

УДК 681.5

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2024-2-12>

МОДЕРНІЗАЦІЯ АСКТП-ДОЗУВАННЯ Й ОГРУДКУВАННЯ НА ВИПАЛЮВАЛЬНИХ МАШИНАХ З УРАХУВАННЯМ ВОЛОГОСТІ КОНЦЕНТРАТУ І ШИХТИ ТА ГРАНУЛОМЕТРІЇ СИРИХ ОКАТИШІВ

Стебелько Ігор Євгенович,

студент-магістр

ТОВ «Технічний університет «Метінвест політехніка»

ORCID ID: 0009-0002-0915-7947

Койфман Олексій Олександрович,

кандидат технічних наук, доцент,

завідувач кафедри автоматизації, електро- та робототехнічних систем

ТОВ «Технічний університет «Метінвест політехніка»

ORCID ID: 0000-0003-2075-7417

Бондар Олег Володимирович,

начальник відділу автоматизації управління проєктуванням

ТОВ «Метінвест Січсталь»

Король Вадим Миколайович,

заступник генерального директора з питань проєктування

ТОВ «Метінвест Січсталь»

У статті розглянуті основні аспекти автоматизації відділення шихтопідготовки та відділення огрудкування, які входять до основного процесу виготовлення випалених окатишів на випалювальних машинах типу Lurgi й ОК. Після ознайомлення з основними аспектами було визначено проблематику автоматизації даних технологічних процесів. Пропонується в наявну систему автоматизації інтегрувати вимір вологості в залізорудному концентраті та шихті, які необхідні для виготовлення окатишів, та замінити візуальний контроль за процесом огрудкування, який здійснює машиніст огрудковувача, на застосування засобів інтелектуального бачення з подальшою обробкою і передачею аналітичної інформації поточного гранулометричного складу на HMI екран SCADA. Поточний контроль вологості матеріалу для виготовлення окатишів і крупність гранулометричного складу окатиша надає можливість реагувати та впливати на якість виготовлення окатишів з урахуванням динаміки зміни параметрів шихтового матеріалу та сирих окатишів.

Ключові слова: окатиш, шихтопідготовка, огрудкування, вологість залізорудного концентрату, машинний зір, «годний» клас, людино-машинний інтерфейс.

Stebelko Ihor, Koifman Oleksii, Bondar Oleh, Korol Vadym. Modernization of automated dosing and pelletizing control system of roasting machines considering the moisture of the concentrate and the charge and granulometry of the raw iron pellet

The article discusses the main aspects of automation of the charge preparation and pelletizing departments, which are part of the main process of producing fired pellets using Lurgi and OK roasting machines. After familiarizing ourselves with the main aspects, we identified the problems of automation of these technological processes. It is proposed to integrate moisture measurement in iron ore concentrate and charge required for pellet production into the existing automation system and replace visual control of the pelletizing process performed by the pelletizer operator with the use of intelligent vision tools with subsequent processing and transfer of analytical information on the current particle size distribution to the HMI SCADA screen. The current control of the moisture content of the pelletizing material and the particle size distribution of the pellet makes it possible to respond and influence the quality of pellet production, taking into account the dynamics of changes in the parameters of the charge material and raw pellets.

Key words: pellet, charge preparation, pelletizing, iron ore concentrate moisture content, machine vision, "fit" class, human-machine interface.

Вступ. Автоматизація процесів у гірничо-металургійному виробництві України натеper здебільшого побудована у класичному вигляді. Структура систем автоматизованого управління окремого технологічного процесу складається із простих і надійних рішень.

Розглянемо такі два взаємопов'язані технологічні процеси, як шихтопідготовка й огрудкування, які є складовими частинами основної технології з виготовлення випалених залізорудних окатишів на випалювальних машинах ОК або Lurgi. Ділянка шихтопідготовки потрібна для змішування основних складників окатишів, як-от: залізорудний концентрат, мелений окатиш, бентоніт і вапно. Вапно та бентоніт спочатку підсипаються дозаторами із заданою часткою на конвеєр із залізорудним концентратом, а потім вся маса перемішується у великих вихрових змішувачах, утворюючи однорідну шихту. Далі готовий матеріал потрапляє з'єднувальними конвеєрами та накопичувальними бункерами з дозаторами до чаш-огрудковувачів. Огрудковувачі – тарілчасті чаші з бортом, які обертаються за допомогою електроприводу. Процес огрудкування виконується із заданою швидкістю та під визначеним нахилом чаші. Концентрат формується в рівномірні сирі окатиші за допомогою водяного зрошення. Гранулометричний склад окатишів включає п'ять класів за розміром (вірогідні класи крупності: перший – <10 мм; другий 10–12,5 мм; третій – 12,5–14 мм; четвертий – 14–18 мм; п'ятий – >18 мм). Для технології з виробництва сирих окатишів потрібен визначений діапазон їхньої крупності, а саме «годний» клас – у межах 10–14 мм, формування якого є завданням для автоматизованих систем керування технологічними процесами (далі – АСКТП) шихтування й огрудкування.

Якісні показники залізорудного концентрату, зокрема частка вологи в концентраті й у шихті, напряму впливають на процес огрудкування й отримання «годного» класу: від значення вологості залежить витрата домішок на приготування шихти (бентоніт і мелений окатиш) та витрата води під час огрудкування. Урахування вологості концентрату та вихідної шихти та поточний контроль крупності окатишів у реальному часі технологічного процесу є необхідними динамічними параметрами для двох автоматизованих систем керування (далі – АСК), завданням яких є формування «годного» класу.

Матеріали та метод. У наявній на виробництві АСК шихтопідготовкою оператор через HMI-інтерфейс SCADA-системи контролює процес дозування та змішування шихти за допомогою

поточних технологічних даних із вагових дозаторів і конвеєрів і в ручному режимі регулює продуктивність виходу шихти на ділянку огрудкування. В АСК огрудкуванням оперативна інформація з вагових конвеєрів шихтопідготовки та з дозаторів бункерів на огрудкуванні надходить на HMI-інтерфейс АРМ агломератника та машиніста огрудковувача. Додатково машиніст виконує постійний візуальний контроль процесу огрудкування, залежно від того, як формується окатиш, регулює в ручному режимі параметри роботи чаші (швидкість та кут нахилу) і витрату води, що напряму впливає на ефективність і якість огрудкування, а саме на отримання «годного» класу.

Процес управління огрудкуванням складається з таких завдань:

- регулювання продуктивності кожної чаші шляхом зміни продуктивності дозаторів;
- регулювання гранулометричного складу окатишів шляхом зміни кута нахилу самої чаші та її швидкості обертання;
- регулювання вологості та формування окатишів шляхом подачі зрошувальної води на концентрат, який потрапляє в чашу, для формування окатишів;
- візуальний контроль за фракцією (класом) сирих окатишів.

Нині головним завданням дослідження є формування пропозицій щодо автоматизованого управління процесами шихтування й огрудкування під час виготовлення випалених залізорудних окатишів на випалювальних машинах із забезпеченням виходу необхідної частки «годного» класу окатишів шляхом інтегруванням додаткових параметрів (контроль вологості та контроль крупності окатишів машинним зором) у систему управління й оперативним реагуванням системи на динамічні зміни характеристик сировини.

Для розуміння напряму пошуку шляхів рішень сформованого завдання важливо звернутись до вже наявних способів вирішення даної проблематики, зробити огляд дослідницьких робіт із відкритих джерел.

У праці [1] розглядається підвищення ефективності процесу дозування шихтових матеріалів для виготовлення залізорудних окатишів, забезпечення заданої вологості шихти шляхом формування узгодженого адаптивного керування комплексом механізмів тракту транспортування та дозування шихти, але в роботі, окрім математичних моделі керування, не пропонується конкретних способів виміру вологості, можливості застосування машинного зору у процесі огрудкування.

Авторами роботи [2] запропонована схема ланцюгів апаратів максимальної ефективності для підвищення якості дозування шихтових матеріалів під час огрудкування, але даний ланцюг не передбачає можливості контролю вологості шихти в потоці та використання машинного зору під час формування окатишів.

У роботі [3] авторами опрацьований огляд сфер застосування систем машинного зору та методів оброблення зображень на виробництві, детально розглянуто основні компоненти систем машинного зору, наведено їх класифікацію, але не розглянуто застосування машинного зору в технологічному процесі огрудкування.

У статті [4] розглядається застосування машинного зору для підвищення ефективності, якості та надійності виявлення дефектів на виробництві, але не розглядається можливість застосування машинного зору у виробництві окатишів.

У роботі [5] пропонується розгляд інтелектуального вимірювання вологості вугілля на основі мікрохвиль. Даний метод розроблений для зменшення часу вимірювання без завдання шкоди матеріалу вимірювання. Дане рішення комплексно не розв'язує проблему для технологічного процесу огрудкування, тому що вимір виконується не в потоці.

Авторами роботи [6] розроблено модель АСКТП із чіткою ієрархією для процесу шихтопідготовки для агломераційного виробництва, яка об'єднує всі локальні підсистеми в одну, але в даній моделі відсутні допоміжні аналітичні вимірювання вологості шихти, необхідні для забезпечення максимальної ефективності процесу шихтопідготовки агломераційного виробництва.

Автор роботи [7] має на меті розробити автоматизовану систему зберігання сипучих речовин у резервуарах з аналітичним виміром основних важливих параметрів, як-от температура та вологість, але вимірювання буде виконуватись у статичному стані, а не в потоці на конвеєрі.

У роботі [8] автори вирішують ефективність процесу шихтування застосуванням автоматизованої системи керування з використанням засобів нечіткої логіки. Основною лінією рішення проблематики є регулювання швидкості стрічки конвеєра за допомогою нечіткого регулятора, що дає можливість краще пристосуватись до технологічного процесу з усіма його впливами та збуреннями, але в цій роботі не враховуються інші важливі параметри, як-от вологість шихти та розмір окатишів.

Автори статті [9] аналізують основні аспекти застосувань машинного зору на виробництві та пропонують методи покращення машинного зору на основі проведених досліджень. У праці детально розглянуто недоліки системи машинного зору.

Автори статей [10] та [11] пропонують різні методи неруйнівного контролю вологості сипучих матеріалів на основі мікрохвильового методу [10] й оптичного (інфрачервоного (далі – ІЧ)) методу. Хоча дані методи спостерігаються не конкретно в розрізі залізородного концентрату та шихти, вимір не в потоці, вони можуть бути використані в технологічному процесі виробництва окатишів з подальшою модернізацією апаратно-програмної частини.

Аналіз поточного стану питання й огляд актуальних літературних джерел показав, що вирішення головного завдання можливе з такими напрямами модернізації наявної системи автоматизованого управління, як:

1. Інтеграція автоматичного контролю вологості в залізородному концентраті на вході ділянки шихтопідготовки та вологості шихти на виході з неї. Що, по-перше, допоможе більш ефективно витратити домішки під час формування шихти, по-друге, забезпечить оперативне реагування під час огрудкування окатишів з розрахуванням необхідної витрати зрошувальної води.

2. Застосування засобів технічного зору для цифрового контролю за процесом формування окатишів з подальшим впливом на керування уставками для огрудкування в автоматичному режимі.

Результати. Застосування приладів-аналізаторів для непрямого вимірювання вологості в залізородному концентраті та в шихті є головною складовою частиною вирішення проблематики модернізації АСКТП першого напрямку. Пропонується використання саме приладів непрямого та неконтактного способу вимірювання вологості, через конструктив технологічного обладнання та рух матеріалів, немає можливості в потоці використовувати контактні способи вимірювання їхньої вологості.

До непрямих методів вимірювання [11] належать механічні, електричні, радіаційні, оптичні, надвисокочастотні, акустичні та теплофізичні. На практиці найбільш поширеними рішеннями є застосування оптичного та нейтронного методів [11], які ефективно використовуються для виміру в потоці. На рис. 1 (а, б) зображено приклади встановлення аналізаторів на конвеєрних стрічках для виміру вологості шихтових матеріалів у потоці.



а) б)
Рис. 1. Приклади застосування на виробництві аналізаторів вологості: а – оптичний (ІЧ), б – нейтронний

Нейтронний метод має такі переваги: вимірювання вологості в широкому діапазоні (до 100%); нечутливість до розподілу вологи у зразку і його мінералогічного складу; контроль динаміки сушки; можливість вимірювати вологість матеріалів без відбору проб і порушення структури об'єкта та значний об'єм матеріалу, що аналізується під час вимірювання вологості; широкий спектр матеріалів для аналізу.

Наведені переваги нейтронного методу дозволяються використовувати його для визначення вологості матеріалу в потоці, але він має низку суттєвих недоліків [11], як-от: вплив на результати вимірювань елементів, які ефективно поглинають нейтрони (хлор, бор, залізо); наявність органічних домішок, які збільшують концентрацію нейтронів; варіації щільності контрольованого середовища в межах ± 100 кг/м³, які призводять до похибок, що залежать від діапазону вологості; зміна відстані між джерелом і детектором.

І найголовніший недолік, якого немає в ІЧ-методі, це небезпека виникнення в досліджуваному матеріалі наведеної радіоактивності, через що додатково постає необхідність використання біологічного захисту для персоналу.

З іншого боку, до переваг ІЧ-методу можна віднести такі: високу вибірковість, чутливість, точність і відтворюваність вимірювань; можливість безперервного контролю, безконтактність і експресний аналіз; досягнення найбільшої точності за вологості 0–30%, а для вимірювання низького вологовмісту цей метод є просто незамінними; абсолютна похибка результатів вимірювання вмісту вологи становить приблизно 0,05%; незалежність результатів вимірювання від маси одиниці площі матеріалу, від вмісту в ньому деяких речовин і домішок.

Використання ІЧ-методу вимірювання вологості залежить від довжини хвилі ($\lambda \leq 2$ мкм), товщини шару матеріалу, рівня зв'язку води із твердою речовиною, від температури матеріалу

(зміна температури на 1% еквівалентна зміні вмісту вологи на 0,002%) [11]. Для забезпечення бажаної точності вимірювання необхідно врахувати наведені особливості.

Виходячи з порівняльного аналізу двох ефективних методів виміру вологості в матеріалі, варто зробити висновок, що застосування ІЧ-методу відбитої хвилі є найбільш перспективним у рішенні проблематики першого напрямку, що дозволить оптимізувати й автоматизувати процес управління сушінням продукту за вологістю, проводити експресний контроль вологості та найсуттєвіше – забезпечення контролю вологості матеріалу в потоці.

Вологість концентрату в умовах рудозбагачувальної фабрики має не перевищувати 10,5% [12], а для процесу огрудкування – бути в межах 9,6–9,8%. Якщо на вході в шихтопідготовче відділення вологість концентрату, наприклад, становить 10,1%, то після процесу приготування шихти дана вологість має бути знижена до 9,8% за допомогою домішок. Водночас витрати домішок залежно від особливостей окремого технологічного процесу на випалювальній машині може різнитись і також напряму залежить від загального об'єму залізородного концентрату.

Якщо на дільницю огрудкування надійшла шихта з вологістю вище 9,8% (нештатна ситуація), витрата води у процесі огрудкування буде залежати також від вологості вихідної шихти. У нормальних умовах, коли система автоматизації шихтопідготовки виконала завдання з корегування вологості шихти ($\leq 9,8\%$), витрата води на огрудкуванні буде залежати тільки від поточної потреби процесу формування сирих окатишів.

Натепер промисловість із виробництва контрольно-вимірювальних приладів може запропонувати широкий спектр варіантів вимірювальної техніки, але для виміру вологості матеріалу в потоці варто звернути увагу на ІЧ-аналізатор МСТ460 компанії "Process Sensors" (рис. 2) [13], промислове застосування якого дало ефективне рішення завдання з контролю вологості різних за складом матеріалів у різних сферах промисловості. Також зазначимо, що технічні характеристики МСТ460 цілком відповідають використанню в умовах рудозбагачувальної фабрики. У серії МСТ460 використовується запатентоване програмне забезпечення Viewer Suite для ПК на базі Windows, що дозволяє операторам вводити параметри налаштування, виконувати або коригувати калібрування, вибирати коди продуктів, перевіряти внутрішні діагностичні значення та віддалено переглядати тренди вологості та температури.



Рис. 2. Process Sensors MCT460

Наявність уніфікованого вихідного сигналу (4-20 мА, або 0-10 В) дає можливість додати додатковий сигнал в існуючу систему та забезпечити оператора шихтопідготовки й агломератника в динаміці можливість бачити поточну вологість залізородного концентрату та шихти. На рис. 3 зображено структурну схему АСКТП шихтопідготовки з урахуванням виміру вологості концентрату та шихти.

Наступним кроком у вирішенні поставленого завдання є заміна візуального контролю за процесом огрудкування на цифровий контроль шляхом застосування засобів технічного зору, який включає такі складники:

інтелектуальні камери та система освітлення; контролер системи технічного зору; програмований логічний контролер ділянки огрудкування; АРМ агломератника та машиніста огрудковувача.

Одним із найвідоміших виробників засобів систем машинного зору є Omron, із продукції якого можна виділити камеру моделі FZ-SC2M [14] та контролер технічного зору FH-5552-10 [15] (рис. 4), параметри використання яких відповідають умовам виробництва окатишів.

Інтелектуальні камери необхідно спрямувати на ділянку розвантаження сирих окатишів з огрудковувачів для отримання інформації про розмір окатиша. Сигнали з усіх камер, установлених на чашах, передаються до контролера системи технічного зору та після оброблення інформація, розподілена за класами, поступає до головного програмованого логічного контролера системи керування.

Завдання для АСК ділянки огрудкування – тримати гранулометричний склад у «гідному» класі не менше 60% від загального розподілу (рис. 5).

На рис. 6 представлено структура АСК технологічної ділянки огрудкування з урахуванням системи технічного зору.

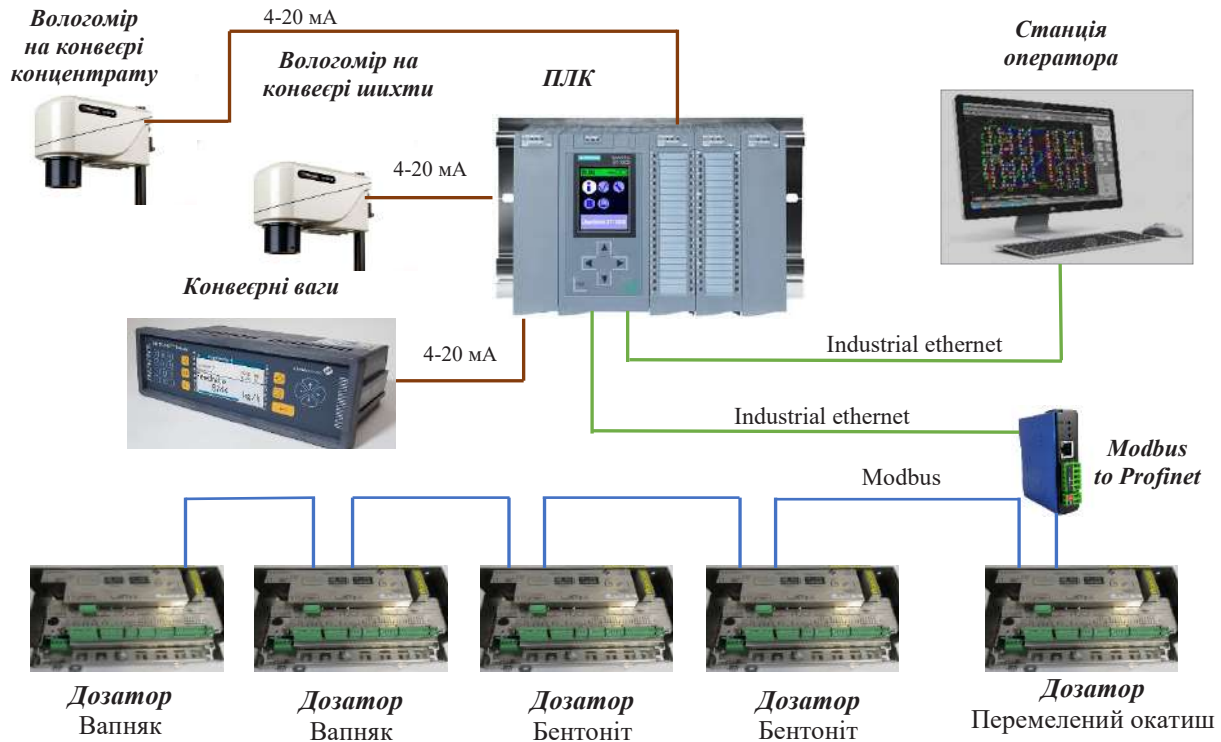


Рис. 3. Структурна схема модернізованої АСКТП шихтопідготовки



а) б)
Рис. 4. Інтелектуальна камера (а) та контролер технічного зору (б)

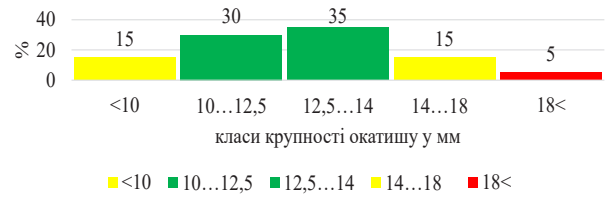


Рис. 5. Приклад гістограми розподілення класів крупності у відсотковому відношенні для одного огрудковувача

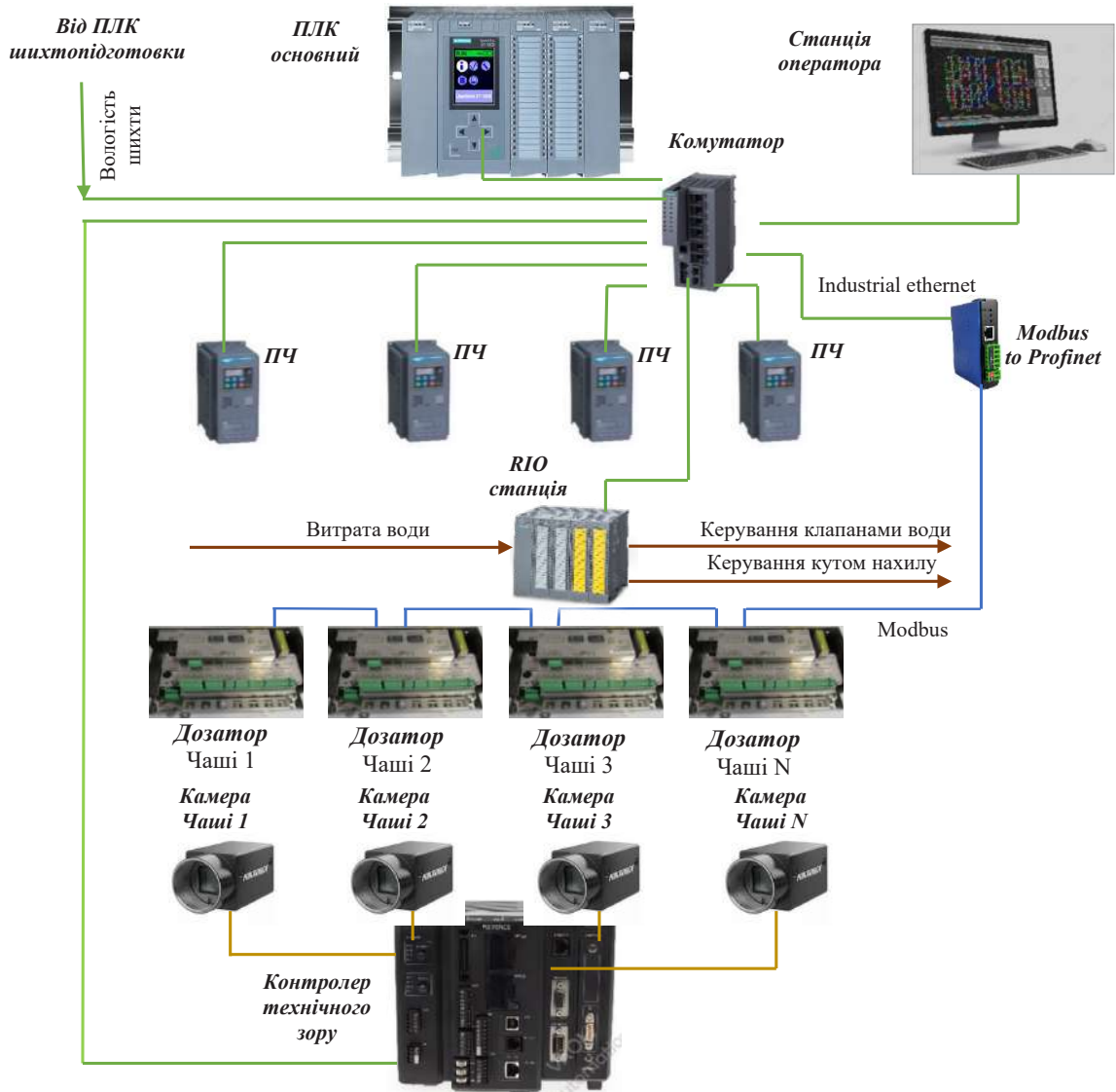


Рис. 6. Структурна схема модернізованої АСКТП огрудкування сирих окатишів

Оброблена інформація з головного ПЛК за протоколом Ethernet потрапить на АРМ агломератника, на якому через НМІ-інтерфейс будуть інтегровані основні функції контролю гранулометричного

складу окатишів та ручний і автоматичний режими регулювання огрудкування сирих окатишів.

Параметри, які будуть залежати від гранулометричного складу, такі:

– кут нахилу тарелі чаші огрудковувача: 45–55°. Наприклад, якщо крупність окатишів зменшується та виходить з діапазону «годного» класу, потрібно, щоб окатиш більше часу перебував у тарелі, для чого потрібно зменшити кут його нахилу, натомість у разі збільшення крупності – кут нахилу збільшити;

– швидкість обертання тарелі чаші: від 6,5 до 7,3 об./хв. Наприклад, якщо крупність окатишів зменшується та виходить із діапазону «годного» класу, потрібно також збільшити час знаходження окатишів у тарелі, тобто зменшити швидкість обертання. За збільшення крупності – збільшити швидкість обертання;

– витрата зрошувальної води, немає офіційних нормативів, але в середньому за встановленого витратоміра її значення сягає приблизно 10 л/хв. Наприклад, якщо крупність окатишів зменшується та виходить з діапазону «годного» класу, потрібно збільшити витрату зрошувальної води, щоби краще огрудковувалась шихта та до зародку окатишів наліплялось більше додаткового матеріалу. Якщо розмір збільшується, то витрату води необхідно зменшити. Додатково на витрату зрошувальної води впливає вологість шихти, але даний параметр буде аналітичним, тому що основним впливом на витрату води є поточний гранулометричний склад. Якщо параметри поточної шихти будуть виходити за межі оптимальної вологості для огрудкування, з'являється можливість вносити як у ручному, так і в автоматичному режимі корективи на витрату води, формувати керівні впливи на заслінки подачі води. Варто зауважити, що дані закономірності враховуються

в разі стабільної (незмінної) подачі шихти на чаші огрудковувачів.

Висновки. У разі отримання аналітичної інформації щодо вологості залізородного концентрату та шихти в технологічному процесі шихтопідготовки та стосовно крупності гранулометричного складу окатишів у процесі їх огрудкування з'являється можливість реалізувати автоматизоване керування основними витратними матеріалами. Поточне значення вологості буде частиною розрахунку завдання для контролера шихтопідготовки, який буде формувати керівний вплив на дозатори, а саме на кількість подачі бентоніту та меленого окатишу на дозаторах для підтримання заданої вологості 9,6–9,8% для наступного процесу огрудкування. Гранулометричний склад буде частиною розрахунку завдання для контролера ділянки огрудкування, який буде формувати керівний вплив на електроприводи механізмів: обертання чаш, кут нахилу та витрати зрошувальної води. Також на витрату зрошувальної води буде впливати аналітична інформація про значення вологості шихти, що надходить на ділянку огрудкування.

Дана модернізація АСК двох технологічних процесів надасть можливість реагувати та впливати на якість виготовлення окатишів з урахуванням динаміки зміни параметрів шихтового матеріалу та сирих окатишів.

У майбутньому авторами дослідження плануються розроблення алгоритмів керування для модернізованих підсистем, пошук можливості підвищення виходу «годного» класу та розрахунок економічного ефекту від упровадження рішення розглянутої проблематики.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Адаптивне керування процесами підготовки шихти для виготовлення залізородних котунів на базі методів теорії гіперстійкості / С.А. Рубан та ін. *Гірничий вісник*. 2020. № 108. С. 34–39. <http://doi.org/10.31721/2306-5435-2020-1-108-34-39>.
2. Можливості підвищення якості дозування шихтових матеріалів цехів огрудкування / М.Р. Руденко та ін. *Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету*. 2017. Т. 2. № 29. С. 10–13. URL: <http://sj.dstu.dp.ua/article/view/145833>.
3. Застосування машинного зору та методів обробки зображення на виробництві / О.М. Безвесільна та ін. *Технологічний аудит та резерви виробництва*. 2014. № 3/4 (17). С. 18–23. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2014.25312>.
4. State of the Art in Defect Detection Based on Machine Vision / Zhonghe Ren et al. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*. 2021. № 9. P. 661–691. <https://doi.org/10.1007/s40684-021-00343-6>.
5. Intelligent Measurement of Coal Moisture Based on Microwave Spectrum via Distance-Weighted kNN / Ming Li et al. *Appl. Sci.* 2022. № 12. 6199. <https://doi.org/10.3390/app12126199>.
6. Автоматизована система управління технологічним процесом шихтопідготовки агломераційного виробництва в умовах ГЗК ВАТ «Міттал Стіл Кривий Ріг» / В.П. Щокін та ін. *Гірничі електромеханіка та автоматика* : науково-технічний збірник. 2007. № 78. С. 49–56. URL: <https://vde.nmu.org.ua/ua/science/ntz/archive/78/10.pdf>.

7. Дирда М.О. Автоматизація системи вимірювання і підтримки температури та вологості сипучих речовин : автореф. кваліфік. роботи на здобуття освітнього ступеня «бакалавр» : 151. Миколаїв : ЧНУ ім. Петра Могили, 2020. 15 с. URL: <https://krs.chmnu.edu.ua/jspui/handle/123456789/1485>.
8. Нечітке керування процесом підготовки агломераційної шихти з використанням нечіткого регулятора / Л.І. Єфіменко та ін. *Гірничий вісник*. 2021. № 109. С. 33–40. <https://doi.org/10.31721/2306-5435-2021-1-109-33-41>.
9. Розроблення методу покращення машинного зору / С.В. Цюцюра та ін. *Управління розвитком складних систем*. 2020. № 41. С. 187–193. <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2020.41.187-193>.
10. Study on microwave moisture measurement of grain crops / P.I. Kalandarov et al. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. № 939 012091. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/939/1/012091>.
11. Аналіз та класифікація відомих методів неруйнівного контролю вологості порошкоподібних матеріалів / В.В. Кухарчук та ін. *Опτικο-електронні інформаційно-енергетичні технології*. 2009. № 2. С. 13–21. URL: <https://oeipt.vntu.edu.ua/index.php/oeipt/article/view/111>.
12. Окатиші, залізорудний концентрат, агломерат: купити від виробника. Метінвест. *International Mining and Steel Manufacturing Group of Companies*. URL: <https://metinvestholding.com/ua/products/semi-finished-products/iron-ore-concentrate> (дата звернення: 05.06.2024).
13. MCT460 Industrial Online NIR Moisture Meter for Wood and Paper & Chemicals. *KPM Analytics*. URL: <https://www.kpmanalytics.com/products/moisture-compositional/mct460-nir-analyzer> (дата звернення: 05.06.2024).
14. Omron FZ-SC2M. Omron Europe B.V. Industrial Automation. | *OMRON, Europe*. URL: <https://industrial.omron.eu/en/products/FZ-SC2M> (дата звернення: 05.06.2024).
15. Omron FH-5552-10. Omron Europe B.V. Industrial Automation. *OMRON, Europe*. URL: <https://industrial.omron.eu/en/products/FH-5552-10> (дата звернення: 05.06.2024).

REFERENCES:

1. Ruban, S.A., Marynych, I.A., Fedorov, M.E. (2020). Adaptivne keruvannya protsesamy pidhotovky shykhty dlya vyhotovlennya zalizorudnykh kotuniv na bazi metodiv teoriyi hiperstiykosti [Adaptive control of charge preparation processes for the manufacture of iron ore pellets based on the methods of hyperstability theory]. *Mining journal*, № 108, P. 34–39. <http://doi.org/10.31721/2306-5435-2020-1-108-34-39> [in Ukrainian].
2. Rudenko, M.R., Zyuz, V.G., Rudenko, R.M. (2017). Mozhylyvosti pidvyshchennya yakosti dozuvannya shykhtovykh materialiv tsekhiv ohrudkuvannya [Opportunities to improve the quality of batching of charge materials of the workshops of the agglomeration]. *Collection of scholarly papers of Dniprovsk State Technical University (Technical Sciences)*. Vol. 2, № 29, P. 10–13. Retrieved from: <http://sj.dstu.dp.ua/article/view/145833> [in Ukrainian].
3. Bezvesilna, O.M., Tsiрук, V.G., Dyachenko, V.P., Tkachuk, A.G. (2014). Zastosuvannya mashynnoho zoru ta metodiv obrobky zobrazhennya na vyrobnytvstvi [Application of machine vision and image processing methods in production]. *Technology Audit and Production Reserves*, 3 (4 (17)), P. 18–23. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2014.25312> [in Ukrainian].
4. Zhonghe, Ren, Fengzhou, Fang, Ning, Yan, You, Wu. State of the Art in Defect (2021). Detection Based on Machine Vision. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*. № 9, P. 661–691. <https://doi.org/10.1007/s40684-021-00343-6>.
5. Ming, Li, Jun, Tian, Yuliang, Wang, Haiyang, Zhang, Dongping, Yang, and Meng, Lei (2022). Intelligent Measurement of Coal Moisture Based on Microwave Spectrum via Distance-Weighted kNN. *Appl. Sci.* № 12, 6199. <https://doi.org/10.3390/app12126199>.
6. Shchokin, V.P., Nechytailo, V.M. (2007). Avtomatyzovana systema upravlinnya tekhnolohichnym protsesom shykhtopidhotovky ahlomeratsiynoho vyrobnytvstva v umovakh HZK VAT “Mittal Stil Kryvyy Rih” [Automated control system for the technological process of charge preparation of sinter production in the conditions of GOK OJSC “Mittal Steel Kryvyy Rih”]. *Hirnycha elektromekhanika ta avtomatyka: nauk.-tekhn. zb.* № 78. P. 49–56. Retrieved from: <https://vde.nmu.org.ua/ua/science/ntz/archive/78/10.pdf> [in Ukrainian].
7. Dyrda, M.O. (2020). Avtomatyzatsiya systemy vymiryuvannya i pidtrymky temperatury ta volohosti sypuchykh rehovyn [Automation of the system for measuring and maintaining the temperature and humidity of bulk substances] : avtoref. kvalifik. roboty na zdobuttya osvithn'oho stupenya “bakalavr”: spets. 151 “Avtomatyzatsiya ta kompiuterno intehrovani tekhnolohiyi”. CHNU im. Petra Mohyly. Mykolayiv. 15 s. Retrieved from: <https://krs.chmnu.edu.ua/jspui/handle/123456789/1485> [in Ukrainian].
8. Efimenko, L.I., Tikhansky, M.P., Tikhanskaya, A.M. (2021). Nechitke keruvannya protsesom pidhotovky ahlomeratsiynoyi shykhty z vykorystanniam nechitkoho rehulyatora [Fuzzy control of the

process of sinter charge preparation using a fuzzy controller]. *Mining journal*, № 109, P. 33–40. <https://doi.org/10.31721/2306-5435-2021-1-109-33-41> [in Ukrainian].

9. Tsiutsiura, S.V., Chernyshev, D.O., Nykodiuk, D.V. (2020). Rozroblennya metodu pokrashchennya mashynnoho zoru [Machine vision improvement method development]. *Management of Development of Complex Systems*, № 41, p. 187–193. <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2020.41.187-193> [in Ukrainian].

10. Kalandarov, P.I., Mukimov, Z., Toshpulatov, N. (2021). Study on microwave moisture measurement of grain crops. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, № 939. 012091. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/939/1/012091>.

11. Kukharchuk, V.V., Bogachuk, V.V., Hraniak, V.F. (2009). Analiz ta klasyfikatsiya vidomykh metodiv neruynivnoho kontrolyu volohosti poroshkopodibnykh materialiv [Analysis and classification of known methods of non-destructive moisture control of powdered materials]. *Optoelectronic information-power technologies*. Vol. 18, № 2, p. 13–21. Retrieved from: <https://oeipt.vntu.edu.ua/index.php/oeipt/article/view/111> [in Ukrainian].

12. Pellet, iron ore concentrste, sintered iron ore: buy from Metinvest manufacturer. International Mining and Steel Manufacturing Group of Companies. Retrieved from: <https://metinvestholding.com/en/products/semi-finished-products/iron-ore-concentrate> [in Ukrainian].

13. MCT460 Industrial Online NIR Moisture Meter for Wood and Paper & Chemicals. KPM Analytics. Retrieved from: <https://www.kpmanalytics.com/products/moisture-compositional/mct460-nir-analyzer>.

14. Omron FZ-SC2M. Omron Europe B.V. Industrial Automation. OMRON, Europe. Retrieved from: <https://industrial.omron.eu/en/products/FZ-SC2M>.

15. Omron FH-5552-10. Omron Europe B.V. Industrial Automation. OMRON, Europe. Retrieved from: <https://industrial.omron.eu/en/products/FH-5552-10>.