

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
Факультет автоматизації виробництва, інформаційних та управлінських
технологій
Кафедра автоматизації, електро- та робототехнічних систем

«Допущено до захисту»
Гарант ОПП

Вікторія МІРОШНИЧЕНКО

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня бакалавра

за підсумками виконання
освітньо-професійної програми
«Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехнічні
системи в металургії та гірництві»
за спеціальністю 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології
та робототехніка»

**на тему «Система автоматизації обліку роботи візків
барабанних розвантажувальних конвеєрів відкритого складу
дробленої руди в умовах РЗФ гірничозбагачувального комбінату»**

Керівник роботи

Вікторія МІРОШНИЧЕНКО

*Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень та напрацювань.
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на
відповідне джерело. Електронний та паперовий варіанти роботи є ідентичними*

Кваліфікаційна робота містить інформацію з обмеженим доступом

Здобувач

Артем ОЛЬВАЧ

Підсумкова оцінка за атестацію			
--------------------------------	--	--	--

Голова ЕК

Олег БОНДАР

Запоріжжя 2026



	ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
Факультет	автоматизації виробництва, інформаційних та управлінських технологій
Кафедра	автоматизації, електро- та робототехнічних систем
Ступінь вищої освіти	бакалавр
Спеціальність	174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка
ОПП	Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехнічні системи в металургії та гірництві

ЗАТВЕРДЖУЮ

Гарант ОПП

Вікторія МІРОШНИЧЕНКО

17.05.2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА

Ольвача Артема Віталійовича

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема роботи на тему «Система автоматизації обліку роботи візків барабанних розвантажувальних конвеєрів відкритого складу дробленої руди в умовах РЗФ гірничозбагачувального комбінату»

керівник роботи Мірошніченко Вікторія Ігорівна, доцент, канд. техн. наук,

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом Університету від 41/23.02.2026 від 23.02.2026 р

2. Термін подання роботи 17.06.2026 р.

3. Вихідні дані до роботи Навчальна література, державні стандарти з автоматизації, методична література з спеціальних дисциплін та дипломування, дослідницькі роботи з тематики автоматичного регулювання та управління, літературні джерела, технологічні інструкції.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань) Анотація. Зміст. Вступ. 1. Аналіз предметної області (літературний огляд, недоліки існуючих систем, сучасні тенденції). 2. Постановка задач автоматизації та обґрунтування запропонованої структури системи управління та сигналізації технологічних параметрів. 3. Реалізація запропонованої системи. 4. Економічне обґрунтування запропонованої системи. 5. Охорона праці. Висновки. Перелік використаних джерел. Додатки.

5. Перелік графічного (демонстраційного) матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): Схема структурна автоматизації. Схема функціональна автоматизації. Принципово-електрична схема контуру.

6. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи, що стосуються їх.

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта
1-5	Мірошніченко В.І., доцент кафедри АВЕРС

7. Дата видачі завдання 17.05.2026

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи
1	Розділ 1. Аналіз предметної області	25.05.2026
2	Розділ 2. Постановка задач автоматизації та обґрунтування запропонованої структури комп'ютерної системи управління	30.05.2026
3	Розділ 3. Реалізація запропонованої системи автоматизації	01.06.2026
4	Розділ 4. Економічне обґрунтування запропонованої системи автоматизації	12.06.2026
5	Розділ 5. Охорона праці	14.06.2026
6	Висновки, перелік посилань, вступ, зміст, реферат	15.06.2026
7	Подання завершеної роботи. Перевірка на академічний плагіат	17-18.06.2026
8	Остаточне оформлення роботи, презентаційного матеріалу, автореферату	19-21.06.2026
9	Рецензування завершеної роботи. Захист	22-24.06.2026

Здобувач
Керівник роботи



Артем ОЛЬВАЧ
Вікторія МІРОШНИЧЕНКО



АНОТАЦІЯ

Ольвача Артема Віталійовича. Система автоматизації обліку роботи візків барабанних розвантажувальних конвеєрів відкритого складу дробленої руди в умовах РЗФ гірничозбагачувального комбінату - Кваліфікаційна праця на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня бакалавра за спеціальністю 174 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». ОПП «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології в металургії та гірництві» – ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», Запоріжжя, 2026.

Об'єктом дослідження є технологічний процес завантаження та усереднення дробленої руди в бункерах рудозбагачувальної фабрики за допомогою розвантажувальних візків конвеєрів.

Предметом дослідження є автоматизація обліку роботи розвантажувальних візків конвеєрів та контролю рівнів засипу бункерів рудозбагачувальної фабрики.

У першому розділі проаналізована предметна область систем автоматизації технологічних процесів на рудозбагачувальній фабриці. Надана загальна характеристика технологічного процесу та наявної системи автоматизації. Приведено аналіз рішень на аналогічних об'єктах. В результаті визначена необхідність модернізації наявної системи та сформульована невирішена частина проблеми, яку планується досліджувати та вирішувати в рамках кваліфікаційної роботи.

У другому розділі проведено аналіз технологічного процесу як об'єкту автоматизації, визначено параметри об'єкту автоматизації, визначені задачі автоматичного контролю та регулювання відповідних технологічних параметрів, обґрунтована запропонована структура системи автоматизації, наведено опис функціональної схеми системи автоматизації.

У третьому розділі обґрунтовано вибір технічних засобів автоматизації для спроектованої САР; розроблено схеми структурну автоматизації, функціональну автоматизації та принципово-електричну схему контуру.

У четвертому розділі відповідними розрахунками підтверджено економічну доцільність впровадження запропонованої системи автоматизації.

У п'ятому розділі наведено аналіз небезпечних і шкідливих факторів виробництва та рекомендації щодо поліпшення умов праці інженерів АСУ ТП ділянки.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: АВТОМАТИЗАЦІЯ, РУДОЗБАГАЧУВАЛЬНА ФАБРИКА, РОЗВАНТАЖУВАЛЬНИЙ ВІЗОК (АВТОСТЕЛА), КОНТРОЛЬ РІВНЯ, РАДАРНИЙ РІВНЕМІР, RFID-ІДЕНТИФІКАЦІЯ, БУНКЕР, ПРОГРАМОВАНИЙ ЛОГІЧНИЙ КОНТРОЛЕР



ЗМІСТ

ВСТУП	6
1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ	8
1.1 Характеристика технологічного процесу	8
1.2 Аналіз наявного рівня автоматизації об'єкта дослідження	8
1.3 Аналіз стану питання на аналогічних об'єктах	9
1.4 Постановка задачі дослідження	11
2 ЗАДАЧІ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ	12
2.1 Технологічний процес дільниці завантаження бункерів як об'єкт автоматизації	12
2.2 Визначення параметрів об'єкта автоматизації	13
2.3 Задачі автоматичного контролю, обліку та сигналізації	14
2.4 Обґрунтування та вибір структури системи автоматизації	14
3 РЕАЛІЗАЦІЯ ЗАПРОПОНОВАНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ	17
3.1 Вибір технічних засобів автоматизації	17
3.2 Проектування системи автоматичного керування	20
3.2.1 Обґрунтування обраних технологічних параметрів	20
3.2.2 Обґрунтування типу алгоритму керування та розрахунків його параметрів	21
3.2.3 Опис функціональної схеми автоматизації	22
3.2.4 Опис принципово-електричної схеми контуру	23
3.2.5 Опис структурної схеми комплексу технічних засобів	24
3.3 Програмна реалізація системи автоматизації	24
3.3.1 Алгоритм роботи контролера	24
3.3.2 Фрагмент програмної реалізації (SCL)	25
4 ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ	27
4.1 Розрахунок капітальних витрат	27
4.2 Розрахунок річних експлуатаційних витрат	28
4.3 Розрахунок річної економії від упровадження системи	28
4.4 Розрахунок показників економічної ефективності	29
4.5 Висновки до розділу	29
5 ОХОРОНА ПРАЦІ	31
5.1 Загальні заходи безпеки	31
5.2 Електробезпека при роботі з АСУ ТП	31
5.3 Безпека обслуговування виконавчих пристроїв	31
5.4 Технічні рішення з безпеки	32
5.5 Умови безпечної експлуатації	32
ВИСНОВКИ	33
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	35
ДОДАТОК А СХЕМА ЛАНЦЮГІВ АПАРАТІВ РОЗВАНТАЖУВАЛЬНИХ ВІЗКІВ РЗФ	36



ВСТУП

Сучасний стан гірничо-збагачувальної галузі України характеризується високим рівнем конкуренції на світовому ринку залізорудної сировини та постійним зростанням вимог до якості продукції за одночасного скорочення витрат на її виробництво. За цих умов автоматизація та впровадження комп'ютерно-інтегрованих технологій стають вирішальним чинником підвищення ефективності виробництва, оскільки дозволяють забезпечити безперервний контроль технологічних параметрів, оперативне прийняття рішень та раціональне використання ресурсів. Особливого значення це набуває для процесів рудопідготовки, від стабільності яких безпосередньо залежить продуктивність усієї збагачувальної фабрики.

На рудозбагачувальній фабриці транспортування та усереднення дробленої руди здійснюється системою конвеєрів із розвантажувальними барабанными візками (автостелами), які в цілодобовому човниковому режимі розподіляють руду по бункерах секцій.

Водночас ця ділянка залишається фактично неавтоматизованою: відсутній автоматичний контроль рівня руди в бункерах по всій довжині складу, не контролюється положення та напрямок переміщення автостел конвеєрів, а інформація про фактичні запаси руди не накопичується та не архівується.

Унаслідок цього виникають прості технологічного обладнання через нерівномірне завантаження бункерів, рудний просип при їх переповненні, пришвидшене зношення живильників при повному спорожненні бункерів та підвищені пилові викиди.

Усе це обумовлює актуальність розроблення автоматизованої системи обліку роботи розвантажувальних візків конвеєрів та контролю рівнів засипу бункерів, яка відповідає реальним потребам підприємства за сучасних умов господарювання.

Метою кваліфікаційної роботи є підвищення ефективності роботи ділянки завантаження бункерів рудозбагачувальної фабрики шляхом розроблення автоматизованої системи обліку роботи розвантажувальних візків конвеєрів та контролю рівнів засипу бункерів.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються такі завдання:

- проаналізувати технологічний процес рудозбагачувальної фабрики та наявні системи автоматизації, визначити недоліки існуючого ручного контролю засипу бункерів;
- сформулювати задачі автоматизації та обґрунтувати структуру запропонованої системи управління й сигналізації технологічних параметрів;



- обґрунтувати вибір технічних засобів автоматизації для реалізації системи на базі радіолокаційних рівнемірів, RFID-ідентифікації положення автостел та програмованих логічних контролерів;
- розробити функціональну схему системи та визначити її технічне забезпечення;
- виконати економічне обґрунтування доцільності впровадження запропонованої системи;
- розглянути питання охорони праці при обслуговуванні електронного обладнання системи.

Об'єктом дослідження є технологічний процес завантаження та усереднення дробленої руди в бункерах рудозбагачувальної фабрики за допомогою розвантажувальних візків конвеєрів.

Предметом дослідження є автоматизація обліку роботи розвантажувальних візків конвеєрів та контролю рівнів засипу бункерів рудозбагачувальної фабрики.

Методи дослідження. У роботі використано методи аналізу та узагальнення науково-технічної літератури, державних стандартів і технологічних інструкцій; методи аналізу технологічного процесу як об'єкта автоматизації; методи системного підходу при обґрунтуванні структури системи автоматизації та виборі технічних засобів; методи техніко-економічного аналізу для оцінки доцільності впровадження системи.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що розроблена трирівнева автоматизована система є готовим технічним рішенням, придатним до впровадження на рудозбагачувальній фабриці. Її використання дозволяє оптимізувати завантаження бункерів за рахунок рівномірного розподілу та усереднення руди, скоротити простої технологічного обладнання через відсутність сировини, виключити рудний просип при переповненні бункерів, запобігти пошкодженню живильників унаслідок повного спорожнення бункерів, знизити пилові викиди, а також забезпечити повноцінний облік, статистичний аналіз і прогнозування запасів руди в бункерах. Запропоновані технічні рішення та структуру системи може бути використано при модернізації аналогічних дільниць рудопідготовки на гірничо-збагачувальних підприємствах.



1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

1.1 Характеристика технологічного процесу


Об'єктом дослідження є ділянка завантаження бункерів дробленої руди рудозбагачувальної фабрики гірничо-збагачувального комбінату. Збагачувальна фабрика є проміжною ланкою між гірничодобувним і переробним підприємствами, тому стабільність подачі та усереднення вихідної сировини безпосередньо впливає на продуктивність усього виробничого ланцюга. До складу головного корпусу фабрики входять розподільні бункери, живильники, млини, класифікатори, гідроциклони та транспортні засоби - конвеєри й насоси.

Технологічний процес виробництва залізорудного концентрату на РЗФ є стадійним, що зумовлено тонкою вкрапленістю магнетиту в кварцитах. Перша стадія подрібнення здійснюється в млинах ММС-70х23, що працюють у замкнутому циклі зі спіральними класифікаторами 1КСН-24х131, друга - у рудно-галькових млинах МГР-40х75 у замкнутому циклі з гідроциклонами ГЦ-500. Подрібнення ведеться до 97,5–99,0 % класу мінус 0,05 мм. Збагачення виконується магнітною сепарацією у три стадії на барабанних сепараторах типу ПБМ-90/250 та ПБМ-120/300 з проміжним знешламуванням на дешламаторах МД-9. Завершальною операцією є магнітно-флотаційне доведення концентрату на флотомашинах РІФ-25 із наступним згущенням, фільтрацією та освітленням оборотної води, у результаті чого отримують концентрат марки А-1.

Початковою ланкою цього процесу є приймання, накопичення та усереднення дробленої руди в бункерах. Руда подається конвеєрами та розподіляється по бункерах секцій за допомогою розвантажувальних барабанних візків (автостел), що рухаються вздовж бункерів конвеєрів О5-А, О5-Б, О6-А, О6-Б у безперервному човниковому режимі цілодобово. Рівномірність завантаження бункерів і коректне позиціонування автостел визначають стабільність живлення млинів і, відповідно, рівень технологічних втрат, простоїв обладнання та пилоутворення. Схема ланцюгів апаратів транспортування руди наведена в додатку А.

1.2 Аналіз наявного рівня автоматизації об'єкта дослідження

Автоматизована система управління технологічними процесами рудозбагачувальної фабрики побудована за дворівневою архітектурою. Верхній рівень реалізовано на базі SCADA-системи WinCC: робочі станції операторів забезпечують візуалізацію процесу у вигляді мнемосхем, трендів і рапортів з інтеграцією в системи MES, ERP та диспетчерську АСОДУ. Нижній рівень побудовано на програмованих логічних контролерах Siemens із процесором CPU 1512C, що здійснюють збір сигналів і автоматичне регулювання технологічних параметрів. Польовий рівень представлений датчиками, виконавчими механізмами, кабельними



лініями та системами електроживлення з джерелами безперебійного живлення і ступенем захисту IP54/IP67.

Наявна система забезпечує моніторинг технологічних параметрів у реальному часі, автоматичне регулювання, оптимізацію контуру «млин–класифікатор», аварійну сигналізацію, архівування даних і формування звітності. Контролю підлягають маса руди та концентрату, витрата й тиск води, густина пульпи, потужність двигунів млинів, температура підшипників, рівень пульпи в зумпфах та інші параметри основного технологічного процесу.

Водночас дільниця розвантажувальних візків і бункерів засипу руди залишається фактично неавтоматизованою. На ній відсутній автоматичний контроль рівня руди в бункерах по всій довжині складу, не контролюються положення та напрямок переміщення автостел, а інформація про фактичні запаси руди в бункерах не накопичується й не архівується. Контроль завантаження здійснюється переважно візуально, з огляду на що інформація надходить із запізненням і не завжди є достовірною. Наслідками цього є простоя млинів через нерівномірне завантаження бункерів, рудний просип при їх переповненні, пришвидшене зношення живильників при повному спорожненні бункерів та підвищені пилові викиди.

1.3 Аналіз стану питання на аналогічних об'єктах

Для визначення можливих шляхів автоматизації дільниці виконано огляд технічних рішень, що застосовуються для контролю рівня сипких матеріалів у бункерах та для ідентифікації положення рухомих механізмів.

Традиційним рішенням для контролю заповнення бункерів є радіоізотопні (радіаційні) рівнеміри, у яких джерело випромінювання та приймач розташовують у стінах бункера так, щоб потік випромінювання проходив через контрольоване середовище; за зміною інтенсивності потоку визначають наявність матеріалу і за відсутності його зупиняють живильник. При відсутності матеріалу в бункері вся система спрацьовує так, що живильник зупиняється. Перевагою такого методу є безконтактність та працездатність у запиленому середовищі, проте суттєвими недоліками є застосування джерел іонізуючого випромінювання, що потребує спеціальних дозволів і заходів радіаційної безпеки, висока вартість обслуговування та переважно сигналізаційний, а не вимірювальний характер контролю (визначення лише граничних значень, а не профілю заповнення).

Більш сучасним підходом є безконтактне вимірювання рівня акустичними (ультразвуковими) та радарними методами. Ультразвукові рівнеміри визначають відстань до поверхні матеріалу за часом проходження відбитого імпульсу і відзначаються відсутністю контакту із середовищем, компактністю та відсутністю рухомих частин відсутній контакт з вимірюваним середовищем; компактна конструкція і відсутність рухомих частин; не потребують частого обслуговування. Проте їхнім



істотним недоліком є залежність результату від властивостей газового середовища над поверхнею матеріалу, оскільки швидкість поширення звукових хвиль змінюється залежно від запиленості, температури та повітряних потоків. Для відкритого складу руди з інтенсивним пилоутворенням це знижує достовірність вимірювань.

Радарні рівнеміри визначають рівень за відбитим електромагнітним сигналом і, на відміну від ультразвукових, зберігають точність у складних умовах. Як зазначають фахівці, радарний рівнемір варто обирати, якщо потрібна максимальна точність і стабільність у важких умовах (пара, пил, агресивні середовища, великі резервуари), тоді як ультразвукові рішення доцільні для стандартних задач зі стабільними умовами та обмеженим бюджетом. Сучасні радарні прилади для сипких матеріалів розроблені спеціально для роботи в умовах запиленості: пил у бункері або скупчення на антені не впливають на точність його виміру. Це робить радарний метод найбільш придатним для контролю рівня руди в бункерах фабрики. Радарні рівнеміри мають уніфікований вихідний сигнал 4–20 мА, що спрощує їх інтеграцію з контролерним обладнанням; подібне рішення вже застосовується в інших системах автоматизації, де радарний рівнемір має уніфікований вихідний сигнал 4-20 мА, який подається на модуль аналогових входів. Недоліком радарних рівнемірів порівняно з ультразвуковими є вища вартість приладу, що, однак, компенсується надійністю в умовах запиленого складу руди.

Окремою складовою задачі є визначення положення рухомих автостел уздовж бункерів, оскільки рівнемір вимірює висоту руди, але не дає інформації про те, у якій секції наразі перебуває візок. Для розв'язання таких задач застосовують технологію радіочастотної ідентифікації (RFID). Радіочастотна ідентифікація (Radio Frequency Identification, RFID) — це сучасна технологія автоматичної ідентифікації, що дозволяє автоматизувати процес збору та обробки інформації безконтактним способом, причому для забезпечення роботи системи не потрібні ані контакт зі зчитувачем, ані пряма видимість зчитувача, а надійна робота гарантована в агресивних середовищах та несприятливих кліматичних умовах. Стаціонарні RFID-зчитувачі можуть закріплюватися на рухомих складських пристроях, на стінах або поряд з конвеєром, і завдяки інтеграції в інформаційну систему дозволяють поетапно фіксувати переміщення маркованих об'єктів у реальному часі або ідентифікувати положення мічених предметів у просторі. Технологія вже довела свою ефективність у задачах позиціонування рухомого транспорту: за RFID-мітками система забезпечує оперативне отримання даних про місцеперебування вагонів за контрольними точками. Перевагами RFID є безконтактність, відсутність вимоги прямої видимості та стійкість до запиленості й несприятливих умов; обмеженням є дискретний характер визначення положення (прив'язка до встановлених міток), що, втім, є достатнім для задачі визначення секції бункера, у якій перебуває автостела.



1.4 Постановка задачі дослідження

Проведений аналіз показав, що, незважаючи на високий рівень автоматизації основного технологічного процесу рудозбагачувальної фабрики №2, початкова ланка - дільниця завантаження бункерів дробленої руди розвантажувальними візками - залишається неавтоматизованою. Відомі технічні засоби (радіоізотопні, ультразвукові, радарні рівнеміри, технологія RFID) дозволяють розв'язати окремі складові задачі, проте на досліджуваному об'єкті відсутнє комплексне рішення, яке поєднувало б безперервний контроль рівня руди в бункерах по всій довжині складу, ідентифікацію положення та напрямку руху автостел і накопичення архівної інформації про запаси руди.

Таким чином, невирішеною частиною проблеми є відсутність автоматизованої системи обліку роботи розвантажувальних візків конвеєрів О5-А, О5-Б, О6-А, О6-Б та контролю рівнів засипу бункерів, яка б у реальному часі вимірювала рівень руди радарними рівнемірами, визначала положення автостел засобами RFID та забезпечувала накопичення, аналіз і прогнозування запасів руди.

З огляду на викладене, у кваліфікаційній роботі необхідно вирішити такі задачі: сформулювати вимоги до системи та обґрунтувати її структуру; обґрунтувати вибір технічних засобів автоматизації; розробити функціональну схему системи та визначити її програмне забезпечення; виконати економічне обґрунтування доцільності впровадження системи; розглянути питання охорони праці при її обслуговуванні.



2 ЗАДАЧІ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ

2.1 Технологічний процес дільниці завантаження бункерів як об'єкт автоматизації

Об'єктом автоматизації є технологічний процес транспортування, розподілу та усереднення дробленої руди в бункерах рудозбагачувальної фабрики №2, що виконується системою магістральних конвеєрів із розвантажувальними барабанними візками (автостелами). Автостели рухаються вздовж бункерів конвеєрів О-5А, О-5Б, О-6А, О-6Б у безперервному човниковому режимі цілодобово (24/7) з перервами лише на ремонт та технічне обслуговування, розподіляючи руду по бункерах секцій фабрики.

З погляду теорії автоматичного управління розглядуваний об'єкт має низку особливостей, які визначають вимоги до системи та обґрунтовують її структуру:

- розподіленість у просторі. Контрольований параметр (рівень руди) формується не в одній точці, а вздовж усієї довжини складу, причому місце надходження матеріалу постійно змінюється внаслідок руху автостели. Тому об'єкт є об'єктом з розподіленими параметрами, а повну картину його стану дає лише сукупність «рівень + координата візка»;

- рухомість джерела завантаження. Точка вивантаження руди переміщується разом з автостелою, що унеможлиблює застосування стаціонарного точкового контролю на кожній секції та обумовлює прив'язку вимірювання рівня до рухомого візка з одночасною фіксацією його положення;

- несприятливі умови експлуатації. Процес супроводжується інтенсивним пилоутворенням, вібрацією, перепадами температури та запиленістю атмосфери над поверхнею матеріалу, що накладає обмеження на принцип дії засобів контролю;

- інерційність та дискретність завантаження. Заповнення окремого бункера є відносно повільним процесом, тоді як просування автостели та відбір руди живильниками знизу змінюють профіль засипу в реальному часі;

- відсутність неперервного регульовального впливу на сам матеріал. Керування зводиться не до плавного регулювання фізичної величини виконавчим механізмом, а до контролю стану, формування профілю засипу, виявлення граничних ситуацій та інформаційної підтримки рішень технологічного персоналу щодо маршруту руху автостел.

Таким чином, за своєю природою об'єкт є переважно об'єктом автоматичного контролю та обліку з елементами аварійного захисту й сигналізації, а не об'єктом безперервного автоматичного регулювання замкненого типу.

2.2 Визначення параметрів об'єкта автоматизації

На підставі аналізу технологічного процесу та наявних технологічних даних визначено перелік параметрів, що характеризують стан об'єкта автоматизації. За функціональним призначенням їх поділено на контрольовані (первинні), обчислювані (похідні) та сигналізаційні. Зведений перелік наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 — Параметри об'єкта автоматизації

Параметр	Позначення	Характер	Діапазон / стан
Рівень руди в бункері у точці зондування	H	вимірюваний, аналоговий	0...Hmax (за висотою бункера)
Положення (координата) автостели вздовж бункерів	L	вимірюваний, дискретний	за номером будівельної осі
Напрямок переміщення автостели	D	вимірюваний, дискретний	«вперед» / «назад» / «стоп»
Ступінь заповнення бункера	Z, %	обчислюваний	0...100 %
Профіль засипу вздовж осі бункера	P(L)	обчислюваний	масив значень H за координатами
Середнє заповнення за секціями	Zсер	обчислюваний	0...100 %
Запас руди в бункерах (поточний та архівний)	Q	обчислюваний	t (за об'ємом та насипною густиною)
Перевищення максимального заповнення	—	сигналізаційний	дискретний, «норма / аварія»
Повне спорожнення бункера	—	сигналізаційний	дискретний, «норма / аварія»

Первинними (безпосередньо вимірюваними) параметрами є рівень руди H, координата автостели L та напрямок її руху D. Решта показників - ступінь заповнення, профіль засипу, середні значення за секціями та запаси руди - є похідними й обчислюються програмно на основі первинних вимірювань та відомої геометрії бункерів. Коригування поточного запасу руди при її відборі виконується за даними конвеєрних ваг.



2.3 Задачі автоматичного контролю, обліку та сигналізації

Виходячи з визначених параметрів об'єкта та виявлених у розділі 1 недоліків ручного контролю, на систему покладаються такі задачі.

Задачі автоматичного контролю та вимірювання:

- безперервний контроль рівня руди в бункерах під конвеєрами О-5А, О-5Б, О-6А, О-6Б у місці вивантаження під час їх заповнення;
- контроль рівня руди в бункерах по всій довжині складу під час руху автостели;
- контроль положення (визначення секції бункера) та напрямку переміщення автостел.

Задачі обчислення та обліку:

- перерахунок вимірюваного рівня у відсотки заповнення бункера з урахуванням його геометрії;
- фільтрація вимірювань для виключення перешкод;
- формування профілю засипу вздовж осі бункера та розрахунок середнього заповнення за секціями;
- накопичення, архівування, статистичний аналіз і прогнозування запасів руди в бункерах за заданими інтервалами часу.

Задачі сигналізації та аварійного захисту:

- виявлення аварійних ситуацій — переповнення бункера та його повне спорожнення;
- світлова та звукова сигналізація аварійних ситуацій із попередженням технологічного персоналу.

Оскільки об'єкт не передбачає прямого регулювального впливу на матеріал, функцію «регулювання» в системі реалізовано опосередковано: за результатами контролю профілю засипу та виявлення граничних станів формуються інформаційні сигнали й рекомендації, на підставі яких персонал коригує маршрут руху автостел, забезпечуючи рівномірний розподіл і усереднення руди та запобігаючи переповненню чи спорожненню бункерів. Таким чином замикається інформаційний контур «контроль → сигналізація → керуюче рішення персоналу → зміна стану об'єкта».

2.4 Обґрунтування та вибір структури системи автоматизації

Особливості об'єкта - просторова розподіленість, рухомість джерела завантаження, потреба в поєднанні швидкісного контролерного збору даних із тривалим архівуванням та віддаленим доступом - обумовлюють побудову системи за трирівневою ієрархічною клієнт-серверною архітектурою. Такий підхід дозволяє розподілити задачі за рівнями відповідно до їхньої природи: швидкісні задачі вимірювання та аварійного захисту виконуються «ближче» до об'єкта, а ресурсомісткі задачі обробки, архівування та подання даних - на верхньому рівні. Це підвищує надійність (за рахунок автономного буферування даних на нижньому рівні при втраті зв'язку), забезпечує роботу в реальному часі на критичних задачах та



масштабованість системи. Розподіл основних задач за рівнями наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 - Розподіл задач за рівнями системи автоматизації

Рівень	Призначення	Задачі, що вирішуються на рівні
I — польовий (вимірювальний)	первинне отримання інформації про стан об'єкта	вимірювання рівня руди в бункері; ідентифікація положення автостели вздовж бункерів; визначення напрямку її руху; перетворення фізичних величин в електричні сигнали
II — контролерно-логічний	первинна обробка даних і автономний захист	приймання та фільтрація сигналів первинних перетворювачів; перерахунок рівня у відсоток заповнення з урахуванням геометрії бункера; обробка даних ідентифікації та визначення поточної координати автостели; контроль граничних станів і формування аварійної сигналізації; буферне накопичення даних при втраті зв'язку з верхнім рівнем та їх передавання після відновлення
III — інформаційний (web-сервер)	обробка, архівування та подання інформації	формування профілю засипу вздовж осі бункера та розрахунок середнього заповнення за секціями; ведення довгострокового архіву та прогнозування запасів руди; коригування запасу за даними конвеєрних ваг; візуалізація процесу, формування звітів і розмежований web-доступ технологічного персоналу

Перший (польовий) рівень вирішує задачі безпосереднього вимірювання та первинного перетворення інформації. На ньому формуються три первинні величини - рівень руди в бункері, координата автостели та напрямок її руху, - які перетворюються в електричні сигнали, придатні для передавання на контролерний рівень. Принцип дії та конкретні засоби вимірювання, що відповідають визначеним у розділі 1 вимогам (зокрема стійкості до запиленості), обґрунтовуються в розділі 3.



Другий (контролерно-логічний) рівень виконує первинну обробку отриманих сигналів та реалізує функції, критичні до часу реакції. На цьому рівні здійснюється фільтрація вимірювань, перерахунок рівня у відсоток заповнення бункера, обробка даних ідентифікації для визначення поточної секції, у якій перебуває автостела, а також контроль перевищення граничних рівнів із формуванням світлової та звукової аварійної сигналізації. Важливою функцією рівня є автономне буферне архівування результатів вимірювань на випадок втрати зв'язку з верхнім рівнем із подальшим передаванням накопичених даних після його відновлення, що забезпечує неперервність обліку.

Третій (інформаційний, web-серверний) рівень вирішує ресурсомісткі задачі додаткової обробки, зберігання та подання інформації. На ньому з окремих вимірювань формується профіль засипу вздовж осі бункера, розраховуються середні значення заповнення за секціями, ведеться довгостроковий архів профілів та виконується прогнозування запасів руди. Поточний запас коригується за даними конвеєрних ваг при відборі матеріалу. Рівень забезпечує візуалізацію процесу у вигляді мнемосхем, трендів і звітів, а також розмежований за правами доступ технологічного персоналу цеху та підприємства через web-інтерфейс автоматизованих робочих місць.

Обмін даними між рівнями організовано за принципом «знизу вгору» для результатів вимірювань та «згори вниз» для уставок і параметрів обробки. Запропонована трирівнева структура повністю відповідає визначеним задачам автоматизації: польовий рівень забезпечує отримання первинної інформації, контролерний — її оперативну обробку та аварійний захист, а інформаційний — облік, аналіз і подання даних персоналу, чим досягається мета роботи щодо автоматизації обліку роботи автостел і контролю рівнів засипу бункерів.



3 РЕАЛІЗАЦІЯ ЗАПРОПОНОВАНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

3.1 Вибір технічних засобів автоматизації

Вибір технічних засобів виконано окремо для кожного з трьох рівнів системи відповідно до розподілу задач, наведеного в розділі 2, з урахуванням умов експлуатації об'єкта (запиленість, вібрація, рухомий характер джерела завантаження, цілодобовий режим) та вимог Стандарту АСУ ТП Метінвест Холдингу щодо уніфікації обладнання й сумісності з наявною інфраструктурою фабрики.

Польовий (перший) рівень. На цьому рівні розв'язуються задачі вимірювання рівня руди та ідентифікації положення і напрямку руху автостели. Ключовим є вибір методу вимірювання рівня. Як показано в розділі 1, для запиленого відкритого складу руди радіоізотопний метод неприйнятний через застосування джерел іонізуючого випромінювання, а ультразвуковий - через залежність результату від запиленості та повітряних потоків над поверхнею матеріалу. Тому обрано радіолокаційний (радарний) метод, який зберігає точність у складних умовах. Перелік і обґрунтування технічних засобів польового рівня наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 - Технічні засоби польового рівня

Технічний засіб	Обґрунтування вибору	Основні характеристики
Радіолокаційний рівнемір KROHNE OPTIWAVE (поз. CIA5.1, 5.2, 6.1, 6.2)	Радарний (мікрохвильовий безконтактний) метод зберігає точність в умовах інтенсивного пилоутворення складу руди, на відміну від ультразвукового; сертифікований засіб згідно з вимогами Стандарту АСУ ТП Метінвест Холдингу	діапазон до 30 м; вихідний сигнал 4...20 мА; ступінь захисту IP67; живлення 24 В DC
RFID-зчитувач (поз. SIA5.1-5.4, IUH-F190-V1-FR1-01) на автостелі	Безконтактна ідентифікація, не потребує прямої видимості, стійка до запиленості та вібрації; інтеграція через стандартний промисловий інтерфейс	робоча частота HF/UHF; інтерфейс Ethernet (Profinet); IP67
RFID-мітки на будівельних осях конвеєрів (SI)	Пасивні мітки забезпечують однозначну дискретну прив'язку положення автостели до секції бункера; не потребують живлення та обслуговування	пасивні; промислове виконання; кріплення на кожній будівельній осі



Продовження таблиці 3.1

Технічний засіб	Обґрунтування вибору	Основні характеристики
Датчики напрямку руху (дискретні)	Формують дискретні сигнали напрямку переміщення автостели для коректного нарощування координати між мітками	дискретний вихід; IP67; 24 В DC

Контролерний (другий) рівень. Вибір контролера підпорядковано вимозі уніфікації з наявною на фабриці АСУ ТП: оскільки нижній рівень існуючої системи побудовано на контролерах Siemens, для проєктованої системи обрано ПЛК Siemens SIMATIC CPU 1512SP-1 PN (6ES7512-1CK01-0AB0), що відповідає Стандарту АСУ ТП Метінвест Холдингу. Перелік технічних засобів контролерного рівня наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 — Технічні засоби контролерного рівня

Технічний засіб	Обґрунтування вибору
ПЛК Siemens SIMATIC CPU 1512SP-1 PN (6ES7512-1CK01-0AB0, ET 200SP)	Уніфікація з наявною на фабриці АСУ ТП (контролери Siemens, SCADA WinCC), що знижує витрати на впровадження та обслуговування; модульне виконання ET 200SP, підтримка Profinet; відповідає Стандарту АСУ ТП Метінвест Холдингу
Ethernet-комутатор IE-SW-BL05-5TX (5 портів)	Організація промислової мережі Profinet між контролером, блоком зв'язку та точкою доступу в межах шафи
Блок живлення Ethernet IE-KP2-1NB1T-2V10 з W/R-модулем	Живлення та узгодження каналу Ethernet між контролером і RFID-зчитувачем (прийом/передавання)
Інтерфейсний блок керування TCP/IP	Перетворення та передавання обробленої інформації RFID-зчитувача на контролер за протоколом Ethernet/Profinet
Мережевий комутатор 5×RJ45	Організація промислової мережі Profinet між компонентами підсистем
Сенсорна панель оператора Siemens SIMATIC 6AV2124-0GC01-0AX0 (на пульті керування ПК)	Локальна візуалізація стану автостели та керування за місцем; установлюється на кожному пульті керування (ПК51, ПК61, ПК52, ПК62)



Продовження таблиці 3.2

Технічний засіб	Обґрунтування вибору
Точка доступу Mikrotik Metal 52 ac (WiFi) з PoE-інжектором	Промислова точка доступу для побудови бездротового мосту між рухомою автостелою та стаціонарним рівнем; підключення до ПЛК за протоколом Profinet, живлення через PoE-інжектор
Блок живлення Weidmüller (~230 В → 24 В DC) та трансформатор ETI TRANSF 910 (200 VA)	Стабілізоване живлення кіл 24 В DC ланцюгів контролера та польових засобів від мережі 380 В, 50 Гц
Джерело безперебійного живлення Weidmüller (ДБЖ) з АКБ 24 В DC 12 Аг	Збереження працездатності та внутрішніх змінних при зникненні напруги протягом не менше 5 хв
Шафа керування автостелою (ШУ5А) з термостатом обігріву ETR202 (IP54)	Захист обладнання від механічних пошкоджень і підтримання мікроклімату в умовах відкритого складу

Інформаційний (третій) рівень. Верхній рівень реалізує ресурсомісткі задачі обробки, архівування та подання даних і будується на базі промислового web-сервера та сервера WinCC з інтеграцією в наявну SCADA-систему. Зв'язок з рухомою автостелою забезпечується бездротовою передачею даних (антени SiA5 на автостелах та приймальні блоки за місцем) з подальшим передаванням через існуюче оптоволоконне кільце Ethernet, у яке інтегрується система. Перелік технічних засобів верхнього рівня наведено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 — Технічні засоби інформаційного рівня

Технічний засіб	Обґрунтування вибору
Промисловий Web-сервер	Формування профілю засипу, ведення архіву та прогнозу запасів, web-доступ персоналу; виділений промисловий сервер забезпечує надійність цілодобової роботи
Сервер (SCADA)	Інтеграція з наявною SCADA-системою фабрики, візуалізація мнемосхем, трендів і звітності



Продовження таблиці 3.3

Технічний засіб	Обґрунтування вибору
Обладнання бездротового зв'язку Mikrotik Metal 52 ac (IEEE 802.11 b/g/n, «бездротовий міст»)	Передавання даних з рухомої автостели на стаціонарний рівень без кабельного зв'язку, що є обов'язковим за рухомого характеру об'єкта
Існуюче оптоволоконне кільце Ethernet (магістраль фабрики)	Використовується як наявна магістраль передавання даних до WEB-сервера; інтеграція в нього знижує витрати на впровадження системи

Обраний комплекс технічних засобів повністю забезпечує реалізацію визначених у розділі 2 задач автоматизації та узгоджений із наявною інфраструктурою фабрики, що мінімізує витрати на впровадження.

3.2 Проектування системи автоматичного керування

Метою проектування є створення системи автоматичного керування, яка на підставі безперервного контролю рівня руди та положення автостели забезпечує рівномірне завантаження й усереднення руди в бункерах, запобігає їх переповненню та повному спорожненню.

3.2.1 Обґрунтування обраних технологічних параметрів

Основним технологічним параметром, що підлягає контролю та керуванню, обрано рівень руди в бункері Н, оскільки саме він безпосередньо визначає стабільність живлення млинів, технологічні втрати та пилоутворення. Важливість його контролю обумовлена тим, що переповнення бункера спричиняє рудний просип і підвищені пилові викиди, а повне спорожнення - пришвидшене зношення живильників і простої млинів через відсутність сировини. Допоміжними параметрами є координата автостели L та напрямок її руху D, які дозволяють співвіднести вимірний рівень з конкретною секцією складу та сформувати профіль засипу по всій довжині бункера.

Технологічні вимоги до параметрів. Згідно з технологічною інструкцією ведення процесу збагачення магнетитових кварцитів (ТІ 00190905.07.001-2024), діапазон та динаміку зміни обраних параметрів і вимоги до процесу керування прийнято відповідно до таблиці 3.4. Рівень руди в бункері змінюється у діапазоні 0...12 м; робочий рівень заповнення підтримується в межах 15...90 %, що, з одного боку, зберігає захисну «подушку» руди над живильником, а з іншого — виключає переповнення. Швидкість наростання рівня при засипі не перевищує 0,05 м/с, що в поєднанні зі швидкістю переміщення автостели 0,3...0,5 м/с визначає необхідний період опитування датчиків. Вимоги до перехідного процесу: час реакції системи на досягнення аварійної уставки (формування

сигналізації та команди керування) не повинен перевищувати 2 с, перерегулювання за рівнем (вихід за уставку до моменту відпрацювання) — не більше 5 %, статична похибка підтримання рівня в зоні нечутливості — не більше ± 3 %.

Таблиця 3.4 - Технологічні параметри та уставки об'єкта керування

Параметр / уставка	Позначення	Значення
Робочий діапазон вимірювання рівня	H	0...12 м
Верхня (аварійна) уставка заповнення	Hmax	90 %
Нижня (попереджувальна) уставка — «подушка» руди	Hmin	15 %
Гістерезис (зона нечутливості) перемикавання	Δ	± 3 %
Максимальна швидкість зміни рівня при засипі	vн	до 0,05 м/с
Швидкість переміщення автостели	va	0,3...0,5 м/с
Період опитування датчиків (цикл ПЛК)	Tц	100 мс
Допустимий час реакції на аварійну ситуацію	tp	≤ 2 с

3.2.2 Обґрунтування типу алгоритму керування та розрахунок його параметрів

Об'єкт за своєю природою (розділ 2) є об'єктом контролю та обліку з дискретним характером керуючого впливу: керування зводиться не до плавної зміни фізичної величини безперервним виконавчим механізмом, а до формування дискретних команд за досягненням заданих рівнів (зупинка засипу секції, перемикавання напрямку руху автостели, аварійна сигналізація). Тому застосування класичного безперервного ПІД-регулятора замкненого типу для цього контуру є недоцільним — натомість реалізовано двопозиційний (релейний) алгоритм керування із зоною нечутливості (гістерезисом), параметри якого розраховуються за технологічними уставками.

Параметри двопозиційного алгоритму визначаються верхньою та нижньою уставками й гістерезисом. Верхню уставку прийнято на рівні Hmax = 90 %, нижню — Hmin = 15 % від повного заповнення бункера. Зона нечутливості (гістерезис) розраховується для виключення «дребезгу» перемикачів за формулою (3.1):



$$2\Delta = H_{\text{в}} - H_{\text{н}}, \text{ де } H_{\text{в}} = H_{\text{max}} + \Delta, H_{\text{н}} = H_{\text{max}} - \Delta \quad (3.1)$$

За прийнятого $\Delta = 3\%$ межі перемикання верхньої уставки становлять $H_{\text{в}} = 93\%$ (команда «стоп засипу/перехід») та $H_{\text{н}} = 87\%$ (дозвіл засипу). Аналогічно для нижньої уставки формується попереджувальний сигнал при зниженні рівня до 15% .

Мінімальний період опитування датчиків (цикл ПЛК) обмежується умовою, щоб за один цикл рівень не зміг змінитися більше ніж на половину зони нечутливості. З умови (3.2):

$$T_{\text{ц}} \leq \Delta \cdot H_{\text{п}} / v_{\text{н}} \quad (3.2)$$

де $H_{\text{п}} = 12 \text{ м}$ – повна висота бункера,

$v_{\text{н}} = 0,05 \text{ м/с}$ – максимальна швидкість наростання рівня.

Підстановка дає $T_{\text{ц}} \leq 0,03 \cdot 12 / 0,05 = 7,2 \text{ с}$. З урахуванням вимоги часу реакції на аварію ($\leq 2 \text{ с}$) і необхідності відстеження положення автостели прийнято значно менший цикл $T_{\text{ц}} = 100 \text{ мс}$, що забезпечує запас за швидкодією та точне формування профілю засипу.

Дискретність визначення положення автостели задається кроком установлення RFID-міток на будівельних осях. Поточна координата між мітками обчислюється методом числення шляху за формулою (3.3):

$$L(t) = L_{\text{м}} + v_{\text{а}} \cdot (t - t_{\text{м}}) \cdot \text{sign}(D) \quad (3.3)$$

де $L_{\text{м}}$ – координата останньої зчитаної мітки,

$t_{\text{м}}$ – момент її зчитування,


$v_{\text{а}}$ – швидкість автостели,

D – напрямок руху.

Проходження наступної мітки скидає накопичену похибку числення, чим забезпечується необхідна точність прив'язки рівня до секції.

3.2.3 Опис функціональної схеми автоматизації

Функціональна схема автоматизації, наведена в графічній частині роботи, розроблена згідно з ДСТУ Б А.2.4-16:2008 і охоплює чотири автостели на конвеєрах О-5А, О-5Б, О-6А та О-6Б, технічні засоби яких ідентичні. На кожній автостелі встановлено радіолокаційний рівнемір, що вимірює рівень руди в бункері (позначений на схемі позиціями LE — первинний перетворювач та LIA — показання і сигналізація), і RFID-зчитувач, що контролює положення автостели (позиції SI та SIA). Дискретну прив'язку положення автостели до секцій складу забезпечують пасивні RFID-мітки, встановлені на будівельних осях складу й рознесені вздовж бункерів за секціями: зчитувач, проходячи повз них під час руху автостели, визначає, навпроти якої секції вона перебуває. Для автостели



конвеєра О-6А це, зокрема, рівнемір LE 1-1 / LIA6.1 та засоби контролю положення SI 2-1 / SIA5.3, які працюють у парі з мітками вздовж складу.

Кожна автостела оснащена власною шафою керування (ПУ51, ПУ52, ПУ61, ПУ62) з програмованим логічним контролером (А51, А52, А61, А62), який виконує первинну обробку сигналів рівнеміра та засобів контролю положення. Аналоговий сигнал рівнеміра (4...20 мА) надходить на аналоговий вхід контролера, де перетворюється у значення рівня та перераховується у відсоток заповнення відповідно до геометрії бункера, а дані RFID-зчитувача й дискретні сигнали напрямку руху обробляються в лінійне переміщення автостели. На контролері формуються параметри «рівень руди в бункері» та «положення автостели». Обмін даними між рухомою автостелою та стаціонарним рівнем здійснюється бездротовим зв'язком через точки доступу Wi-Fi Mikrotik Metal 52 ac, установлені на кожній автостелі та за місцем (приймальні блоки U51, U52, U61, U62). Адресація пристроїв у промисловій мережі виконана за схемою P.172.16.2.2XX.

Згідно зі схемою рівні подання інформації позначено як «За місцем» (блоки U5, U6, установлені безпосередньо на об'єкті), «Існуюче оптоволоконне кільце Ethernet» (магістраль передавання даних, у яку інтегрується система) та «WEB-сервер» (верхній рівень обробки, архівування й подання даних). Ці рівні відповідають польовому, контролерному та інформаційному рівням, обґрунтованим у розділі 2. У нижній частині схеми наведено перелік вимірюваних параметрів для кожної автостели — «Рівень руди в бункері» та «Положення автостели» — з прив'язкою до конвеєрів О-3 і О-4 та до секцій складу 1...8 і 9...10.

3.2.4 Опис принципово-електричної схеми контуру

Принципово-електрична схема шафи керування автостелою (ШУ5А) виконана на двох аркушах: кола живлення (креслення 4Д-1) та сигнальні кола (креслення 4Д-2). Кола живлення містять ввідний автомат Q1, запобіжники F2 (10 А), F3 (6 А), F4, трансформатор живлення ETI TRANSF 910 (0–230 В, 200 ВА) та блок живлення Weidmüller, що формує напругу 24 В постійного струму. Резервування забезпечує джерело безперебійного живлення Weidmüller (входи Input / Battery / Output) з акумулятором 24 В DC 12 Аг. Стан мережі відображає сигнальна лампа Н1, мікроклімат у шафі підтримує термостат ETR202. Живлення модулів контролера А1 здійснюється через клемні блоки (X80, X11, X12) із захистом запобіжниками FU1...FU8 (2 А).

Сигнальні кола (креслення 4Д-2) об'єднують технічні засоби корпусу автостели та за місцем. Аналоговий сигнал радарного рівнеміра LIA5.1 «Рівень у бункері» (кабель 4×0,75, 15 м) подається на входи контролера А1. RFID-зчитувач SI (IUH-F190-V1-FR1-01) підключено до контролера через Ethernet-комутатор IE-SW-BL05-5TX та блок живлення Ethernet IE-KP2 з W/R-модулем. Сенсорна панель пульта керування А3 (Siemens 6AV2124-0GC01-0AX0) приєднана до мережі шафи, а зв'язок із верхнім



рівнем організовано через PoE-інжектор і точки доступу Mikrotik Metal 52 ac («за місцем», точки доступу №1 і №2) з антенами. Усі кола живляться напругою 24 В постійного струму; передбачено захист кіл та видиме заземлення обладнання опором не більше 4 Ом.

3.2.5 Опис структурної схеми комплексу технічних засобів

Структурна схема (креслення 4Г) відображає побудову системи для чотирьох автостел конвеєрів О-5А, О-5Б, О-6А, О-6Б РЗФ-2. Кожна автостела обладнана власною шафою контролера (А51, А52, А61, А62) з програмованим логічним контролером, до якого підключено RFID-зчитувач та джерело безперебійного живлення (ДБЖ). На входи контролера надходять три сигнали з польового рівня: «рівень руди в бункері», «положення візка автостели» та «сигнал про напрямок руху автостели»; живлення шафи здійснюється від мережі 380 В, 50 Гц. Кожна шафа доповнена пультом керування з сенсорною панеллю (ПК51, ПК61, ПК52, ПК62), що забезпечує локальну візуалізацію та керування за місцем.

Зв'язок контролера з точкою доступу WiFi (Mikrotik Metal 52 ac) здійснюється за протоколом Profinet. Точки доступу утворюють бездротовий міст, через який дані передаються до існуючого оптоволоконного кільця Ethernet і далі — на WEB-сервер системи. Таким чином структурна схема реалізує трирівневу архітектуру: польовий рівень (давачі та RFID на автостелі), контролерний рівень (ПЛК у шафах А51...А62 з локальними панелями) та інформаційний рівень (WEB-сервер), об'єднані бездротовим і оптоволоконним каналами зв'язку. Принципова схема шафи контролера наведена у відповідному додатку.

3.3 Програмна реалізація системи автоматизації

Програмну реалізацію системи виконано у вигляді алгоритму роботи програмованого логічного контролера Siemens CPU 1512SP-1 PN, що реалізує визначені задачі контролю, обчислення та сигналізації. Програма розробляється в середовищі TIA Portal мовою структурованого тексту (SCL) та працює циклічно з періодом $T_c = 100$ мс.

3.3.1 Алгоритм роботи контролера

За кожен робочий цикл контролер виконує таку послідовність дій:

- 1) опитування аналогового входу рівнеміра та масштабування сигналу 4...20 мА у фізичне значення рівня Н;
- 2) цифрова фільтрація виміряного значення (ковзне середнє) для виключення випадкових перешкод;
- 3) перерахунок рівня у відсоток заповнення бункера Z з урахуванням його геометрії;
- 4) зчитування даних RFID та дискретних сигналів напрямку руху, оновлення поточної координати автостели L за виразами (3.3);



- 5) запис пари «координата – рівень» у поточний профіль засипу;
 - 6) порівняння Z з уставками H_{max} і H_{min} з урахуванням гістерезису Δ ; формування команд керування та світлової і звукової сигналізації при досягненні граничних значень;
 - 7) перевірка наявності зв'язку з верхнім рівнем: за наявності — передавання даних на web-сервер; за відсутності — буферне накопичення в пам'яті контролера (не менше 30 хв) із подальшим передаванням після відновлення зв'язку;
 - 8) перехід до наступного циклу.
- Блок-схему описаного алгоритму наведено в графічній частині (креслення БС).

3.3.2 Фрагмент програмної реалізації (SCL)

Нижче наведено фрагмент програми, що реалізує масштабування сигналу, обчислення відсотка заповнення та двопозиційну логіку формування сигналізації:

```
// Масштабування 4..20 мА -> рівень, м
H := H_MIN + (AI_Raw - 5530.0) * (H_MAX - H_MIN)
    / (27648.0 - 5530.0);

// Цифрова фільтрація (ковзне середнє)
H_filt := (H_filt * (N - 1) + H) / N;

// Відсоток заповнення
Z := H_filt / H_BUNKER * 100.0;

// Двопозиційна логіка з гістерезисом
IF Z >= Z_MAX + DELTA THEN
    Alarm_Over := TRUE; Cmd_Stop := TRUE;
ELSIF Z <= Z_MAX - DELTA THEN
    Alarm_Over := FALSE; Cmd_Stop := FALSE;
END_IF;

IF Z <= Z_MIN THEN
    Alarm_Empty := TRUE;
ELSIF Z >= Z_MIN + DELTA THEN
    Alarm_Empty := FALSE;
END_IF;
```

Розроблений алгоритм забезпечує виконання всіх визначених у розділі 2 задач системи: безперервний контроль рівня та положення автостели, формування профілю засипу, виявлення аварійних ситуацій із сигналізацією та надійне накопичення даних при втраті зв'язку з верхнім рівнем.



Візуалізація отриманих даних і подання профілю засипу бункерів технологічному персоналу реалізується на двох рівнях: локально — на сенсорних панелях пультів керування (ПК51, ПК61, ПК52, ПК62) для оперативного контролю стану кожної автостели за місцем; на верхньому рівні — засобами SCADA WinCC у вигляді мнемосхем, трендів і звітів, інтегрованих у наявну систему фабрики, із розмежуванням прав доступу.



4 ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ

Метою розділу є оцінка економічної доцільності впровадження автоматизованої системи обліку роботи розвантажувальних візків (автостел) конвеєрів О-5А, О-5Б, О-6А, О-6Б та контролю рівнів засипу бункерів рудозбагачувальної фабрики №2. Економічний ефект визначається співвідношенням капітальних витрат на створення системи, річних експлуатаційних витрат і річної економії, що досягається за рахунок зниження простоїв обладнання, виключення рудного просипу, зменшення пошкоджень живильників і скорочення пилових викидів.

4.1 Розрахунок капітальних витрат

Капітальні витрати включають вартість основного й допоміжного обладнання, програмного забезпечення, монтажних-налагоджувальних та проєктних робіт. Систему реалізовано для чотирьох автостел, тому обладнання нижнього та контролерного рівнів закуповується відповідною кількістю комплектів. Перелік і вартість технічних засобів наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 — Вартість технічних засобів системи автоматизації

Найменування	Од. вим.	К-сть	Ціна за од., грн	Сума, грн
Радіолокаційний рівнемір KROHNE OPTIWAVE (4...20 мА)	шт.	4	48 000	192 000
RFID-зчитувач IUH-F190-V1-FR1-01	шт.	4	22 000	88 000
RFID-мітки (на будівельні осі конвеєрів)	шт.	320	350	112 000
ПЛК Siemens SIMATIC CPU 1512SP-1 PN (6ES7512-1CK01-0AB0)	шт.	4	95 000	380 000
Ethernet-комутатор IE-SW-BL05-5TX	шт.	4	7 500	30 000
Блок живлення Ethernet IE-KP2 з W/R-модулем	шт.	4	12 000	48 000
Сенсорна панель Siemens 6AV2124-0GC01-0AX0	шт.	4	26 000	104 000
Точка доступу Mikrotik Metal 52 ас з PoE-інжектором	компл.	8	4 500	36 000

Продовження таблиці 4.1

Найменування	Од. вим.	К-сть	Ціна за од., грн	Сума, грн
Блок живлення Weidmüller, трансформатор ETI TRANSF 910	компл.	4	9 800	39 200
ДБЖ Weidmüller з АКБ 24 В DC 12 Аг	компл.	4	18 000	72 000
Шафа керування ШУ5А з термостатом ETR202 та комутацією	шт.	4	32 000	128 000
Промисловий Web-сервер (третій рівень)	шт.	1	145 000	145 000
Сервер WinCC	шт.	1	130 000	130 000
Кабельна продукція, монтажні конструкції, дрібні матеріали	компл.	1	85 000	85 000
Разом за обладнанням, Коб				1 589 200

Вартість програмного забезпечення (ліцензії WinCC, середовище TIA Portal, ПЗ Web-сервера та СУБД) приймається $K_{пз} = 220\ 000$ грн. Витрати на монтажні (15 %), пусконаладжувальні (12 %) та проєктні роботи (8 %) визначаються у відсотках від вартості обладнання та становлять відповідно 238 380, 190 704 і 127 136 грн. Загальні капітальні витрати визначаються за формулою (4.1):

$$K = K_{об} + K_{пз} + K_{монт} + K_{пнр} + K_{пр} = 2\ 365\ 420 \text{ грн (4.1)}$$

4.2 Розрахунок річних експлуатаційних витрат

Річні експлуатаційні витрати складаються з амортизаційних відрахувань (за норми 15 % від вартості обладнання та ПЗ — 271 380 грн/рік), витрат на електроенергію (за сумарної потужності 2,2 кВт, цілодобового режиму та тарифу 4,50 грн/кВт·год — 86 724 грн/рік), витрат на технічне обслуговування й ремонт (5 % від вартості обладнання — 79 460 грн/рік) та заробітної плати обслуговуючого персоналу з відрахуваннями (96 000 грн/рік). Сумарні річні експлуатаційні витрати визначаються за формулою (4.2):

$$Векс = V_a + V_{ел} + V_{тор} + V_{зп} = 533\ 564 \text{ грн/рік (4.2)}$$

4.3 Розрахунок річної економії від упровадження системи

Економічний ефект формується за рахунок усунення недоліків ручного контролю засипу бункерів. Зниження простоїв млинів через

відсутність сировини дає економію $E_1 = 1\,140\,000$ грн/рік (скорочення простоїв на 120 год/рік за вартості години простою 9 500 грн). Виключення рудного просипу при переповненні бункерів — $E_2 = 80\,750$ грн/рік. Зменшення пошкоджень живильників завдяки збереженню «подушки» руди — $E_3 = 180\,000$ грн/рік. Зменшення пилових викидів — $E_4 = 60\,000$ грн/рік. Сумарна річна економія визначається за формулою (4.3):

$$E = E_1 + E_2 + E_3 + E_4 = 1\,460\,750 \text{ грн/рік} \quad (4.3)$$

4.4 Розрахунок показників економічної ефективності

Річний економічний ефект визначається як різниця між річною економією та річними експлуатаційними витратами за формулою (4.4):

$$E_p = E - \text{Векс} = 1\,460\,750 - 533\,564 = 927\,186 \text{ грн/рік} \quad (4.4)$$

Термін окупності капітальних витрат визначається за формулою (4.5):

$$T_{\text{ок}} = K / E_p = 2\,365\,420 / 927\,186 \approx 2,55 \text{ року} \quad (4.5)$$

Коефіцієнт економічної ефективності капіталовкладень визначається за формулою (4.6):

$$E_{\text{еф}} = E_p / K = 927\,186 / 2\,365\,420 \approx 0,39 \quad (4.6)$$

Розрахований коефіцієнт ефективності (0,39) перевищує нормативний для систем автоматизації ($E_n = 0,15$), а термін окупності (близько 2,55 року) є меншим за нормативний ($T_n \approx 6,7$ року), що підтверджує економічну доцільність упровадження системи. Зведені техніко-економічні показники наведено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Зведені техніко-економічні показники

Показник	Од. вим.	Значення
Капітальні витрати	грн	2 365 420
Річні експлуатаційні витрати	грн/рік	533 564
Річна економія	грн/рік	1 460 750
Річний економічний ефект	грн/рік	927 186
Термін окупності	рік	2,55
Коефіцієнт економічної ефективності	—	0,39

4.5 Висновки до розділу

Виконано економічне обґрунтування впровадження автоматизованої системи обліку роботи розвантажувальних візків конвеєрів О-5А, О-5Б, О-6А, О-6Б та контролю рівнів засипу бункерів РЗФ-2. Капітальні витрати на



створення системи становлять 2 365 420 грн, річні експлуатаційні витрати - 533 564 грн, річна економія - 1 460 750 грн. Річний економічний ефект складає 927 186 грн, термін окупності - близько 2,55 року, коефіцієнт економічної ефективності - 0,39. Отримані показники свідчать про економічну доцільність упровадження запропонованої системи автоматизації.



5 ОХОРОНА ПРАЦІ

Під час експлуатації автоматизованої системи обліку роботи розвантажувальних візків барабанних конвеєрів, необхідно дотримуватися комплексу організаційних і технічних заходів безпеки.

5.1 Загальні заходи безпеки

На робочих місцях біля агрегатів і в небезпечних зонах розміщують написи про безпечні методи робіт та інструкції щодо пуску, експлуатації й зупинки обладнання. Пересування працівників здійснюється лише передбаченими технологічними проходами, майданчиками та перехідними містками; перехід через конвеєри й жолоби в необладнаних місцях заборонено. Обладнання має бути справним і оснащеним сигнальними пристроями, гальмами, огорожами рухомих частин, освітленням та захистом від неконтрольованого пуску. Перед початком роботи перевіряють цілісність огорож, надійність пускових і гальмівних пристроїв, заземлення, ізоляцію та сигналізацію. У разі виявлення несправностей експлуатацію негайно припиняють. Пуск обладнання дозволено лише персоналу, який його обслуговує. На підприємстві складаються плани ліквідації аварій, з якими мають бути ознайомлені всі працівники.

5.2 Електробезпека при роботі з АСУ ТП

До роботи з АСУ ТП допускаються особи, які пройшли відповідне навчання та інструктаж з техніки безпеки і мають допуск до роботи з електроустановками до 1000 В. Система відповідає вимогам безпечної роботи з електротехнічними засобами (ДСТУ 12.2.007.0-75) та засобами обчислювальної техніки (ДСТУ 25861-83). Конструкція технічних засобів захищає персонал від доступу до частин, що працюють під небезпечною напругою. Категорично забороняється знімати захисні кожухи без спеціального допуску, а також виконувати електричні підключення чи відключення датчиків і приладів при увімкненому живленні. Усі електричні засоби мають видиме заземлення опором не більше 4 Ом.

5.3 Безпека обслуговування виконавчих пристроїв

До підготовки та обслуговування виконавчих пристроїв допускаються особи, які мають право роботи з арматурою та трубопроводами під тиском. Забороняється ремонтувати пристрій, що перебуває під тиском. Перед подачею тиску перевіряють міцність і герметичність з'єднань. Приєднання та від'єднання датчика виконують лише після закриття вентиля та скидання тиску до атмосферного. Будь-які конструкторські зміни без згоди підприємства-розробника заборонені.



5.4 Технічні рішення з безпеки

Шафи й пульти комплексу виконано за ступенем захисту IP-54, обладнано замками та місцевим освітленням; датчики й виконавчі механізми — за IP-67 з герметичними кабельними вводами та живленням 24 В постійного струму. У шафах при відкритих дверцятах виключено доступ до струмопровідних частин. Модульність обладнання обмежує зону робіт під час обслуговування. Передбачено програмні сервіси діагностики обладнання та ліній зв'язку, а всі комплектувальні вироби мають чинні сертифікати відповідності.

5.5 Умови безпечної експлуатації

Обов'язковими умовами є організація на підприємстві служб з обслуговування, ремонту та експлуатації програмних і апаратних засобів АСУ ТП, навчання їх працівників, а також виконання всіх робіт згідно з чинними нормативними документами з охорони праці та «Правилами безпечної експлуатації електроустановок споживачів».



ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі вирішено актуальне завдання підвищення ефективності роботи дільниці завантаження бункерів рудозбагачувальної фабрики гірничо-збагачувального комбінату шляхом розроблення автоматизованої системи обліку роботи розвантажувальних візків конвеєрів О-5А, О-5Б, О-6А, О-6Б та контролю рівнів засипу бункерів.

У першому розділі проаналізовано предметну область, технологічний процес рудозбагачувальної фабрики та наявні системи автоматизації. Встановлено, що фабрика оснащена дворівневою АСУ ТП на базі контролерів Siemens та SCADA WinCC, проте дільниця транспортування й усереднення дробленої руди розвантажувальними візками залишається неавтоматизованою. Визначено три ключові недоліки існуючого ручного контролю: відсутність автоматичного контролю рівня руди в бункерах по всій довжині складу, відсутність контролю положення та напрямку переміщення автостел і відсутність накопичення архівної інформації про фактичні запаси руди.

У другому розділі розглянуто технологічний процес як об'єкт автоматизації, визначено його параметри та сформульовано задачі автоматизації. Установлено, що об'єкт є об'єктом контролю та обліку з розподіленими параметрами й рухомим джерелом завантаження, для якого первинними є рівень руди, координата та напрямок руху автостели. Обґрунтовано побудову системи за трирівневою клієнт-серверною архітектурою у складі польового, контролерно-логічного та інформаційного рівнів, що забезпечує контроль рівня руди й положення автостел, виявлення та сигналізацію аварійних ситуацій, а також статистичний аналіз і прогнозування запасів руди.

У третьому розділі обґрунтовано вибір технічних засобів автоматизації для всіх рівнів системи та розроблено схеми автоматизації. Запропоновано польовий рівень на базі радіолокаційного рівнеміра KROHNE OPTIWAVE та RFID-ідентифікації положення автостел; контролерний рівень на базі програмованого логічного контролера Siemens SIMATIC CPU 1512SP-1 PN (6ES7512-1CK01-0AB0) з локальними сенсорними панелями; інформаційний рівень на базі web-сервера й сервера WinCC з передаванням даних бездротовим зв'язком та через існуюче оптоволоконне кільце Ethernet. Розроблено функціональну, структурну та принципово-електричні схеми, а також алгоритм роботи контролера з двопозиційним керуванням за уставками й гістерезисом і його програмну реалізацію.

У четвертому розділі виконано економічне обґрунтування доцільності впровадження системи. Капітальні витрати на створення системи становлять 2 365 420 грн, річні експлуатаційні витрати - 533 564 грн, річна економія - 1 460 750 грн. Річний економічний ефект складає 927 186 грн, термін окупності - близько 2,55 року, коефіцієнт економічної ефективності - 0,39, що перевищує нормативний. Показано, що основну



економію забезпечує скорочення простоїв дорогого технологічного обладнання, виключення рудного просипу, зменшення пошкоджень живильників і зниження пилових викидів, завдяки чому впровадження системи є економічно доцільним.

У п'ятому розділі розглянуто питання охорони праці при експлуатації та обслуговуванні системи. Проаналізовано небезпечні та шкідливі виробничі фактори й визначено комплекс організаційних і технічних заходів безпеки: загальні правила безпечного пересування та експлуатації обладнання, вимоги електробезпеки при роботі з АСУ ТП (допуск персоналу до електроустановок до 1000 В, заборона робіт під напругою, видиме заземлення опором не більше 4 Ом), правила безпечного обслуговування виконавчих пристроїв та технічні рішення з безпеки. Передбачено виконання шаф і пультів за ступенем захисту IP-54, а датчиків і виконавчих механізмів - за IP-67 з живленням 24 В постійного струму, програмні сервіси діагностики обладнання й ліній зв'язку, а також наявність сертифікатів відповідності комплектувальних виробів. Надано рекомендації щодо безпечного виконання робіт інженерами АСУ ТП згідно з чинними нормативними документами та «Правилами безпечної експлуатації електроустановок споживачів».

За результатами роботи рекомендовано впровадити розроблену автоматизовану систему обліку роботи розвантажувальних візків та контролю рівнів засипу бункерів на рудозбагачувальній фабриці №2. Система є готовим технічним рішенням, інтегрованим у наявну на фабриці інфраструктуру АСУ ТП на базі контролерів Siemens та SCADA WinCC, що знижує витрати на її впровадження.

Прогнозований ефект від упровадження системи полягає в оптимізації завантаження бункерів за рахунок рівномірного розподілу та усереднення руди за крупністю і вмістом заліза, скороченні простоїв технологічного обладнання, виключенні рудного просипу, продовженні міжремонтного ресурсу живильників, зниженні пилових викидів та поліпшенні умов праці, а також у забезпеченні повноцінного обліку, статистичного аналізу й прогнозування запасів руди в бункерах. У сукупності це підвищує продуктивність фабрики та підтверджує доцільність практичної реалізації запропонованої системи автоматизації.



ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Смирнов В. О., Білецький В. С. Проектування збагачувальних фабрик : навч. посібник. Харків : НТУ «ХПІ», 2018. 376 с.
2. Необхідність створення комплексної системи автоматизації конвеєрної лінії гірничодобувного підприємства. Вісник Криворізького національного університету. Кривий Ріг, 2017. Вип. 44. С. 112–117. URL: <http://ds.knu.edu.ua/jspui/handle/123456789/337>.
3. Технологічна інструкція Ведення процесу збагачення магнетитових кварцитів в умовах фабрики безкульового подрібнення ТІ 00190905.07.001-2024.
4. Контроль технологічних процесів збагачення корисних копалин : матеріал з Вікіпедії. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Контроль_технологічних_процесів_збагачення_корисних_копалин
5. Радарний рівнемір для сипучих матеріалів VEGAPULS 69 : технічний опис. Скіф Контрол. URL: <https://skifcontrol.com.ua/elementy-avtomatizaczi-proizvodstva-2/urovnemer-dlya-sypuchih-materialov-vegapuls-69/> (дата звернення: 15.06.2026).
6. Радіочастотна ідентифікація : матеріал з Вікіпедії. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Радіочастотна_ідентифікація
7. Програмовані контролери SIMATIC ET 200SP : каталог продукції. Siemens. URL: <https://www.siemens.com/en-us/products/simatic/et-200sp/>
8. SCADA-система SIMATIC WinCC : навчальні матеріали. URL: https://stud.com.ua/160503/tehnika/scada_sistema_simatic_wincc (дата звернення: 15.06.2026).
9. ДСТУ Б А.2.4-16:2008. Автоматизація технологічних процесів. Зображення умовні приладів і засобів автоматизації в схемах. [Чинний від 2010-01-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2009. 24 с.
10. ДСТУ 3008:2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлювання. [Чинний від 2017-07-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 31 с.
11. ДСТУ 8302:2015. Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання. [Чинний від 2016-07-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 17 с.
12. СТП ИНГОК 017-2019 Система менеджменту якості. Метрологічне забезпечення виробництва. Організація та порядок проведення повірки и калібрування засобів вимірювальної техніки.
13. СТП ИНГОК 018-2019 Система менеджменту якості. Метрологічне забезпечення виробництва. Технічне обслуговування та ремонт засобів вимірювальної техніки.
14. Інструкція з охорони праці з безпечного виконання робіт при ремонті та обслуговуванні електронного обладнання : ІОП 002-047-2025.



ДОДАТОК А СХЕМА ЛАНЦЮГІВ АПАРАТІВ РОЗВАНТАЖУВАЛЬНИХ ВІЗКІВ РЗФ

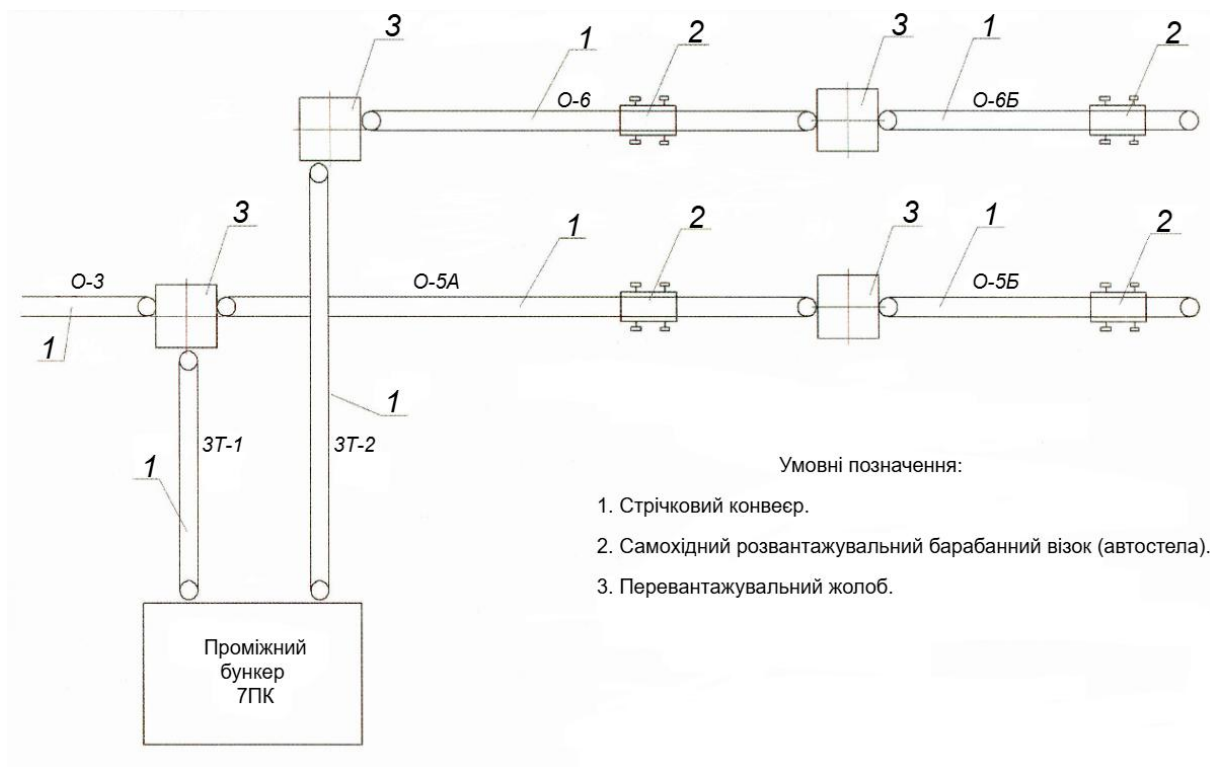


Рисунок А.1 – Схема ланцюгів апаратів розвантажувальних візків