

УДК 681.518:681.5.08:620.9:622.7:622.341

Д.В. ШВЕЦЬ, І.А. КОТОВ, П.С. СМОЛЯНСЬКИЙ, О.В. ШАМРАЙ, Н.О. КАРАБУТ

АВТОМАТИЗОВАНЕ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНЕ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСАМИ ПЕРЕРОБКИ ЗАЛІЗНИХ РУД НА БАЗІ БАГАТОРІВНЕВОЇ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ З ОПТИЧНИМИ СЕНСОРАМИ

*Криворізький національний університет,
вул. Віталія Матусевича, 11, м. Кривий Ріг, Україна, 50027*

Анотація. У статті обґрунтовано принципи побудови багаторівневої інформаційно-вимірювальної системи для забезпечення детермінованого збору, транзакційної валідації та логічної абстракції промислової телеметрії. Метою дослідження є підвищення енергоефективності та якості автоматизованого керування процесом переробки залізрудної сировини шляхом розробки архітектури комплексної багаторівневої інформаційно-вимірювальної системи.

Запропонована архітектура інтегрує методи програмної інженерії на трьох рівнях управління. На периферійному рівні обґрунтовано застосування операційних систем реального часу для управління сенсорними вузлами та засобів машинного зору. Це гарантує детермінованість часу обробки апаратних переривань, мінімізує латентність і дозволяє виконувати фільтрацію цифрового шуму безпосередньо біля джерела даних. На рівні логічного керування запропоновано використання парадигми об'єктно-орієнтованого промислового програмування за стандартом IEC 61131-3. Формування шару апаратної абстракції забезпечує створення ієрархічних цифрових двійників агрегатів, що приховує низькорівневу специфіку обладнання та підвищує масштабованість коду. На рівні глобальної агрегації доведено перевагу спеціалізованих баз даних часових рядів. Впровадження механізмів попередньої валідації даних на етапі інгресії гарантує транзакційну цілісність записів. Це автоматично відкидає дублікати, запобігаючи інформаційним штормам тривоги та спотворенню роботи предиктивних моделей. Розглянуто захист критичної інфраструктури гірничо-збагачувальних комбінатів через проєктування інформаційно-вимірювальної системи з урахуванням міжнародного стандарту кібербезпеки ISA/IEC 62443. Показано, що комплексна реалізація розробленої архітектури створює базис для переходу до проактивного адаптивного управління. Такий підхід стабілізує роботу технологічних агрегатів за наявності неконтрольованих збурень, дозволяє мінімізувати питомі витрати електроенергії на рудопідготовку та забезпечує підвищення якості залізрудного концентрату.

Ключові слова: автоматизоване керування, інформаційно-вимірювальна система, операційні системи, промисловий Інтернет речей, бази даних, кібербезпека, цифрові двійники.

Abstract. This paper substantiates the principles of building a multi-level information and measurement system to ensure deterministic data acquisition, transactional validation, and logical abstraction of industrial telemetry. The study aims to improve the energy efficiency and quality of automated control in iron ore processing by developing the architecture of a comprehensive multi-level information and measurement system.

The proposed architecture integrates software engineering methods across three control levels. At the edge level, the use of real-time operating systems to manage sensor nodes and machine vision systems is justified. This guarantees the determinism of hardware interrupt processing time, minimizes latency, and allows digital noise filtering directly at the data source. At the logic control level, the use of the object-oriented industrial programming paradigm as defined in IEC 61131-3 is proposed. The creation of a hardware abstraction layer creates hierarchical digital twins of technological units, hiding the low-level details of the equipment and improving code scalability. At the global aggregation level, the advantage of specialized time-series databases is proven. Implementing preliminary data validation mechanisms at the data ingestion stage ensures the transactional integrity of records. This automatically discards duplicates, preventing alarm storms and distorting predictive model performance.

ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

The protection of critical infrastructure in mining and processing plants is addressed through the design of the information and measurement system in compliance with the ISA/IEC 62443 international cybersecurity standard. It is shown that the comprehensive implementation of the developed architecture provides a basis for transitioning to proactive adaptive control. This approach stabilizes the operation of technological units in the presence of uncontrolled disturbances, minimizes specific energy consumption for ore preparation, and improves the quality of the iron ore concentrate.

Keywords: automated control, information and measurement system, operating systems, Industrial Internet of Things, databases, cybersecurity, digital twins.

DOI: 10.31649/1681-7893-2026-51-1-331-338

ВСТУП

Зниження вмісту корисного компонента у залізних рудах на тлі постійного здорожчання енергоресурсів створює серйозні виклики для гірничо-металургійної галузі. Оскільки процеси збагачення залізородної сировини є надзвичайно енергоємними, збереження рентабельності виробництва вимагає нових підходів до їх оптимізації. Основну частку загальних енерговитрат збагачувальних фабрик (до 50 – 70%) становить рудопідготовка, зокрема багатостадійний процес подрібнення у млинових комплексах [1]. Традиційні підходи до автоматизації керування технологічними процесами подрібнення переважно орієнтовані на стабілізацію окремих локальних контурів без комплексного врахування безперервних змін фізико-механічних та хіміко-мінералогічних властивостей сировини, що надходить на переробку. Коливання подрібнюваності та гранулометричного складу руди призводять до порушення оптимальних режимів роботи агрегатів, виникнення надмірних циркуляційних навантажень та переподрібнення матеріалу. Наслідком є перевитрати електроенергії при одночасному зниженні якості готового концентрату. Оптимізація виробництва вимагає переходу від статичних алгоритмів до адаптивних енергоефективних систем керування. Ефективне впровадження концепції адаптивного керування вимагає створення відповідних інформаційно-вимірювальних систем (ІВС), здатних забезпечити оперативний та детермінований моніторинг технологічних параметрів процесу переробки залізородної сировини. Такі системи повинні в режимі реального часу збирати, обробляти та структурувати багатовимірні потоки даних щодо поточного стану обладнання, а також фізико-механічних і хіміко-мінералогічних характеристик матеріалу. Проектування та впровадження подібних комплексів вимагають застосування сучасних методів програмної інженерії. Це зумовлює необхідність формування комплексної архітектури, яка забезпечує детерміновану обробку сигналів на рівні операційних систем реального часу (RTOS), гнучке інформаційне моделювання технологічних агрегатів на основі парадигм об'єктно-орієнтованого програмування (ООП) та надійну транзакційну персистентність часових рядів і технологічних параметрів у спеціалізованих базах даних (TSDB). Водночас інтеграція операційних та інформаційних технологій у критичну інфраструктуру гірничо-збагачувальних комбінатів (ГЗК) підвищує її вразливість до потенційних кіберзагроз. ГЗК, своєю чергою, стикаються зі зростанням кількості кіберінцидентів, метою яких є безпосереднє блокування технологічних процесів, що призводить до фінансових втрат та простоїв обладнання.

Розв'язання задачі розробки ІВС для автоматизованого енергоефективного керування процесом переробки залізородної сировини з урахуванням сучасних інформаційних технологій та інтегрованих механізмів кіберзахисту є актуальним науковим завданням, що має суттєве економічне та технологічне значення.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Наразі існує ціла низка засобів для підвищення інформаційного забезпечення процесу переробки залізородної сировини. Вони забезпечують можливість визначення хіміко-мінералогічних властивостей рудного матеріалу, та дозволяють опосередковано отримувати інформацію стосовно його фізико-механічних характеристик. Так, у роботі [2] описано рудничний радіометр, який дозволяє визначати вміст корисного компоненту в порошковій руді, а у [3] – розробка для визначення вмісту заліза гравітаційним методом. Однак використання зазначених пристроїв потребує виконання операцій з відбору проб. У працях [4, 5] наведено опис системи безперервного контролю вмісту магнетитового заліза у сировині на конвейерній стрічці на етапі подрібнення-класифікації в умовах рудозбагачувальної фабрики. Втім, вона не дозволяє реалізувати контроль вмісту заліза, що не виявляє магнітних властивостей. В роботі [6] пропонується використання ядерно-фізичних методів для визначення густини пульпи у пульпопроводах збагачувальних комбінатів. Альтернативним напрямком є

ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

використання оптичних технологій і систем машинного зору для неруйнівного контролю гранулометричного та мінералогічного складу руди безпосередньо на конвеєрних лініях, що живлять сировиною подрібнювальні установки. Однак ефективне впровадження таких мультисенсорних систем стримується проблемою трансляції великих масивів неструктурованих відеоданих, що вимагає імплементації алгоритмів їх локальної обробки у режимі реального часу.

В той же час, розв'язання завдання автоматизації гірничо-збагачувального виробництва формується на перетині теорії автоматичного керування, кіберфізичних систем та програмної інженерії. Проблема підвищення енергоефективності процесів рудопідготовки має глибоке наукове обґрунтування. Зокрема, у праці [7] доведено доцільність застосування методів модельно-прогнозуючого керування (МРС) на базі гібридних рекурсивно-паралельних моделей Гаммерштейна для ідентифікації об'єктів магнітного збагачення. Ефективність таких алгоритмів суттєво залежить від наявності оперативної інформації про мінералогічний склад сировини, що підтверджується дослідженнями систем автоматизованого розпізнавання технологічних сортів руди у безперервних потоках [8]. Імплементація високорівневих алгоритмів керування у промислове середовище вимагає формування надійних інформаційно-вимірювальних архітектур. Дослідження [9] фокусується на методах забезпечення відмовостійкості та детермінованості вбудованих систем керування під управлінням операційних систем реального часу, що є критичним для своєчасного опитування польових датчиків. На верхньому рівні архітектури, як зазначається у комплексному огляді [10], зберігання та обробка масивів промислової телеметрії спираються на спеціалізовані бази даних часових рядів, які у синергії з алгоритмами штучного інтелекту забезпечують предиктивне обслуговування обладнання. Водночас інтеграція різномірних підсистем в єдиний інформаційний простір вимагає семантичної інтероперабельності, архітектурні рішення для якої, з урахуванням сучасних стандартів промислового Інтернету речей (IIoT), запропоновано у роботі [11]. Крім того, розгортання подібних кіберфізичних систем актуалізує питання дотримання стандартів індустріальної кібербезпеки, зокрема ISA/IEC 62443 [12], для захисту від втручань у технологічний процес [13].

ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

Метою дослідження є розробка архітектури комплексної багаторівневої інформаційно-вимірювальної системи для підвищення енергоефективності та якості автоматизованого керування процесом переробки залізорудної сировини (зокрема, рудопідготовки та подрібнення).

ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Розв'язання задачі автоматизованого енергоефективного керування процесом переробки залізорудної сировини вимагає переходу від використання монолітних АСУ ТП до застосування розподіленої кіберфізичної платформи. Реалізація предиктивних моделей та алгоритмів багатокритеріальної оптимізації безпосередньо залежить від побудови надійної інформаційно-вимірювальної інфраструктури, здатної безперервно збирати, нормалізувати та інтерпретувати інтенсивні потоки даних на різних організаційних рівнях виробництва. Формування такої архітектури здійснюється шляхом інтеграції сучасних методів обчислень та структурування програмного забезпечення, що функціонують у єдиному синхронізованому середовищі.

Схема запропонованої архітектури ІВС для автоматизованого енергоефективного керування процесами переробки залізорудної сировини наведена на рис. 1. Нижній (периферійний) рівень розробленої архітектури безпосередньо взаємодіє з агресивним промисловим середовищем збагачувальної фабрики. На цьому етапі здійснюється опитування датчиків, тензометрів та потокових аналізаторів складу руди. Використання операційних систем загального призначення на таких периферійних вузлах є неприйнятним через їхню недетерміновану поведінку. Планувальники завдань у цих системах допускають непередбачувані затримки під час обробки критичних переривань. Тому ядром управління процесами збору даних виступають операційні системи реального часу, які базуються на пріоритетній багатозадачності з витисненням. Це гарантує миттєву та математично передбачувану реакцію на апаратні події, що є основною вимогою для дотримання жорстких часових обмежень. Детермінованість систем реального часу відіграє ключову роль в умовах інтенсивного потоку даних від промислових пристроїв Інтернету речей, забезпечуючи надвисоку точність прив'язки телеметричних вимірювань до абсолютних міток часу. Порівняльні характеристики операційних систем реального часу з операційними системами загального призначення наведено у таблиці 1. В той же час, перенесення

ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

обчислювальних потужностей на периферію дозволяє виконувати первинну фільтрацію цифрового шуму та інтегрувати алгоритми машинного навчання у безпосередній близькості до джерела даних, що суттєво розвантажує магістральні промислові мережі та підвищує надійність системи.

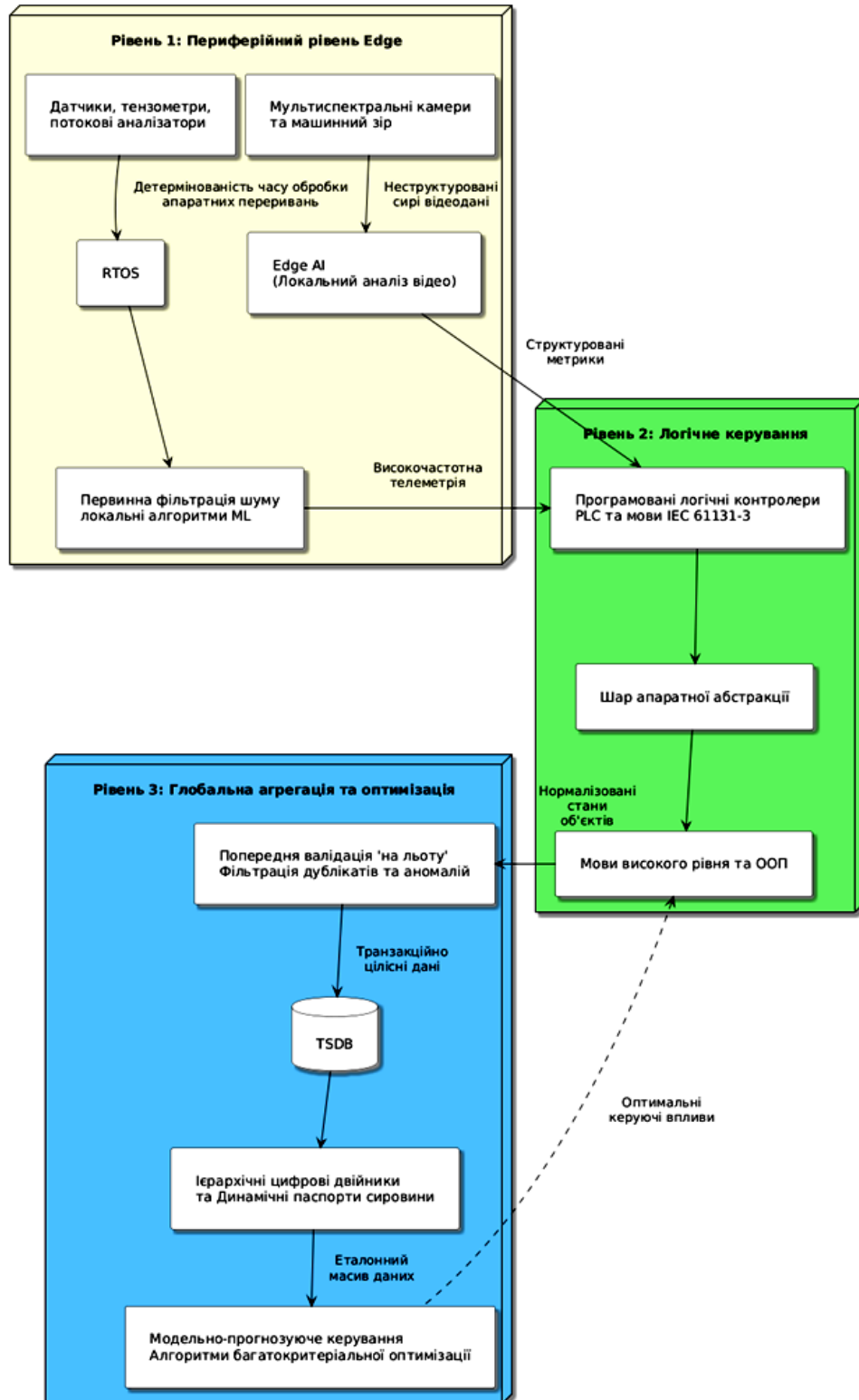


Рисунок 1 – Архітектура IBC для автоматизованого енергоефективного керування процесами переробки залізородної сировини

ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

Класичні методи контролю якості руди здебільшого спираються на точковий відбір проб або довготривалий лабораторний аналіз, що унеможливує оперативне реагування на швидкі зміни властивостей матеріалу в потоці. Для усунення цієї прогалини периферійний рівень архітектури розширюється підсистемою безконтактного оптичного моніторингу.

Встановлення промислових камер машинного зору та мультиспектральних сенсорів безпосередньо над магістральними конвеєрами забезпечує безперервну оптичну зйомку сировини. Завдяки цьому з'являється можливість оцінювати гранулометричний склад, візуальні текстурні характеристики та наявність негабаритів на етапі транспортування руди до подрібнювальних комплексів.

Очевидною перепоною для впровадження таких систем є колосальний обсяг генерованих відеоданих. Трансляція неструктурованих відеопотоків на верхній рівень управління неминуче призведе до перевантаження магістральних мереж підприємства та виникнення неприпустимих затримок. Цю проблему розв'язує перенесення обчислювальних потужностей максимально близько до джерела даних відповідно до парадигми Edge AI. Нейромережеві моделі комп'ютерного зору, розгорнуті на периферійних контролерах, аналізують зображення локально: алгоритми сегментують контури шматків руди, визначають їх площу та класифікують за розміром. Відтак, на рівень глобальної агрегації передаються лише математично стиснуті, структуровані показники із прив'язкою до міток часу.

Таблиця 1 – Порівняння операційних систем (ОС) загального призначення та ОС реального часу

<i>Характеристика ОС/ Тип ОС</i>	Загального призначення	Реального часу (RTOS)
Парадигма планування	Розділення часу, орієнтація на пропускну здатність	Орієнтація на дотримання дедлайнів
Латентність переривань	Недетермінована, схильна до затримок	Жорстко детермінована, мікросекундний діапазон.
Управління апаратним рівнем	Абстраговане через складні стеки драйверів	Прямий, низьколатентний доступ до регістрів датчиків
Застосування в ІВС	SCADA сервери, НМІ панелі	Edge-контролери, сенсорні вузли, автономні ПІД-регулятори

Акумуляування зазначених оптичних метрик набуває цінності у поєднанні з інформацією від традиційних промислових сенсорів. Дані комп'ютерного зору, синхронізовані з показниками конвеєрних ваг, вологомірів, ядерно-фізичних та магнітометричних аналізаторів, поєднуються в один інформаційний масив. Це дозволяє формувати розширений, динамічний цифровий паспорт кожної порції мінеральної сировини у режимі реального часу. Його наявність, своєю чергою, дає можливість системі заздалегідь фіксувати фізико-механічні особливості руди, що надходить на подрібнення, і отримувати необхідний часовий лаг для адаптації налаштувань обладнання в контурі керування енергоефективною переробкою сировини.

Перехід до рівня логічного керування, де функціонують програмовані логічні контролери, супроводжується проблемою експоненційного зростання обсягу неструктурованого процедурного коду. Для ефективного управління великою кількістю сигналів вхідних та вихідних пристроїв програмна архітектура будується з використанням концепцій об'єктно-орієнтованого моделювання. Імплементація механізмів інкапсуляції, композиції та абстракції, адаптованих до стандарту ІЕС 61131-3 [14], дозволяє репрезентувати кожен фізичний агрегат як автономний програмний об'єкт. Усередині таких об'єктів прихована алгоритмічна логіка ПІД-регулювання, обробки аварійних блокувань та взаємодії з апаратурою. Формування шару апаратної абстракції відокремлює математичну модель керування від специфіки конкретних фізичних інтерфейсів та мережевих протоколів. Розробляються ієрархічні цифрові двійники обладнання, що дозволяє оптимізаторам взаємодіяти з системою шляхом виклику стандартизованих методів об'єктів. Це призводить до зменшення зв'язності коду та підвищує рівень його повторного використання, а також спрощує модифікацію системи під час модернізації виробництва.

Верхній рівень інформаційно-виміральної архітектури відповідає за глобальну агрегацію телеметрії та формування незмінного аудиторського сліду технологічного процесу. Як відомо, гірничо-збагачувальне виробництво генерує безперервні масиви хронологічних даних, і спроби використання реляційних систем управління базами даних для збереження такої інформації призводять до зниження продуктивності через блокування таблиць та неефективність традиційної індексації при інтенсивному

ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

потоків запису. Архітектурним рішенням є впровадження спеціалізованих баз даних часових рядів. Вони оптимізовані для операцій додавання записів та використовують стовпчикове зберігання, що в поєднанні з алгоритмами дельта-кодування забезпечує високу швидкість запису та ефективне стиснення дискового простору.

Основним завданням на рівні збереження даних є забезпечення транзакційної цілісності телеметричного потоку. Оскільки класичні транзакції реляційних баз даних уповільнюють обробку часових рядів, захист від спотворень реалізується через механізми попередньої валідації безпосередньо під час надходження даних. Потрапляння дублікатів, десинхронізованих міток часу або некоректних значень до бази проковує інформаційні шторми тривоги у системах SCADA та спотворює розрахунки в алгоритмах оптимізації. Система автоматично відкидає аномальні пакети та забезпечує рівномірну дискретизацію сигналів, гарантуючи достовірність накопичених історичних даних. Сформований еталонний масив даних стає основою для навчання нейронних мереж, предиктивного моніторингу стану обладнання та функціонування алгоритмів модельно-прогнозуючого керування на всьому підприємстві.

ВИСНОВКИ

Забезпечення енергоефективного керування переробкою залізорудної сировини вимагає відмови від традиційних методів автоматизації на користь концептуально нових інформаційних систем. Практична реалізація цього завдання спирається на побудову розподіленої багаторівневої ІТ-архітектури. На периферійному рівні інтеграція потокових аналізаторів, систем машинного зору та мікросекундна детермінованість опитування датчиків мінімізують латентність каналів зв'язку, дозволяючи обробляти великі масиви даних, включаючи оптичну телеметрію, безпосередньо біля джерела. На рівні логічних контролерів застосування об'єктно-орієнтованого моделювання формує шар апаратної абстракції: це дозволяє створювати ієрархічні цифрові двійники обладнання та підвищує масштабованість системи. Своєю чергою, агрегація телеметрії в базах даних часових рядів зі вбудованою валідацією гарантує транзакційну цілісність накопичених даних. Такий підхід є критичною умовою для коректного навчання предиктивних математичних моделей.

Комплексна інтеграція наведених апаратних та програмних рішень формує єдиний інформаційний простір підприємства. Розроблена багаторівнева архітектура ІВС створює технологічне підґрунтя для переходу ГЗК від реактивного до проактивного управління. У стратегічній перспективі це дозволить стабілізувати якісні показники залізрудного концентрату, мінімізувати втрати корисного компонента та суттєво зменшити питомі витрати електроенергії на процеси рудопідготовки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Kondratets V, Matsui A, Brovko D, Demchyshyna O. Study of rock fracture patterns for obtaining the basis for energy-efficient ore ball milling. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science; 1348(1); 2024. p 012052.
2. Азарян АА, Трачук АА, Швидкий ОВ. Оперативний контроль вмісту заліза у подрібненій гірничій масі. Гірничий вісник 2022;(110):59-67.
3. Крапувnyi NS, Azaryan AA, Shvydkiy OV, Shvets DV, Hrytsenko AM. Development of an automated system for preparing mineral raw material samples for discrete analysis. CEUR Workshop Proceedings 3917; 2024. p 237-44.
4. Дрига ВВ, Швидкий ОВ, Карачабан АС. Контроль якості залізорудної сировини в порошкових пробах за допомогою пристрою ДЖМЗ-М1. Якість мінеральної сировини 2011:180-4.
5. Азарян АА, винахідник; ТЗОВ «Рудпромгеофізика». Пристрій для автоматичного визначення вмісту магнетитового заліза на конвеєрі. Пат. Україна 36662. 2008 Лис 10.
6. Цибулевський ЮЄ, Гриценко АМ, Черкасов ОВ, Швидкий ОВ. Підвищення точності радіоізотопних густинимірів. Гірничий вісник 2022;(110):125-9.
7. Porkuian O, Morkun V, Morkun N, Serdyuk O. Predictive control of the iron ore beneficiation process based on the Hammerstein hybrid model. Acta Mechanica et Automatica 2019;13(4):262-70.
8. Morkun V, Tron V. Automation of iron ore raw materials beneficiation with the operational recognition of its varieties in process streams. Metallurgical and Mining Industry 2014;6(6):4-7.

ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

9. Doris L, Shad R. Software engineering best practices for developing AI-integrated real-time operating systems. *International Journal of Embedded and Real-Time Communication Systems* 2025.
10. Azeta J, et al. Artificial intelligence and robotics in predictive maintenance: a comprehensive review. *Frontiers in Mechanical Engineering* 2025;11:1722114.
11. San Emeterio de la Parte M. SISS: Semantic Interoperability Support System for the Internet of Things. *IEEE Internet of Things Journal* 2025:1-15.
12. ISA/IEC 62443 Series of Standards [electronic format] [cited 2026 Apr 21]. Available from: URL: <https://www.isa.org/standards-and-publications/isa-standards/isa-iec-62443-series-of-standards>.
13. Alvarez-Alvarado MS, et al. Cyber-Physical Power Systems: A Comprehensive Review About Drivers, Standards, and Future Perspectives. *Computers and Electrical Engineering* 2024.
14. IEC 61131-3: Programming Languages [electronic format] [cited 2026 Apr 21]. Available from: URL: <https://www.plcopen.org/standards/logic/iec-61131-3/>.

REFERENCES

1. Kondratets V, Matsui A, Brovko D, Demchyshyna O. Study of rock fracture patterns for obtaining the basis for energy-efficient ore ball milling. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*; 1348(1); 2024. p 012052.
2. Azaryan AA, Trachuk AA, Shvydkyi OV. Operational control of iron content in crushed rock mass. *Mining Bulletin* 2022;(110):59-67.
3. Krapyvnyi NS, Azaryan AA, Shvydkyi OV, Shvets DV, Hrytsenko AM. Development of an automated system for preparing mineral raw material samples for discrete analysis. *CEUR Workshop Proceedings* 3917; 2024. p 237-44.
4. Dryga VV, Shvydkyi OV, Karachaban AS. Quality control of iron ore raw materials in powder samples using the DzhM3-M1 device. *Quality of mineral raw materials* 2011:180-4.
5. Azaryan AA, inventor; LLC "Rudpromgeofizika". Device for automatic determination of magnetite iron content on the conveyor. Pat. Ukraine 36662. 2008 Nov 10.
6. Tsybulevskiy YuE, Hrytsenko AM, Cherkasov OV, Shvydkyi OV. Increasing the accuracy of radioisotope density meters. *Mining Bulletin* 2022;(110):125-9.
7. Porkuian O, Morkun V, Morkun N, Serdyuk O. Predictive control of the iron ore beneficiation process based on the Hammerstein hybrid model. *Acta Mechanica et Automatica* 2019;13(4):262-70.
8. Morkun V, Tron V. Automation of iron ore raw materials beneficiation with the operational recognition of its varieties in process streams. *Metallurgical and Mining Industry* 2014;6(6):4-7.
9. Doris L, Shad R. Software engineering best practices for developing AI-integrated real-time operating systems. *International Journal of Embedded and Real-Time Communication Systems* 2025.
10. Azeta J, et al. Artificial intelligence and robotics in predictive maintenance: a comprehensive review. *Frontiers in Mechanical Engineering* 2025;11:1722114.
11. San Emeterio de la Parte M. SISS: Semantic Interoperability Support System for the Internet of Things. *IEEE Internet of Things Journal* 2025:1-15.
12. ISA/IEC 62443 Series of Standards [electronic format] [cited 2026 Apr 21]. Available from: URL: <https://www.isa.org/standards-and-publications/isa-standards/isa-iec-62443-series-of-standards>.
13. Alvarez-Alvarado MS, et al. Cyber-Physical Power Systems: A Comprehensive Review About Drivers, Standards, and Future Perspectives. *Computers and Electrical Engineering* 2024.
14. IEC 61131-3: Programming Languages [electronic format] [cited 2026 Apr 21]. Available from: URL: <https://www.plcopen.org/standards/logic/iec-61131-3/>.

Дата надходження: 15.04.2026

Дата прийняття до друку після рецензування:

20.05.2026 Дата публікації: 18.06.2026

Ця робота ліцензується відповідно до

[Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

ШВЕЦЬ ДМИТРО ВАЛЕРІЙОВИЧ – к.т.н., доцент кафедри моделювання та програмного забезпечення, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, Україна,
e-mail: shvets@knu.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0001-5126-6405>

КОТОВ ІГОР АНАТОЛІЙОВИЧ – д.т.н., професор кафедри моделювання та програмного забезпечення, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, Україна,
e-mail: rioexit@knu.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0003-2445-6259>

СМОЛЯНСЬКИЙ ПАВЛО СТАНИСЛАВОВИЧ – к.т.н., доцент кафедри моделювання та програмного забезпечення, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, Україна,
e-mail: smolianskyi@knu.edu.ua, <https://orcid.org/0009-0008-2678-5447>

ШАМРАЙ ОЛЕНА ВОЛОДИМИРІВНА – к.т.н., доцент кафедри моделювання та програмного забезпечення, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, Україна,
e-mail: shamrai@knu.edu.ua, <https://orcid.org/0009-0002-5282-2965>

КАРАБУТ НАДІЯ ОЛЕКСАНДРІВНА – ст. викладач кафедри моделювання та програмного забезпечення, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, Україна,
e-mail: karabut@knu.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-2327-4595>

Dmytro SHVETS, Ihor KOTOV, Pavlo SMOLYANSKYI, Olena SHAMRAY, Nadiia KARABUT

AUTOMATED ENERGY-EFFICIENT CONTROL OF IRON ORE PROCESSING BASED ON A MULTI-LEVEL INFORMATION AND MEASUREMENT SYSTEM WITH OPTICAL SENSORS

Kryvyi Rih National University