

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

«Допущено до захисту»  
Гарант ОПП

Олексій КОЙФМАН

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня магістра

за підсумками виконання  
освітньо-професійної програми  
«Інтелектуальні системи управління та робототехнічні комплекси  
в гірничо-металургійному виробництві»  
за спеціальністю 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології  
та робототехніка

на тему «АСУ тракту середнього та мілкового подрібнення залізної  
руди в умовах дробильної фабрики гірничозбагачувального  
комбінату»

Керівник роботи

О. І. СІМКІН

Консультант від бази  
практики

В. В. БЕДНОВ

*Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень.  
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на  
відповідне джерело*

Здобувач

Ю. В. УЗЛОВ

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

Голова ЕК

Андрій ЛЕОНОВ

Запоріжжя 2025

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

|                                 |   |
|---------------------------------|---|
| Факультет                       | <u>автоматизації виробництва та цифрових технологій</u>   |
| Кафедра                         | <u>автоматизації, електро- та робототехнічних систем</u>  |
| Освітньо-кваліфікаційний рівень | <u>Магістр</u>  |
| Спеціальність                   | <u>174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка</u>                             |
| ОПП                             | <u>Інтелектуальні системи управління та робототехнічні комплекси в гірничо-металургійному виробництві</u> |

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Гарант ОПП

Олексій КОЙФМАН

27.11.2024 р.

**ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА**

УЗЛОВА Юрія Вікторовича

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема роботи АСУ трактом середнього та мілкового дроблення залізної руди в умовах дробильної фабрики гірничозбагачувального комбінату

керівник роботи Сімкін Олександр Ісакович, канд. техн. наук, професор

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

затверджені наказом Університету від 14.10.2024 р. №238/14.10.2024

2. Термін подання роботи 03.02.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи Навчальна література, державні стандарти з автоматизації, методична література з спеціальних дисциплін та дипломування, науково-дослідницькі роботи з тематики автоматичного регулювання та управління, літературні джерела, технологічні інструкції, дані ГЗК, результати власних експериментів та досліджень тощо

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань) Анотація. Зміст. Вступ. 1. Аналіз предметної області (літературний огляд, недоліки існуючих систем, сучасні тенденції). Технологічний процес як об'єкт управління. 2. Постановка задач автоматизації та обґрунтування запропонованої структури системи управління та сигналізації технологічних параметрів (Основні задачі АСУТП, концепція роботи системи, обґрунтування та вибір технічних рішень). 3. Реалізація запропонованої системи (3.1. Вибір та обґрунтування технічних засобів автоматизації. 3.2. Проєктування САР завантаження руди та її просіювання на грохотах ГТ-52 і ГТ-51 з використанням ПЗ TIA Portal. 3.3. Розробка математичного, алгоритмічного та програмного системи управління трактом середнього та мілкового подрібнення).

4. Економічне обґрунтування запропонованої системи. Висновки. Перелік використаних джерел. Додатки (обов'язкові: опис конструкції агрегату та технологічного процесу, скан-копії тез і статей, інші матеріали на розсуд автора)

5. Перелік графічного (демонстраційного) матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): 1. Схема функціональна автоматизації. 2. Взаємозв'язок функціональних завдань. 3. Схема структурна комплексу технічних засобів. 4. Блок-схеми алгоритмів керування та програмного забезпечення. 5. Презентація магістерської роботи.

Плакати (за вибором): результати розрахунків, розрахунок економічного ефекту, графіки, екранні форми тощо.

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

|                    |   |
|--------------------|---|
| Розділ             | Прізвище, ініціали та посада консультанта |
| <i>Усі розділи</i> | Сімкін О.І., професор кафедри АВЕРС       |

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів кваліфікаційної роботи (проєкту)  | Термін виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|--|--------------------------------|----------|
| 1     | Розділ 1. Аналіз предметної області  | 31.12.2024                     |          |
| 2     | Розділ 2. Постановка задач автоматизації та обґрунтування запропонованої структури комп'ютерної системи управління | 03.01.2025                     |          |
| 3     | Розділ 3. Реалізація запропонованої системи автоматизації  | 17.01.2025                     |          |
| 4     | Розділ 4. Економічне обґрунтування запропонованої системи автоматизації  | 27.01.2025                     |          |
| 5     | Висновки, перелік посилань, вступ, зміст, реферат  | 31.01.2024                     |          |
| 6     | Подання завершеної роботи. Перевірка на академічний плагіат  | 03.02.2025                     |          |
| 7     | Остаточне оформлення роботи, презентаційного матеріалу, автореферату   | 10.02.2025                     |          |
| 8     | Рецензування завершеної роботи. Захист   | До 17.02.2025                  |          |

Здобувач

Юрій УЗЛОВ

Керівник роботи

Олександр СІМКІН



## АНОТАЦІЯ

Узлов Юрій Вікторович. «АСУ тракту середнього та мілкового подрібнення залізної руди в умовах дробильної фабрики. - Кваліфікаційна праця на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» за освітньо-професійною програмою «Інтелектуальні системи управління та робототехнічні комплекси в гірничо-металургійному виробництві», виконана у ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», Запоріжжя, 2025.

Об'єкт дослідження – процес дроблення залізної руди трактом середнього та мілкового подрібнення на базі Дробильної фабрики.

Предмет дослідження – методи та алгоритми автоматизації даного технологічного процесу.

Метою роботи є розробка та вдосконалення автоматизованої системи управління трактом подрібнення залізної руди з метою підвищення продуктивності виробництва, зниження витрат на енергоресурси та покращення якості кінцевого продукту. Для досягнення поставленої мети використовувалися методи аналізу науково-технічної літератури, моделювання технологічних процесів, розробки алгоритмів оптимального управління, проведення обчислювальних експериментів та економічного аналізу.

Основні результати роботи: запропоновано концепцію модернізації існуючої системи автоматизації; розроблено адаптивні алгоритми керування процесом дроблення; проведено аналіз впливу основних технологічних параметрів на продуктивність та енерговитрати; обґрунтовано економічну доцільність впровадження запропонованої системи; сформульовано рекомендації щодо оптимізації режимів роботи дробильного обладнання.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості впровадження розробленої системи на підприємствах гірничо-збагачувальної галузі, що сприятиме зниженню експлуатаційних витрат, підвищенню якості подрібненої руди та збільшенню терміну безвідмовної роботи обладнання.

**АВТОМАТИЗАЦІЯ, ДРОБЛЕННЯ, ЗАЛІЗНА РУДА, КЕРУВАННЯ, ОПТИМІЗАЦІЯ, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, МОДЕРНІЗАЦІЯ**

## ЗМІСТ

|   |    |
|---|----|
| ВСТУП .....   | 7  |
| 1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ.....  | 9  |
| 1.1 Існуючих систем та її недоліки.....   | 9  |
| 1.2 Літературний огляд та сучасні тенденції.....  | 10 |
| 2 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ<br>ЗАПРОПОНОВАНОЇ СТРУКТУРИ КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМИ<br>УПРАВЛІННЯ .....            | 16 |
| 2.1 Технологічний процес як об'єкт управління. Основні задачі<br>АСУТП.....   | 16 |
| 2.2 Концепція роботи системи .....  | 19 |
| 2.3. Обґрунтування та вибір технічних рішень.....   | 20 |
| 3 РЕАЛІЗАЦІЯ ЗАПРОПОНОВАНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ .   | 25 |
| 3.1 Вибір та обґрунтування технічних засобів автоматизації .....  | 25 |
| 3.2 Проектування САР завантаження руди та її просіювання на<br>грохотах ГІТ-52 і ГІТ-51і з використанням ПЗ ТІА Portal .....      | 28 |
| 3.3 Розробка математичного, алгоритмічного та програмного<br>системи управління трактом середнього та мілкового подрібнення ..... | 33 |
| 4 ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАПРОПОНОВАНОЇ СИСТЕМИ<br>АВТОМАТИЗАЦІЇ .....  | 46 |
| ВИСНОВКИ .....  | 50 |
| ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....  | 52 |
| ДОДАТОК А ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС.....   | 53 |
| ДОДАТОК Б ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ АГРЕГАТИВ ТА<br>МЕХАНІЗМІВ .....  | 56 |
| ДОДАТОК В СХЕМА ФУНКЦІОНАЛЬНА АВТОМАТИЗАЦІЇ .....   | 62 |
| ДОДАТОК Г ВЗАЄМОЗВ'ЯЗОК ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ЗАВДАНЬ .....  | 5  |
| ДОДАТОК Д СХЕМА СТРУКТУРНА КОМПЛЕКСУ ТЕХНІЧНИХ<br>ЗАСОБІВ.....  | 64 |
| ДОДАТОК Е БЛОК-СХЕМИ АЛГОРИТМІВ КЕРУВАННЯ .....   | 65 |



## ВСТУП

У сучасних умовах розвитку гірничо-металургійної промисловості важливу роль має автоматизація технологічних процесів, а саме: у підвищенні продуктивності підприємств, оптимізації використання енергетичних ресурсів та покращенні якості кінцевої продукції. Зокрема, автоматизація процесів подрібнення залізної руди дозволяє забезпечити стабільність роботи дробильного обладнання, мінімізувати вплив людського (технологічного персоналу) фактору та знизити ремонтні витрати. Саме тому тема кваліфікаційної роботи "Автоматизована система управління трактом середнього та мілкового подрібнення залізної руди в умовах дробильної фабрики одного з гірничо-збагачувальних комбінатів України (далі – дробильна фабрика) є актуальною.

Актуальність обраної теми є постійно зростаючі вимоги до якості вихідного матеріалу, необхідність підвищення продуктивності виробництва та зменшення витрат на енергоресурси. Враховуючи сучасні тенденції розвитку промисловості, автоматизовані системи управління (АСУ) технологічними процесами дозволяють підприємствам адаптуватися до змін на ринку збуту продукції.


Метою кваліфікаційної роботи є розробка та вдосконалення автоматизованої системи управління трактом середнього та мілкового подрібнення залізної руди на базі дробильної фабрики. Основними завданнями дослідження є:

- 1) аналіз існуючих систем управління технологічними процесами подрібнення на підприємствах гірничо-збагачувальної галузі;
- 2) визначення переваг та недоліків наявних автоматизованих систем управління дробильним обладнанням;
- 3) розробка структури автоматизованої системи управління для забезпечення оптимальної продуктивності дробарок та енергоефективності процесу подрібнення;
- 4) розробка алгоритмів автоматизованого управління та моніторингу технологічних параметрів;
- 5) оцінка ефективності запропонованої системи та формулювання рекомендацій щодо її впровадження на підприємствах.

Об'єктом дослідження є процес дроблення залізної руди трактом середнього та мілкового подрібнення в умовах дробильної фабрики. Предметом дослідження виступають методи та алгоритми автоматизованої системи управління даним трактом.

Методи дослідження включають аналіз науково-технічної літератури, моделювання автоматизованих систем управління, розробку алгоритмів оптимального управління та проведення обчислювальних експериментів для оцінки ефективності запропонованих рішень.

Науково-практичне значення отриманих результатів полягає у збільшенні продуктивності роботи дробильного обладнання шляхом впровадження та вдосконалення існуючих системи управління (АСУ) з



можливістю адаптації до змін умов роботи. Впровадження розробленої системи дозволить знизити витрати на енергоресурси, збільшити якість подрібненої руди та збільшити ремонтний період обладнання.

Новизна роботи полягає у розробці адаптивної системи управління, що базується на сучасних методах оптимізації технологічних параметрів та використанні нових технологій, таких як нейронні мережі та нечітка логіка, для підвищення точності прогнозування стану обладнання та оптимізації процесу подрібнення.

Матеріали кваліфікаційної роботи пройшли апробацію під час переддипломної практики на базі одного з ГЗК України, що дозволило оцінити практичну значущість запропонованих рішень у реальних умовах роботи дробильної фабрики. Основні положення та результати дослідження висвітлені у науковій статті, опублікованій у збірнику матеріалів науково-технічної конференції.

Таким чином, результати кваліфікаційної роботи можуть бути використані для підвищення ефективності технологічних процесів на підприємствах гірничо-збагачувальної галузі, що сприятиме зміцненню економічного потенціалу промисловості.

Апробація роботи:

1) Узлов Ю.В., Сімкін О.І. АСУ тракту середнього та мілкового подрібнення залізної руди. Автоматизація та комп'ютерні-інтегровані технології у виробництві та освіті: стан, досягнення, перспективи розвитку. Матеріали Секція 1. Всеукраїнська науково-практичній Інтернет-конференції. м. Черкаси 11 – 17 березня 2024р. С 55-56

2) Узлов Ю.В., Сімкін О.І. Постановка задачі алгоритмів роботи інформаційних підсистем АСУТП та оцінки їх якості. Автоматизація та біомедичні і комп'ютерні технології. м. Маріуполь/Дніпро 12.03.2024р. С 17 – 18

3) Uzlov Y.V., Simkin O.I. Автоматизована система управління трактом подрібнення дробарної фабрики. Miningmetaltech 2024 – the mining and metals sector: integration of business, technology and education. International scientific conference Riga, the Republic of Latvia. Vol 2 November 28–29, 2024 P 79-82

DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-506-8-142>

# 1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

## 1.1 Існуючих систем та її недоліки

На дробильній фабриці гірничо-збагачувального комбінату діють кілька локальних автоматизованих систем управління, які забезпечують моніторинг ключових технологічних параметрів, основні параметри та технологічний процес описаний у Додатку А. Ці системи включають сенсори для збору інформації, контролери для її обробки та монітори для візуалізації даних. Крім того, створене автоматизоване робоче місце оператора з мінімальним рівнем людино-машинного інтерфейсу (ЛМІ).

Основні функції локальних систем:

- вимірювання основних і допоміжних технологічних показників;
- управління механізмами основного та допоміжного обладнання.

Деякі локальні системи, встановлені в 2011 році, використовують контролери Siemens серії S300 і обладнання КВП виробництва «ОВЕН», зокрема датчики температури Pt100, датчики тиску EDS 3348-5-0016-000-F1 і електромагніти гідророзподільників. Ці системи виконують лише функції запуску й зупинки електроприводів, а також контролю стану обладнання в робочих і аварійних режимах, не забезпечуючи регулювання параметрів.


Новіші локальні системи являють собою автоматизовані комплекси управління дробарками. Управління реалізоване на базі програмованих логічних контролерів (ПЛК) Siemens S1500, встановлених у шафах управління (ШУК), із використанням децентралізованої периферії ET200. Ці системи можуть інтегруватися в загальну АСУ ТП фабрики як базовий рівень автоматизації. Модульна структура систем забезпечує безперервний контроль роботи обладнання, передавання інформації технологічному персоналу й збереження даних в архівах.

На сенсорній панелі Siemens TP1500 Comfort відображається меню з такими розділами:

- архів повідомлень;
- автоматичний режим;
- налаштування розміру щілини;
- графіки (тренди);
- контроль параметрів;
- стан автоматів і контакторів;
- введення уставок;
- облік часу роботи дробарки й заміни броней;
- копіювання даних на флеш-накопичувач;
- підтвердження операцій (квітування).

Основними недоліками наявних систем є:

- 1) відсутність стабілізації основних технологічних параметрів;
- 2) немає можливості реалізувати алгоритми комплексного управління дробаркою.



Перед третьою стадією подрібнення використовуються грохоти ГТ-52, а перед четвертою — ГТ-51. Процеси подрібнення й грохочення залишаються практично неавтоматизованими, із застосуванням застарілих релейних схем управління.

## 1.2 Літературний огляд та сучасні тенденції

З метою ґрунтовного дослідження теми кваліфікаційної роботи "АСУ тракту середнього та мілкового подрібнення залізної руди в умовах дробильної фабрики гірничозбагачувального комбінату", було проведено огляд літератури, що включав наукові статті та інші публікації, тісно пов'язані з проблематикою автоматизації процесів подрібнення. Для підготовки цього розділу роботи, основною інформаційною базою слугували ресурси бібліотеки ТОВ «Метінвест Політехніка», а також інтернет-джерела, зокрема, "Google Scholar". Короткий зміст опрацьованих матеріалів наведено нижче.

У джерелі [2] розглядається методика системного моделювання для проектного розрахунку вібраційного грохоту з коловими коливаннями. Основна увага приділена розробці математичної моделі та аналізу впливу параметрів на ефективність роботи пристрою.

Переваги:

- автори пропонують комплексний підхід до розв'язання інженерної задачі, використовуючи методи системного моделювання;
- наведені результати дозволяють оптимізувати конструктивні параметри грохоту;
- практична значущість статті може бути корисною для інженерів і дослідників, які займаються розробкою або вдосконаленням вібраційних машин.


Недоліки:

- робота зосереджена на певному типі коливань (колові), що може обмежувати застосування запропонованих підходів для інших типів вібрацій;
- у статті відсутній детальний аналіз економічної доцільності впровадження запропонованих рішень.

Стаття [3] є сучасним дослідженням, яке може бути цінним для аналізу питань автоматизації в гірничій промисловості, зокрема у процесах дроблення руди. У статті розглядається підхід до вибору способу автоматизованого регулювання продуктивності процесу дрібного дроблення залізної руди за умов змінних параметрів. Особлива увага приділена аналізу методів автоматизації, їх впливу на ефективність виробництва та стабільність роботи обладнання.

Переваги:

- актуальність дослідження у контексті підвищення продуктивності та ефективності гірничо-збагачувальних процесів;

- 
- автори аналізують декілька варіантів регулювання, що дозволяє обрати найбільш оптимальне рішення для різних умов експлуатації;
  - робота підкріплена реальними даними і містить практичні рекомендації щодо впровадження автоматизації.

Недоліки:

- у статті акцент зроблено переважно на технічних аспектах регулювання, тоді як економічна складова розглянута поверхово;
- дослідження обмежується конкретним типом дроблення (мілке дроблення), що може обмежити використання результатів для інших процесів.

Джерело [4] є корисним для аналізу сучасних підходів до автоматизації керування електроприводами, зокрема у сфері дроблення матеріалів. Його практична спрямованість може стати цінною частиною вашого дослідження. У роботі [2] розглянуто застосування операторських панелей та програмованих логічних контролерів (ПЛК) для управління електроприводом дробарки. Особлива увага приділена можливостям інтеграції сучасного обладнання в технологічні процеси з метою підвищення їх продуктивності та надійності.

Переваги:

- викладені матеріали демонструють прикладну цінність використання ПЛК для автоматизації складних технологічних процесів;
- надано детальний опис функціоналу операторської панелі, що дозволяє підвищити зручність та ефективність керування обладнанням;
- сучасність джерела (2023 рік) забезпечує актуальність викладеної інформації.


Недоліки:

- основний фокус роботи спрямований на технічні аспекти, при цьому недостатньо розкрито економічний ефект від впровадження описаних рішень;
- дослідження обмежене лише електроприводом дробарки, що не дозволяє поширити його результати на інші типи обладнання.

Стаття [5] є цінним джерелом інформації для аналізу підходів до автоматизації процесів дроблення руди, зокрема у контексті використання економічних критеріїв для оптимізації технологічних процесів. У статті [5] описано систему екстремального автоматичного керування процесом дроблення руди, яка базується на застосуванні економічного критерію. Основна увага приділена алгоритмам автоматичного керування, що дозволяють досягти максимальної продуктивності за мінімальних витрат енергії.

Переваги:

- автори застосували економічний критерій, що є вагомим перевагою для оптимізації процесів у промисловості;
- наведено результати моделювання, які підтверджують ефективність запропонованого підходу;



– практична значущість роботи: можливість використання результатів для зниження витрат енергоресурсів та підвищення ефективності роботи дробильних установок.

Недоліки:

– у статті недостатньо уваги приділено технічним аспектам реалізації системи автоматичного керування;

– робота фокусується лише на певному економічному критерії, без врахування інших показників ефективності, таких як надійність чи екологічність процесу.

Джерело [6] є фундаментальним дослідженням у сфері автоматизації технологічних процесів, зокрема керування процесами дроблення та здрібнювання руд. Монографія надає глибокий аналіз методів автоматизації та підходів до оптимального керування. У монографії розглядаються теоретичні основи та практичні аспекти автоматизації процесів дроблення та здрібнювання руд. Автор зосереджується на оптимізації технологічних процесів, використовуючи сучасні методи автоматичного керування. Важливу увагу приділено математичному моделюванню, алгоритмам керування та реалізації систем автоматизації на промислових об'єктах.

Переваги:

– комплексний аналіз автоматизації процесів дроблення та здрібнювання руд;

– монографія містить теоретичне обґрунтування методів та їхнє практичне застосування;

– велика кількість прикладів та детальний опис алгоритмів керування;

– підходи до автоматизації орієнтовані на підвищення продуктивності та зменшення енергетичних витрат.


Недоліки:

– видання 2013 року може містити застарілі дані щодо деяких технологічних нововведень;

– монографія, ймовірно, зосереджена переважно на специфічних умовах застосування, що може обмежити універсальність викладених рішень.

Стаття [7] джерело є важливим внеском у сферу автоматизації рудопідготовчих процесів із використанням сучасних інтелектуальних методів. Стаття описує синергетичний підхід до оптимального керування, що є актуальним для підвищення ефективності технологічних процесів у гірничій промисловості. У статті представлено синергетичний підхід до синтезу системи оптимального керування рудопідготовкою з використанням інтелектуального прогнозування. Автор досліджує можливості підвищення ефективності рудопідготовчих процесів завдяки інтеграції інтелектуальних алгоритмів у системи автоматизації.

Переваги:

- 
- використання синергетичного підходу дозволяє врахувати взаємодію різних підсистем рудопідготовки, що забезпечує більш ефективне управління;
  - інтелектуальне прогнозування сприяє підвищенню точності рішень і зменшенню ризиків у технологічних процесах;
  - стаття містить теоретичне обґрунтування методів і практичні рекомендації щодо їх застосування.

Недоліки:

- стаття акцентує увагу на теоретичному аспекті без детального аналізу практичних результатів впровадження описаних методів;
- викладені підходи можуть бути складними для реалізації без залучення додаткових ресурсів чи адаптації до специфічних умов виробництва.

Джерело [8] є важливим для дослідження сучасних підходів до керування нелінійними динамічними об'єктами в автоматизованих системах, зокрема в збагачувальних виробництвах. Автореферат дисертації надає глибокий аналіз використання гібридних моделей Гамерштейна для оптимізації процесів керування. У роботі автора розглядаються методи керування нелінійними динамічними об'єктами, які застосовуються у збагачувальних виробництвах. Основну увагу приділено розробці гібридних моделей Гамерштейна, які дозволяють точно моделювати складні процеси та підвищити ефективність автоматизованого керування в реальних умовах.


Переваги:

- описані інноваційні підходи до керування складними системами за допомогою гібридних моделей;
- робота містить новітні досягнення в галузі автоматизації процесів, що робить її корисною для розробки та оптимізації систем управління;
- автореферат надає чітке уявлення про теоретичні та практичні аспекти застосування гібридних моделей Гамерштейна.

Недоліки:

- оскільки це автореферат дисертації, деякі деталі методології можуть бути спрощені або викладені без достатньої глибини;
- задля повного розуміння застосованих методів необхідно звертатися до основного тексту дисертації.

Стаття [9] є важливим для дослідження автоматизації процесів на конкретних промислових об'єктах, зокрема на конвеєрних лініях гірничозбагачувальних комбінатів. Стаття розглядає особливості автоматизації та ефективність роботи конвеєрної лінії на Інгулецькому гірничозбагачувальному комбінаті. У роботі автора аналізується автоматизація конвеєрної лінії Інгулецького гірничозбагачувального комбінату, що є важливим елементом в автоматизації технологічних процесів у гірничій та переробній промисловості. Описуються основні етапи автоматизації, технічні характеристики та переваги



автоматизованої конвеєрної лінії для підвищення продуктивності та зменшення витрат.

Переваги:

- стаття надає конкретний приклад застосування автоматизації на промисловому об'єкті, що має високу практичну цінність;
- детально описані технічні аспекти роботи конвеєрної лінії, що дозволяє зрозуміти важливість автоматизації для покращення ефективності виробничих процесів;
- важливість роботи статті полягає в її конкретному застосуванні до одного з найбільших комбінатів України.

Недоліки:

- оскільки робота була опублікована в 2001 році, деякі технічні рішення можуть бути застарілими в контексті сучасних технологій автоматизації;
- стаття може не розкривати всі нюанси інтеграції сучасних інформаційних технологій та інтелектуальних систем у процес автоматизації.

Стаття [10] пропонує сучасні методи автоматизації дробарок, які підвищують їх продуктивність і енергоефективність. У роботі розглядається проблема удосконалення системи керування конусною дробаркою середнього дроблення. Важливою частиною статті є пропозиції щодо оптимізації процесу дроблення, використовуючи сучасні методи автоматизації та контролю, що дозволяють підвищити ефективність роботи дробарки та зменшити енергоспоживання. Автори описують систему автоматичного регулювання, яка забезпечує точне підтримання параметрів дроблення залежно від умов роботи дробарки.


Переваги:

- у роботі запропоновано актуальні підходи до оптимізації управління конусною дробаркою, що може бути корисним для підвищення продуктивності та енергоефективності гірничо-збагачувальних процесів;
- докладно розглянуто удосконалення систем автоматичного регулювання параметрів роботи дробарки, що є ключовим для забезпечення стабільної роботи обладнання при змінних умовах;
- практичні рекомендації для інженерів та операторів, які працюють з дробарками середнього дроблення.

Недоліки:

- оскільки стаття орієнтована на удосконалення існуючих технологій, вона може не враховувати новітніх інноваційних підходів у галузі автоматизації;
- можливо, деякі запропоновані рішення не придатні для використання на старих або застарілих моделях дробарок без додаткової модернізації.

На основі проведеного аналізу літератури було виявлено, що хоча існує значна кількість досліджень, присвячених автоматизації процесів



подрібнення руд, вони здебільшого фокусуються на окремих аспектах, таких як використання програмованих логічних контролерів, оптимізація параметрів роботи обладнання або застосування економічних критеріїв. Однак недостатньо уваги приділено інтеграції цих рішень у комплексну автоматизовану систему управління (АСУ), яка враховує всі етапи подрібнення та адаптується до змінних умов роботи дробильної фабрики.

Крім того, актуальним залишається питання підвищення ефективності енергоспоживання та забезпечення стабільної роботи обладнання в умовах змінних параметрів виробничого процесу. Тому у рамках кваліфікаційної роботи планується дослідити та вирішити ці аспекти шляхом розробки та впровадження комплексної АСУ для тракту середнього та мілкового подрібнення залізної руди в умовах Дробильної фабрики.

## 2 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАПРОПОНОВАНОЇ СТРУКТУРИ КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ

### 2.1 Технологічний процес як об'єкт управління. Основні задачі АСУТП

Управління процесами дроблення та здрібнення базується на принципі максимізації швидкості зменшення часток руди, більших за граничний розмір фракції у кінцевому продукті, та мінімізації швидкості для часток, менших за цей розмір. Тобто, метою дроблення є збільшення кількості готового продукту та досягнення різкого розподілу часток за розміром.

Основними вихідними параметрами процесу дроблення в конусних дробарках (рис. 2.1) є гранулометричний склад подрібненого продукту вих  $\gamma$  (вихідний), продуктивність процесу  $Q_{др}$  та споживана потужність  $P_{др}$ . Керуючими впливами є продуктивність подачі руди  $Q_{вх}$ , розмір розвантажувальної щілини дробарки та частота коливань її рухомого конусу  $\nu$ . Збуреннями виступають гранулометричний склад вхідної руди  $\gamma$  та її міцність  $\rho$ , стан футеровок  $\xi$  тощо.

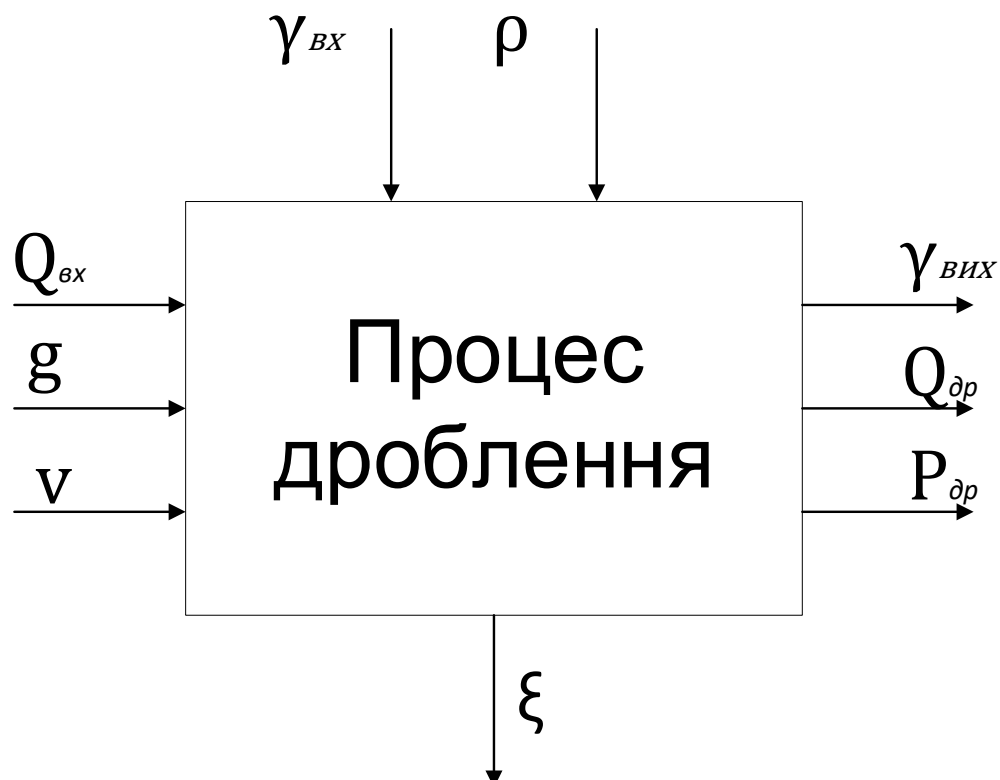


Рисунок 2.1 – Процес дроблення в конусних дробарках

Продуктивність дроблення значною мірою залежить від властивостей руди (розмір, міцність), тому при проектуванні

збагачувальних фабрик дробильне обладнання обирають із значним запасом продуктивності. Режими дроблення на діючих ГЗК Криворізького басейну встановлюють, враховуючи найскладніші умови. Через це ефективність використання дробильного обладнання за продуктивністю на гірничих підприємствах становить 50-60%, а тривалість можливої зупинки дробильного відділення при працюючому подрібнювальному відділенні може сягати 10 і більше годин на добу.

Зазначені особливості гірничих підприємств створюють сприятливі умови для узгодження процесів дроблення без необхідності досягнення максимальної продуктивності. Зниження енерговитрат також не є раціональним, оскільки вони значно нижчі за енерговитрати процесу здрібнювання. Тому керування процесом крупного дроблення доцільно здійснювати за якісним показником, наприклад, шляхом мінімізації різниці між поточним  $\gamma_{\text{вих}}$  та заданим  $\gamma_{\text{вих}}^{\text{зад}}$  гранулометричним складом продукту дроблення

$$\|\gamma_{\text{вих}} - \gamma_{\text{вих}}^{\text{зад}}\| \rightarrow \min \quad (2.1)$$

За обмежень на потужність  $P_{\text{др}} \leq P_{\text{др max}}$  та продуктивність  $Q_{\text{др}} \geq Q_{\text{др max}}$ . Заданий гранулометричний склад  $\gamma_{\text{вих}}^{\text{зад}}$  відповідає максимальній продуктивності наступного процесу самоподрібнення.

Процеси дроблення та здрібнювання є складними динамічними системами керування з нестационарними параметрами, нелінійними залежностями та випадковими змінними, що мають значні транспортні запізнення, що характеризує їх значну невизначеність.

Динамічні властивості процесу дроблення за каналами  $\gamma_{\text{вих}} - Q_{\text{др}} \rho - \gamma_{\text{вих}}$  і  $g - P_{\text{др}}$  продуктивності та розміру щілини приблизно описуються передатною функцією аперіодичної ланки першого порядку із запізненням


$$W_1 = \frac{k_1}{T_1 p + 1} \cdot e^{-p\tau_1} \quad (2.2)$$

а за каналом  $Q_{\text{вих}} - Q_{\text{др}}$  - аперіодичною ланкою другого порядку із запізненням:

$$W_2 = \frac{k_2}{T_2^2 p^2 + 2\mu T_2 p + 1} \cdot e^{-p\tau_2}, \quad (2.3)$$

де  $k_1, k_2$  – коефіцієнти  $T_1, T_2$  – підсилення, постійні часу та  $\tau_1, \tau_2$  – запізнення є нестационарними і залежать від продуктивності подачі руди, гранулометричного складу вхідної руди, її фізико-механічних властивостей та ширини розвантажувальної щілини дробарки.

При автоматизації керування процесом дроблення використовуються наступні принципи:

- 
- підвищення продуктивності за умови забезпечення заданого гранулометричного складу продукту дроблення;
  - зниження енерговитрат за умови забезпечення заданого гранулометричного складу продукту дроблення та продуктивності;
  - забезпечення заданого гранулометричного складу продукту дроблення за умови підтримки продуктивності на рівні не нижче допустимого.

Оптимальне керування шириною розвантажувальної щілини досягається за допомогою прогнозуючої моделі процесу, представленої у вигляді скінчено-різницевого рівняння, параметри якого можуть адаптуватися під час роботи системи. Проте, ця система має обмежену точність через похибки моделі та датчиків.


Прикладом комплексного підходу до оптимального керування процесом дроблення є автоматизована система керування (АСК) дробарками КСД-2200Т, розроблена на базі мікропроцесорних засобів Siemens. Ця система автоматично регулює завантаження дробарки, оптимізуючи режим роботи головного приводу шляхом керування подачею матеріалу залежно від струму двигуна. Мета керування полягає в досягненні максимальної продуктивності за умови підтримки заданого значення струму двигуна при встановленому розмірі розвантажувальної щілини. Однак, ця АСК має обмеження щодо цілей керування, наприклад, вона не може керувати гранулометричним складом продукту дроблення.

З точки зору керування, процес дроблення є складною динамічною системою з нестаціонарними параметрами, нелінійними залежностями та випадковими змінними, що характеризуються значними транспортними запізненнями. Сучасна теорія автоматичного керування передбачає досягнення головної мети на кожному етапі функціонування системи шляхом оптимізації в реальному часі. Це можливо за умови:

- оптимального оцінювання (фільтрації) динамічних процесів в системі;
- ідентифікації (оптимального оцінювання структури та параметрів моделі) системи;
- синтезу оптимального керування на кожному етапі функціонування системи;
- адаптації (налаштування оптимального керування за неповної інформації).

Крім того, для складних нелінійних систем активно розвиваються інтелектуальні методи керування, які розглядають систему не як повністю відомий об'єкт, а лише як певну інформацію про нього.

Можна стверджувати, що актуальною науковою проблемою є підвищення ефективності автоматизованого керування процесами дроблення на 3-й та 4-й (див. Додаток А) стадіях в умовах зміни їх динамічних режимів роботи і параметрів та збуреного середовища шляхом синтезу і реалізації оптимального керування в процесі



функціонування систем керування на основі ідентифікації та прогнозування стану керованих процесів з контролем основних збурень.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати низку завдань, таких як:

- теоретично обґрунтувати принципи оптимального управління процесами дроблення руд. Це потрібно реалізувати на етапах проектування та експлуатації систем автоматизованого керування. Важливим аспектом є також визначення точності здійснення такого управління;

- розробити методику вибору параметрів дискретизації та відновлення сигналів, яка дозволить мінімізувати похибку апроксимації при вирішенні завдань спостереження та ідентифікації керованих процесів;

- розробити способи моніторингу гранулометричного складу вихідної руди, досліджуючи та пропонуючи ефективні методи контролю, як алгоритмічні, так і оптичні;

- розробити адаптивний алгоритм для автоматичного визначення розміру розвантажувальної щілини, який має на меті покращення якості кінцевого продукту;

- розробити адаптивні системи оптимального керування процесами дроблення руд з функцією інтелектуального прогнозування.

Рішення цих задач дозволить створити ефективну систему автоматизованого управління процесами дроблення, що сприятиме оптимізації технологічного процесу, підвищенню продуктивності та якості кінцевого продукту.


## **2.2 Концепція роботи системи**

Як перший етап реалізації комплексної автоматизованої системи управління фабрикою запропоновано створення системи управління для тракту середнього та дрібного дроблення. До складу цього тракту входять: завантажувальний конвеєр, дробарка середнього дроблення, грохот, а також дробарка дрібного (мілкового) дроблення.

Запропонована система автоматизації спрямована на впровадження сучасних технологій автоматизації для оптимізації процесу дроблення. Її використання дозволить значно підвищити продуктивність та знизити витрати на переробку залізної руди, забезпечуючи високу ефективність процесу.

На основі технологічної інструкції та переліку вимірювальних засобів виділено такі ключові параметри:

- струмове навантаження кожного агрегата;
- температура мастила дробарок КСД і КМД (температура на подачі, підшипникових вузлах, ексцентрики, на зливі);
- температура двигунів (обмоток і підшипників);
- вібрація двигуна в контрольних точках;

- 
- вібрація дробарки (при проходженні недробильного матеріалу);
  - температура води теплообмінника на вході та виході;
  - ширина розвантажувальної щілини дробарок;
  - частота обертання завантажувального конвеєра;
  - частота коливань грохотів ГІТ-51 і ГІТ-52;
  - рівень завантаження дробарки.

Для вибору необхідних датчиків і засобів контролю враховуються існуючі технологічні та експериментальні дані, а стандарту АСУТП [11].

САР ширини розвантажувальної щілини дробарок. Для її реалізації необхідно розробити алгоритм роботи та підібрати технічні засоби з високою точністю. На дробарках, встановлених у 2021 році, гідроагрегати вже обладнані відповідними технічними рішеннями. Основні параметри для їх налаштування включають:

- витримки часу для відключення та запуску компонентів;
- значення тисків для розфіксації та аварійного захисту;
- температурні межі мастила та рівня масла.

Функція автоматичного регулювання щілини реалізується шляхом підтяжки регулювального кільця, що зменшує її розмір на 1,1–1,3 мм залежно від типу дробарки. Для старіших дробарок, обладнаних штоковими гідроагрегатами, реалізація автоматичного режиму неможлива через конструктивні обмеження, що дозволяють лише напівавтоматичне управління.

САР кількості матеріалу на завантажувальному конвеєрі. Ця система регулює швидкість завантажувального конвеєра за допомогою частотного перетворювача. Для її реалізації передбачається модернізація контролера для впровадження нового алгоритму регулювання та монтаж вагового обладнання для точного вимірювання поданого матеріалу.


Використання даних від датчика рівня в чаші дробарки та струмового навантаження двигуна дробарки. Регулювання швидкості конвеєра дозволяє оптимально завантажувати дробарку та зменшувати енергоспоживання.

САР частоти коливань грохотів. Для її реалізації потрібно замінити застарілу релейну систему управління на сучасну, доповнивши її датчиками рівня матеріалу та вібрації. Управління частотою вібрації виконується за допомогою частотного перетворювача. У разі перевищення рівня матеріалу на грохоті частота зменшується, а при недостатньому рівні – збільшується.

Впровадження описаних систем дозволить підвищити продуктивність процесу дроблення, забезпечити стабільність роботи обладнання та зменшити витрати енергоресурсів.

### **2.3. Обґрунтування та вибір технічних рішень**

Оптимальний вибір структури системи автоматизації дозволяє забезпечити ефективну координацію між усіма елементами виробничого



процесу, своєчасно реагувати на зміни технологічних параметрів та знижувати енергетичні витрати.

На цьому етапі зробимо аналіз критеріїв та методів обрання оптимальної архітектури системи управління, що ґрунтується на трирівневій структурі. Вона включає:

- нижній рівень, який відповідає за безпосередній збір інформації від датчиків та виконання керуючих сигналів;
- середній рівень, де реалізовано основні алгоритми обробки даних і прийняття рішень за допомогою програмованих логічних контролерів;
- верхній рівень, який забезпечує моніторинг, візуалізацію даних і оперативну взаємодію оператора з системою.

Обґрунтування структури системи автоматизації базується на аналізі технологічного процесу подрібнення руди та його динамічних характеристик, що дозволяє ефективно розподілити функціональні завдання між різними рівнями управління. Цей підхід сприяє підвищенню надійності та адаптивності системи, забезпечуючи своєчасне виявлення відхилень у роботі обладнання та прийняття оптимальних рішень для підтримки заданих параметрів процесу.

Основний розподіл завдань здійснюється наступним чином:


1) нижній рівень (польовий рівень): цей рівень відповідає за безпосередній збір інформації та виконання первинних керуючих дій. Основні завдання включають:

- збір даних: використання різноманітних датчиків (температури, вібрації, струму, рівня завантаження тощо) для моніторингу стану технологічного процесу;
- локальне управління: негайне реагування на сигнал із системи шляхом регулювання роботи виконавчих пристроїв, таких як частотні перетворювачі та гідроагрегати.

2) середній рівень (контролерний рівень): на цьому рівні відбувається обробка даних, отриманих з нижнього рівня, та прийняття рішень за допомогою програмованих логічних контролерів (PLC). Основні завдання включають:

- аналіз і обробка сигналів: отримані дані порівнюються з заданими вставками (нормами), визначаються відхилення та необхідність коригувальних дій;
- прийняття керуючих рішень: реалізація алгоритмів управління для оптимізації параметрів технологічного процесу, що дозволяє змінювати режими роботи обладнання відповідно до поточних умов;
- комунікація: забезпечення зв'язку між нижнім рівнем та системами моніторингу, а також передача керуючих команд на виконавчі пристрої.

3) верхній рівень (операторський рівень): цей рівень призначений для забезпечення управління та моніторингу роботи системи. Основні завдання включають:



- моніторинг та візуалізація: відображення інформації про стан процесу в реальному часі за допомогою SCADA-системи і HMI-панелей, що дозволяє оператору та технологу контролювати процеси;

- інтерфейс управління: забезпечення можливості налаштування параметрів автоматичного керування, коригування режимів роботи обладнання, отримання аварійних сповіщень та формування звітів;

- аналіз історичних даних: збір і обробка архівних даних для прогнозування тенденцій, оптимізації алгоритмів керування та підвищення загальної ефективності системи.

У сучасних автоматизованих системах управління технологічними процесами, такими як подрібнення руди, важливо чітко окреслити основні функціональні завдання, які реалізуються на кожному рівні управління, а також продемонструвати логічну взаємодію між цими завданнями. Це дозволяє забезпечити високий рівень ефективності, адаптивності та надійності роботи системи. Нижче наведено детальний перелік основних функціональних завдань, а також опис схеми їхнього взаємозв'язку (див. Додаток Г):

1) Основні функціональні завдання.

а) Збір та первинна обробка даних:

- моніторинг параметрів: збір інформації з різних типів датчиків (температурних, вібраційних, рівня завантаження, струмового навантаження тощо) для визначення поточного стану технологічного процесу;

- первинна обробка сигналів: фільтрація та попередня обробка даних для усунення шумів і забезпечення коректності інформації, яка надходить до системи управління.

б) Аналіз та прийняття рішень:

- порівняння з вставками: аналіз отриманих даних шляхом порівняння з заданими контрольними значеннями, що дозволяє виявити відхилення та потенційні аварійні ситуації;

- розрахунок коригувальних дій: визначення необхідних регульовальних заходів (зміна швидкості конвеєра, коригування розміру щілини дробарки, регулювання частоти коливань грохота) на основі адаптивних алгоритмів управління;

- прийняття рішень: автоматичне або напівавтоматичне прийняття рішень для корекції режимів роботи обладнання з метою оптимізації технологічного процесу.

в) Реалізація керуючих дій:

- передача керуючих сигналів: отримані рішення передаються на виконавчі пристрої (частотні перетворювачі, гідроагрегати), які безпосередньо впливають на технологічні параметри;

- виконання регульовальних дій: Виконавчі пристрої змінюють робочі режими відповідно до отриманих команд, що дозволяє адаптувати систему до поточних умов.



г) Моніторинг та зворотний зв'язок:

- контроль виконання: постійний моніторинг результатів виконання регульовальних заходів за допомогою датчиків та систем зворотного зв'язку;
- аналіз ефективності: порівняння поточних показників із заданими вставками для визначення ефективності реалізованих рішень;
- адаптація алгоритмів: збір і аналіз архівних даних для коригування та оптимізації алгоритмів управління в режимі реального часу.

д) Візуалізація та звітність:

- моніторинг в режимі реального часу: відображення інформації про поточний стан системи на HMI-панелях та в SCADA-системі;
- аварійне сповіщення: генерація сигналів тривоги при виявленні аварійних ситуацій або перевищенні критичних показників;
- формування звітів: збереження архівних даних та створення аналітичних звітів для подальшого аналізу і прийняття рішень щодо вдосконалення технологічного процесу.

2) схема взаємозв'язку функціональних завдань (див. Додаток Г).  
Схема взаємозв'язку функціональних завдань відображає послідовність і логіку взаємодії між компонентами системи автоматизації. Основні елементи взаємозв'язку можна описати наступним чином:

– «Збір даних» → «Аналіз: дані» - отримані від сенсорів на нижньому рівні, надходять до PLC, де вони обробляються і порівнюються з заданими вставками;


– «Аналіз» → «Прийняття рішень» - на основі аналізу, контролери визначають необхідність коригувальних заходів. Рішення приймаються згідно з алгоритмами управління, які враховують як поточні, так і історичні дані;

– «Прийняття рішень» → «Виконання» - отримані рішення передаються на виконавчі пристрої, які регулюють роботу обладнання (змінюють швидкість роботи конвеєра або регулюють ширину щілини дробарки);

– «Виконання» → «Зворотний зв'язок» - після виконання регульовальних дій, система отримує зворотний сигнал від датчиків, що дозволяє перевірити ефективність змін і, при необхідності, внести додаткові корективи;

– «Моніторинг» → «Інтерфейс оператора» - дані про стан системи передаються до SCADA та HMI – панелі, де оператор та технолог може спостерігати за процесом, контролювати параметри і реагувати на аварійні ситуації.

– «Збір історичних даних» → «Оптимізація» - архівування даних про роботу системи дозволяє аналізувати тенденції та удосконалювати алгоритми управління, адаптуючи їх до змін технологічного процесу.



Проведений аналіз структури системи автоматизації дозволяє чітко розмежувати завдання, що виконуються на різних рівнях управління, та встановити логічний зв'язок між ними.

Розподіл основних задач за рівнями автоматизації. На нижньому рівні здійснюється безпосередній збір даних за допомогою різноманітних датчиків та оперативне виконання команд виконавчими пристроями. Цей рівень забезпечує точність вимірювань і швидку реакцію на зміну технологічних параметрів. Середній рівень, представлений програмованими логічними контролерами, виконує обробку отриманих сигналів, аналіз відхилень від нормативних значень та прийняття керуючих рішень. Верхній рівень, який включає SCADA-системи та HMI-панелі, відповідає за моніторинг, візуалізацію та взаємодію оператора з системою. Така структура забезпечує ефективну інтеграцію всіх компонентів, дозволяє оперативно реагувати на збої та коригувати режим роботи обладнання.

Перелік основних функціональних завдань та схема їхнього взаємозв'язку. Основні функціональні завдання включають збір та первинну обробку даних, аналіз і прийняття рішень, передачу команд виконавчим пристроям, а також постійний моніторинг результатів і забезпечення зворотного зв'язку. Схема взаємозв'язку демонструє послідовність процесів: від отримання даних до виконання коригувальних дій і аналізу ефективності виконання завдань. Завдяки такому підходу система здатна своєчасно виявляти відхилення від норм, оптимізувати технологічний процес і забезпечувати адаптивне управління.

Застосування ієрархічного підходу до організації автоматизації дозволяє ефективно розподілити функціональні завдання між різними рівнями управління. Чітке розмежування ролей і завдань сприяє підвищенню точності вимірювань, оперативності прийняття рішень і адаптивності системи до змін виробничих умов. Логічна інтеграція збору даних, аналізу, прийняття рішень і виконання керуючих дій забезпечує стабільну роботу технологічного процесу, знижує ризики аварійних ситуацій та сприяє оптимізації витрат ресурсів. Таким чином, запропонована структура системи автоматизації є основою для підвищення продуктивності та надійності роботи підприємства.



## **3 РЕАЛІЗАЦІЯ ЗАПРОПОНОВАНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ**

Далі розглядається впровадження комплексної системи автоматизації технологічного процесу дроблення та здрібнювання руди. Розділ поділено на три ключові підрозділи, що охоплюють вибір і обґрунтування технічних засобів автоматизації, проектування системи автоматичного регулювання завантаження руди та її просіювання на грохотах із використанням програмного забезпечення TIA Portal, а також розробку математичної, алгоритмічної та програмної бази управління трактом середнього та мілкового подрібнення.

Основна мета цього розділу – продемонструвати інтегрований підхід до автоматизації виробничих процесів, який забезпечує підвищення ефективності, зниження експлуатаційних витрат та оптимізацію роботи обладнання. Завдяки застосуванню сучасних апаратних засобів і програмних рішень, розроблена система дозволяє оперативно реагувати на змінні умови технологічного процесу, підтримувати стабільність режимів роботи і забезпечувати належний рівень безпеки виробництва.

### **3.1 Вибір та обґрунтування технічних засобів автоматизації**


Вибір технічних засобів базується на таких аспектах, як точність вимірювань, надійність роботи, можливість інтеграції в існуючу систему управління та адаптивність до змін умов виробництва. Зокрема, акцент робиться на використанні високоточних датчиків, сучасних контролерів і виконавчих пристроїв, що дозволяють оптимізувати режим роботи виробничих агрегатів, мінімізувати енерговитрати та забезпечити оперативну реакцію системи на збурення.

Для забезпечення надійного управління технологічними процесами, зокрема для дробарки, станції рідкої маслосмазки та гідроагрегата, завантажувального конвеєра та грохоту необхідно підібрати пристрої, що відповідають вимогам точності, стабільності та сумісності в рамках автоматизованої системи керування. Нижче наведено детальний аналіз та підбір технічних засобів із використанням компонентів від провідних виробників (Siemens, WIKA, KROHNE, Endress+Hauser), з урахуванням специфічних сигналів, що надходять від агрегатів та Стандарту АСУ ТП [11].

Розглянемо контроль агрегату «Дробарка».

Всі параметри та сигнали будуть оброблятися з а допомогою пристрою – програмований логічний контролер (PLC), використовуватися буде SIEMENS SIMATIC серії S7-1500. Ці контролери забезпечують надійне централізоване управління системою, інтегрують вхідні сигнали від датчиків і дозволяють реалізувати логіку автоматизації.

Для контролю роботи дробарки важливо відслідковувати численні сигнали, серед яких, контроль струму завантаження приводу. Рішенням цього буде використання трансформаторів струму із вихідним сигналом 4–20 мА. Такі пристрої дозволяють точно вимірювати струм



завантаження, що обробляється PLC (наприклад, Siemens SIMATIC S7-1511) для аналізу навантаження двигуна. Також не мало важливим є контроль напруги в ланцюгу управління. За допомогою вбудованих модулів контролю напруги від Siemens (наприклад Siemens PAC3200 – цифровий електроенергетичний лічильник/модуль контролю напруги) забезпечують моніторинг стабільності живлення та виявлення зниження напруги, що може свідчити про потенційні несправності.

Для вимірювання рівня масла на сливі дробарки та в баку маслосмазки можна застосувати ультразвукові або радарні рівнеміри. Приклади – KROHNE OPTIWAVE 5200 або Endress+Hauser Micropilot FMR60. Ці пристрої забезпечують безконтактне вимірювання рівня рідин з високою точністю.


Сигнали включення головного приводу та перевантаження двигуна обробляються за допомогою входів PLC. Розглядається використання цифрових входів Siemens для реєстрації стану реле чи датчиків, що сигналізують про включення приводу та виявлення перевантаження.

Для контролю температурних режимів використовують датчики температури. Наприклад, WIKA TR10 або інші термодатчики, що можуть встановлюватись на сливі масла, ексцентрику, приводному валу, а також для контролю температури підшипників і обмотки електродвигуна. Дані температури передаються в систему через перетворювачі сигналів аналогові входи PLC.

Для контролю включення системи рідкої маслосмазки, витрати масла, не менше 110 л/хв, та виявлення несправностей використовують аналогові датчики (для вимірювання витрати, наприклад Endress+Hauser Proline Promag 10P). Рекомендується застосування рішення з підсиленням сигналів і попередньою фільтрацією даних.

Система повинна включати в себе можливість моніторингу роботи автоматичних вимикачів, пускачів, випрямлювачів (ДБЖ), ланцюгів живлення аналогових датчиків та положення перемикачів. Цей функціонал реалізується за допомогою вбудованих діагностичних модулів у PLC Siemens, що забезпечують зворотний зв'язок по внутрішньому інтерфейсу.

Для станції рідкої маслосмазки важливі такі сигнали, як Контроль параметрів електроживлення, застосувавши модулів контролю напруги, що фіксують пониження, асиметрію, послідовність і обрив фаз, забезпечує оперативне виявлення проблем з електропостачанням. Не менш важливим параметром з контроль рівня масла. Встановлення рівнемірів для визначення верхнього та нижнього рівнів масла в баку, а також рівня масла на сливі з дробарки та в бак. Для цього можна використати ультразвукові або радарні рівнеміри від KROHNE або Endress+Hauser (наприклад Endress+Hauser Micropilot FMR60 або KROHNE OPTIWAVE 5200). Контроль тиску в лінії нагнітання масла та масла після теплообмінника, а також датчики температури для контролю температури масла в баку та на виході з теплообмінника – дає змогу виявити




засмічення фільтрів або несправності в системі охолодження, що є критично важливим для стабільної роботи станції Встановлення аналогових датчиків тиску, наприклад, OPTIBAR PSM 2010 або Endress+Hauser забезпечують точне вимірювання параметрів після теплообмінника. Ще критично важливим для своєчасного виявлення засмічення фільтрів або несправностей у системі охолодження є встановлення датчиків положення або спеціальних електромагнітних клапанів з відповідними датчиками зворотного зв'язку для забезпечення правильного напрямку потоків рідин.

Гідроагрегат в системі автоматизації потребує моніторингу ряду параметрів таких як контроль роботи механізмів гідроагрегата, відстеження сигналів про включення механізмів і перевірка їх коректної роботи через цифрові входи контролера. Також дуже важливу роль відіграє контроль параметрів масла. Використання датчиків рівня, температури та тиску для моніторингу стану масла в баку. Рекомендовано застосування високоточних аналогових датчиків, які дозволяють точно визначати температуру масла та тиск у системі фіксації (приклади датчиків приведені вище), а також у магістралях механізму закручування/розкручування. Так як і системі рідкої змазки застосовується фільтр для масла та датчики для визначення засміченості фільтрів, що дозволяє своєчасно виявляти потребу в обслуговуванні. Важливо також виконувати моніторинг стану технічних засобів. Контролювати включення автоматичних вимикачів, пускачів та перевірка ланцюгів живлення аналогових датчиків, що інтегрується в загальну систему діагностики PLC.

Розглянемо контроль агрегату «Завантажувальний конвеєр», нижче наведено узагальнений перелік рекомендованих пристроїв і датчиків для автоматизації конвеєра. Так як розглядається тракт подрібнення  $\frac{3}{4}$  стадії як єдиний механізм складаючий з декількох окремих агрегатів, то і використовується один програмований логічний контролер (PLC).

Для контролю струмового навантаження швидкості обертання валу двигуна (швидкість роботи конвеєра), контроль напруги, а також захист електродвигуна використовується частотний перетворювач Siemens SINAMICS V20, або інший відповідний модельний ряд дозволить регулювати швидкість електродвигуна конвеєра, забезпечуючи плавний пуск, гальмування та адаптацію до змін навантаження. Можливо також додатково використовувати датчики швидкості, струму напруги, для додаткового контролю роботи механізму. Для моніторингу температури двигунів, підшипників та електроніки можна використовувати температурні датчики, такі ж як і для агрегатів дробарки, станції рідкої змазки та гідроагрегата. Це дозволяє вчасно виявляти перегрів компонентів, та не допускати аварійних ситуацій, що може привести до виходу з ладу вузлів та деталей, та простій обладнання.

Рішення для агрегату «грохоту ГІТ-51/ГІТ52», також буде використання частотного перетворювача, як і для агрегату «завантажувальний конвеєр». Моніторинг, контроль параметрів та



регулювання по електродвигуну такий же самий. Також можливо додатково встановити датчики струму та напруги для додаткового контролю параметрів. Датчики температури для контролю температурних режимів в критичних точках (електродвигуни, підшипники, агрегатні вузли) застосовують температурні датчики WIKA TR10 або інші термодатчики.

Контроль вібрації буде використовуватися вібраційні датчики BALLUF BAW-MKK 050.19-S4. Даний датчик від BALLUF забезпечує стабільний і точний збір вібраційних даних навіть у важких виробничих умовах. Його стійкість до агресивних середовищ робить його придатним для використання в системах моніторингу стану обладнання.

Для контролю рівня матеріалу у бункері над завантажувальним конвеєром, у дробарці та грохоту буде використовуватися рівнеміри. Для моніторингу рівня матеріалу у падаючих бункерах або на грохоті доцільно застосувати радарні або ультразвукові рівнеміри від Endress+Hauser (наприклад, Levelflex або Micropilot FMR). Такі пристрої забезпечують безконтактне вимірювання з високою точністю

Таке комплексне рішення дозволить забезпечити точний моніторинг, оперативну діагностику і надійне управління процесами на всіх вище вказаних агрегатах та механізмів, що сприятиме підвищенню продуктивності та зниженню ризиків аварійних ситуацій.


### **3.2 Проєктування САР завантаження руди та її просіювання на грохотах ГІТ-52 і ГІТ-51і з використанням ПЗ TIA Portal**

У сучасних гірничих підприємствах забезпечення точного та своєчасного регулювання процесу завантаження руди та її подальшого просіювання є критично важливим для досягнення оптимальної продуктивності та якості кінцевого продукту. Впровадження системи автоматичного регулювання (САР) дозволяє не лише автоматизувати управління технологічними процесами, але й забезпечити адаптацію режимів роботи обладнання у відповідь на змінні технологічні умови.

Використання TIA Portal, для контролю процесу завантаження руди та її просіювання на грохотах ГІТ-52 і ГІТ-51 дозволяє об'єднати конфігурацію апаратних засобів, програмування логічних контролерів та створення інтерфейсів користувача в єдине інтегроване середовище, що сприяє скороченню часу розробки та підвищенню надійності системи.

Основною метою проєктування є розробка адаптивних алгоритмів автоматичного регулювання, які враховують динамічні характеристики завантаження руди та забезпечують оптимальне розподілення матеріалу для подальшого просіювання. Це дозволяє досягти максимальної ефективності роботи грохотів, запобігти перевантаженням і знизити витрати енергії, що є важливими факторами для сучасних виробничих процесів.

Для забезпечення оптимальної роботи САР важливо визначити критичні технологічні параметри, які підлягають контролю та регулюванню. Згідно з технологічною інструкцією [1] та технічними



характеристиками агрегатів та механізмів (див. Додаток Б) основними параметрами є:

- швидкість конвеєра, нормативний діапазон роботи встановлюється, наприклад, від 0% до 100% від номінальної швидкості 0,17 м/с. Для забезпечення рівномірного завантаження дробарки рекомендується здійснювати зміни швидкості з кроком 5% за період 10 секунд. Це дозволяє уникнути раптових коливань і забезпечити поступовий перехід від одного режиму до іншого;

- ширина розвантажувальної щілини дробарки, зазначений параметр визначає гранулометричний склад продукту дроблення. Обраний діапазон може коливатися, для дробарок КСД 15 – 30 мм та КМД від 5 – 15 мм. Регулювання здійснюється з кроком 1,1–1,3 мм, що дозволяє точно досягти бажаного розміру часток;


- частота коливань грохотів, для ефективного просіювання матеріалу частота коливань може варіюватися в межах 40–60 Гц. Враховуючи характер завантаження грохота, регулювання повинно здійснюватися поступово, щоб уникнути різких змін, які можуть призвести до порушення технологічного процесу;

- інші параметри, контроль температури, тиску, рівня масла, витрати рідини та інші показники встановлюються згідно з вимогами виробничого процесу.

Всі ці параметри інтегровані в систему, що дозволяє відстежувати їх у режимі реального часу і виконувати коригувальні дії за потреби, щоб не допускати аварійних ситуацій.

Для забезпечення плавного переходу між різними режимами роботи агрегатів необхідно правильно розрахувати налаштування регулятора, зокрема це коефіцієнт підсилення (K) – він визначає, наскільки сильно система реагує на зміну вхідного сигналу. Розрахунок цього параметра проводиться шляхом аналізу експериментальних даних, що визначають зміну вихідного показника наприклад, для завантажувального конвеєра це його швидкість, при зміні рівня матеріалу бункерах, та завантаження агрегату. Необхідно підібрати K так, щоб регулятор реагував адекватно, не спричиняючи надмірних навантажень на механізми, для не допуску аварійних ситуацій, та підвищення продуктивності та збережені енергоресурсів.

Постійна часу (T) – вона характеризує швидкість реакції системи на коригувальні дії. Значення T визначається експериментальним шляхом із врахуванням часу, за який система досягає нового стабільного стану після внесення зміни. Оптимальне значення T дозволяє уникнути як занадто повільної, так і надто швидкої реакції, що може призводити до нестабільності процесу. А також враховується запізнення ( $\tau$ ), в системі, пов'язане з транспортними затримками та часом обробки сигналів, має бути враховане при налаштуванні регулятора. Компенсація цього



параметра дозволяє зменшити вплив затримок на загальну динаміку процесу.

Методи налаштування регуляторів, такі як метод Зіглера-Ніколса або адаптивне налаштування [13] з використанням моделювання, дозволяють на основі зібраних експериментальних даних встановити оптимальні значення  $K$ ,  $T$  та  $\tau$ . Таким чином, регулятор здатний коригувати параметри в режимі реального часу, забезпечуючи плавність переходу між режимами роботи агрегатів.

На основі визначення параметрів регулювання розроблено блок-схеми (див. Додаток Е) та сама робота САР організована у вигляді кількох послідовних етапів.

Початок – програма ініціалізуються, всі підсистеми проводять первинну діагностику та завантаження конфігураційних даних. Система переходить у режим опитування датчиків.


Опитування стану Hardware – PLC здійснює самодіагностику, перевіряючи стан процесора, пам'яті, модулів I/O, а також відповідає за отримання актуальної інформації про стан під'єданого до нього обладнання. Він є початковим етапом циклу керування та забезпечує збір необхідних даних для подальшої обробки та прийняття рішень. У разі виявлення помилок або збоїв, PLC генерує відповідні сигнали

Основними функціями блоку опитування дискретних сигналів та аналогових датчиків є збір даних з модулів введення/виведення (I/O). PLC регулярно опитує аналогові та дискретні модулі I/O для отримання інформації про стан датчиків, виконавчих механізмів та інших пристроїв. Аналогові модулі передають значення технологічних параметрів, таких як температура, тиск, рівень, витрата тощо. Дискретні модулі фіксують стан дискретних датчиків (включено/виключено, замкнуто/розімкнуте) та виконавчих механізмів. PLC може взаємодіяти з іншими пристроями, під'єднаними через різні інтерфейси (Ethernet, Modbus, Profibus та інші). Це можуть бути частотні перетворювачі, панелі оператора інтерфейсі модулі тощо.

Блок обробки даних – дані фільтруються, масштабуються та нормалізуються. Виконується перевірка, чи не перевищують показники встановлені межі. У разі виявлення аварійних станів система генерує повідомлення для оператора і активує відповідні сигнали сповіщення (звук, світлові індикатори). Блок забезпечує надходження свіжої інформації про стан технологічного процесу, що є критично важливим для ефективного керування

Зібрана та оброблена інформація передається до програми керування, де вона може безперервно контролювати параметри технологічного процесу та стан обладнання і використовується для аналізу та прийняття рішень щодо керування технологічним процесом.


Блок запуск обладнання – після підтвердження готовності агрегатів команда на запуск передається до відповідних додаткових агрегатів, таких як станції рідкої змазки. Після підтвердження роботи змазки, і немає



відхилень від технологічних параметрів, маємо готовність до запуску головного приводу дробарки, сигнал поступає на ВРУ (високовольтне розподільне устаткування), після чого відбувається запуск головного приводу дробарки КСД та КМД відповідно. Після запуску головного приводу дробарки відбувається запуск інших агрегатів, таких як конвеєр та грохот, які запускаються через частотні перетворювачі, що керують електродвигунами. Окрім автоматичного запуску описаного вище, реалізовано запуск в ручному та ремонтному режимах усіх окремо взятих агрегатів.

Надалі розглянемо напевно самий важливий блок це – робота та регулювання. В блоці робота та регулювання агрегату конвеєр система аналізує отримані дані від датчиків та дискретних сигналів про поточний стан механізму, порівнює допустимими нормами та відхиленнями, тобто система забезпечує контроль за роботою конвеєра, запобігаючи перевантаженням, пробуксовуванню стрічки та іншим аварійним ситуаціям. У разі виявлення аварійної ситуації (перевищення допустимих значень параметрів, збій в роботі обладнання), блок автоматично вживає заходів для зупинки конвеєра та запобігання поломкам. Система захисту включає в себе блокування запуску конвеєра при несправності датчиків, автоматичне відключення при перевантаженні, а також звукову та світлову сигналізацію для сповіщення технологічного персоналу та формування повідомлення на НМІ – панелі та оператора цеху. Система регулювання – контролює швидкість руху конвеєра, регулюючи її за допомогою частотних перетворювачів. Програмно реалізовано за допомогою PID – регулятора, який буде регулювати швидкість в залежності від рівня завантаження дробарки КСД. Рівень завантаження дробарки КСД отримується з радарного рівнеміру KROHNE OPTIWAVE 5200, також додатково буде повірвання навантаження на головний привід дробарки КСД, зі встановленими нормами, для недопущення перевантаження електродвигуна та приводу дробаркою КСД.

Щодо блоку роботи та регулювання дробарки то він відповідає за контроль та управління роботою дробарки, зокрема за автоматичне регулювання ширини розвантажувальної щілини для досягнення необхідного гранулометричного складу дробленої руди. Контроль та управління роботи дробарки будується на основі отриманих даних від механізмів, тобто дискретних та аналогових сигналів, наприклад поточне навантаження на електродвигун (струм) температура підшипників, температура ексцентрика, тиску масла та інших параметрів. Блок забезпечує контроль за роботою дробарки, запобігаючи перевантаженням та іншим аварійним ситуаціям. У разі виявлення аварійної ситуації (перевищення допустимих значень параметрів, збій в роботі обладнання), блок автоматично вживає заходів для зупинки дробарки та запобігання поломкам. Система захисту включає в себе блокування запуску дробарки при несправності датчиків, автоматичне відключення при перевантаженні або перевищення технологічних




параметрів за допустимі норми, а також звукову та світлову сигналізацію для сповіщення технологічного персоналу та формування повідомлення на НМІ – панелі та оператора цеху.

Автоматичне регулювання ширини розвантажувальної щілини здійснюється з кроком 1,1–1,3 мм для досягнення потрібного гранулометричного складу дробленої руди. Регулювання відбувається за допомогою гідроагрегату, а точніше гідромотору, який закручує або розкручує регулююче кільце. З початку в автоматичному режимі йде процес закручування до мінімального значення, потім розкручування до заданого значення для дробарки КСД це від 15 мм – 30 мм, а для дробарки КМД це 5 мм – 15 мм, згідно технологічної інструкції [1]. Так як контролювати ширину розвантажувальної щілини в режимі реального часу не має можливості, із – за конструкції самої дробарки [12], то процес регулювання повторяється через певний проміжок часу, при роботі під навантаженням це 8 год. При напруженні роботи дробарки під навантаженням 24 діб то це попередження про те що потрібно замінити броні. Також відбувається порівняння показників навантаження дробарки (струм електродвигуна головного приводу), для додаткового контролю за розвантажувальною щілиною.

В блоці робота та регулювання агрегату грохот, як і інших блоках роботи, система аналізує отримані дані від датчиків та дискретних сигналів про поточний стан механізму, порівнює допустимими нормами та відхиленнями, тобто система забезпечує контроль за роботою грохоту, запобігаючи перевантаженням та іншим аварійним ситуаціям. У разі виявлення аварійної ситуації (перевищення допустимих значень параметрів, збій в роботі обладнання), блок автоматично вживає заходів для зупинки конвеєра та запобігання поломкам. Система захисту включає в себе блокування запуску конвеєра при несправності датчиків, автоматичне відключення при перевантаженні, а також звукову та світлову сигналізацію для сповіщення технологічного персоналу та формування повідомлення на НМІ – панелі та оператора цеху. Система регулювання – контролює частота обертання валу електродвигуна, регулюючи її за допомогою частотних перетворювачів. Програмно реалізовано за допомогою PID – регулятора, який виконує регулювання в залежності від рівня завантаження дробарки КМД. Рівень завантаження дробарки КМД отримується з радарного рівнеміру KROHNE OPTIWAVE 5200, також додатково буде повіряться навантаження на головний привід дробарки КСД, зі встановленими нормами, для недопущення перевантаження електродвигуна та приводу дробаркою КМД. Контроль частоти коливань грохотів, діапазон 40–60 Гц, дозволяє оптимізувати процес просіювання. Система аналізує вібраційні показники і за потреби коригує режим роботи грохотів.

У блоці зупинка обладнання реалізовано зупинку обладнання, агрегатів та допоміжних механізмів при різних ситуаціях, наприклад у разі виявлення аварійних ситуацій або за командою оператора система



виконує безпечну зупинку агрегатів. Контроль технічного стану забезпечує, що система зупиняється коректно, запобігаючи пошкодженням. Так само як і в блоці запуску, і блоці зупинки реалізовано зупинку в різних режимах автоматичному, ручному та ремонтному.

Блок передачі даних у базу даних реалізовано через OPC – сервер, за протоколом Ethernet. Оброблені дані передаються до центральної бази для архівування та подальшого аналізу. Це дозволяє здійснювати моніторинг та аналіз історичних показників для оптимізації алгоритмів управління.

Блок кінець – це завершення циклу роботи алгоритму. Після виконання всіх операцій поточний цикл завершується, а система переходить у режим очікування, після чого запускається новий цикл опитування.


Контроль і регулювання ключових параметрів є критично важливими для забезпечення стабільності та високої якості виробничого процесу. Завдяки точному налаштуванню регулятора система:

- забезпечує постійне підтримання оптимальних режимів роботи агрегатів;
- забезпечує своєчасне реагування на зміни у навантаженні та умовах експлуатації, що допомагає запобігати аварійним ситуаціям;
- оптимізує витрати енергії і ресурсів завдяки ефективному регулюванню швидкості конвеєра та регулюванню роботи грохотів;
- підвищує якість кінцевого продукту за рахунок регулюванню розвантажувальної щілини для більш точного досягнення заданих параметрів гранулометричного складу вихідного матеріалу.

Розробка системи автоматичного регулювання, яка базується на ретельно підібраних технологічних параметрах, є невід’ємною частиною оптимізації виробничого процесу. Застосування інтегрованого середовища TIA Portal дозволяє об’єднати налаштування апаратного забезпечення, алгоритмів керування та інтерфейсів взаємодії з оператором у єдину систему. Ретельне розрахування параметрів регулятора (коефіцієнту підсилення, постійної часу та запізнення) з урахуванням вимог до перехідних процесів дозволяє забезпечити стабільну роботу агрегатів, своєчасне виявлення відхилень і швидку адаптацію до змін у технологічному процесі. Загалом, запропонований підхід сприяє підвищенню продуктивності, зниженню експлуатаційних витрат та підвищенню якості кінцевого продукту, що є ключовими завданнями сучасних виробничих систем

### **3.3 Розробка математичного, алгоритмічного та програмного системи управління трактом середнього та мілкового подрібнення**

Створення інтегрованої системи, яка на основі математичного моделювання технологічного процесу дозволить точно визначити ключові параметри роботи агрегатів. Розроблені алгоритми регулювання



враховують нелінійність процесу, транспортні затримки та випадкові збурення, що забезпечує адаптивне управління режимами роботи у режимі реального часу. Особливу увагу приділено формуванню математичної моделі, яка описує динаміку подрібнення руди, визначенню оптимальних діапазонів змін параметрів та швидкості їх корекції. Алгоритмічне забезпечення включає розробку контурів регулювання, аварійного захисту та оптимізації, а програмна реалізація системи здійснюється із застосуванням сучасних інтегрованих середовищ розробки.

Ефективне функціонування сучасних технологічних комплексів, таких як тракт середнього та мілкового подрібнення руди, неможливе без комплексної автоматизації процесів керування. Автоматизована система управління (АСУ) забезпечує не тільки точний контроль та регулювання параметрів технологічного процесу, але й дозволяє оптимізувати його роботу для досягнення максимальної продуктивності, мінімізації енергетичних витрат та забезпечення безпеки обладнання та персоналу.

Математичне моделювання технологічного процесу базується на побудові систем диференціальних рівнянь або передатних функцій, які описують вхід-вихідну поведінку системи. Основні підходи включають в себе аналіз динамічних характеристик таких як встановлення залежності між параметрами, що змінюються в часі, шляхом використання диференціальних рівнянь. Лінеаризація нелінійних процесів для спрощення аналізу нелінійних систем часто застосовують лінеаризацію в околі робочої точки, що дозволяє використовувати методи лінійного аналізу, такі як передаточні функції та аналіз частотних характеристик. Та передаточні функції, що описують відношення вихідного сигналу до вхідного в частотній області (через перетворення Лапласа), що є зручним інструментом для аналізу стабільності та динаміки системи.

Для опису процесу подрібнення необхідно врахувати основні елементи автоматизації:

- завантажувальний конвеєр: Забезпечує подачу залізної руди в дробарку (КСД/КМД);
- дробарка КСД/КМД: Виконує механічне подрібнення матеріалу;
- грохоти (ГІТ-51 або ГІТ-52): Здійснюють класифікацію подрібненої руди за гранулометричним складом (розміром шматків).

Кожен з цих елементів моделюється окремо, а потім інтегрується в єдину систему.

Представимо математичні моделі основних елементів. Завантажувальний конвеєр, який транспортує руду до дробарки, можна описати як інерційну систему з транспортним запізненням. Передаточну функцію конвеєра можна подати наступним чином:

$$W_k = \frac{K_k}{T_k p + 1} e^{-p\tau_k}, \quad (3.1)$$

де  $W_k(p)$  – передавальна функція конвеєра;  
 $K_k$  – коефіцієнт передачі конвеєра;  
 $T_k$  – стала часу конвеєра;  
 $\tau_k$  – запізнення.

Коефіцієнт передачі завантажувального конвеєра визначається типом двигуна та технічними характеристиками конвеєра (див таб. № Б.1 Додаток Б), а саме як співвідношення номінальної продуктивності завантажувального конвеєра, т/год ( $Q_{\text{НОМ}} = 500$  т/год) та номінальною частотою обертання приводу конвеєра, об/хв ( $n_{\text{НОМ}} = 750$  об/хв):

$$K_k = \frac{Q_{\text{НОМ}}}{n_{\text{НОМ}}} = \frac{500}{750} = 0.666$$

Постійна часу системи, яка визначає швидкість реакції на зміни вхідного сигналу для стрічкових живильників (конвеєра) визначається по формулі:

$$T_k = 0.7 (1 + T_{\text{п.НОМ}} \times 10^{-4}) \left(1 + \frac{L_k}{50}\right), \quad (3.2)$$

де  $T_{\text{п.НОМ}}$  – номінальна потужність електроприводу двигуна ( $T_{\text{п.НОМ}} = 22$  кВт);

$L_k$  – довжина конвеєра ( $L_k = 9,5$  м)

$$T_k = 0.7 (1 + 22 \times 10^{-4}) \left(1 + \frac{9,5}{50}\right) = 0,834$$

Запізнення – визначається відношенням довжини конвеєра ( $L_k$ ) до швидкості руху ( $V_k$ ):

$$\tau_k = \frac{L_k}{V_k} = \frac{9,5}{0,17} = 55,882$$

Таким чином передавальна функція завантажувального конвеєра (живильника) має вигляд:

$$W_k = \frac{0,666}{0,834p+1} e^{-p55,882}.$$

Модель дробарки можна представити як аперіодичну систему другого порядку із запізненням. Передаточну функцію дробарки КСД 2200 можна описати наступною формулою:

$$W_d = \frac{K_d}{(T_d p + 1)^2} e^{-p\tau_d} \quad , \quad (3.3)$$

де  $K_d$  – коефіцієнт підсилення дробарки, який визначається співвідношенням продуктивності до діапазону регулювання вихідної щілини;

$T_d$  – характеристична постійна часу дроблення;

$\tau_k$  – час запізнення, пов'язаний із внутрішніми транспортними процесами.

Продуктивність дробарки по технічним характеристикам 250 м<sup>2</sup>/год, використовуючи середню насипну щільність залізної руди  $\lambda = 3$  т/м<sup>3</sup> дає 750 т/год. Діапазон регулювання вихідної щілини беремо середнє значення, яке буде рівна 15 мм. Отже тепер можемо прорахувати коефіцієнт  $K_d$ :

$$K_d = \frac{750}{15} = 50$$

Стала часу  $T_d$  характеризує інерційність процесу дроблення. Точних даних для її розрахунку у нас немає. Ми можемо прийняти значення практичного експерименту. Для конусних дробарок такого класу  $T_d$  буде рівна 10 с.

Час запізнення  $\tau_d$  – це час, необхідний для проходження матеріалу через дробарку. Його можна оцінити, знаючи середню швидкість руху матеріалу ( $V_m$ ) і довжину шляху ( $L_m$ ) в дробарці. Вироставши технічні дані [12] визначаємо середню швидкість руху матеріалу та довжину шляху та прорахувати час запізнення:


$$\tau_d = \frac{L_m}{V_m} = \frac{8,5}{0,5} = 17 \text{ с}$$

Передавальна функція процесу дроблення буде рівна:

$$W_d = \frac{50}{(10p + 1)^2} e^{-p17}$$

Грохот (в контексті дроблення) – це пристрій для розділення подрібненого матеріалу на фракції за розміром. Він не є частиною безпосередньо контуру керування "конвеєр-дробарка", але впливає на загальну ефективність процесу подрібнення. Надходження на дробарку матеріалу, який вже відповідає вимогам до кінцевого продукту, знижує навантаження на дробарку і підвищує загальну продуктивність [12].

Грохот може бути встановлений перед дробаркою у цьому випадку він відсіває дрібну фракцію, яка не потребує подальшого подрібнення. Це найбільш поширений варіант. Та після дробарки – у цьому випадку він



розділяє подрібнений продукт на фракції, і одна з фракцій може повертатися на повторне подрібнення (замкнений цикл).

Параметри, що впливають на модель це продуктивність (т/год). Для ГІТ-51 – 1000 т/год, для ГІТ-52 – 600 т/год. Це максимальні значення. Реальна продуктивність залежить від гранулометричного складу матеріалу, що надходить на грохот. Розмір комірок/осередків, визначає межу розділення матеріалу. Для ГІТ-51 – 27x27 мм. Для ГІТ-52 два яруси: 43x43 мм і 27x27 мм. Крупність шматків живлення: Для ГІТ-51 – 100-200 мм, для ГІТ-52 – 0-250 мм. Частота коливання – впливає на ефективність розділення. Кут нахилу – впливає на швидкість проходження матеріалу та ефективність розділення. Потужність електродвигуна – для ГІТ-51 – 18,5 кВт, для ГІТ-52 – 22 кВт

Модель грохота ГІТ-51, що відповідає за класифікацію дробленої руди, описується передатною функцією другого порядку:

$$W_g = \frac{K_g}{T_g^2 p^2 + 2\varepsilon_g T_g p + 1}, \quad (3.4)$$

де  $K_g$  — коефіцієнт підсилення грохота;

$T_g$  — постійна часу системи грохоту;


$\varepsilon_g$  — коефіцієнт демпфірування, що визначає амплітудні коливання та стабільність вібраційних процесів.

Опис моделі грохота ГІТ-51 (або ГІТ-52) як аперіодичної ланки другого порядку є загальноприйнятим підходом. Це дозволяє врахувати інерційність процесу розділення матеріалу на фракції. Другий порядок вказує на наявність двох накопичувачів енергії в системі. У випадку грохота це кінетична енергія коливань (пов'язана з масою грохота та матеріалу на ньому) та потенційна енергія пружних елементів підвіски грохота.

Аперіодична ланка означає, що в системі немає власних стійких коливань. Грохот здійснює вимушені коливання під дією вібратора. Коефіцієнт демпфування  $\varepsilon_g$  в даному випадку характеризує затухання цих вимушених коливань. Якщо  $\varepsilon_g > 1$ , то ланка аперіодична. Якщо  $\varepsilon_g < 1$ , то ланка коливальна (що для робочого грохота не є нормою – він не повинен "розгойдуватися" сам по собі).

Коефіцієнт підсилення ( $K_g$ ) показує, яка частина вхідного потоку матеріалу проходить через грохот (стає надрешітним продуктом). У найпростішому випадку (ідеальний роздільник),  $K_g$  – це частка матеріалу, крупність якого більша за розмір комірки сита. У більш складних моделях  $K_g$  може залежати від гранулометричного складу, вологості, форми шматків та інших факторів. Для замкненої системи автоматичного керування важлива зміна  $K_g$  при зміні властивостей матеріалу.

Використавши дані з таблиці № Б.3, (див Додаток Б), та дані з проведених заздалегідь експериментів, використане сито з розміром



отворів 25 мм і що близько 60% матеріалу (залізної руди) який поступає на сито має розмір більший за 25 мм, то коефіцієнт підсилення буде рівний  $K_g = 0,6$ . Це означає, що 60% вхідного потоку руди підлягає подальшому дробленню або сортуванню, що відображається в математичній моделі грохота.

Постійна часу ( $T_g$ ) характеризує інерційність процесу розділення. Вона пов'язана з часом, необхідним для того, щоб матеріал пройшов через грохот і розділився на фракції. Залежить від конструкції грохота, частоти і амплітуди коливань, кута нахилу, властивостей матеріалу. Для інерційних грохотів подібного типу (масою ~6 т, продуктивністю ~500 т/год) [12]. орієнтовні значення можуть варіюватися від 2–3 до 10–15 секунд. Прийmemo  $T_g = 5\text{с}$  як усереднене значення, що відповідає експериментальним даним для грохотів аналогічного класу.

Коефіцієнт демпфування ( $\varepsilon_g$ ) характеризує здатність системи гасити коливання. Як правило, для грохотів  $\varepsilon_g > 1$ , тобто вони є аперіодичними ланками. Значення  $\varepsilon_g$  залежить від конструкції підвіски, наявності амортизаторів тощо. Для надійного грохотування, без надмірних вібрацій,  $\varepsilon_g$  зазвичай  $> 1$ . З урахуванням конструктивних особливостей ГІТ-51 [12], то  $\varepsilon_g = 1,2$ .

З експериментально визначених значень  $K_g$   $T_g$   $\varepsilon_g$  передаточна функція грохота ГІТ-51 набуває вигляду:

$$W_g = \frac{0,6}{25p^2 + 12p + 1}$$

Так як процесі роботи над проектом тракту подрібнення приділялася увага датчику рівня і від цього датчика буде залежить регулювання, а саме від заповнення бункера дробарки. Опишемо рівень завантаження дробарки як аперіодичну ланку першого порядку. Його динамічні властивості описуються передавальною функцією:

$$W_{dy} = \frac{K_{dy}}{1 + \tau_{dy}p}, \quad (3.5)$$

де  $K_{dy}$  - коефіцієнт передачі;

$\tau_{dy}$  – стала часу датчика.

Коефіцієнт передачі  $K_{dy}$  визначається із співвідношення вихідного сигналу датчика до вимірюваного ним рівня:

$$K_{dy} = \frac{16}{124} = 0,13 \text{ мА/см}$$

Значення сталої часу  $\tau_{dy}$ , що характеризує інерційність датчика, визначається з його технічних характеристик, у нашому випадку це 1с. Отже, передавальна функція датчика має вигляд:

$$W_{dy} = \frac{0,13}{1 + p}$$

Використання MATLAB та Simulink значно прискорює процес розробки систем керування. Ці програмні засоби дають можливість синтезувати, аналізувати та оцінювати якість регулювання запропонованих систем. Побудувавши дві моделі перша це для завантажувального конвеєра та дробарки КСД 2200 як продемонстровано на рисунку 3.1. Друга модель це грохот ГІТ – 51 та Дробарка КМД 2200, так як дробарка КСД і КМД відрізняються тільки розвантажувальною щільною, а сама передавальна функція таж сама (див. рисунок 3.2).

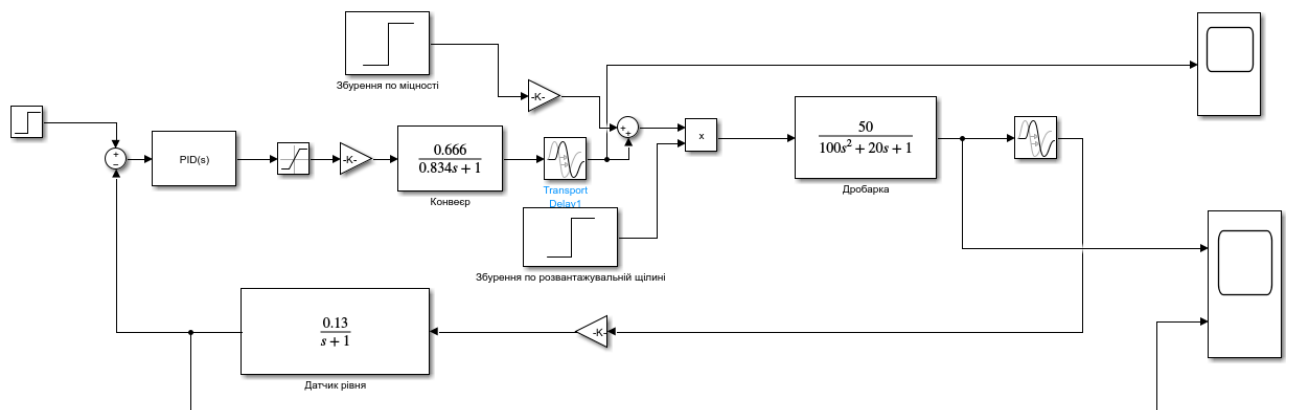


Рисунок 3.1 – Структурна схема САК дробарки КСД 2200 в позначеннях Simulink

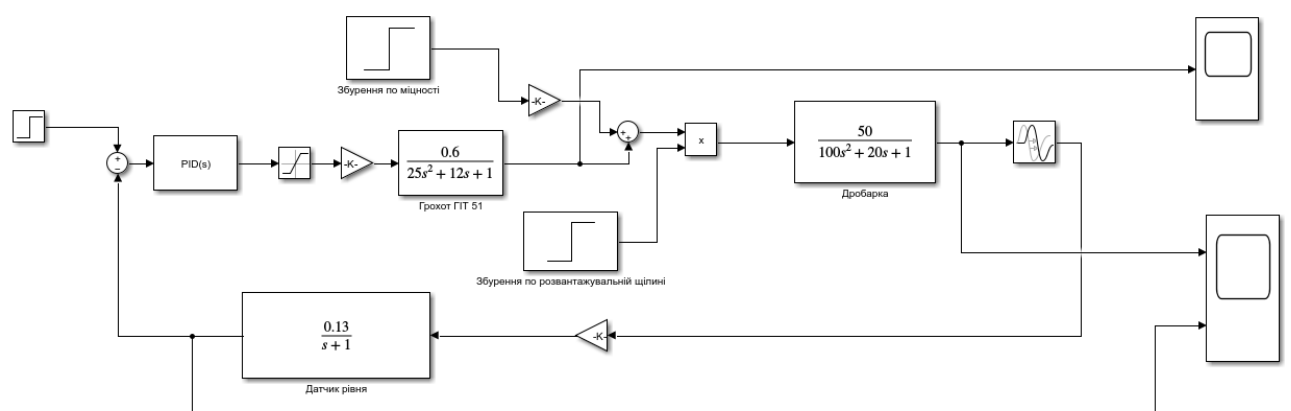



Рисунок 3.2 – Структурна схема САК дробарки КМД 2200 в позначеннях Simulink



Розроблений алгоритм функціонування системи управління трактом середнього та мілкового подрібнення залізної руди реалізує послідовність операцій, спрямованих на запуск, роботу і зупинку обладнання, забезпечення контролю, регулювання, протиаварійного захисту та інформаційної підтримки оператора. Алгоритм реалізовано у вигляді програмних модулів (функціональних блоків, функцій, підпрограм) у середовищі розробки Siemens Simatic TIA Portal V19 (Step 7 Professional, WinCC) для програмованого логічного контролера (ПЛК) SIMATIC S7-1511 і панелі оператора TP1500 Comfort. Алгоритм базується на ієрархічній модульній структурі, що відповідає технологічній ієрархії АСУ ТП.

Укрупнена блок-схема алгоритму представлена дивись Додаток Е. Згідно блок-схемі зробимо детальний опис кроків алгоритму.


Ініціалізація системи, блок "Початок" – початковий стан, при подачі живлення на систему управління або при отриманні команди "Скидання" (від оператора, з АРМ, або з SCADA-системи) всі виконавчі механізми (приводи конвеєра, дробарки, грохота) примусово переводяться у вимкнений (безпечний) стан.

Ініціалізація змінних, внутрішні змінні програмного забезпечення ПЛК, що відповідають за стан обладнання, режими роботи, уставки, поточні значення параметрів, ініціалізуються значеннями за замовчуванням. Ці значення визначаються конфігурацією системи і зберігаються в енергонезалежній пам'яті ПЛК.

Очищення аварійних журналів – журнали подій очищаються від попередніх записів.

Встановлення зв'язку – встановлення зв'язку ПЛК з панеллю оператора (TP1500 Comfort) та зі SCADA-системою верхнього рівня.

Діагностика обладнання Блок "Опитування стану Hardware", перед запуском технологічного обладнання виконується комплекс діагностичних процедур, таких як самодіагностика ПЛК – автоматична перевірка працездатності центрального процесора (CPU S7-1511), модулів вводу/виводу, каналів зв'язку ПЛК, що виконується вбудованими засобами TIA Portal. Результати самодіагностики доступні через діагностичні функції Step 7 і відображаються на панелі оператора. Перевірка зв'язку з периферійними пристроями – панель оператора (TP1500 Comfort). Перевірка зв'язку по Ethernet (Profinet) за допомогою спеціальних функціональних блоків TIA Portal, датчики – перевірка наявності зв'язку з датчиками за відповідними протоколами (Profibus DP, Profinet, або через аналогові/дискретні входи ПЛК). Перевірка достовірності даних (перевірка виходу сигналу за допустимі межі). Виконавчі механізми – перевірка зв'язку з приводами (частотним перетворювачем конвеєра, приводом регулювання ширини щілини дробарки, приводом грохота) за відповідними протоколами. SCADA-система – перевірка зв'язку за протоколом обміну даними (OPC – клієнт/сервер).



Перевірка стану силового електрообладнання відбувається шляхом опитування дискретних входів ПЛК контролюється таких як стан автоматичних вимикачів ("включено"/"вимкнено"), стан пристроїв плавного пуску – "готовий"/"не готовий"/"аварія", стан високовольтного вимикача (ВВ) дробарки ("включено"/"вимкнено"/"аварія").


Перевірка стану кінцевих вимикачів – опитування дискретних входів ПЛК для контролю положення рухомих частин (заслінки, механізм регулювання щілини). Також виконується перевірка стану аварійних кнопок, опитування дискретних входів для контролю, чи не натиснута жодна з аварійних кнопок. Перевірка стану системи рідкої маслосмазки, опитування аналогових входів ПЛК для контролю справності системи.

Після опитування і перевірки, результат два варіанту, в разі успіху - якщо всі перевірки пройшли успішно, система готова до запуску і переходить до наступного етапу. Або несправність, якщо виявлене будь-яка несправність то формується відповідний аварійний сигнал (з використанням функціональних блоків PR08\_MESS і PR09\_ALARM в TIA Portal), який блокує запуск обладнання. На панелі оператора TP1500 Comfort і в SCADA-системі відображається детальне повідомлення про причину несправності, а інформація про несправність записується в журнал подій (з міткою часу).

Збір даних блоки "Дані з датчиків" та "Дискретні сигнали" – цей етап виконується циклічно протягом усього часу роботи системи з періодом, що визначається циклом виконання програми ПЛК (500 мілісекунд). Опитування аналогових датчиків – зчитування даних з аналогових входів ПЛК, підключених до датчиків. У TIA Portal використовуються спеціалізовані блоки для роботи з аналоговими входами, що реалізують функції масштабування AI\_SCALE. Зчитування значення рівня матеріалу в камері дроблення, за допомогою датчик рівня (H, в мА). Перетворення в фізичну величину (метри) з використанням калібрувальної характеристики датчика і коефіцієнта  $K_{dy}$ . Датчик ширини розвантажувальної щілини – зчитування значення ширини щілини (S, в мм). Датчики температури підшипників, датчики тиску масла датчики вібрації та інші аналогові датчики – зчитування показників.

Опитування дискретних датчиків - зчитування логічних станів ("0" або "1") з дискретних входів ПЛК, зчитування станів кнопок керування ("Пуск", "Стоп", локальні/дистанційні), зчитування станів кінцевих вимикачів, зчитування сигналів аварійних датчиків, зчитування сигналів стану обладнання.

Обробка сигналів складається з декількох етапів. Перший – цифрова фільтрація, це застосування алгоритмів фільтрації (наприклад, ковзне середнє) для усунення шумів і випадкових викидів в сигналах аналогових датчиків. Реалізовано програмно в ПЛК з використанням функціональних блоків або на мові SCL. Другий це перевірка достовірності, це перевірка, чи знаходяться значення сигналів в допустимих діапазонах. При виході за межі генерується попереджувальний або аварійний сигнал. Третій етап



це масштабування, виконується перетворення значень сигналів, отриманих від датчиків в мА або в кодах АЦП, в фізичні величини т/год, мм, кВт, °С, тощо.


Обробка даних, вивід повідомлень і сигналів Блок "Обробка даних" виконує контроль параметрів, а поточні значення параметрів порівнюються з заданими уставками, які задають робочий діапазон. Попереджувальні уставки задають значення, при досягненні яких необхідно вжити заходів (наприклад, змінити режим роботи, повідомити оператора). Аварійні уставки задають значення, при досягненні яких необхідне негайне аварійне зупинення. Уставки зберігаються в блоках даних ПЛК і можуть змінюватися з панелі оператора або SCADA-системи.

При відхиленні параметрів від нормальних значень формуються текстові повідомлення для оператора, які відображаються на панелі оператора TP1500 Comfort і передаються в SCADA-систему. Для цього використовуються функції PR08\_MESS в TIA Portal. При досягненні попереджувальних або аварійних уставок активується світлова та звукова сигналізація. Управління виконавчими пристроями сигналізації здійснюється через дискретні виходи ПЛК. Всі події (відхилення параметрів, спрацьовування сигналізації, дії оператора, зміни режимів роботи, аварійні зупинки) фіксуються в журналі подій з міткою часу. Журнал подій зберігається в енергонезалежній пам'яті ПЛК і може бути переглянутий на панелі оператора та в SCADA-системі. Для цього використовуються розроблена функція PR09\_ALARM в TIA Portal.

Запуск обладнання блок "Запуск обладнання", спочатку виконується перевірка умов запуску, а саме: відсутність активних аварійних сигналів; Наявність команди "Пуск" (від оператора з панелі TP1500, з АРМ, або з верхнього рівня системи); Результати діагностики обладнання в нормі. Потім відбувається послідовний запуск, спочатку це запуск системи рідкої маслосмазки – видача команди на включення насосів системи змащення, використовується функція PR05\_SMZ, контроль досягнення робочого тиску масла, за сигналом від датчика тиску, витримка часу для прогріву масла (якщо необхідно).

Після досягнення потрібних параметрів по системі рідкої маслосмазки відбувається запуск приводу дробарки КМД 2200 – видача команди на включення високовольтного вимикача (ВВ) дробарки, використовується функція PR06\_DRB. Контроль включення ВВ за сигналом зворотного зв'язку. Після запуску дробарки КМД відбувається запуск приводу грохота – видача команди на включення приводу грохота. За грохотом запускається дробарка КСД 2200, аналогічно дробарці КМД. І в кінці відбувається запуск завантажувального конвеєра – видача команди на включення приводу конвеєра.

Регулювання продуктивності блок "Робота, регулювання швидкості конвеєра" Обчислення похибки регулювання:  $e(t) = H_{зад} - H(t)$ , де  $H_{зад}$  – задане значення рівня заповнення камери дроблення, 15.2 мА, що відповідає 70% заповнення. Задається з панелі оператора (TP1500) або з




верхнього рівня системи (SCADA), а  $H(t)$  – поточне значення рівня заповнення (в мА), отримане від датчика рівня після обробки (фільтрація, масштабування).

Розрахунок сигналу керування ПІД-регулятором *PID\_Compact* - обмеження керуючого сигналу:  $4 \text{ мА} \leq U(t) \leq 20 \text{ мА}$ . Реалізується програмно в ПЛК з використанням функціонального блоку LIMIT в SCL, а сам керуючий сигнал  $U(t)$  (4-20 мА) видається на частотний перетворювач конвеєра через модуль аналогового виводу ПЛК.

Регулювання ширини розвантажувальної щілини дробарки блок "Робота. Регулювання ширини розвантажувальної щілини дробарки". Запуск таймера при роботі Дробарки під навантаженням, яке береться з порівняння роботи на холостому ході дробарки, визначається з струмового навантаження (19 А). Коли дробарка працює під навантаженням то працює відлік (таймер, реалізовано функцію FB\_TON), для дробарки КМД це 8 год, а для дробарки КСД 12 год. Ці дані взяті зі проведених експериментів. При досягненні значення таймеру відбувається запуск механізму «Гідроагрегат». Алгоритм контролю та управління обладнанням гідроагрегату, що реалізований у програмній функції FC: PR07\_GDA необхідних для регулювання ширини розвантажувальної щілини дробарки КСД-2200 (КМД 2200), а також для проведення налагоджувальних та монтажних робіт. Включення/вимкнення гідроагрегату забезпечує можливість запуску та зупинки гідронасосної станції за командою з пульта місцевого керування (при ручному керуванні), або в автоматичному режимі. Ручне керування: Надає можливість ручного керування виконавчими механізмами гідроагрегату (насосом, електромагнітами золотників) для проведення налагоджувальних робіт та перевірки працездатності окремих вузлів. Цей режим призначений для використання обслуговуючим персоналом при проведенні технічного обслуговування та ремонтних робіт. Автоматичний режим виконання одного повного робочого циклу зміни положення регулювального кільця. Робочий цикл включає операції, необхідні для повороту регулювального кільця на один зуб (1,1 – 1,3 мм) для точного регулювання ширини розвантажувальної щілини.

Блок "Зупинка обладнання – зупинка обладнання дробильного комплексу може бути ініційована в декількох випадках, це штатна (нормальна) зупинка, вона виконується оператором з панелі керування (TP1500 Comfort), або з SCADA-системи при завершенні роботи. Інша це аварійна зупинка – це виконується автоматично при виникненні аварійної ситуації, яка загрожує безпеці персоналу або може призвести до пошкодження обладнання. Незалежно від причини зупинки, алгоритм забезпечує послідовне вимкнення обладнання в певному порядку, щоб запобігти завалам матеріалу, перевантаженню окремих елементів та іншим небажаним наслідкам. Послідовність дій (для штатної зупинки) це отримання команди "Стоп" на дискретний вхід PLC. Отримує команду "Стоп" від оператора (з панелі, SCADA), перший зупиняється



завантажувальний конвеєр та грохот ГТ-51 (видається команда на зупинку приводу конвеєра та грохоту). Потім зупинка дробарки КСД/КМД – витримка часу (опціонально): Після зупинки конвеєра передбачена витримка часу (30 с), щоб дати можливість дробарці подрібнити матеріал, що залишився в камері дроблення., після витримки поступає команда на вимкнення високовольтного вимикача (ВВ).

Алгоритм аварійної зупинки. Аварійна зупинка повинна виконуватися негайно при виникненні аварійної ситуації. Послідовність дій така ж, як і при штатній зупинці, але без витримок. Крім того, аварійна зупинка супроводжується світловою та звуковою сигналізацією та записом події в журнал аварій. Реалізовано також блокуванням повторного запуску до усунення причини аварії та скидання аварійного сигналу оператором або технологічним персоналом.

Для забезпечення інтеграції АСУ керування дробильним комплексом КСД-2200Т-Д1Б (нижній рівень автоматизації) з системою верхнього рівня SCADA-системою, MES-системою або іншою системою диспетчеризації підприємства реалізовано обмін даними через спеціалізовані області пам'яті програмованого логічного контролера SIMATIC S7-1511 – блоки даних (Data Blocks – DB). Ці блоки даних утворюють інформаційний інтерфейс, що дозволяє здійснювати моніторинг стану обладнання, передачу команд керування та налаштування параметрів системи. Для організації інформаційного обміну використовуються такі блоки даних DB90, DB93, DB94, DB95, DB101 – DB131.


DB90 (SYS\_DATA) – цей блок даних містить поточні основні дані системи і призначений, головним чином, для передачі інформації від ПЛК до системи верхнього рівня. У ньому дані, що характеризують поточний стан технологічного процесу та обладнання. Стан основного обладнання (конвеєра, дробарки, грохота): включено/вимкнено, аварія, тощо. Зведена інформація про аварійні сигнали (масив ARRAY of BOOL, де кожен елемент відповідає певному аварійному стану). Інші важливі технологічні параметри.

DB93 (HMI\_CMD) – цей блок даних призначений для прийому команд керування від оператора. Команди можуть надходити як з панелі оператора TP1500 Comfort, так і з верхнього рівня АСУ ТП (SCADA-системи).

DB94 (SP\_DATA) – цей блок даних містить уставки (задані значення) технологічних параметрів, які можуть бути змінені оператором або системою верхнього рівня.

DB95 (SP\_TIME) – цей блок даних містить часові уставки.

DB101 – DB131 Ці блоки даних (кількість блоків може варіюватися) призначені для зберігання поточних значень аналогових параметрів, отриманих від датчиків. Кожен блок даних, як правило, відповідає одному або групі однотипних датчиків.



Обмін даними між ПЛК і верхнім рівнем АСУ ТП здійснюватися промисловими протоколами OPC UA.

Розроблена комплексна система автоматизації забезпечує інтегрований підхід до управління процесом дроблення та здрібнювання руди. Застосування сучасних апаратних засобів, програмних рішень та математичного моделювання дозволяє:

- підвищити ефективність виробничого процесу за рахунок оптимального завантаження обладнання, точного регулювання параметрів і мінімізації ручного втручання;
- знизити експлуатаційні витрати завдяки економії електроенергії, зменшенню зносу обладнання та оптимізації витратних матеріалів;
- оптимізувати роботу обладнання шляхом автоматичного регулювання параметрів, адаптації до змінних умов і запобігання аварійним ситуаціям;
- забезпечити стабільність режимів роботи і високу якість кінцевого продукту;
- підвищити рівень безпеки виробництва за рахунок автоматичного контролю параметрів, своєчасного виявлення відхилень і реагування на аварійні ситуації.

Розроблена система є гнучкою, адаптивною та масштабованою, що дозволяє використовувати її на різних гірничодобувних підприємствах з урахуванням специфіки конкретного виробництва.

#### 4 ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАПРОПОНОВАНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

Ефективне функціонування сучасних виробничих систем нерозривно пов'язане з впровадженням інноваційних технологій автоматизації, які сприяють підвищенню продуктивності, зниженню експлуатаційних витрат та оптимізації використання енергетичних ресурсів. Економічне обґрунтування впровадження запропонованої системи автоматизації тракту середнього та мілкого подрібнення залізної руди полягає у визначенні інвестиційних витрат, аналізі експлуатаційних заощаджень та оцінці терміну окупності проекту

Для проведення економічного обґрунтування необхідно визначити вихідні дані. Частина з них у нас вже є (технічні характеристики обладнання), наведені в таблиці 4.1.


Таблиця 4.1 - Вартість технічних засобів

| Найменування обладнання/робіт                   | Одиниця виміру | Кількість | Ціна за одиницю, грн (орієнтовно) | Сума, грн (орієнтовно) |
|---|----------------|-----------|-----------------------------------|------------------------|
| CPU 1511-1 PN                                   | шт.            | 1         | 25000                             | 25000                  |
| Модулі вводу/виводу (DI/DO/AI/AO)               | шт.            | 76        | 400                               | 30400                  |
| Комунікаційний модуль (CP 1543-1)               | шт.            | 6         | 15000                             | 90000                  |
| Блок живлення                                   | шт.            | 6         | 5000                              | 30000                  |
| Разом (ПЛК):                                    |                |           |                                   | 175400                 |
| Панель оператора (TP1500 Comfort):              | шт.            | 2         | 80000                             | 160000                 |
| Датчики:  |                |           |                                   |                        |
| Датчик рівня (ультразвуковий/емнісний/радарний) | шт.            | 2         | 15000                             | 30000                  |
| Датчик ширини щілини (потенціометр/енкодер)     | шт.            | 2         | 8000                              | 16000                  |

Продовження таблиці 4.1

| Найменування обладнання/робіт                            | Одиниця виміру | Кількість | Ціна за одиницю, грн (орієнтовно) | Сума, грн (орієнтовно) |
|--|----------------|-----------|-----------------------------------|------------------------|
| Датчики вібрації   | шт.            | 8         | 5000                              | 40000                  |
| Датчики температури                                      | шт.            | 26        | 2000                              | 52000                  |
| Датчики тиску масла                                      | шт.            | 14        | 3000                              | 42000                  |
| Датчик продуктивності конвеєра                           | шт.            | 2         | 40000                             | 80000                  |
| Датчик швидкості конвеєра                                | шт.            | 2         | 5000                              | 10000                  |
| Разом (Датчики):   |                |           |                                   | 270000                 |
| Частотний перетворювач конвеєра (22 кВт):                | шт.            | 2         | 30000                             | 60000                  |
| SCADA-система (ПЗ):                                      | ліцензія       | 1         | 100000                            | 100000                 |
| Монтаж і налагодження:                                   | -              | -         | -                                 | 150000                 |
| Розробка ПЗ для ПЛК:                                     | -              | -         | -                                 | 50000                  |
| Кабельна продукція, шафи, клемники, допоміжні матеріали: | -              | -         | -                                 | 40000                  |
| Разом (Капітальні витрати):                              |                |           |                                   | 995400                 |

Аналізуючи витрати то їх можна розділити на інвестиційні витрати та експлуатаційні витрати. Інвестиційні витрати я включають в себе закупівля обладнання (датчики, контролери, частотні перетворювачі, виконавчі пристрої, SCADA-система), вартість впровадження програмного забезпечення (розробка алгоритмів, інтеграція в існуючу систему управління, налаштування системи), монтаж та інженерні роботи (інсталяція, налаштування, пусконаладжувальні роботи), навчання



персоналу та супровід після впровадження. Експлуатаційні витрати охоплюють обслуговування та технічний супровід системи автоматизації, енергоспоживання обладнання, витрати на ремонти та заміну деталей у разі зносу, витрати на модернізацію та оновлення програмного забезпечення.

Для оцінки економічної ефективності впровадження системи проводиться розрахунок терміну окупності інвестицій, внутрішньої норми прибутковості (IRR) та чистої приведеної вартості (NPV).

$$T_0 = I/E, \quad (4.1)$$

де  $T_0$  – термін окупності;  $I$  – інвестиційні витрати;  $E$  – річні економічні ефекти

Чиста приведена вартість (NPV) за заданою ставкою дисконту (наприклад, 8 %), NPV розраховується за формулою:

$$NPV = \sum_{i=1}^T \frac{E}{(1+0.08)^t} - I \quad (4.2)$$

Якщо  $NPV > 0$ , то проект є економічно доцільним.

Базова продуктивність тракту дроблення 420 т/год а робочий час, що дробильна фабрика працює 300 днів на рік по 24 години. Запропонована система підвищує продуктивності на +5 %

$$Q_{\text{нов}} = 420 \times 0,5 = 441 \text{ т/год}$$

Додаткова продуктивність  $\Delta Q = 441 - 420 = 21$

Ціна концентрату на вересень 2024 року середня ринкова ціна становить 120 дол/т або близько 5000 грн/т.


Річна економія за рахунок підвищення продуктивності, та враховуючи що співвідношення залізної руди до виробництва залізородного концентрату 1:3 то отримаємо наступне:

$$\Delta Q_{\text{рік}} = \frac{21 \text{ т/год} \times 7200 \text{ год}}{3} = 50\,400 \text{ т}$$

А додатковий дохід від підвищення продуктивності:

$$\Delta D = 50\,400 \times 5000 \text{ грн/т} = 252\,000\,000 \text{ грн}$$

Економія на електроенергії. Щорічні витрати на електроенергію складають: сумарна номінальна потужність: 315 кВт + 250 кВт = 565 кВт. Середня споживана потужність: 565 кВт \* 0.9 = 508.5 кВт. Річне споживання: 508.5 кВт \* 6000 год = 3 661 200 кВт/год . Річні



витрати:  $3\,661\,200 \text{ кВт/год} * 6.05 \text{ грн/кВт} \cdot \text{год} = 22\,150\,260 \text{ грн}$ . Це розрахунки для дробарок КСД та КМД, до цього додаються витрати по конвеєру та грохоту, а це буде 862 488 грн і 644 688 грн відповідно. Розам затрати на рік по електроенергії буде 23 013 108 грн.

При впровадженні нової системи економічний ефект на електроенергії на 5%:

$$\Delta E = 23\,017\,108 * 0,05 = 1\,150\,665 \text{ грн}$$

Сумарний економічний ефект

$$\Delta \Sigma = \Delta D + \Delta E = 252\,000\,000 \text{ грн} + 1\,150\,665 \text{ грн} = 253\,150\,665 \text{ грн}$$

Термін окупності проекту при інвестиційних витратах близько  $I = 250\,000\,000 \text{ грн}$  це враховуючи і механічне обладнання і роботи по монтажу термін окупності розраховується за формулою:

$$T_0 = \frac{250\,000\,000}{253\,150\,665} = 0,9$$

Розрахунки показують, що впровадження автоматизованої системи управління дробильним процесом дозволяє:

- збільшити продуктивність виробництва на 5 %, що дає додатковий дохід близько 3 млн грн на рік;
- знизити витрати на електроенергію на 5 %, що забезпечує економію близько 1,2 млн грн на рік;
- загальний річний економічний ефект складає приблизно 5 млн грн, що забезпечує термін окупності проекту близько 11 місяців.

Ці розрахунки засвідчують високий потенціал економічної ефективності впровадження запропонованої системи автоматизації, що сприятиме підвищенню продуктивності дробильної фабрики та оптимізації експлуатаційних витрат.



## ВИСНОВКИ

Робота присвячена розробці інтелектуальної системи керування для тракту середнього і дрібного подрібнення залізної руди на основі роботи дробильної фабрики одного з ГЗК України. Основні положення дослідження можна охарактеризувати наступним чином.

Загальна характеристика та актуальність. Сучасна гірничо-металургійна промисловість вимагає підвищення продуктивності і оптимізації енергоспоживання. Необхідність впровадження сучасних систем автоматизації, які не тільки покращують якість кінцевої продукції, але й сприяють зменшенню експлуатаційних витрат та зростанню надійності обладнання.

Аналіз технологічного процесу. У першій частині роботи детально описується послідовність операцій при дробленні руди – від її видобутку до досягнення необхідного розміру частинок. Також проводиться огляд сучасних систем автоматизації, виявляються їхні слабкі сторони, зокрема недостатня стабілізація ключових технологічних параметрів та обмежена інтеграція різних регулюючих алгоритмів. Аналіз літератури свідчить про зростаючу популярність адаптивних алгоритмів і методів математичного моделювання, які використовують нейронні мережі та нечітку логіку для покращення точності керування.


Формулювання завдань та концепція системи керування. Окреслюється головні завдання автоматизації – досягнення оптимального гранулометричного складу продукту дроблення при максимальній продуктивності та мінімальних енергетичних витратах. Запропоновано багаторівневу архітектуру системи, що складається з:

- нижнього рівня – збору даних із застосуванням сенсорів та базового регулювання;
- середнього рівня – обробки інформації та прийняття рішень з використанням ПЛК;
- верхнього рівня – моніторингу, візуалізації даних через SCADA-системи і забезпечення оперативного керування.

Методологія і технічні рішення. У роботі розглядаються методи математичного моделювання та ідентифікації динамічних характеристик процесу дроблення, зокрема алгоритми, що враховують нелінійність, затримки та випадкові збурення. Запропоновані методи дозволяють адаптувати систему до змін умов виробництва, забезпечуючи своєчасне коригування параметрів роботи обладнання через систему зворотного зв'язку.

Практична цінність та інноваційність дослідження. Впровадження розробленої системи автоматизації сприятиме підвищенню ефективності виробничого процесу за рахунок:

- збільшення продуктивності дробильного обладнання;
- скорочення витрат на енергоспоживання;

- 
- покращення якості кінцевого продукту;
  - подовження терміну експлуатації обладнання завдяки своєчасному моніторингу та адаптивному управлінню.

Інноваційність роботи полягає у комплексному підході, що інтегрує сучасні технології автоматизації, адаптивні алгоритми прогнозування та методи оптимізації для досягнення максимальної ефективності технологічного процесу.

Підсумовуючи, дослідження демонструє, що впровадження запропонованої системи автоматизації може значно оптимізувати технологічний процес подрібнення, адаптувати його до змін умов експлуатації та сприяти підвищенню конкурентоспроможності підприємств у гірничо-металургійному секторі. Робота поєднує теоретичні розробки з практичними рекомендаціями, що робить її вагомим внеском у сферу автоматизації виробничих процесів.



## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Технологічна інструкція ТІ 00190905.02.001-2023. 24 с.
2. Яковенко В.Б., Забродський М.М. Системне моделювання проектного розрахунку вібраційного грохоту з коловими коливаннями. Техніка будівництва. 2011. №27. С. 55-63
3. Савицький О.І., Тимошенко М.А., Грамм О. О. Вибір способу автоматизованого регулювання продуктивності процесу мілкового дроблення залізної руди зі змінними параметрами. Гірничий вісник 2020. № 108. С. 39-44.
4. Воронцов І.О., Ільченко О.В., Данилейко О.К. Використання операторської панелі та програмованого логічного контролера для керування електроприводом дробарки. Теоретичні та практичні дослідження в галузі гуманітарних і природничих наук. Матеріали науково-практичної конференції (м. Запоріжжя, 24-25 лютого 2023 р.). Запоріжжя, 2023. С.134-140.
5. Стець С. Є., Стадник В. С., Стець Н. В. Система екстремального автоматичного керування процесом дроблення руди з використанням економічного критерію. Вісник НУВГП. Технічні науки. 2016. № 3(75). С. 345 – 354.
6. Корнієнко В.І. Автоматизація оптимального керування процесами дроблення і здрібнювання руд: монографія. Дніпропетровськ : НГУ 2013. 193 с.
7. Корнієнко В.І. Синергетичний підхід до синтезу оптимального керування рудопідготовкою з інтелектуальним прогнозуванням. Науковий вісник Національного гірничого університету. 2008 № 3 С. 79- 83.
8. Поркуян О.В. Керування нелінійними динамічними об'єктами збагачувальних виробництв на основі гібридних моделей Гамерштейна. Автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук : спец. 05.13.07 Кривий Ріг, 2009. 32 с.
9. Тиханський М.П., Єфименко Л.І. Конвеєрна лінія Ігулецького гірничозбагачувального комбінату, як об'єкт автоматизації Академічний вісник. 2001р. №92. С. 92-97.
10. Тігарєв, А.М. Тігарєва Т.Г. Удосконалення системи керування конусною дробаркою середнього дроблення. Інформатика та математичні методи в моделюванні 2024р. Том 14, № 1-2. С. 106 – 116
11. Стандарт АСУ ТП. Версія 2.0.. Вид. офіц. Київ, 2023. 50 с.
12. Білецький В.С., Олійник Т.А., Смирнов В.О., Скляр Л.В. Основи техніки та технології збагачення корисних копалин Київ Видавництво Ліра-К 2020. 635 С
13. І.В. Ельперін, О.М. Пупена, В.М. Сідлецький, С.В. Струтинський. Автоматизація виробничих процесів. Навчальний посібник. Київ. Вид. Ліра-К, 2017. 378 С



## ДОДАТОК А ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС

Подрібнення залізної руди є ключовим етапом у технологічному циклі виробництва, оскільки від ефективності цього процесу залежить подальше збагачення руди та якість кінцевого продукту.

На сучасних гірничозбагачувальних комбінатах технологічний процес включає такі етапи:

- видобуток руди та її транспортування на фабрику;
- поетапне дроблення матеріалу: крупне, середнє та дрібне;
- подрібнення до необхідного рівня для розкриття корисних мінералів.

Розподіл отриманого продукту на концентрат і відходи за допомогою магнітної сепарації, флотації чи інших методів.

Відправлення готового концентрату споживачам та утилізація залишків.

Етапи дроблення:

1) перший етап. Руда, розмір часток якої сягає 1200 мм, подається в дробарку ККД 1500/180. Там вона подрібнюється до розміру 400 мм при ширині розвантажувальної щілини 165-180 мм. Подрібнений матеріал переміщується на наступний етап за допомогою конвеєрів, живильників та перевантажувальних вузлів;


2) другий етап. Дроблення руди розміром до 400 мм виконується в дробарці КРД 700/100, що забезпечує зменшення розмірів до 250 мм. Процес здійснюється при ширині розвантажувальної щілини 70-100 мм. Після цього матеріал через барабанні живильники і конвеєри надходить у бункери третього та четвертого етапів;

3) третій етап. Розмір руди зменшується до 100 мм у дробарках КСД 2200/400Т. На цьому етапі використовуються інерційні грохоти ГІТ-51 або ГІТ-52 для відділення готового продукту (фракції 0-20 мм). Частина матеріалу транспортується на рудозбагачувальну фабрику;

4) четвертий етап. Остаточне дроблення виконується в дробарках КМД 2200/600Т. Отриманий матеріал з розміром часток до 20 мм транспортується до збагачувальної фабрики через систему конвеєрів (рис.А.1).

Основним технологічним показником для ДФ є крупність подрібненого продукту, що транспортується на РЗФ-1, РЗФ-2.

Для подачі руди необхідної крупності на РЗФ-2 потрібно: витримувати розвантажувальну щілину для дробарок ККД 1500/180 ГРЩ № 4, 5, 7 при роботі на РЗФ-2 від 165 мм до 180 мм. Термін становить експлуатаційний період дробарки після заміни броні нижньої чаші за бронею конуса до моменту їх зносу, коли максимальний розмір щілини не буде відповідати зазначеним вище параметрам (нове футерування), стежити, щоб подавана у приймальну лійку дробарки руда крупністю не



була більше 1200 мм та не допускати попадання в дробарки недробимих матеріалів.

За дотримання цих умов виключаються:

- перекриття розвантажувальної щілини;
- вихід з ладу вузлів дробарки та футерувальних броней;
- підпресування дробарки.

Для подачі на РФ-1 руди планової крупності – мінус 20 мм з вмістом класу плюс 20 мм не більше 11,0%, необхідно:

Витримувати розвантажувальні щілини на дробарках: ККД 1500/180 ГРЩ № 1, 2, 4, 7 величина розвантажувальної щілини повинна бути не більше 165-180 мм. Термін становить експлуатаційний період дробарки, коли зношування броні не дозволяє витримувати зазначені параметри.

Другий і третій живильники, без I стадії дроблення, величина розвантажувальної щілини повинна бути від 140 мм до 145 мм.

Режимні параметри розвантажувальних щілин дробарок КРД 700/100 і КРД 900/100 ГРЩ № 3, 4, 5, 6 – від 70 мм до 100 мм.

Режимні параметри розвантажувальних щілин КСДТ-2210 та МДТ-2200 – від 15 мм до 30 мм та від 5 мм до 15 мм відповідно.

Для запобігання аваріям обладнання на дробильній фабриці встановлюється ряд захисту:

- у перевантажувальному вузлі та бункерах встановлюються сигналізатори рівня заповнення перевантажувального вузла;
- на конвеєрах встановлені пристрої, що запобігають поздовжньому та поперечному пориву стрічки, перевантаженню конвеєр, сходу стрічки, пробуксуванню стрічки.

Для досягнення зазначених вище якісно-кількісних показників при дробленні та транспортуванні руди технологічний персонал зобов'язаний:

Забезпечувати контроль за технічною справністю обладнання та його маслогосподарством, проводити огляд та чищення обладнання, регулювати подачу води на зрошення, контролювати якість продукту за допомогою ситового аналізу [1].

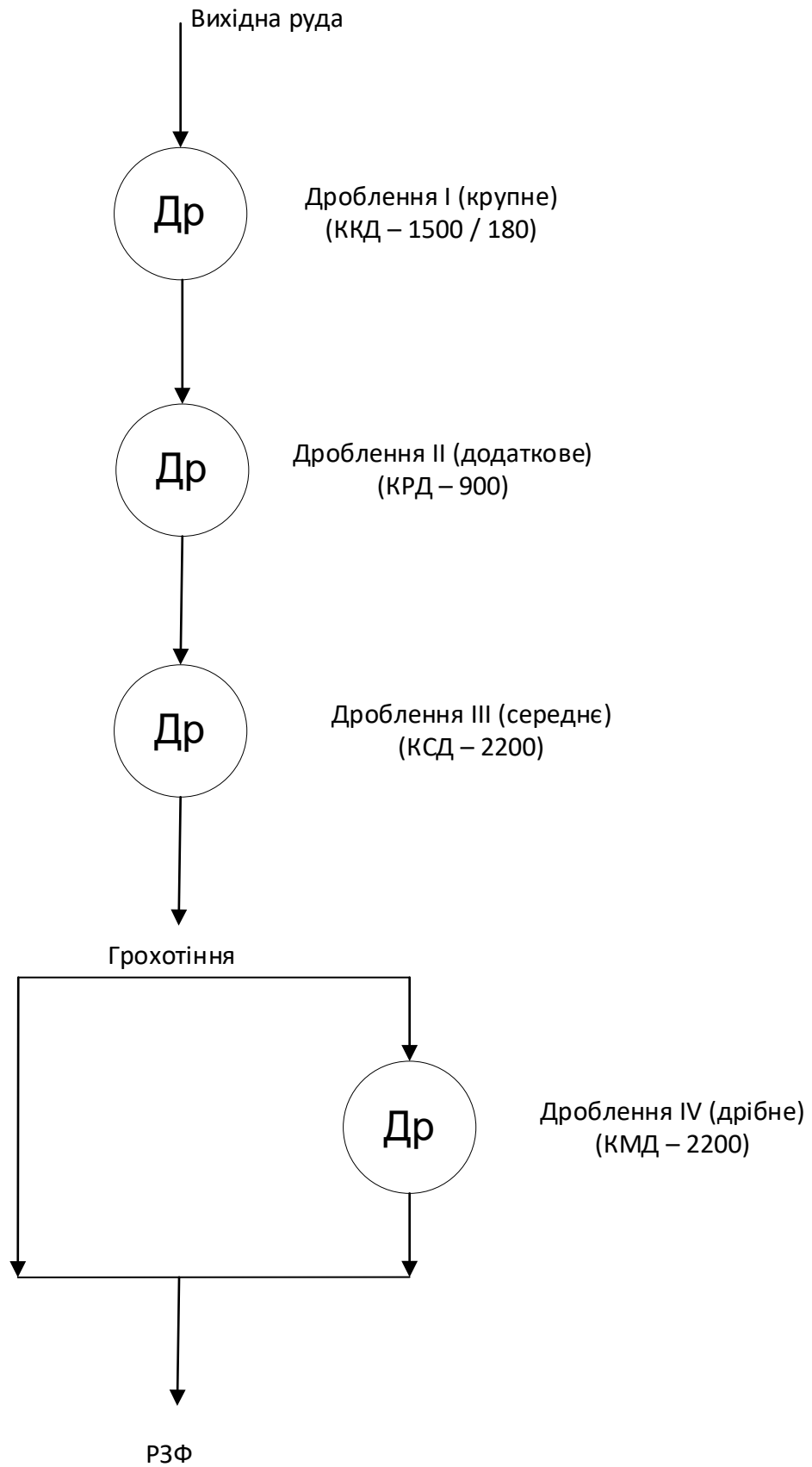


Рисунок А.1 – Технологічна схема

**ДОДАТОК Б**  
**ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ АГРЕГАТІВ ТА МЕХАНІЗМІВ**

Таблиця Б.1 – Технічні характеристики завантажувального конвеєра

| Параметри                   | М1А  |
|-----------------------------|------|
| Довжина конвеєра, м         | 9,5  |
| Ширина стрічки, мм          | 1600 |
| Швидкість руху стрічки, м/с | 0,17 |
| Продуктивність, т/г         | 500  |

Таблиця Б.2 – Технічні характеристики дробарки КСД 2200 / КМД 2200

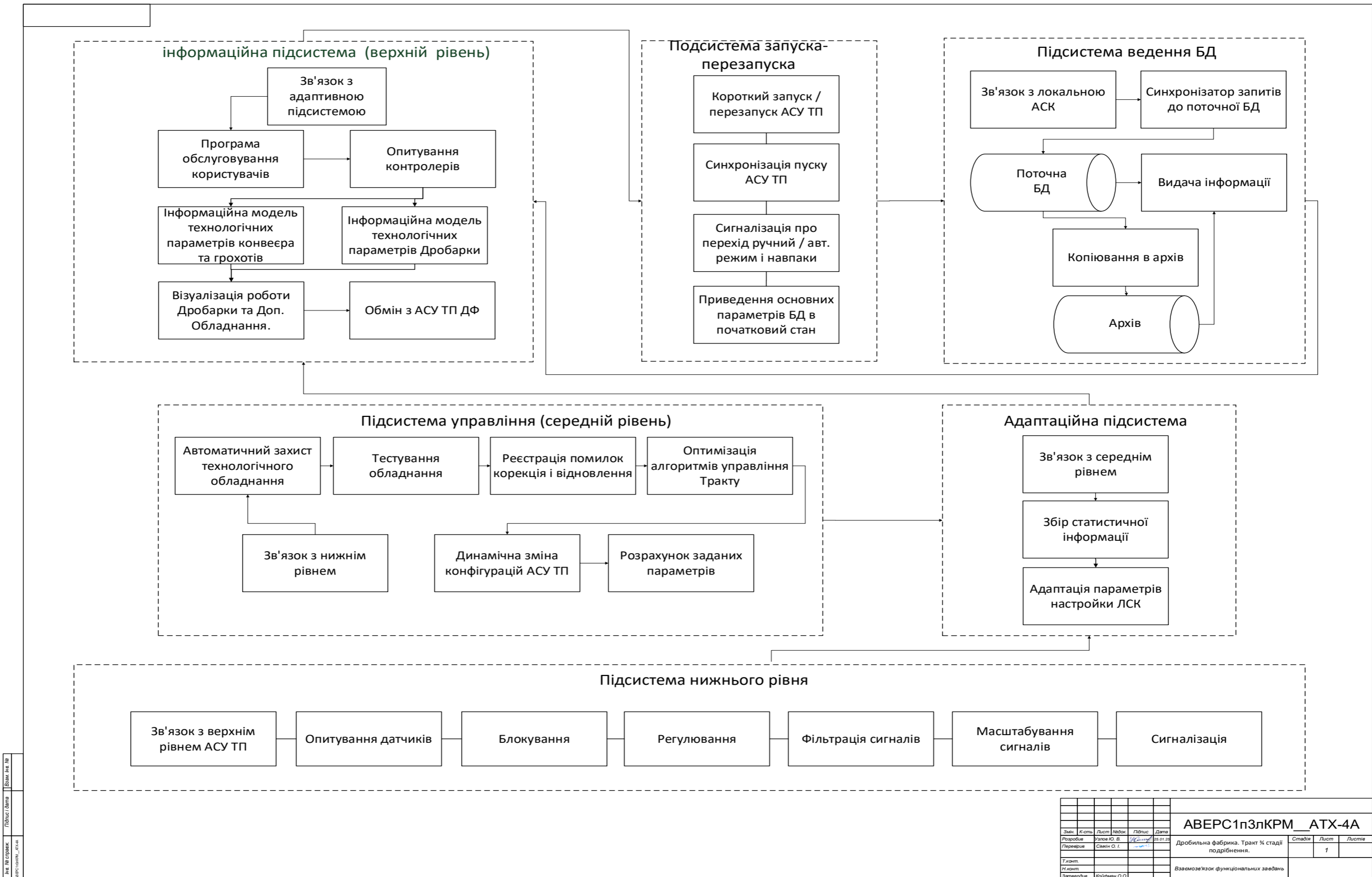
| Параметр   | КСД-2200/400Т | КМД-2200/600Т |
|--|---------------|---------------|
| Діаметр основи рухомого конуса, мм                         | 2200          | 2200          |
| Ширина приймального отвору, мм                             | 275           | 100           |
| Найбільший шмат живлення, мм                               | 250           | 85            |
| Ширина вихідної щілини, мм                                 | 15-30         | 5-15          |
| Об'ємна продуктивність, м <sup>3</sup> /год                | 180-360       | 160-220       |
| Частота коливань конуса, хв <sup>-1</sup>                  | 242           | 242           |
| Електродвигун приводу: потужність, кВт                     | 315           | 250           |
| Електродвигун приводу: частота обертання, хв <sup>-1</sup> | 495           | 495           |
| Маса дробарки, т   | 87,6          | 87.3          |
| Габарити, мм:  |               |               |
| довжина  | 5500          | 5500          |
| ширина   | 4300          | 4300          |
| висота   | 5100          | 5100          |

Таблиця Б.3 – Технічні характеристики грохоту ГІТ – 51

| Параметр                    | ГІТ 51  |
|-----------------------------|---------|
| Площа сита, м <sup>2</sup>  | 7,9     |
| Число сит                   | 1       |
| Кут нахилу короба, град     | 10 - 30 |
| Частота коливань, хв-1      | 730     |
| Амплітуда коливань, мм      | 3 - 7   |
| Розмір отворів сит, мм      | 6 - 80  |
| Потужність електродвиг, кВт | 17      |
| Продуктивність, т/год       | 500     |
| Габарити, мм:               |         |
| довжина                     | 4010    |
| ширина                      | 2687    |
| висота                      | 1487    |
| Маса грохота, т             | 6       |



## ДОДАТОК Г ВЗАЄМОЗВ'ЯЗОК ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ЗАВДАНЬ



Ім. № сторінки | Північ | Лист | Стан | №  
 Версія | Назва | Дата

|           |         |      |  |      |          |                            |      |        |
|-----------|---------|------|--|------|----------|----------------------------|------|--------|
|           |         |      |  |      |          | <b>АВЕРС1пЗлКРМ_АТХ-4А</b> |      |        |
| Знак      | К-сть   | Лист | Назва  | Лист | Дата     | Стан                       | Лист | Листів |
| Розробка  | Уклад   | Ю.В. | Дробильна фабрика. Тракт ¼ стадії подрібнення. | 1    | 20.01.20 |                            | 1    |        |
| Перевірка | Свіж    | О.І. |  |      |          |                            |      |        |
| Т.хит     |         |      |  |      |          |                            |      |        |
| Н.хит     |         |      |  |      |          |                            |      |        |
| Затвердив | Колодій | О.О. |  |      |          |                            |      |        |

Рисунок Г.1 - Взаємозв'язок функціональних завдань

## ДОДАТОК Д СХЕМА СТРУКТУРНА КОМПЛЕКСУ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ

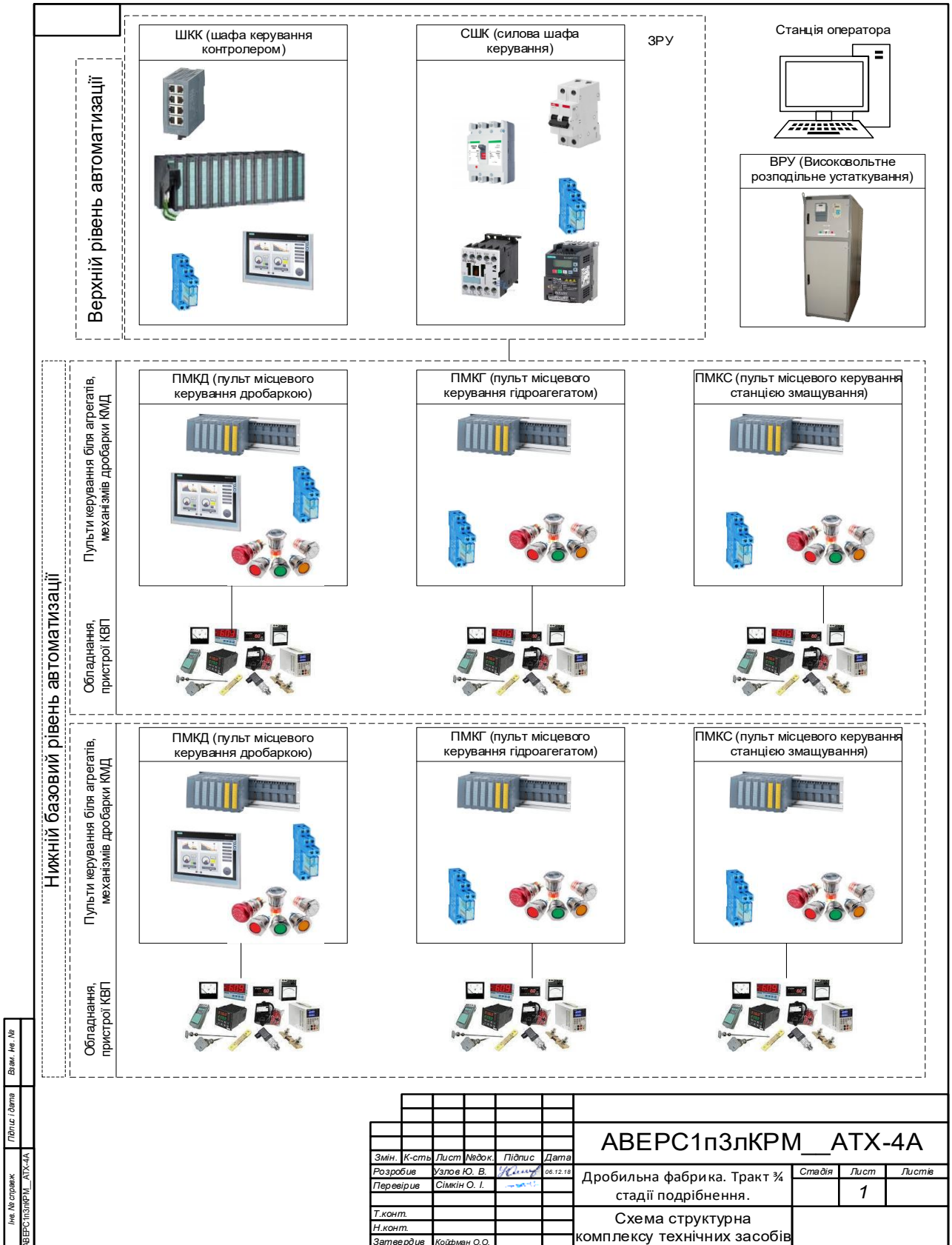


Рисунок Д.1 - Схема структурна комплексу технічних засобів

