

С.А. Рубан, Д.В. Швець, І.А. Котов, В.В. Тронь, Н.О. Карабут

РОЗРОБКА АРХІТЕКТУРИ ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОЇ ПЕРЕРОБКИ ЗАЛІЗОРУДНОЇ СИРОВИНИ

Анотація. У статті розроблено багаторівневу архітектуру інформаційно-керуючої системи для енергоефективної переробки залізорудної сировини. Запропонована архітектура відповідає референсній моделі RAMI 4.0, вимогам стандартів ISA-88 та ISA-95 щодо ієрархічної організації систем управління, а також вимогам кібербезпеки стандарту ISA/IEC 62443. Розглянуто структуру польового рівня з інтеграцією засобів оперативного контролю якості залізорудної сировини, Edge-рівня для первинної агрегації та нормалізації технологічних даних, а також хмарного рівня для реалізації цифрових двійників технологічного процесу та алгоритмів оптимізації верхнього рівня. Запропонована архітектура спрямована на підвищення енергоефективності виробництва, скорочення питомих витрат на збагачення та покращення якості кінцевого продукту.

Ключові слова: інформаційно-керуюча система, залізорудна сировина, RAMI 4.0, ISA-88, ISA-95, ISA/IEC 62443, Edge computing, цифровий двійник, кібербезпека промислових систем, енергоефективність.

Постановка проблеми. Переробка залізорудної сировини є одним із найбільш енергоємних переділів металургійного виробництва. Підвищення ефективності цього процесу потребує не лише вдосконалення технологічного обладнання, а й впровадження сучасних інформаційно-керуючих систем (ІКС), здатних забезпечити автоматизований збір, передачу, обробку та аналіз технологічних даних у режимі реального часу.

Цифрова трансформація гірничо-металургійної галузі відбувається в контексті концепції Industry 4.0, ключовим елементом якої є Промисловий Інтернет речей (ІІоТ). Референсна архітектурна модель Індустрії 4.0 (RAMI 4.0, IEC PAS 63088) визначає єдину систему координат для опису компонентів розумного виробництва в трьох вимірах: ієрархії (від польового рівня до хмари), життєвого циклу виробу та функціональних рівнів (активів, інтеграції, комунікації, інформації, функцій і бізнесу) [1, 2].

Специфіка збагачення залізорудної сировини полягає в необхідності безперервного контролю якісних показників матеріального потоку – вмісту заліза, розміру часток, вологості, – що вимагає інтеграції у структуру ІКС спеціалізованих засобів оперативного контролю безпосередньо у технологічному потоці. Такі засоби генерують значні масиви даних, ефективна обробка яких потребує проміжного Edge-шару між польовим і хмарним рівнями.

Метою статті є розробка та обґрунтування багаторівневої архітектури ІКС для енергоефективної переробки залізорудної сировини, яка відповідає сучасним стандартам у сфері промислової автоматизації (ISA-88, ISA-95) та кібербезпеки (ISA/IEC 62443).

Тематика дослідження відповідає пріоритетам європейської промислової політики, зокрема «Новій промисловій стратегії для зеленої та цифрової Європи», та реалізується у рамках проєкту Erasmus+ GreeDI-EU «Transition towards Green Digital European Industry», що об'єднує академічних учасників та представників роботодавців, громадських організацій та органів влади для підготовки фахівців до зеленої цифрової трансформації промисловості.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Традиційні архітектури ІКС гірничо-збагачувальних підприємств будувались за ієрархічним принципом відповідно до моделі ISA-95, проте мали ряд обмежень: вертикально-інтегровані та слабо пов'язані компоненти, обмежені можливості обміну даними між рівнями [3], відсутність засобів просунутої аналітики та предиктивного керування.

Сучасні дослідження свідчать про тенденцію до впровадження IoT-платформ, Edge-обчислень та хмарних сервісів у системи управління процесами переробки залізорудної сировини. Разом із тим, комплексний підхід до проєктування таких систем з урахуванням вимог RAMI 4.0 [2], специфіки оперативного контролю якості залізорудної сировини у потоці та вимог кібербезпеки залишається недостатньо дослідженим.

Технологічний процес переробки залізорудної сировини включає такі основні переділи: дроблення та грохочення, подрібнення, класифікацію, магнітну та флотаційну сепарацію, зневоднення (фільтрацію та сушку). Кожен переділ характеризується специфічними технологічними параметрами, що підлягають вимірюванню та регулюванню.

Ключовою особливістю управління процесом є необхідність безперервного контролю якісних показників матеріального потоку. Для цього застосовуються засоби оперативного контролю: рентгено-флуоресцентні (XRF) аналізатори, вологоміри, гранулометри та інші. Дані пристрої мають власні вбудовані мікроконтролери та протоколи зв'язку, що потребує спеціального підходу до їх інтеграції у загальну структуру ІКС.

RAMI 4.0 (Reference Architecture Model Industrie 4.0), розроблена в рамках ініціативи Industrie 4.0 (Германія) та стандартизована як IEC PAS 63088, являє собою тривимірну архітектурну систему координат, яка об'єднує різні аспекти інтелектуального виробництва [2, 4].

Вісь «Ієрархічні рівні» відображає розширену ієрархію автоматизації від одного виробу (Product) через польовий рівень (Field Device), станцію (Control Device), комірку (Field), зону (Station), підприємство (Enterprise) до підключеного світу (Connected World). Вісь «Шари» охоплює шість функціональних шарів: активів (Asset), інтеграції (Integration), комунікації (Communication), інформації (Information), функцій

(Functional) та бізнесу (Business). Вісь «Життєвий цикл» (на основі ІЕС 62890) відображає зв'язок між розробкою та виробництвом активів.

Основним концептом RAMI 4.0 є Компонент Індустрії 4.0 (I4.0 Component), що об'єднує фізичний актив (Asset) та його цифрове представлення – Оболонку адміністрування активу (Asset Administration Shell, AAS). AAS забезпечує стандартизований опис можливостей активу, його властивостей та інтерфейсів, що є необхідною умовою для побудови семантично сумісних та інтероперабельних систем управління [5].

Виклад основного матеріалу. Для ІКС переробки залізорудної сировини принципово важливим є відображення у рамках RAMI 4.0 наступних компонентів: технологічного обладнання (млини, сепаратори, насоси), засобів оперативного контролю якості (аналізатори у потоці), Edge-пристроїв (промислові шлюзи), систем управління (DCS/PLC, SCADA) та хмарних сервісів (платформи цифрових двійників, системи оптимізації).

Стандарт ISA-88 (ІЕС 61512) визначає модель та термінологію для батч-управління, проте його концепції процедурних та фізичних моделей широко застосовуються і для безперервних процесів [6-8]. Відповідно до цього стандарту, технологічний процес переробки залізорудної сировини декомпозується на:

- Процес (Process) – повний цикл переробки від прийому руди до відвантаження концентрату.
- Стадії (Stages) – основні переділи: дроблення, подрібнення, сепарація, зневоднення.
- Операції (Operations) – послідовні дії в рамках стадії (наприклад, регулювання завантаження млина).
- Фази (Phases) – елементарні дії управління (наприклад, встановлення уставки регулятора).

Фізична модель за ISA-88 включає підприємство, ділянку (site), зону (area), технологічну комірку (process cell) та одиницю обладнання (unit). Засоби оперативного контролю якості розглядаються як спеціалізовані функціональні модулі (equipment modules) у складі відповідних одиниць обладнання [6].

Стандарт ISA-95 (ІЕС/ІСО 62264) визначає ієрархічну модель управління виробничим підприємством та інтерфейси між рівнями [3]. Для розроблюваної ІКС запропонована наступна відповідність рівнів ієрархії (табл. 1).

Критично важливим елементом рівня 0 є засоби оперативного контролю якості сировини. XRF-аналізатори та гранулометри, вбудовані безпосередньо у конвеєрну лінію або трубопровід, забезпечують вимірювання вмісту заліза (Fe), вологи, а також складу пульпи з частотою 1–5 хвилин. Ці дані є вхідними для алгоритмів управління режимами сепарації та подрібнення.

Для безперервного контролю якісних параметрів залізорудної сировини у потоці застосовуються наступні типи аналітичних пристроїв:

«Системні технології» 3 (164) 2026 «System technologies»

- рентгено-флуоресцентні (XRF) аналізатори на конвеєрі (cross-belt analyzers) – для визначення хімічного складу (Fe, SiO₂, Al₂O₃, CaO, MgO) у потоці руди або концентрату;
- вологоміри – для безконтактного вимірювання вологості матеріалу на конвеєрі або у технологічних ємностях;
- гранулометри – для вимірювання розподілу частинок за розмірами;
- щільноміри та витратоміри пульпи – для контролю консистенції та витрати пульпи у гідроциклонах та насосних агрегатах;
- аналізатори вологості та зольності концентрату – на стадії зневоднення та сушки.

Таблиця 1

Відповідність рівнів ISA-95 компонентам ІКС переробки залізорудної сировини

Рівень ISA-95	Функціональне призначення	Системи та компоненти
Рівень 4 (ERP/MES)	Планування виробництва, управління ресурсами підприємства	ERP, MES, BI, Digital Twin Platform
Рівень 3 (MES/SCADA)	Оперативне диспетчерське управління, координація технологічних процесів	SCADA, MES, historian, Edge Gateway
Рівень 2 (Control)	Безперервне управління технологічним процесом	DCS, PLC, HMI
Рівень 1 (Field Control)	Локальне регулювання, захист	Регулятори, реле захисту
Рівень 0 (Field)	Первинне вимірювання та виконавчі механізми	Датчики, аналізатори, приводи

Інтеграція засобів оперативного контролю у загальну структуру ІКС здійснюється через стандартні промислові протоколи: OPC UA (основний протокол для обміну даними між рівнями 0-3 згідно з RAMI 4.0), Modbus TCP/RTU (для застарілих пристроїв), PROFINET/PROFIBUS (у складі SIMATIC-архітектур), а також MQTT (для передачі даних у напрямку Edge і хмари).

Кожен аналітичний пристрій оформлюється як I4.0 Component з відповідною Asset Administration Shell (AAS), що забезпечує стандартизований опис його можливостей, параметрів та інтерфейсів. AAS містить субмоделі: ідентифікації (Identification), технічних даних (Technical Data), документації (Documentation) та даних процесу (Process Data) [2, 9].

Виміряні показники якості передаються на рівень DCS/SCADA для використання у алгоритмах замкнутого та розімкнутого управління, а також на Edge-рівень для первинної обробки та подальшої передачі у хмарну платформу.

Edge-рівень (проміжний шар між польовим рівнем та хмарою) займає ключову позицію в сучасних ІТ-архітектурах [10]. Для ІКС переробки залізорудної сировини Edge-рівень виконує наступні функції:

- агрегація та буферизація даних від польових пристроїв, PLC/DCS та засобів оперативного контролю якості – забезпечення локального зберігання даних у разі втрати зв'язку з хмарою;
- нормалізація технологічних показників – приведення даних різних джерел до єдиної семантичної моделі (на основі OPC UA або AAS), вирішення проблеми різномірності форматів та протоколів;
- первинна обробка та фільтрація даних – усунення шуму та аномалій, розрахунок похідних показників (питома витрата енергії на тону продукту, ефективність сепарації тощо);
- виконання алгоритмів управління та оптимізації нижнього рівня (edge analytics)
- розрахунок уставок для регуляторів без необхідності звернення до хмари;
- забезпечення кібербезпеки – фільтрація трафіку, аутентифікація пристроїв, контроль цілісності даних перед відправкою у хмару.

Апаратну основу Edge-рівня складають промислові Edge-сервери або IPC (Industrial PC) з підвищеними вимогами до захисту від електромагнітних завад, пилу та вібрації. Типові представники: Siemens SIMATIC IPC427E, Dell EMC Edge Gateway 3200, HPE Edgeline EL300.

Програмний стек Edge-вузла включає: операційну систему реального часу або Linux-дистрибутив з RT-патчем; OPC UA Server/Client для взаємодії з польовими пристроями та хмарою; брокер MQTT (наприклад, Eclipse Mosquitto) для публікації даних; контейнерне середовище (Docker/Kubernetes) для розгортання мікросервісів аналітики; систему локального зберігання даних (time-series DB рівня Edge, наприклад InfluxDB Edge або TimescaleDB) [10].

Зв'язок Edge-рівня з хмарою здійснюється через захищені канали (VPN, TLS 1.3) за протоколами MQTT або AMQP [11, 12], що відповідає архітектурному принципу однопоточної передачі критичних технологічних даних від промислової мережі до хмари.

Технологічні дані процесів переробки залізорудної сировини є за своєю природою часовими рядами (time-series), що обумовлює застосування спеціалізованих баз даних цього типу. Базы даних часових рядів (TSDB) забезпечують: компресію та ефективне зберігання великих обсягів часових рядів, швидке виконання запитів на часові проміжки та агрегацію, підтримку функцій даунсемплінгу та автоматичного видалення застарілих даних.

У якості TSDB для ІКС переробки залізорудної сировини рекомендується застосування: InfluxDB [12] або TimescaleDB (на основі PostgreSQL) для операційного зберігання технологічних даних з горизонтом до 1 року; Apache Parquet/Delta Lake на хмарних об'єктних сховищах (AWS S3, Azure Blob) для довготривалого архівування та машинного навчання. Для доступу до даних з рівня SCADA та MES застосовується OPC Historical Data Access (OPC HDA) або REST API відповідної TSDB.

Цифровий двійник (Digital Twin) технологічного процесу збагачення є ключовим елементом хмарного рівня ІКС. Відповідно до RAMI 4.0, цифровий двійник реалізуєть-

ся як оболонка адміністрування активу (AAS) для технологічної системи в цілому та її окремих компонентів.

Для ІКС переробки залізорудної сировини виділяються наступні типи цифрових двійників:

– Цифровий двійник агрегату (Equipment Digital Twin) – для ключового обладнання (кульових млинів, барабанних сепараторів). Моделює кінетику подрібнення/сепарації, поточний стан зносу, прогнозований залишковий ресурс.

– Цифровий двійник технологічної комірки (Process Cell Digital Twin) – для замкнутого циклу подрібнення або ділянки флотації. Інтегрує моделі окремих агрегатів та моделює матеріальні та енергетичні баланси.

– Цифровий двійник підприємства (Plant Digital Twin) – охоплює весь технологічний ланцюжок від прийому сировини до відвантаження продукту. Застосовується для оперативного планування виробництва та оптимізації енергоспоживання.

Моделі цифрових двійників будуються на основі комбінації фізично обґрунтованих моделей та моделей на основі даних (нейронні мережі, gradient boosting), що дозволяє забезпечити прийнятну точність навіть при неповноті знань стосовно фізичних параметрів процесу.

На хмарному рівні реалізуються алгоритми оптимізації, що оперують на горизонті від декількох годин до доби. Основною задачею є мінімізація питомого енергоспоживання на тону виробленої продукції при дотриманні вимог до якості продукту та продуктивності.

Для вирішення задачі оптимізації застосовуються: Model Predictive Control (MPC) на основі лінеаризованих моделей цифрових двійників технологічних комірок [13]; алгоритми оптимізації з обмеженнями (gradient-based, evolutionary); методи машинного навчання з підкріпленням (Reinforcement Learning) для адаптивного управління в умовах мінливих характеристик сировини. Результати оптимізації транслюються у вигляді оперативних рекомендацій (установок) через рівень SCADA/DCS до регуляторів польового рівня.

Для підвищення практичної цінності запропонованої архітектури доцільно виділити в її складі спеціалізовані аналітико-керуючі модулі для окремих технологічних комірок збагачення. У контексті переробки залізорудної сировини такими комірками можуть бути замкнутий цикл подрібнення–класифікації, вузол магнітної сепарації, а також комбіновані ділянки, у межах яких формується якість концентрату та основна частка питомих енерговитрат. Для кожної з таких комірок доцільно формувати локальний цифровий двійник, орієнтований на прогнозування технологічного стану та підтримку прийняття рішень щодо оптимального режиму роботи.

Інформаційною основою функціонування такого модуля є потоки технологічних даних, що надходять із рівня польових пристроїв, локальних систем керування та засобів оперативного контролю якості. До найбільш інформативних змінних належать витрата живлення, густина та витрата пульпи, крупність продукту класифікації, вміст заліза у вихідному та кінцевому продуктах, споживана потужність основного обладна-

ння, а також сигнали про поточний технічний стан технологічних апаратів. Сукупний аналіз цих даних у середовищі Edge та хмарного рівня дає змогу перейти від реактивного способу керування до прогнозно-орієнтованого, в якому рішення формуються з урахуванням очікуваної динаміки процесу та наявних технологічних обмежень.

Для процесів збагачення залізорудної сировини особливо доцільним є поєднання фізично обґрунтованих моделей із моделями, побудованими на основі даних. Такий гібридний підхід дозволяє враховувати як відомі закономірності подрібнення, класифікації та сепарації, так і складні нелінійні залежності, які важко формалізувати аналітично в умовах змінних характеристик мінералого-технологічних різновидів руди. У межах запропонованої архітектури моделі машинного навчання можуть використовуватись як м'які сенсори для оцінювання важковимірюваних показників, для короткострокового прогнозування вмісту заліза у концентраті, крупності продукту або питомих витрат енергії, а також для адаптації параметрів цифрового двійника до поточного стану технологічного об'єкта.

На основі прогнозної моделі технологічної комірки може бути реалізовано модельно-прогнозне керування, яке забезпечує обчислення оптимальних уставок для локальних контурів регулювання з урахуванням багатокритеріальності процесу керування. На відміну від традиційних підходів, MPC дозволяє одночасно враховувати вимоги до якості концентрату, продуктивності, стабільності технологічного режиму та мінімізації енергоспоживання. При цьому у задачі оптимізації можуть бути враховані обмеження на витрату води, подачу руди, навантаження на млини, допустимі режими роботи сепараторів, а також обмеження, пов'язані з коливаннями гранулометричного складу та вмісту заліза у сировині.

З погляду реалізації в інформаційно-керуючій системі модуль машинного навчання та MPC доцільно розміщувати на Edge-рівні або на верхньому рівні керування залежно від вимог до швидкодії та обчислювальних ресурсів. Edge-рівень є доцільним для задач, що потребують оперативного перерахунку уставок у реальному часі або квазі-реальному часі, тоді як хмарний рівень придатний для більш складних обчислень, перенавчання моделей, багатоваріантної оптимізації та аналізу історичних даних. Такий розподіл функцій забезпечує масштабованість системи, зменшує затримки при прийнятті рішень і водночас зберігає можливість централізованого вдосконалення моделей та алгоритмів керування.

Запропонований підхід дозволяє інтегрувати в єдину архітектуру засоби онлайн-аналітики, цифрові двійники, модулі машинного навчання та алгоритми модельно-прогнозного керування, що є особливо важливим для енергоефективної переробки залізорудної сировини. У результаті формується основа для побудови інтелектуальної ІКС, здатної не лише реєструвати поточний стан процесу, а й прогнозувати його розвиток, виявляти тенденції до погіршення якості продукту чи зростання енерговитрат та своєчасно формувати керуючі впливи для стабілізації й оптимізації технологічного режиму.

Своєю чергою, стандарт ISA/IEC 62443 «Мережева та системна безпека для промислових систем автоматизації та управління» є галузевим стандартом кібербезпеки

для промислових систем управління (IACS) [14, 15]. Він визначає концепцію зон безпеки (Security Zones) та кондуїтів (Conduits), рівні безпеки (Security Levels, SL 1-4), а також вимоги до засобів захисту (Security Countermeasures).

Зони безпеки являють собою логічні або фізичні групи активів системи управління з подібними вимогами до безпеки. Кондуїти – це комунікаційні канали між зонами, які мають бути захищені відповідно до вимог обох підключених зон.

Для розроблюваної ІКС запропоновано розподіл на зони безпеки та відповідні заходи захисту (табл. 2).

Особливу увагу слід приділити захисту кондуїту між промисловою мережею (Зона 2/3) та Edge-рівнем [15]. Рекомендується застосування апаратних однонаправлених шлюзів (data diodes), що фізично унеможливають зворотну передачу даних з мережі Edge до промислової мережі, забезпечуючи захист від кібератак типу «pivot».

Таблиця 2

Зони безпеки та заходи захисту відповідно до ISA/IEC 62443

Зона / Кондуїт	Рівень безпеки (SL)	Ключові заходи захисту
Зона 1 – Польовий рівень	SL 1	Фізичний захист обладнання, базова автентифікація
Зона 2 – Управління процесом	SL 2	Сегментація мережі, контроль доступу на рівні ролей (RBAC)
Зона 3 – Диспетчерський рівень (SCADA)	SL 2–3	DMZ, шифрування трафіку (TLS 1.3), аудит подій
Зона 4 – Edge Gateway	SL 2	Однонаправлені шлюзи (data diode), VPN, аутентифікація пристроїв (X.509)
Зона 5 – Хмарна платформа	SL 3	Zero-trust архітектура, шифрування даних у стані спокою та передачі, SOC/SIEM

Для виявлення аномалій у трафіку промислових мереж та інцидентів кібербезпеки рекомендується розгортання системи промислового виявлення вторгнень (Industrial IDS) на рівні SCADA/DCS, сумісної з такими платформами, як Clarity, Dragos або Nozomi Networks.

Результати та обговорення. Розроблена архітектура ІКС для енергоефективної переробки залізорудної сировини являє собою інтегровану багаторівневу систему, що охоплює польовий рівень (рівні 0-1 ISA-95), рівень управління процесом (рівень 2 ISA-95), диспетчерський рівень (рівень 3 ISA-95), Edge-рівень та хмарний рівень (рис. 1).

Відповідність RAMI 4.0 забезпечується: застосуванням OPC UA як єдиного комунікаційного стандарту між рівнями; реалізацією концепту Asset Administration Shell для ключових компонентів системи (аналізаторів якості, основного обладнання, цифрових двійників); орієнтацією на сервісно-орієнтовану архітектуру на хмарному рівні.

Інтеграція засобів оперативного контролю якості залізорудної сировини як I4.0 Components дозволяє забезпечити семантичну сумісність їх даних з рештою системи та використання цих даних у алгоритмах управління та оптимізації на всіх рівнях ієрархії.

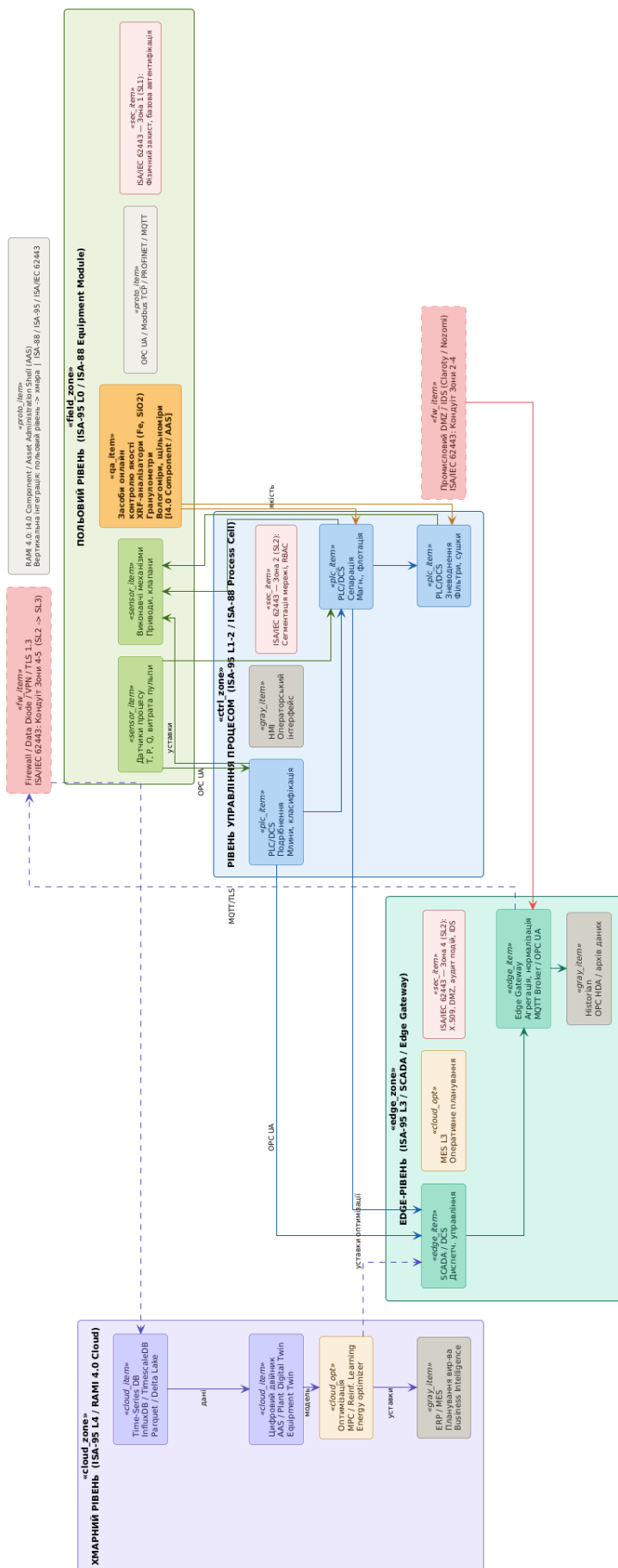


Рисунок 1 – Архітектура ІКС для енергоефективної переробки залізрудної сировини

Edge-рівень забезпечує зниження затримки реакції на зміни технологічних параметрів, зменшення обсягу трафіку у напрямку хмари (до 90% за рахунок локальної агрегації та фільтрації), а також підвищення відмовостійкості системи при втраті зв'язку з хмарою.

Очікуваний ефект від впровадження розробленої ІКС: зниження питомого енергоспоживання на збагачення на 8–15% за рахунок оптимізації режимів подрібнення та сепарації; підвищення вмісту заліза у концентраті на 0,5–1,5%; скорочення нерентабельних простоїв основного обладнання на 20–30% за рахунок предиктивного технічного обслуговування.

Висновки. У статті розроблено та обґрунтовано архітектуру інформаційно-керуючої системи для енергоефективної переробки залізорудної сировини, що відповідає сучасним вимогам у сфері промислової автоматизації та цифрової трансформації. Основні результати роботи:

– запропоновано багаторівневу архітектуру ІКС на основі референсної моделі RAMI 4.0 з ієрархічним розподілом функцій відповідно до ISA-88 та ISA-95.

– розроблено підхід до інтеграції засобів оперативного контролю якості залізорудної сировини (XRF-аналізаторів, гранулометрів, вологомірів) у загальну структуру ІКС із застосуванням концепту Asset Administration Shell.

– обґрунтовано роль та функції Edge-рівня як ключового проміжного шару між польовим рівнем та хмарою, що забезпечує первинну агрегацію, нормалізацію та локальну аналітику технологічних даних.

– визначено архітектуру хмарного рівня з розгортанням баз даних часових рядів (InfluxDB, TimescaleDB), платформ цифрових двійників та алгоритмів оптимізації верхнього рівня (MPC, Reinforcement Learning).

– розроблено систему зон безпеки та кондуїтів відповідно до ISA/IEC 62443 з визначенням цільових рівнів безпеки (SL 1-3) для кожної зони.

Подальші дослідження будуть спрямовані на розробку та верифікацію математичних моделей цифрових двійників технологічних комірок збагачення на реальних виробничих даних, а також на практичну апробацію алгоритмів оптимізації верхнього рівня.

Funding: This work was supported by the Erasmus+ Programme of the European Union [GreeDI-EU, Grant Number 101085821].

Disclaimer: Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or European Education and Culture Executive Agency (EACEA). Neither the European Union nor the granting authority can be held responsible for them.

ЛІТЕРАТУРА

1. Past, present and future of Industry 4.0 - a systematic literature review and research agenda proposal / Y. Liao та ін. *International Journal of Production Research*. 2017. Т. 55, № 12. С. 3609–3629. DOI: 10.1080/00207543.2017.1308576

2. Reference Models for Digital Manufacturing Platforms / Fraile та ін. *Applied Sciences*. 2019. Т. 9, № 20. С. 4433. DOI: 10.3390/app9204433
3. Пупена О.М., Клименко О.М., Міркевич Р.М. Принципи функціонування систем керування основним виробництвом через призму стандарту ІЕС-62264: Електронний навчальний посібник. 2019. URL: <https://tk185.appau.org.ua/62264/case-study-iec-62264/momguide>
4. Bridging the Gap: Deriving Specific Reference Architectures from RAMI 4.0 for Flexible Production Systems / С. Binder та ін. *IFAC-PapersOnLine*. 2025. Т. 59, № 10. С. 1119–1124. DOI: 10.1016/j.ifacol.2025.09.189
5. Ontologies for Industry 4.0 / V. R. Sampath Kumar та ін. *The Knowledge Engineering Review*. 2019. Т. 34. DOI: 10.1017/s0269888919000109
6. Пупена О. М. Практичні рекомендації до реалізації елементів стандарту ІЕС 61512 в програмному забезпеченні систем керування / О. М. Пупена, Р. М. Міркевич, О. М. Клименко. – К: АППАУ, ТК 185 «Промислова автоматизація», 2020. – 46 с.
7. Міркевич Р., Пупена О. Оперативно-календарне планування як основа ефективної діяльності сучасних молочних підприємств. *Наукові праці НУХТ*. 2018. Т. 24, № 4. С. 29–40. DOI: 10.24263/2225-2924-2018-24-4-5
8. Pupena O. PacFramework: Technological Solutions for PLC/PAC Programming – A Technical Report on Architecture, Principles, and Practical Implementation. *Preprints 2025*, 2025071180. DOI: 10.20944/preprints202507.1180.v1
9. Пупена О., Клименко О., Полупан В. Систематизація ключових стандартів для цифрових двійників у промисловому виробництві. *Наукові вісники КПІ*. 2025. Т. 140, № 3. DOI: 10.20535/kpissn.2025.3.337306
10. Edge Computing: Vision and Challenges / W. Shi та ін. *IEEE Internet of Things Journal*. 2016. Т. 3, № 5. С. 637–646. DOI: 10.1109/jiot.2016.2579198
11. Siqueira F., Davis J. G. Service Computing for Industry 4.0: State of the Art, Challenges, and Research Opportunities. *ACM Computing Surveys*. 2022. Т. 54, № 9. С. 1–38. DOI: 10.1145/3478680
12. Bousdekis A., Mentzas G. Enterprise Integration and Interoperability for Big Data-Driven Processes in the Frame of Industry 4.0. *Frontiers in Big Data*. 2021. Т. 4. DOI: 10.3389/fdata.2021.644651
13. Model predictive control of power plant cycling using Industry 4.0 infrastructure / D. Kesterling та ін. *Digital Chemical Engineering*. 2023. С. 100090. DOI: 10.1016/j.dche.2023.100090
14. Jhanjhi N., Humayun M., N. Almuayqil S. Cyber Security and Privacy Issues in Industrial Internet of Things. *Computer Systems Science and Engineering*. 2021. Т. 37, № 3. С. 361–380. DOI: 10.32604/csse.2021.015206
15. Secure data exchange in Industrial Internet of Things / A. Sukiasyan та ін. *Neurocomputing*. 2022. Т. 484. С. 183–195. DOI: 10.1016/j.neucom.2021.07.101

REFERENCES

1. Liao, Y., Deschamps, F., Loures, E. d. F. R., & Ramos, L. F. P. (2017). Past, present and future of Industry 4.0 - a systematic literature review and research agenda proposal. *International Journal of Production Research*, 55(12), 3609–3629. DOI: 10.1080/00207543.2017.1308576.
2. Fraile, Sanchis, Poler, & Ortiz. (2019). Reference Models for Digital Manufacturing Platforms. *Applied Sciences*, 9(20), 4433. DOI: 10.3390/app9204433
3. Pupena, O. M., Klymenko, O. M. & Mipkevych, P. M. (2019) Ppyntsypy funktsionuvannia cyctem kepuvannia ocnovnym vypobnytstvom chepez ppyzmu ctandaptu IEC-62264 [Principles of operation of core manufacturing control systems through the lens of the IEC-62264 standard]. [in Ukrainian]
4. Binder, C., Riedmann, S., Neureiter, C., Vollmar, J., Gupta, R., Calà, A., & Lüder, A. (2025). Bridging the Gap: Deriving Specific Reference Architectures from RAMI 4.0 for Flexible Production Systems. *IFAC-PapersOnLine*, 59(10), 1119–1124. DOI: 10.1016/j.ifacol.2025.09.189
5. Sampath Kumar, V. R., Khamis, A., Fiorini, S., Carbonera, J. L., Olivares Alarcos, A., Habib, M., Goncalves, P., Li, H., & Olszewska, J. I. (2019). Ontologies for Industry 4.0. *The Knowledge Engineering Review*, 34. DOI: 10.1017/s0269888919000109
6. Pupena, O. M., Mipkevych, P. M. & Klymenko, O. M. (2020) Ppaktychni pekomentatsii do pealizatsii elementiv ctandaptu IEC 61512 v ppohpamnomu zabezpechenni cyctem kepuvannia [Practical recommendations for the implementation of IEC 61512 standard elements in control system software]. Kyiv: APPAU, TC 185 "Industrial Automation". [in Ukrainian].
7. Mirkevich, R., & Pupena, A. (2018). Planning and scheduling as the basis of effective activity of modern dairy enterprises. *Scientific Works of National University of Food Technologies*, 24(4). DOI: 10.24263/2225-2924-2018-24-4-5 [in Ukrainian].
8. Pupena, O. (2025) PacFramework: Technological Solutions for PLC/PAC Programming – A Technical Report on Architecture, Principles, and Practical Implementation. *Preprints 2025*, 2025071180. DOI: 10.20944/preprints202507.1180.v1
9. Pupena, O., Klymenko, O., & Polupan, V. (2025). Systematyzatsiia kliuchovykh standartiv dlia tsyfrovyykh dviinykiv u promyslovomu vyrobnytstvi [Systematization of key standards for digital twins in industrial manufacturing]. *Naukovi visti KPI*, 3(140). DOI: 10.20535/kpissn.2025.3.337306 [in Ukrainian].
10. Shi, W., Cao, J., Zhang, Q., Li, Y., & Xu, L. (2016). Edge Computing: Vision and Challenges. *IEEE Internet of Things Journal*, 3(5). DOI: 10.1109/jiot.2016.2579198
11. Siqueira, F., & Davis, J. G. (2022). Service Computing for Industry 4.0: State of the Art, Challenges, and Research Opportunities. *ACM Computing Surveys*, 54(9). DOI: 10.1145/3478680
12. Bousdekis, A., & Mentzas, G. (2021). Enterprise Integration and Interoperability for Big Data-Driven Processes in the Frame of Industry 4.0. *Frontiers in Big Data*, 4. DOI: 10.3389/fdata.2021.644651

13. Kestering, D., Agbleze, S., Bispo, H., & Lima, F. V. (2023). Model predictive control of power plant cycling using Industry 4.0 infrastructure. *Digital Chemical Engineering*, 100090. DOI: 10.1016/j.dche.2023.100090
14. Jhanjhi, N., Humayun, M., & N. Almuayqil, S. (2021). Cyber Security and Privacy Issues in Industrial Internet of Things. *Computer Systems Science and Engineering*, 37(3). DOI: 10.32604/csse.2021.015206
15. Sukiasyan, A., Badikyan, H., Pedrosa, T., & Leitao, P. (2022). Secure data exchange in Industrial Internet of Things. *Neurocomputing*, 484. DOI: 10.1016/j.neucom.2021.07.101

Received 24.04.2026.

Accepted 27.04.2026.

Published 30.04.2026

Development of an information and control system architecture for energy-efficient iron ore processing

Analysis of recent research and publications. The high energy intensity of iron ore processing necessitates the implementation of control systems based on streaming data analysis. Recent studies confirm the effectiveness of integrating IIoT platforms, edge computing, and cloud services. Traditional hierarchical architectures are limited by weak horizontal integration and a lack of predictive control tools. Designing multi-level systems to process data arrays from on-stream quality analyzers while accounting for the RAMI 4.0 reference model and strict cybersecurity requirements requires a comprehensive approach.

Purpose of the research. To substantiate a comprehensive multi-level architecture of an information and control system aimed at minimizing the specific energy consumption of beneficiation processes through multi-criteria data processing in accordance with the ISA-88, ISA-95, and ISA/IEC 62443 industry standards.

Presentation of the main research material. The proposed architecture is based on the RAMI 4.0 concept. At the field level, on-stream analyzers are integrated via Asset Administration Shells to guarantee semantic interoperability. The implemented Edge level provides primary aggregation, normalization, and local analytics of technological data, critically reducing the load on industrial networks and transmission latency. The cloud level operates with specialized time-series databases and digital twins of process cells. Energy consumption optimization is achieved by combining physics-based models and machine learning methods within a unified Model Predictive Control loop. The system's cybersecurity is implemented through spatial distribution into secure zones using hardware data diodes.

Conclusions. The developed architecture constitutes a scientific and practical foundation for the digital transformation of the mineral processing industry. The application of hybrid predictive models and edge analytics lays the technological groundwork for reducing specific electricity consumption by 8–15%, increasing the iron content in the concentrate by 0.5–1.5%, and minimizing unscheduled downtime. The prospect for further research is the verification of the digital twin mathematical models on real industrial datasets.

Keywords: information and control system; iron ore raw materials; RAMI 4.0; ISA-88; ISA-95; ISA/IEC 62443; Edge computing; digital twin; industrial cybersecurity; energy efficiency.

Рубан Сергій Анатолійович - кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри автоматизації, комп'ютерних наук і технологій, Криворізький національний університет.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4495-6667>

Швец Дмитро Валерійович - кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри моделювання та програмного забезпечення, Криворізький національний університет.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5126-6405>

Котов Ігор Анатолійович - доктор технічних наук, доцент, професор кафедри моделювання та програмного забезпечення, Криворізький національний університет.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2445-6259>

Тронь Віталій Валерійович - кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації, комп'ютерних наук і технологій, Криворізький національний університет.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6149-5794>

Карабут Надія Олександрівна - старший викладач кафедри моделювання та програмного забезпечення, Криворізький національний університет.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2327-4595>

Ruban Serhii Anatoliyovych - Ph.D., Head of the Department of Automation, Computer Sciences and Technology, Kryvyi Rih National University.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4495-6667>

Shvets Dmytro Valeriyovych - Ph.D., Associate Professor of the Modeling and Software Department, Kryvyi Rih National University.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5126-6405>

Kotov Ihor Anatoliyovych - Doctor of Sciences, Professor of the Modeling and Software Department, Kryvyi Rih National University.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2445-6259>

Tron Vitaliy Valeriyovych - Ph.D., Associate Professor of the Department of Automation, Computer Sciences and Technology, Kryvyi Rih National University.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6149-5794>

Karabut Nadiya Oleksandrivna - Senior Lecturer, Modeling and Software Department, Kryvyi Rih National University.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2327-4595>.