулометричний склад подрібненої залізорудної сировини. Він, насамперед, залежить від ефективності роботи млинів. Крім стохастичності вмісту корисного компонента, промислові типи залізорудної сировини відрізняються за показниками міцності та подрібнюваності. Відповідно, для досягнення необхідного класу крупності розкриття мінералів різна сировина потребує різного часу перебування в апараті.

Коливання фізико-механічних властивостей вихідної залізородної сировини призводять як до її недоподрібнення (що спричиняє неповне розкриття рудних зростків), так і до переподрібнення (що погіршує магнітні характеристики матеріалу та призводить до ошламування). В обох випадках це зумовлює підвищення втрат заліза у хвостах на першій стадії магнітної сепарації.

З огляду на високу енергоємність технологічного процесу подрібнення на рудо-збагачувальних фабриках, його ефективна оптимізація дозволить суттєво знизити загальну собівартість концентрату.

Вона може полягати у стабілізації планового вмісту заліза у руді, що перероблюється, шляхом керування поданням сировини у млин за рахунок інформації про поточний вміст корисного компоненту. Тому розроблення сучасної інформаційно-вимірювальної системи неруйнівного контролю речовинного складу руд в умовах вираженої стохастичності властивостей залізородної сировини є актуальним науково-практичним завданням.

Мета роботи – розробка інформаційно-вимірювальної системи для оперативного неруйнівного контролю вмісту загального та магнітного заліза в потоці гірничої маси, що дозволить підвищити техніко-економічну ефективність керування процесом подрібнення в умовах стохастичності характеристик сировини.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій

На сьогодні існує низка вітчизняних та закордонних розробок апаратно-програмних комплексів для забезпечення оперативного неруйнівного контролю речовинного складу руд чорних металів. Значний обсяг досліджень у цьому напрямі виконується фахівцями галузевої проблемної лабораторії оперативного контролю та управління якістю мінеральної сировини при Криворізькому національному університеті під керівництвом проф. Азаряна А. А., де розроблено комплекс систем для експрес-аналізу якості залізородної сировини, що перероб-

ляється на гірничо-збагачувальних комбінатах України. Зокрема, науковцями розроблено аналітичну систему [1] для оперативного визначення масової частки магнітного заліза у пробах подрібненого рудного матеріалу. Вона дозволяє здійснювати контроль якості вихідної руди, промпродуктів, концентрату, хвостів, а також матеріалу зі зливу класифікаторів. Іншим технологічним рішенням є апаратно-програмний комплекс [2]. Він призначений для оперативного неруйнівного контролю масової частки загального заліза із застосуванням селективного гамма-гамма-методу, а також для безперервного вимірювання маси мінеральної сировини безпосередньо на конвеєрній стрічці на різних стадіях її переробки. Для безперервного моніторингу також створено систему [3], що забезпечує експресне визначення масової частки корисного компонента з високою магнітною сприйнятливістю у гірничій масі на конвеєрі. Ця система в режимі реального часу обчислює сумарну продуктивність конвеєрів та середньозважену масову частку магнітного заліза у вихідній руді, забезпечуючи накопичення і подальшу обробку результатів у єдиній інформаційній базі.

Слід зазначити, що існуючі методи оперативного контролю речовинного складу залізородної сировини, що набули найбільшого практичного поширення на гірничо-збагачувальних підприємствах, концептуально поділяються на три основні групи. Перша група – ядерно-фізичні методи [4-6], функціонування яких ґрунтується на взаємодії високоенергетичного гамма-випромінювання з досліджуваною гірничою масою. Друга – магнітометричні методи [7,8], що використовують закономірності зміни відносної магнітної проникності середовища за наявності в ньому сполук заліза, що виявляють магнітні властивості. Третю групу становлять ультразвукові методи [9,10], що базуються на аналізі параметрів поширення пружних акустичних хвиль у контрольованому матеріалі.

Аналізуючи зазначені методи, потрібно зазначити, що магнітометричні методи, дія яких ґрунтується на реєстрації змін відносної магнітної проникності під час вза-

смордії з магнетитовими рудами, не дозволяють отримувати дані щодо масової частки заліза, яке не проявляє феромагнітних властивостей.

Ультразвуковий метод контролю, що базується на вимірюванні параметрів поширення об'ємних і поверхневих хвиль, а також високоенергетичного ультразвуку в рідких і твердих середовищах, набув поширення у гірничій справі. Проте суттєвим недоліком цього підходу є його висока чутливість до гранулометричного складу досліджуваного середовища. Через це його практичне застосування для оперативного неруйнівного контролю якості подрібненої руди ускладнено.

При цьому, ядерно-фізичні методи оперативного контролю позбавлені зазначених обмежень, та забезпечують можливість безперервного вимірювання масової частки загального заліза. В той же час, магнітометричні методи дозволяють отримати інформацію про вміст магнетиту в сировині.

Викладення матеріалу

Для проведення дослідження причин зниження якості концентрату розглянемо ГЗК ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», рудозбагачувальні фабрики (РЗФ) якого в поточний час живляться рудою з двох кар'єрів із різними фізико-механічними та хіміко-мінералогічними властивостями. Вміст масової частки магнітного заліза – одного з основних показників якості залізорудної сировини, у руді одного з кар'єрів коливається в межах від 10 до 32%, у руді іншого кар'єру – від 20 до 34%. Через недостатність усереднення руд обох кар'єрів виникають суттєві коливання якості сировини, що поступає на подрібнення на РЗФ (рис. 1). Це, своєю чергою, призводить до коливання якості залізорудного концентрату.

З огляду на це, для ефективного керування технологічним процесом переробки залізної руди та покращення його інформаційного забезпечення є необхідним впровадження засобів оперативного контролю якості сировини.

Проведений аналіз продемонстрував, що для досягнення цієї мети доцільно об'єд-

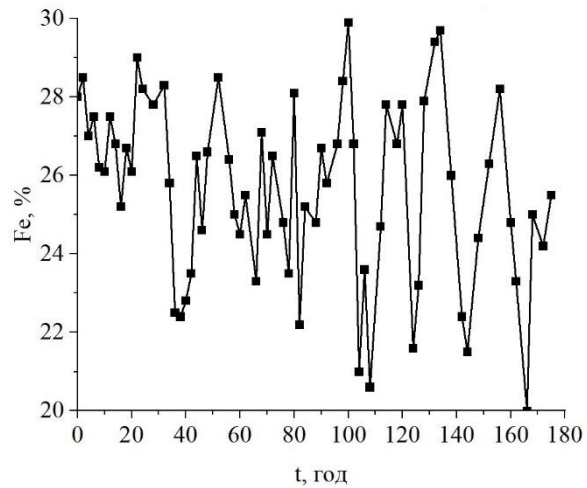


Рисунок 1 – Коливання вмісту заліза в сировині, що надходить на переробку на РЗФ-1 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» (дані контролю з погодинним усередненням)

нати ядерно-фізичні та магнітометричні методи контролю речовинного складу руди. Це дозволить визначати як магнетитову складову, так і відсотковий вміст інших мінеральних форм заліза, що не проявляють виражених феромагнітних властивостей.

На рисунку 2 наведено схему запропонованої інформаційно-вимірювальної системи оперативного неруйнівного контролю речовинного складу залізорудної сировини.

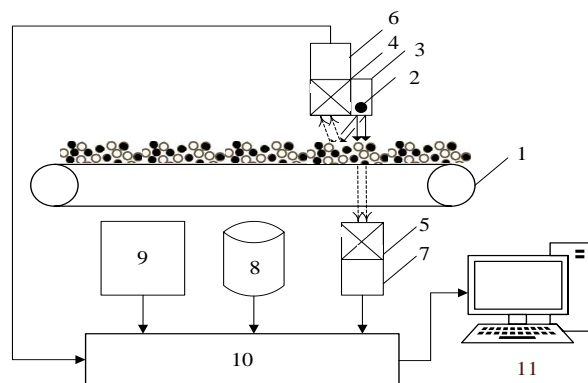


Рисунок 2 – Схема інформаційно-вимірювальної системи оперативного неруйнівного контролю речовинного складу залізорудної сировини

Залізорудна сировина поступає на живильник 1, де опромінюється джерелом гамма-випромінювання. Гамма-кванти з певною початковою енергією випускаються джерелом 2, що розташоване в захисному свинцевому контейнері 3, і потрапляють на гірничу масу на живильнику 1. Частина гамма-квантів відбивається від поверхні залізорудної сировини та розсіюється під певним кутом. Цей кут просторового розсіювання залежить від діаметра колімаційного каналу, глибини розташування джерела в контейнері, його енергії та активності, а також від відстані в системі «джерело – руда – детектор».

Під час взаємодії гамма-кванта з речовиною частина його енергії поглинається, після чого він виходить за межі поглинача з енергією, що є меншою за величину поглиненої енергії. Розсіяні гамма-кванти реєструються сцинтиляційним монокристалом 4, де їхня енергія перетворюється на світлові спалахи. Яскравість та тривалість цих спалахів прямо залежить від енергії початкового гамма-кванта. За допомогою детектора – фотоелектронного помножувача (ФЕП) 6 – світлові спалахи перетворюються на електричні імпульси, кількість яких фіксується лічильним пристроєм. За попередньо встановленими кореляційними залежностями на основі кількості зареєстрованих імпульсів обчислюється масова частка загального заліза в мінеральній сировині. Гамма-кванти, які пройшли крізь шар гірничої маси, аналогічним чином реєструються монокристалом 5, а світлові імпульси, що виникають при цьому, перетворюються ФЕП 7 на електричні сигнали для подальшого підрахунку. Отримані дані передаються до мікроконтролера 10.

Під живильником 1 розташовано ваговимірювач 9 та датчик магнітної сприйнятливості рудного матеріалу 8, які передають до мікроконтролера 10 вимірювальну інформацію про поточну масу сировини та масову частку магнітного заліза в ній. Мікроконтролер 10 із заданою дискретністю в часі здійснює опитування датчиків та розрахунок відповідних технологічних параметрів: маси сировини на контрольованій ділянці, кількості розсіяних і пройшовших

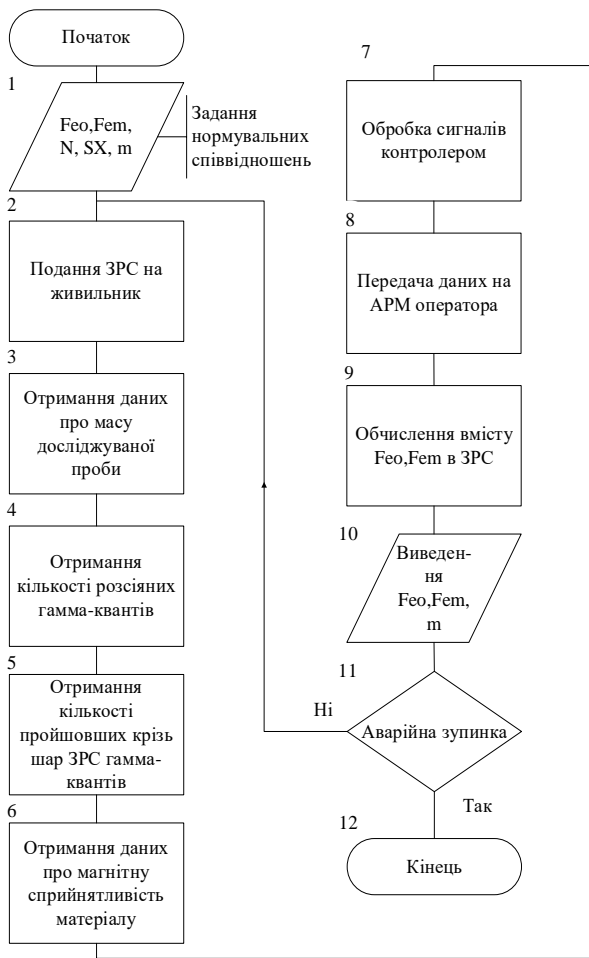
крізь шар руди гамма-квантів, а також відносної зміни індуктивності. Отриманий масив даних через інтерфейс RS-232 передається на АРМ оператора 11, де виконується його алгоритмічна обробка та розрахунок масової частки загального і магнітного заліза в потоці на живильнику.

Як датчик магнітної сприйнятливості застосовано індуктивний перетворювач, аналогічний тому, що використовується в апаратно-програмному комплексі [3]. Індуктивний перетворювач розташовується нерухомо під конвеєрною стрічкою на нормованій відстані. При цьому поперечним провідникам вимірювальної рамки надається форма, яка просторово повторює поперечний профіль навантаженої конвеєрної стрічки. Це конструктивне рішення забезпечує однакову відстань від провідників до матеріалу по всій ширині перерізу, що гарантує рівномірність магнітного поля та стабільну чутливість перетворювача незалежно від профілю рудопотоку. Алгоритм роботи системи оперативного неруйнівного контролю речовинного складу залізорудної сировини представлений на рис. 3.

Перед початком роботи до системи необхідно ввести калібрувальні співвідношення між:

1. Кількістю зареєстрованих детекторами розсіяних і відбитих гамма-квантів та масовою часткою загального заліза в залізорудній сировині;
2. Напругою на виході перетворювача магнітної сприйнятливості та масовою часткою магнітного заліза в сировині;
3. Напругою на виході ваговимірювача та масою мінеральної сировини на конвеєрній стрічці.

Під час подачі залізорудної сировини на живильник ваговимірювач здійснює зважування матеріалу та формує відповідний електричний сигнал. Далі гірничу масу опромінюється джерелом гамма-квантів. За допомогою сцинтиляційних монокристалів фіксуються гамма-кванти, розсіяні матеріалом, а також ті, що пройшли крізь його шар. Поглинуті гамма-кванти генерують у монокристалах світлові спалахи, які реєструються фотоелектронними помножувачами, що виконують перетворення оптичних



Feo – вміст заліза загального, Fem – вміст заліза магнітного, N – кількість зареєстрованих гамма-квантів, SX – величина магнітної сприйнятливості, m – вага сировини на живильнику, ЗРС – залізородна сировина

Рисунок 3 – Алгоритм роботи інформаційно-вимірювальної системи оперативного неруйнівного контролю речовинного складу залізородної сировини

сигналів на електричні імпульси. Водночас рудний матеріал на конвеєрній стрічці проходить над датчиком магнітної сприйнятливості: залежно від коливань масової частки магнітного заліза змінюється вихідна напруга перетворювача.

Мікроконтролер, який, відповідно до концепції IoT, виконує функцію вузла граничних обчислень, здійснює зчитування сигналів із первинних перетворювачів, які характеризують масу сировини, а також масові частки загального і магнітного заліза, виконує їхню первинну обробку та передає у цифровому форматі на персональ-

ний комп'ютер. Програмне забезпечення верхнього рівня конвертує отримані числові значення у фізичні величини відповідно до заданих калібрувальних таблиць, забезпечує візуалізацію поточних хіміко-мінералогічних характеристик рудопотоку, а також здійснює циклічний запис отриманих масивів даних у реляційну базу даних.

Процес опитування датчиків і розрахунку технологічних параметрів (маси та показників якості сировини) повторюється із заданою дискретністю в часі. Функціонування системи в автоматичному режимі триває до моменту її планової або аварійної зупинки.

Для повноцінного використання результатів оперативного контролю в масштабах усього підприємства АРМ оператора підключається до локальної обчислювальної мережі гірничо-збагачувального комбінату. Фізична інтеграція здійснюється на базі стандарту промислового Ethernet із застосуванням екранованих кабельних ліній або волоконно-оптичних каналів зв'язку, що забезпечує необхідну завадостійкість і надійність передачі даних.

Логічний рівень обміну даними реалізується на базі стека протоколів TCP/IP із застосуванням архітектури OPC UA. Цей стандарт відзначається наявністю вбудованих механізмів інформаційної безпеки. Надійність функціонування апаратно-програмного комплексу забезпечується використанням спеціалізованих промислових операційних систем (із гілкою довгострокового обслуговування LTSC), які гарантують стабільну багатозадачність для роботи SCADA-сервера. Інтеграція АРМ оператора в загальнозаводську мережу передбачає сегментування технологічної мережі та її логічну ізоляцію від корпоративного сегмента за допомогою міжмережевих екранів.

Висновки

Вирішено актуальне науково-практичне завдання щодо розробки інформаційно-вимірювальної системи для оперативного неруйнівного контролю речовинного складу залізородної сировини. Базуючись на комплексному поєднанні ядер-

но-фізичного та магнітометричного методів, розроблена система здатна в режимі безперервного потоку визначати відсотковий вміст як магнітного, так і загального заліза безпосередньо на живильнику, додаючи обмеження ізольованих засобів вимірювання. Запропонована інформаційно-вимірювальна система може виступати інтелектуальним ядром для АСК ТП підприємства, оскільки оперативне визначення даних щодо стохастичності речовинного

складу сировини дозволяє автоматично коригувати живлення млинів, оптимізуючи енергоємний процес подрібнення та суттєво знижуючи загальну собівартість кінцевого концентрату.

Подяки

Відсутні.

Конфлікти інтересів

Відсутній.

Список використаних джерел

1. Пристрій для оперативного контролю масової частки заліза магнітного у гірській масі : пат. 80694 Україна : G01N 27/72 (2006.01), G01N 27/00. № у 2004 08 06756 ; заявл. 17.08.2004 ; опубл. 25.10.2007, Бюл. № 17. 2 с.
2. Спосіб оперативного технологічного контролю вмісту корисного компонента в мінеральній сировині на конвеєрі і пристрій для його реалізації : пат. 10780 А Україна : G01N 23/203. № 93050183 ; заявл. 11.05.1993 ; опубл. 25.12.1996, Бюл. № 4. 9 с.
3. Система автоматичного контролю і керування масовою часткою магнітного заліза у конвеєрному рудопотоці : пат. 50668 Україна : G01R 33/12. № у 2009 11116 ; заявл. 02.11.2009 ; опубл. 25.06.2010, Бюл. № 12. 3 с.
4. Qin R.-l., Li C.-y., Qin Z.-j., Zhang Z.-h., Cai J. A Compton scattering background subtraction method of gamma energy spectrum based on Gaussian function convolution. *Radiation Physics and Chemistry*. 2024. Art. 112202. URL: <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2024.112202>
5. Azaryan A., Gritsenko A., Trachuk A., Serebrennikov V., Shvets D. Using the intensity of absorbed gamma radiation to control the content of iron in ore. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 3, No. 5 (99). P. 29–35. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.170341>
6. Abdelnour M. R., Liu J., Hossny K., Wajid A. M., Li W., Liu Z. Prompt gamma neutron activation analysis: A review of applications, design, analytics, challenges, and prospects. *Radiation Physics and Chemistry*. 2025. Art. 112693. URL: <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2025.112693>
7. Tverdostup M. I. Harmonic inductor-to-frequency converter based on impedance converter. *System Technologies*. 2026. Vol. 1, No. 162. P. 112–117. URL: <https://doi.org/10.34185/1562-9945-5-162-2026-12>
8. Tverdostup M. On measuring the components of inductive impedance using the three voltmeter method. *System Technologies*. 2024. Vol. 1, No. 150. P. 135–140. URL: <https://doi.org/10.34185/1562-9945-1-150-2024-13>
9. Morkun V., Morkun N., Fischerauer G., Tron V., Haponenko A., Bobrov Y. Identification of mineralogical ore varieties using ultrasonic measurement results. *Mining of Mineral Deposits*. 2024. Vol. 18, No. 3. P. 1–8. URL: <https://doi.org/10.33271/mining18.03.001>
10. Моркун Н. В., Грищенко С. М., Мацуй А. М., Олійник Т. А. Розпізнавання мінералогічних різновидів залізної руди із застосуванням методів безконтактних неруйнівних вимірювань. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Дала*. 2026. № 1 (299). С. 81–91. URL: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2026-299-1-81-91>

References

1. Prystii dlia operatyvnoho kontroliu masovoi chastky zaliza mahnitnoho u hirs'kii masi [Device for rapid control of the mass fraction of magnetic iron in ore mass] (Ukraine Patent No. 80694). (2007). State Intellectual Property Service of Ukraine. (in Ukrainian)
2. Sposib operatyvnoho tekhnolohichnoho kontroliu vmistu korysnoho komponenta v mineralnii syrovyni na konveieri i prystii dlia yoho realizatsii [Method of operational technological control of the content of a useful component in mineral raw materials on a conveyor and a device for its implementation] (Ukraine Patent No. 10780 A). (1996). State Intellectual Property Service of Ukraine. (in Ukrainian)
3. Systema avtomatychnoho kontroliu i keruvannia masovoiu chastkoiu mahnitnoho zaliza u konveiernomu rudopototsi [System of automatic control and management of mass fraction of magnetic iron in a conveyor ore stream] (Ukraine Patent No. 50668). (2010). State Intellectual Property Service of Ukraine. (in Ukrainian)
4. Qin, R.-l., Li, C.-y., Qin, Z.-j., Zhang, Z.-h., & Cai, J. (2024). A compton scattering background subtraction method of gamma energy spectrum based on gaussian function convolution. *Radiation Physics and Chemistry*, Article 112202. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2024.112202>
5. Azaryan, A., Gritsenko, A., Trachuk, A., Serebrenikov, V., & Shvets, D. (2019). Using the intensity of absorbed gamma radiation to control the content of iron in ore. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(5-99), 29–35. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.170341>
6. Abdelnour, M. R., Liu, J., Hossny, K., Wajid, A. M., Li, W., & Liu, Z. (2025). Prompt gamma neutron activation analysis: A review of applications, design, analytics, challenges, and prospects. *Radiation Physics and Chemistry*, Article 112693. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2025.112693>
7. Tverdostup, M. I. (2026). Harmonic inductor-to-frequency converter based on impedance converter. *System Technologies*, 1(162), 112–117. <https://doi.org/10.34185/1562-9945-5-162-2026-12>
8. Tverdostup, M. (2024). On measuring the components of inductive impedance using the three voltmeter method. *System Technologies*, 1(150), 135–140. <https://doi.org/10.34185/1562-9945-1-150-2024-13>
9. Morkun, V., Morkun, N., Fischerauer, G., Tron, V., Haponenko, A., & Bobrov, Y. (2024). Identification of mineralogical ore varieties using ultrasonic measurement results. *Mining of Mineral Deposits*, 18(3), 1–8. <https://doi.org/10.33271/mining18.03.001>
10. Morkun, N. V., Hryshenko, S. M., Matsui, A. M., & Oliinyk, T. A. (2026). Rozpiznannia mineralohichnykh riznovydiv zaliznoi rudy iz zastosuvanniam metodiv bezkontaktnykh neruivnykh vymiriuvan [Recognition of mineralogical varieties of iron ore using methods of non-contact non-destructive measurements]. *Visnyk of Volodymyr Dahl East Ukrainian National University*, 1(299), 81–91. <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2026-299-1-81-91> (in Ukrainian)

SOFTWARE AND ALGORITHMIC FRAMEWORK OF AN INFORMATION AND MEASUREMENT SYSTEM FOR NON-DESTRUCTIVE MONITORING OF IRON ORE RAW MATERIALS COMPOSITION TOWARDS ENERGY-EFFICIENT GRINDING

Shvets D. V.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Kryvyi Rih National University
50027, 11 Vitaly Matusevich, Kryvyi Rih, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-5126-6405>
e-mail: shvets@knu.edu.ua

Kotov I. A.

Doctor of Technical Sciences, Professor
Kryvyi Rih National University
50027, 11 Vitaly Matusevich, Kryvyi Rih, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-2445-6259>
e-mail: rioexito@knu.edu.ua

Karabut N. O.

Senior Lecturer
Kryvyi Rih National University
50027, 11 Vitaly Matusevich, Kryvyi Rih, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-2327-4595>
e-mail: karabut@knu.edu.ua

Mokiichuk V. M.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
03056, 37 Beresteiskyy (Peremohy) Avenue, Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-7400-4467>
e-mail: uncertainty@ukr.net

Abstract. The article addresses the relevant scientific and practical problem of increasing the efficiency of iron ore processing under conditions of objective resource base depletion and significant stochasticity in the chemical and mineralogical properties of ores by creating a specialized information and measurement system for real-time, non-destructive monitoring. It is demonstrated that existing approaches are not fully capable of providing the required measurement accuracy. Instead, the feasibility of integrating nuclear-physical and magnetometric methods for monitoring the material composition of ores is substantiated. This approach mitigates the shortcomings of individual methods and enables the reliable determination of the mass fractions of magnetic and total iron, as well as the mass of the mineral raw material, directly on the conveyor belt in a continuous flow mode. The proposed architecture of the hardware and software complex ensures the acquisition of signals from primary transducers, their processing, and algorithmic conversion based on defined calibration relationships. Attention is paid to ensuring reliability, which involves the secure transmission of processed measurement results to the enterprise computing network. The implementation of the developed information and measurement system for real-time non-destructive monitoring provides the foundation for automating process control in iron ore processing. Continuous monitoring of the ore material composition dynamics enables the timely adjustment of the grinding unit feeders based on the current properties of the input raw material. This prevents material overgrinding, optimizes energy consumption, minimizes the loss of the valuable component, and reduces the overall production cost of the final concentrate.

Keywords: iron ore raw materials, real-time monitoring, nuclear-physical method, magnetometric method, automated control.