

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** «Модернізація автоматизованої системи управління циклічно-поточною технологією транспортування гірничої маси з горизонту-300 в умовах ПРАТ "ІНГУЛЕЦЬКИЙ ГІРНИЧО-ЗБАГАЧУВАЛЬНИЙ КОМБІНАТ"»

Керівник роботи

Олександр СІМКІН

Консультант від  
бази практики

Олександр БОХАН

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

Здобувач

Анастасія РЯБЧЕНКО

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

Голова ЕК

Олег Бондар

Запоріжжя 2026

# 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

27.10.2025 р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Рябченко Анастасії Анатоліївни

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема роботи Модернізація автоматизованої системи управління циклічно-поточної технології транспортування гірничої маси з горизонту -300 в умовах ПРАТ "ІНГЗК", тракт "Східний-2"

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

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

затверджені наказом Університету від \_\_\_\_\_

2. Термін подання роботи 20.01.2026 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 керування, літературні джерела, технологічні інструкції, дані ПРАТ «ІНГЗК» м. Кривий Ріг, 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. Конфігурування САР швидкості конвеєра TIA Portal. 3.3. Нечітке супервизорне керування з корекцією коефіцієнтів регулятора швидкості. Розробка математичного, алгоритмічного та програмного системи управління трактом).

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. Взаємозв'язок функціональних завдань модернізованої системи (А1). 2. Схема структурна комплексу технічних засобів (А1). 3. Екран конфігурування, математична модель нечіткого супервизорного керування. 4. Блок-схеми алгоритмів керування. 5. Презентація магістерської роботи.

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

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта
Усі розділи	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	01.12.2025	
2	Розділ 2. Постановка задач автоматизації та обґрунтування запропонованої структури комп'ютерної системи управління + креслення	09.12.2025	
3	Розділ 3. Реалізація запропонованої системи автоматизації + креслення (розробка та відправлення на перевірку)	18.12.2025	
4	Розділ 4. Економічне обґрунтування запропонованої системи автоматизації (розробка та відправлення на перевірку)	27.12.2025	
5	Виправлення та кінцева реалізація розділів 2 та 3	03.01.2026	
6	Висновки, перелік посилань, вступ, зміст	08.01.2026	
7	Оформлення графічної частини	12.01.2026	
8	Написання та оформлення автореферату	15.01.2026	
7	Подання завершеної роботи. Перевірка на академічний плагіат	19.01.2026	
8	Остаточне оформлення роботи, презентаційного матеріалу, автореферату	21.01.2026	
9	Рецензування завершеної роботи. Захист	До 30.01.2026	

Здобувач

Анастасія РЯБЧЕНКО

Керівник роботи

Олександр СІМКІН



## АНОТАЦІЯ

Рябченко Анастасія Анатоліївна. Модернізація автоматизованої системи управління циклічно-поточною технологією транспортування гірничої маси з горизонту -300 в умовах ПРАТ "ІГЗК". – Кваліфікаційна праця на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка». ОПП «Інтелектуальні системи управління та робототехнічні комплекси в гірничо-металургійному виробництві» – ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», Запоріжжя, 2026.

Об'єктом дослідження є технологічний процес транспортування гірничої маси стрічковими конвеєрами на горизонті -300 м тракту «Східний-2» ПРАТ «ІНГЗК».


Предметом дослідження є автоматизована система керування режимами роботи конвеєрного транспорту з використанням частотно-керованих електроприводів.

Метою кваліфікаційної роботи є підвищення ефективності, надійності та безпеки транспортування гірничої маси шляхом удосконалення автоматизованої системи керування на основі застосування частотних перетворювачів і сучасних засобів програмно-технічної реалізації.

Для досягнення поставленої мети у роботі використано методи системного аналізу, математичного моделювання динамічних процесів, теорії автоматичного керування, а також методи структурного та функціонального синтезу АСУ ТП.

У першому розділі виконано аналітичний огляд предметної області та досліджено технологічний процес транспортування гірничої маси як об'єкт автоматизації. Показано, що діючі системи управління на аналогічних об'єктах мають обмежені можливості адаптації до змінних режимів роботи та не забезпечують повного використання потенціалу енергозбереження. Аналіз літературних джерел і практики впровадження сучасних АСУ ТП дозволив обґрунтувати доцільність застосування частотно-регульованих електроприводів у поєднанні з інтелектуальними алгоритмами керування як одного з найбільш ефективних напрямів модернізації конвеєрного транспорту.

У другому розділі сформовано постановку задач автоматизації та обґрунтовано структуру модернізованої системи управління. Запропоновано ієрархічний підхід до організації АСУ ТП з чітким розподілом функцій між рівнями керування, моніторингу, сигналізації та захисту. Показано взаємозв'язок функціональних завдань системи та їх роль у забезпеченні стабільної роботи конвеєрного тракту в умовах змінного навантаження. Такий підхід створює основу для гнучкого розвитку системи та впровадження адаптивних і супервізорних алгоритмів управління.



У третьому розділі наведено реалізацію запропонованої системи управління на базі сучасної апаратно-програмної платформи Siemens. Обґрунтовано вибір програмованого логічного контролера, розподілених модулів введення-виведення, частотно-регульованого електропривода та засобів вимірювання технологічних параметрів. Запропоновано систему автоматичного регулювання швидкості стрічкового конвеєра з урахуванням реального навантаження, а також концепцію нечіткого супервізорного керування для корекції параметрів регулятора. Показано, що така реалізація дозволяє зменшити динамічні навантаження на обладнання, підвищити стабільність роботи та покращити керованість технологічного процесу.

У четвертому розділі виконано економічне обґрунтування доцільності впровадження запропонованих технічних рішень. Застосовано аналітично-методичний підхід до оцінювання економічного ефекту, який не потребує використання конфіденційних виробничих даних. Показано, що впровадження частотно-регульованого електропривода та сучасної АСУ ТП створює передумови для зниження споживання електроенергії, скорочення витрат на технічне обслуговування та зменшення кількості аварійних зупинок. Сукупність прямих і непрямих ефектів підтверджує економічну доцільність модернізації системи управління.

Запропоновані рішення забезпечують зниження енергоспоживання, зменшення динамічних навантажень на обладнання, підвищення стабільності роботи та зменшення кількості аварійних зупинок. Практичне значення роботи полягає у можливості впровадження отриманих результатів на діючому виробництві без суттєвої заміни існуючого обладнання, що створює економічний ефект за рахунок зниження експлуатаційних витрат.

Кваліфікаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків, викладена на 85 сторінках, містить 15 рисунків, 6 додатків, список використаних джерел налічує 61 найменувань.

**ТРАКТ ТРАНСПОРТУВАННЯ, АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ, СТРІКОВИЙ КОНВЕЄР, ЧАСТОТНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ, SCADA, PLC SIEMENS, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ.**



## ЗМІСТ

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ.....	10
1.1 Аналіз предметної області.....	10
1.2 Аналіз рівня автоматизації на об'єкті дослідження .....	10
1.3 Технологічний процес циклічно-поточної технології транспортування гірничої маси .....	12
1.4 Аналіз стану автоматизації на аналогічних об'єктах .....	16
1.5 Огляд питання в літературі, статтях .....	17
2 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТА ОБГРУНТУВАННЯ СТРУКТУРИ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТА СИГНАЛІЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ .....	22
2.1 Загальні підходи до автоматизації технологічного процесу транспортування гірничої маси .....	22
2.2 Технологічний процес як об'єкт управління.....	22
2.3 Постановка основних задач автоматизації.....	24
2.3.1 Задачі керування .....	24
2.3.2 Задачі моніторингу.....	25
2.3.3 Задачі сигналізації та захисту .....	25
2.4 Розподіл функціональних завдань за рівнями автоматизації.....	26
2.5 Взаємозв'язок функціональних завдань модернізованої автоматизованої системи керування.....	26
2.6 Опис структурної схеми комплексу технічних засобів дробильної фабрики тракту «Східний-2» .....	29
3 РЕАЛІЗАЦІЯ ЗАПРОПОНОВАНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ .....	36
3.1 Вибір та обґрунтування технічних засобів автоматизації .....	36
3.1.1 Загальні положення та вихідні умови проєктування .....	36
3.1.3 Вибір та обґрунтування програмованого логічного контролера... 37	
3.1.4 Застосування розподілених модулів введення-виведення .....	38
3.1.6 Вибір засобів вимірювання та контролю параметрів конвеєра ....	39
3.1.7 Вибір технічних засобів автоматизації для інших конвеєрів тракту.....	40
3.1.8 Вибір комп'ютерів та серверного обладнання верхнього рівня ...	41
3.2 Конфігурування системи автоматичного регулювання швидкості конвеєра в середовищі TIA Portal .....	42
3.3 Нечітке супервізорне керування з корекцією коефіцієнтів регулятора швидкості.....	45
3.3.1 Математична модель системи керування зі супервізором.....	47
3.3.2 Нормалізація та демасштабування змінних системи керування..	48
3.3.3 Алгоритмічна структура нечіткого супервізора.....	49
3.3.4 Програмна реалізація та моделювання.....	50
3.3.5 Аналіз результатів моделювання.....	52
3.4 Алгоритм керування транспортним трактом «Східний-2» .....	53
3.4.1 Опис роботи алгоритму відповідно до блок-схеми .....	55
4 ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ.....	57

4.1 Загальні положення економічного обґрунтування проєкту .....	57
4.2 Формування вихідних даних та обмеження економічних розрахунків .....	59
4.3 Економічний ефект від зниження енергоспоживання електропривода .....	60
4.3.1 Методика оцінки енергетичного ефекту .....	61
4.3.2 Вартісна оцінка енергетичного ефекту .....	62
4.4 Економічний ефект від зменшення зносу, простоїв та експлуатаційних витрат .....	63
4.4.1 Методика оцінки енергетичного ефекту .....	63
4.5 Узагальнена оцінка економічної ефективності та терміну окупності проєкту .....	65
4.6 Адаптація сценаріїв під конкретні умови ІНГЗК .....	67
4.6.1 Специфіка умов ІНГЗК, що впливає на економічний ефект .....	67
4.6.2 Обережний сценарій для умов ІНГЗК .....	67
4.6.3 Агресивний сценарій для умов ІНГЗК .....	68
4.6.4 Порівняльна логіка сценаріїв для ІНГЗК .....	68
4.7 Обґрунтування практичної доцільності та економічної ефективності запропонованих технічних рішень (з посиланнями на джерела) .....	69
ВИСНОВКИ .....	71
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	73
ДОДАТОК А ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС ЯК ОБ'ЄКТ УПРАВЛІННЯ .....	<b>Помилка! Закладку не визначено.</b>
ДОДАТОК Б КРЕСЛЕННЯ «ВЗАЄМОЗВ'ЯЗОК ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ЗАДАЧ» .....	<b>Помилка! Закладку не визначено.</b>
ДОДАТОК В КРЕСЛЕННЯ «СХЕМА СТРУКТУРНА КОМПЛЕКСУ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ» .....	<b>Помилка! Закладку не визначено.</b>
ДОДАТОК Д УЗАГАЛЬНЕНА БЛОК-СХЕМА РОБОТИ АЛГОРИТМУ УПРАВЛІННЯ ТРАКТУ «СХІДНИЙ-2» .....	<b>Помилка! Закладку не визначено.</b>
ДОДАТОК Е СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ... ..	<b>Помилка! Закладку не визначено.</b>



## ВСТУП

В умовах стрімких змін у промисловому секторі України особливе значення набуває питання модернізації виробництва на підприємствах гірничо-збагачувального профілю. Ресурсна база країни є основою її економічної незалежності, а ефективне функціонування підприємств добувної галузі – запорукою стабільного розвитку суміжних сфер, таких як металургія, енергетика, транспортна логістика тощо. Однією з ключових ланок у структурі гірничодобувного комплексу є система транспортування корисних копалин, зокрема гірничої маси. Від її надійності та адаптивності до виробничих умов залежать обсяги видобутку, стабільність технологічного процесу і витрати на технічне обслуговування.

Актуальність автоматизації процесу транспортування гірничої маси на сучасному етапі зумовлена декількома факторами. По-перше, в умовах воєнного часу наявна необхідність зниження енергоспоживання за рахунок оптимізації режимів роботи обладнання. По-друге, зростають вимоги до безпеки та безперервності виробничих процесів, які неможливо забезпечити без впровадження сучасних засобів контролю та керування. По-третє, на багатьох підприємствах експлуатуються застарілі системи управління, що не відповідають вимогам цифровізації та мають обмежену гнучкість.

З огляду на це, модернізація автоматизованих систем управління (АСУ ТП) на гірничо-збагачувальних комбінатах є не лише технічно обґрунтованою, а й економічно доцільною. Особливої уваги потребують ділянки з високим навантаженням, до яких належить тракт «Східний-2» ПрАТ «ІНГЗК», що забезпечує транспортування гірничої маси з горизонту -300 м. Цей об'єкт характеризується складними умовами експлуатації, нерівномірним вантажопотоком та високим ступенем зношеності обладнання. Вдосконалення системи керування на даній ділянці дозволить зменшити аварійність, покращити енергоефективність та підвищити продуктивність транспортування.

Метою даної магістерської роботи є розробка та обґрунтування сучасної автоматизованої системи управління технологічним процесом транспортування гірничої маси на базі частотно-регульованого електроприводу і SCADA-системи. Такий підхід дозволяє реалізувати адаптивне регулювання параметрів у реальному часі, що критично важливо для забезпечення сталого функціонування конвеєрної лінії за умов змінного навантаження.

Завдання дослідження охоплюють: аналіз чинного стану системи автоматизації на об'єкті; визначення впливу технічних параметрів на ефективність транспортування; побудову математичної моделі динамічної поведінки об'єкта управління; синтез алгоритму керування з урахуванням часових затримок та збурень; вибір і обґрунтування апаратної та програмної платформи реалізації; перевірку



функціональності розробленої системи засобами комп'ютерного моделювання.

Об'єктом дослідження виступає система транспортування гірничої маси на горизонті -300 м гірничо-збагачувального комбінату, що включає комплекс стрічкових конвеєрів, живильників і допоміжного обладнання. Предметом дослідження є автоматизована система керування режимами роботи стрічкових конвеєрів на прикладі тракту «Східний-2», що функціонує за циклічно-поточною схемою переміщення маси.

У роботі застосовано системний та функціональний підходи, а також методи математичного моделювання, структурного синтезу, параметричної оптимізації, аналізу динаміки та стійкості регульованих систем. Усі розрахунки проводилися з використанням пакету MATLAB/Simulink, а реалізація алгоритмів – на базі ПЛК Siemens серії S7-1500 у зв'язці з SCADA-сервером.

Наукова новизна полягає у поєднанні принципів адаптивного регулювання з цифровим моделюванням динамічних характеристик стрічкових конвеєрів. Уперше для заданого об'єкта запропоновано передавальну функцію з урахуванням інерційності та затримок, що дозволяє підвищити точність налаштування регулятора та зменшити час реакції на зміну навантаження.

Практичне значення розробленої системи полягає в її універсальності, масштабованості та готовності до інтеграції у промислові цифрові платформи. Очікуваними результатами впровадження є зниження споживання електроенергії, зменшення кількості аварійних зупинок, продовження ресурсу обладнання та оптимізація роботи персоналу.

Результати дослідження апробовані в рамках виконання міждисциплінарного курсового проєкту, презентовані на засіданнях кафедри та оформлені у вигляді презентаційних матеріалів і моделей у середовищі Simulink. Отримані висновки можуть бути впроваджені в практичну діяльність ГЗК без суттєвих змін в інфраструктурі, що робить цю роботу актуальною не лише з технічної, але й з прикладної точки зору.



# 1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

## 1.1 Аналіз предметної області

Процес транспортування гірничої маси – один із ключових компонентів виробничого ланцюга на підприємствах гірничо-збагачувального профілю. Його ефективність безпосередньо впливає на загальний технологічний ритм підприємства, витрати на енергозабезпечення, рівень експлуатаційної безпеки та надійність функціонування обладнання. Особливої актуальності ці питання набувають у контексті модернізації промислових об'єктів, де транспортна інфраструктура базується на складних циклічно-поточних схемах з багаторівневою організацією потоків.

У сучасних умовах економічної нестабільності та енергетичних викликів автоматизація процесів транспортування стає ключовим напрямом зменшення витрат та підвищення операційної гнучкості. Це зумовлює посилений інтерес до глибокого аналізу стану управління транспортними системами, зокрема у підземних умовах, які мають специфічні технічні обмеження. Одним з таких об'єктів є ділянка горизонту -300 м на ПрАТ "ІНГЗК", де функціонує тракт "Східний-2" - складна система конвеєрного транспорту.

На основі проведеного аналізу (описаного нижче) можна зробити висновок, що актуальною є розробка адаптивної системи керування для стрічкових конвеєрів, яка поєднує математичне моделювання, SCADA-візуалізацію, автоматичне коригування режимів роботи в залежності від навантаження та враховує інерційні та часові фактори. Така система має бути гнучкою, стійкою до збурень та інтегрованою в наявну інфраструктуру підприємства. Розв'язання саме цієї задачі обрано як предмет магістерської кваліфікаційної роботи.

## 1.2 Аналіз рівня автоматизації на об'єкті дослідження

ПрАТ «ІНГЗК» є одним з провідних підприємств України у галузі гірничо-збагачувального виробництва. Його виробнича інфраструктура включає значну кількість технологічних об'єктів, у тому числі потужну транспортну систему для переміщення гірничої маси з підземних горизонтів. Однією з таких ділянок є тракт «Східний-2» горизонту -300 м, що об'єднує стрічкові конвеєри, живильники, приймальні бункери, засоби навантаження та розвантаження (рис. 1.1).

До складу тракт «Східний-2» входять:

- корпус дроблення крупнозернистого обрізу висотою 300 м, обладнаний конусною дробаркою ККД-1500/180 МДШ;
- стрічковий конвеєр 6Б, горизонт -300м;
- стрічковий конвеєр 6А, горизонт -300 м;
- вузол перекачування ПУ2 (-240м) з конвеєра 6А на існуючі конвеєри К-1Б (-180м) або К-2Б (-240м);

– пластинчасті живильники конусної дробарки 1500/180 GRSCН - ПП (-300м) 2 шт.

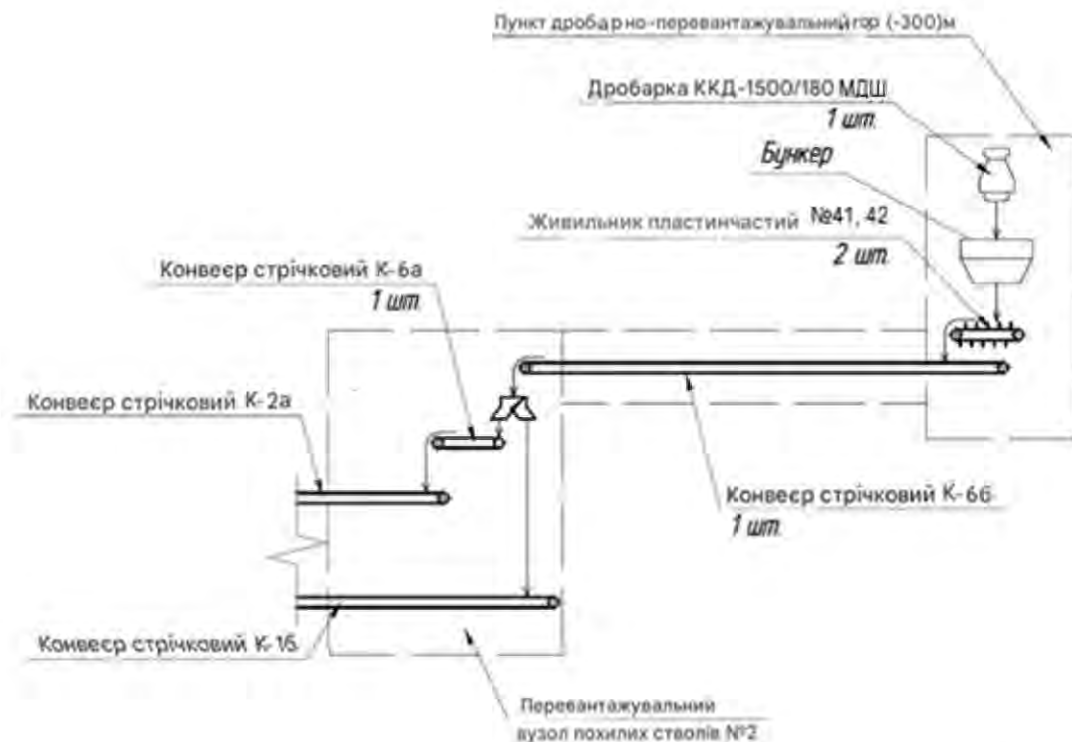


Рисунок 1.1 – Схематичне зображення тракту «Східний-2»

На даний момент тракт «Східний-2» автоматизований частково. Основні функції запуску, зупинки, візуального контролю параметрів та діагностики виконуються операторами через локальні панелі керування. Деякі конвеєри обладнані частотними перетворювачами, однак їх використання не є централізовано інтегрованим. Контроль за навантаженням здійснюється візуально або з використанням аналогових сигналів від датчиків струму, без подальшої обробки даних чи побудови алгоритмів адаптивного регулювання.

Інформаційна складова системи управління обмежена: немає централізованої SCADA-системи, немає історичної архівації даних, відсутні засоби аналітики, що дозволяють виявляти тенденції у роботі обладнання чи прогнозувати аварії. Через це персонал змушений діяти реактивно – реагувати на збої постфактум, а не запобігати їм заздалегідь.

Комунікаційна інфраструктура застаріла, що ускладнює інтеграцію новітніх інтелектуальних модулів, а також впровадження систем диспетчерського контролю з віддаленим доступом. Через відсутність єдиної цифрової платформи неможливо централізовано відстежувати ключові технологічні параметри (швидкість стрічки, завантаження, вібрації, температура приводу тощо).

Незважаючи на це, потенціал об'єкта для модернізації – високий. Вже наявні елементи автоматизації можуть бути об'єднані у єдину

систему з використанням сучасного ПЛК, SCADA-серверів і відповідного програмного забезпечення. Можливе розгортання цифрової системи моніторингу на основі датчиків струму, температури, вібрації, кутів нахилу тощо. Таким чином, створюються передумови для переходу до гнучкої адаптивної системи керування транспортним трактом, яка відповідатиме сучасним вимогам цифрового виробництва.

### 1.3 Технологічний процес циклічно-поточної технології транспортування гірничої маси

Технологічний процес подавання та подрібнення рудної сировини на дробильній фабриці ПрАТ «ІнГЗК» здійснюється у чотири послідовні стадії, кожна з яких забезпечує поетапне зменшення крупності матеріалу відповідно до вимог технологічного регламенту.

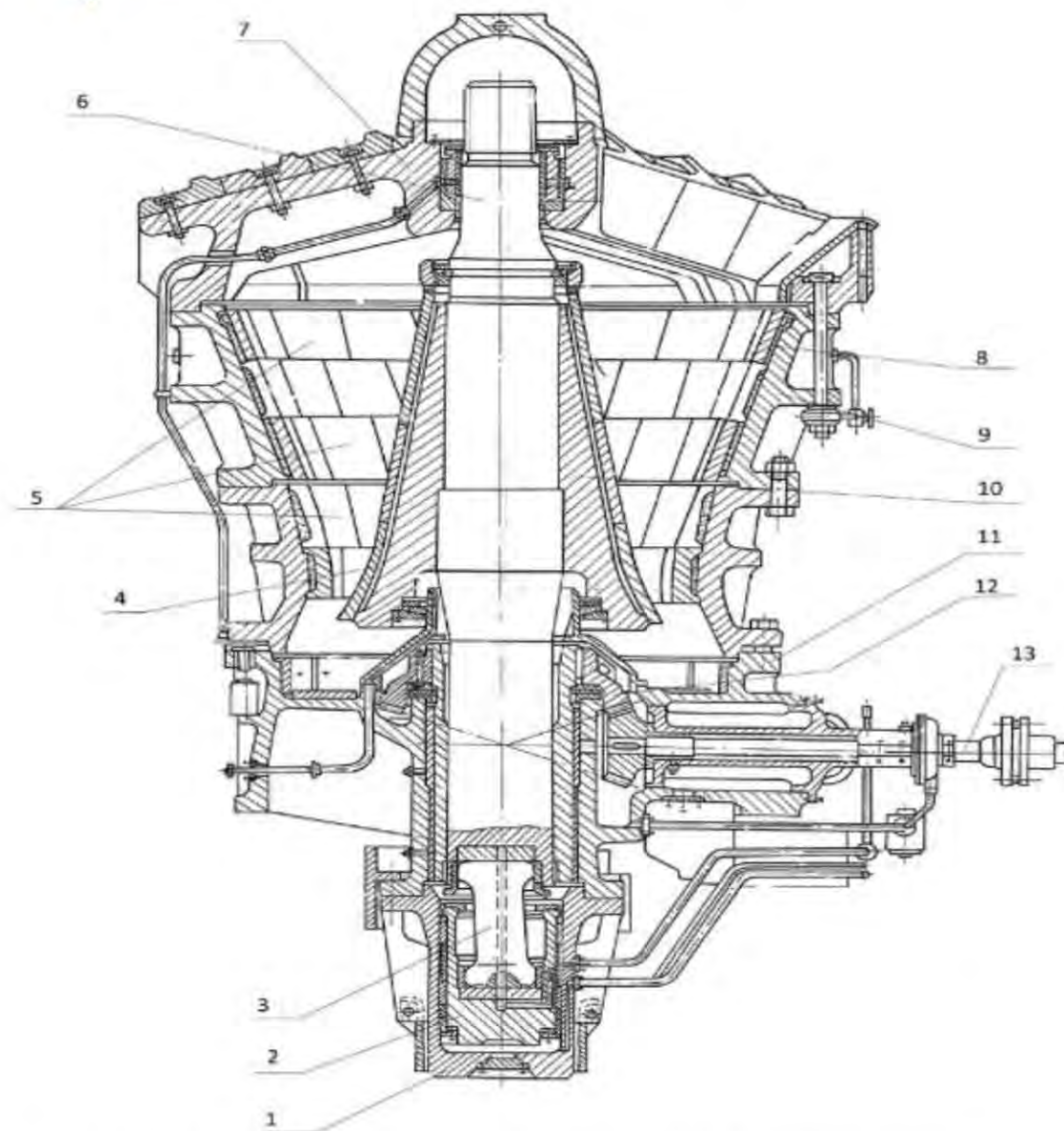
Першим елементом технологічного тракту є конусна дробарка типу ККД-1500/180 ГРЦ (№ 7) (рис. 1.2), яка використовується на першій стадії подрібнення. Дробарка забезпечує приймання рудної сировини з максимальною крупністю до 1200 мм та її подрібнення до фракції мінус 400 мм за умови встановлення робочої щілини в межах 165-180 мм. Номінальна продуктивність агрегату становить 1450 м<sup>3</sup>/год, а встановлена потужність електроприводу – 315/500 кВт.

Після подрібнення в дробарці рудна маса не транспортується на конвеєр у самопливному режимі, а тимчасово накопичується в приймальній зоні, звідки здійснюється її примусова подача за допомогою двох пластинчастих живильників №41 та №42.

Основні технічні характеристики магістральних і перевантажувальних стрічкових конвеєрів, задіяних у складі технологічного тракту, наведено в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Технічні характеристики конвеєрів

Позначення конвеєру	Продуктивність, т/год	Ширина стрічки, мм	Довжина по горизонталі, м	Швидкість руху стрічки, м/с	Потужність приводу, кВт	Місце встановлення
Конвеєр № 6Б	3500	1600	579,08	2,5	3x800	Похилий ствол «Східний»
Конвеєр № 1Б	3359	1600	573,504	2,5	3x800	Похилий ствол «Східний»
Конвеєр № 2Б	3500	1600	573,504	2,5	3x800	Похилий ствол «Східний»
Конвеєр № 6А	3359	1600	31	2,5	75	Перевантажувальний вузол №2



1-Циліндр гідравлічний, 2-Поршень, 3-Опорний вал, 4-Броня дробильного конуса, 5-Сегменти броні дробильної чаші, 6-Вал дробильного конуса, 7-Траверза, 8-Броня дробильної чаші, 9-Дробильна чаша 11-Станіна, 12-Ексцентрик, 13-Вал приводний.

Рисунок 1.2 – Дробарка ККД-1500/180 МДШ

Швидкість руху зазначених пластинчастих живильників є визначальним керувальним параметром у межах усього технологічного тракту, оскільки саме вона безпосередньо забезпечує формування рівномірного вантажопотоку (т/год) на два послідовно з'єднані магістральні конвеєри, а саме:

- конвеєр К-6Б – основний магістральний стрічковий транспортер довжиною 602,5 м, розрахований на продуктивність 3359 т/год (табл. 1.1), із шириною стрічки 1600 мм та робочою швидкістю 2,35 м/с;

- конвеєр К-6А довжиною 30,2 м – перевантажувальний конвеєр, що приймає матеріальний потік з конвеєра К-6Б та передає його на вузол ПУ2

(далі – на конвеєри К-2Б/К-1Б). Конвеєр має аналогічну пропускну здатність, проте працює з підвищеною швидкістю стрічки 2,6 м/с, що забезпечує ефективне перевантаження матеріалу.

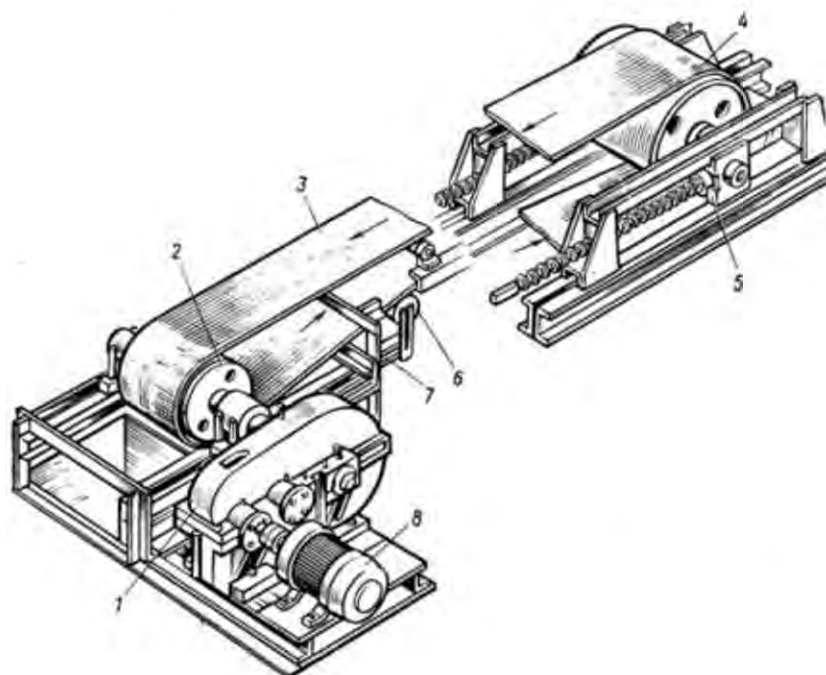


Рисунок 1.3 – Стрічковий конвеєр

Зазначена сукупність обладнання, до складу якого входять дробарка, пластинчасті живильники №41 і №42, перевантажувальний вузол ПЗ-2, а також конвеєри К-6Б і К-6А, утворює єдиний технологічний комплекс, параметри якого відповідають проектним характеристикам технологічного тракту (табл. 1.1), призначений для приймання, подрібнення та подальшої видачі гірничої маси з горизонту –300 м.

Увесь технологічний ланцюг у складі живильників, конвеєрів К-6Б, К-6А та К-2Б/К-1Б потребує реалізації регламентованого алгоритму пуску та зупинки з метою запобігання накопиченню і завалам рудної маси у перевантажувальних вузлах. Система автоматизації повинна забезпечувати пуск обладнання за принципом «від хвоста до голови», за якого останній за ходом матеріалу конвеєр вводиться в роботу першим, а також зупинку за принципом «від голови до хвоста», при якій першочергово вимикаються живильники (рис. 1.4).

На другій стадії подрібнення (середнє дроблення)(рис.1.5) здійснюється приймання рудної маси з максимальною крупністю до 400 мм у дробарки типу КРД-700/100, у яких матеріал подрібнюється до фракції мінус 250 мм за умови встановлення робочої щілини в межах 70–100 мм.

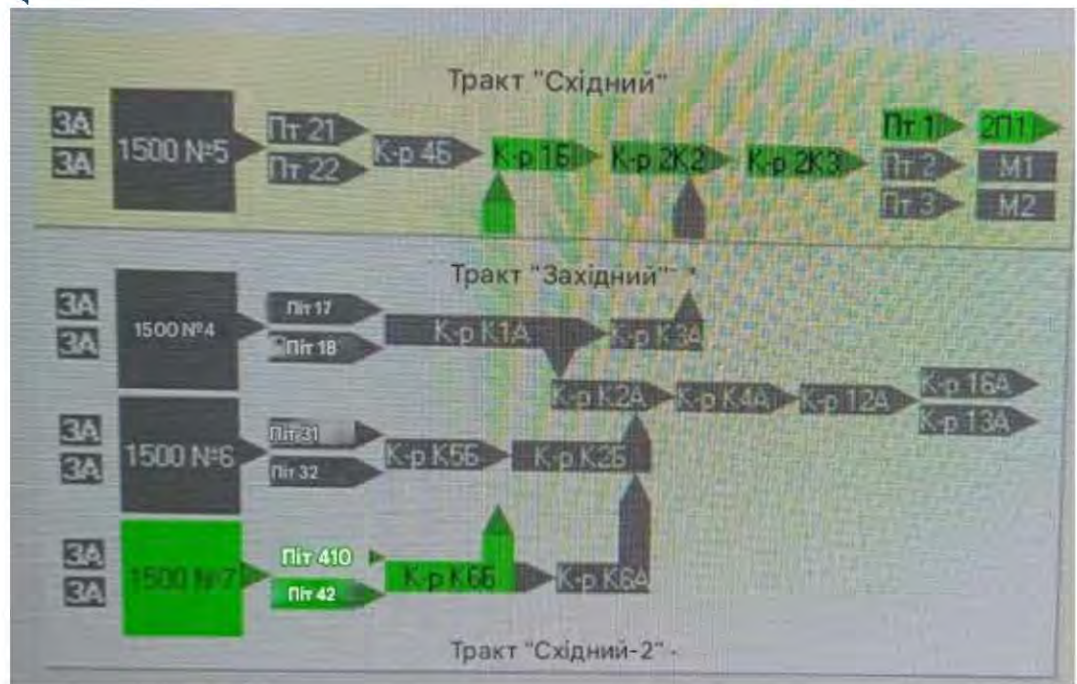


Рисунок 1.4 – Фото «Мнемосхеми» подачі руди через Тракт «Східний-2»

Третя стадія подрібнення передбачає подавання руди до дробарок типу КСД-2200/400Т з робочою щілиною 15–30 мм, де забезпечується зменшення крупності матеріалу до фракції мінус 100 мм. Характерною особливістю даного етапу є відокремлення готового класу крупністю мінус 20 мм за допомогою інерційних грохотів ГІТ-51 та ГІТ-52. Частка відсіяного готового продукту становить близько 30 % загальної маси та безпосередньо спрямовується на рудозбагачувальну фабрику (РЗФ).

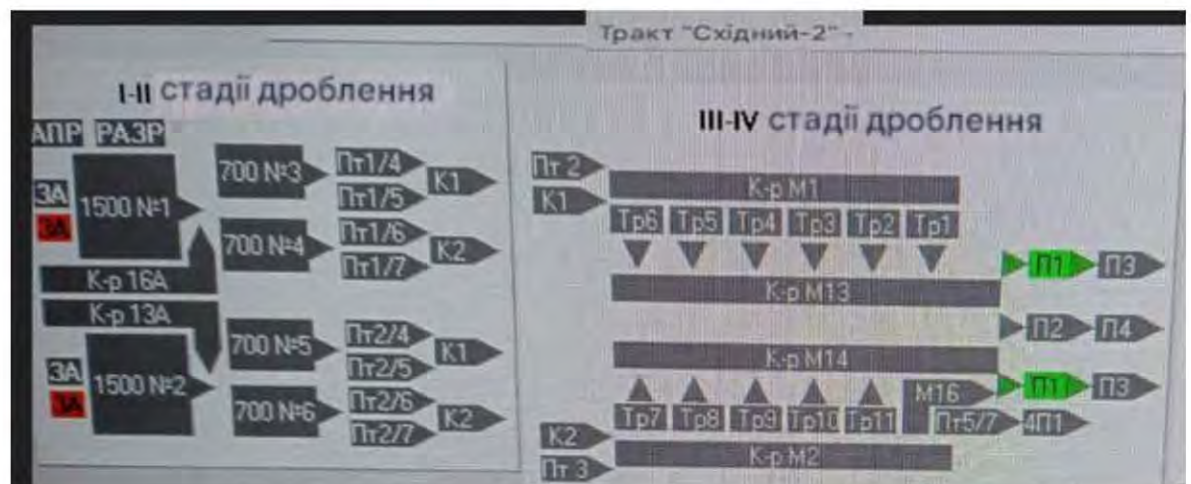



Рисунок 1.5 – Фото узагальненої мнемосхеми дроблення (I–IV стадії)

На четвертій стадії подрібнення здійснюється додаткове дроблення залишкового матеріалу в дробарках типу КМД-2200/600Т з робочою



щільною 5–15 мм, у результаті чого формується кінцева фракція мінус 20 мм за умови, що вміст класу понад 20 мм не перевищує 11%. Отриманий продукт змішується з готовою фракцією, відібраною на третій стадії подрібнення, та спрямовується на подальше збагачення.

Основним принципом функціонування технологічної схеми є послідовне зменшення крупності рудної маси на кожному етапі обробки. Для забезпечення стабільної та ефективної роботи комплексу необхідними є оптимізація навантаження та узгоджена синхронізація роботи обладнання, які на теперішній час частково реалізуються в ручному режимі, що негативно впливає на загальну ефективність процесу. Запропонована модернізація автоматизованої системи управління технологічним процесом (АСУ ТП) дасть змогу забезпечити безперервність технологічного циклу, а також здійснювати оперативний контроль продуктивності та енергоспоживання в режимі реального часу.

#### 1.4 Аналіз стану автоматизації на аналогічних об'єктах


Вивчення досвіду впровадження автоматизованих систем управління транспортом гірничої маси на вітчизняних та зарубіжних підприємствах дозволяє виявити ефективні підходи до модернізації подібних об'єктів. У багатьох країнах світу, зокрема Австралії, Канаді, Чилі, Німеччині та Китаї, процес автоматизації транспортних систем в гірничій промисловості розглядається як невід'ємна складова цифрової трансформації всього виробництва.

На прикладі компанії Rio Tinto (Австралія) [1] слід відзначити широке впровадження систем Smart Mine, що базуються на використанні SCADA, AI та автономних транспортних засобів. Основу подібних рішень складає ієрархічна система управління, яка інтегрує інформацію з сенсорних пристроїв у режимі реального часу та забезпечує оптимізацію роботи транспортних систем за допомогою предиктивної аналітики.

Німецький досвід представлений технологіями компаній Siemens [2, 3] та Rulmeca [4 - 6], які спеціалізуються на створенні модульних систем автоматизації з можливістю віддаленого моніторингу та адаптивного керування швидкістю стрічки. Зокрема, впровадження частотно-регульованих приводів із вбудованою логікою дозволяє здійснювати регулювання на основі поточного навантаження, що підвищує енергоефективність і знижує знос елементів стрічки.

У Китаї активно розвиваються цифрові платформи на основі 5G та IoT. Компанія Sany [9 - 11] використовує інтелектуальні системи моніторингу стану конвеєрів, які передають дані на хмарні сервери для подальшого аналізу та формування команд для ПЛК. Перевагою цього підходу є масштабованість та можливість гнучкої адаптації до змін у виробничому навантаженні.

Українські гірничо-збагачувальні комбінати також впроваджують елементи автоматизації, хоча переважно на рівні модернізації приводів або оновлення локальних систем керування. Наприклад, на Південному



ГЗК реалізовано систему керування конвеєрним транспортом на основі ПЛК Siemens з базовою SCADA-візуалізацією. Втім, більшість таких рішень залишаються фрагментарними і не охоплюють повного циклу збору, обробки та використання даних для адаптивного регулювання [12-15].

Серед спільних тенденцій, характерних для успішних проєктів автоматизації на аналогічних об'єктах, можна виокремити:

- повну інтеграцію SCADA/PLC систем із технологічним обладнанням;
- широке використання сенсорів для моніторингу параметрів роботи (вібрація, температура, навантаження);
- впровадження адаптивних алгоритмів управління на базі машинного навчання;
- підключення до хмарних платформ для обробки історичних даних;
- фокус на зменшенні споживання електроенергії та подовженні ресурсу обладнання.


Усі ці приклади демонструють можливість практичної реалізації повноцінної цифрової системи управління транспортом гірничої маси, яка відповідає вимогам сучасного виробництва. Однак для впровадження подібних рішень на українських підприємствах необхідна адаптація технологій до умов обмеженого фінансування, нестабільного енергозабезпечення та наявної інфраструктури. Ці виклики підкреслюють важливість розробки гнучких, економічно обґрунтованих рішень, які можуть бути реалізовані поетапно.

### 1.5 Огляд питання в літературі, статтях

Огляд науково-практичних джерел показує, що більшість сучасних досліджень у сфері гірничої автоматизації зосереджено на поєднанні технологій SCADA, штучного інтелекту та Інтернету речей.

У статті [7] представлено комплексний огляд автоматизації обладнання та операцій у гірничодобувній промисловості. На думку авторів, технологічний прогрес у цій галузі є вирішальним для підвищення ефективності, безпеки та сталості. Як свідчить проведений аналіз, впровадження автоматизованих систем транспортування, зокрема автоматизованих систем перевезення (AHS) у відкритих гірничих роботах, демонструє значні досягнення.

Уважається доцільним розглядати автоматизацію не лише як технічне оновлення, але й як комплексний процес, що вимагає уваги до інвестиційних витрат, трансформації ринку праці та необхідності перекваліфікації персоналу. Автори підкреслюють, що майбутні досягнення включатимуть ширше застосування машинного навчання (ML) та штучного інтелекту (AI) для створення інтелектуальних систем автоматизації та повністю автономних комплексів. Однак, як зазначають дослідники, у підземних гірничих роботах існують значні виклики щодо



впровадження автоматизації, пов'язані з обмеженнями зв'язку та системами локалізації.

Стаття охоплює технічний розвиток, аспекти АСУТП через розгляд систем автоматизації, а також економічні наслідки у вигляді інвестиційних витрат.

У статті [8] розглядається питання підвищення ефективності конвеєрної системи в автоматизованому виробничому середовищі за допомогою модельного підходу. На думку авторів, оптимізація конвеєрних систем є ключовою для підвищення загальної продуктивності та надійності автоматизованих виробничих процесів.


Уважається доцільним використовувати математичне моделювання та симуляцію, зокрема за допомогою програмного забезпечення MATLAB, для прогнозування довгострокових перспектив виробничого процесу. Як свідчить проведений аналіз, цей підхід дозволяє ідентифікувати оптимальні параметри та методи роботи, що веде до підвищення продуктивності конвеєрної системи в автоматизованому середовищі. Автори наводять конкретні формули розрахунку для параметрів стрічкового конвеєра, таких як потужність та прискорення стрічки, що є важливим для точного моделювання та оптимізації.

Хоча стаття зосереджена на автоматизованому виробничому середовищі, а не конкретно на гірничій галузі, застосовані математичні моделі та підходи до оптимізації ефективності конвеєрів є універсальними і можуть бути адаптовані для використання в гірничодобувній промисловості. Як свідчить проведений аналіз, впровадження таких модельних підходів потенційно може призвести до значного економічного ефекту за рахунок оптимізації споживання енергії, зменшення зносу обладнання та підвищення загальної пропускної здатності.

У статті [16, 24, 25] розглядається підхід до створення автоматичної системи керування електричними приводами для шахтних стрічкових конвеєрів. На думку авторів, сучасні вимоги до ефективності та безпеки гірничих робіт зумовлюють необхідність впровадження передових систем автоматизації.

Вважається доцільним інтегрувати систему управління приводом конвеєра з існуючими промисловими та інформаційними системами, що дозволяє оптимізувати роботу всього комплексу. Для цього в роботі розроблено математичну модель автоматизованого електричного привода, яка враховує динамічні характеристики конвеєра та електричної частини. Як свідчить проведений аналіз, використання такої моделі дозволяє імітувати роботу системи в різних режимах та розробляти ефективні алгоритми управління. Автори наводять результати симуляції, які підтверджують ефективність запропонованих рішень для підвищення стабільності роботи та зменшення навантажень на механізми.

Авторами [20, 21] розглянуто концепцію "Піраміди автоматизації в гірничій справі", що є фундаментальною для інтеграції сучасних технологій у гірничих операціях. Як свідчить проведений аналіз, цей



комплексний підхід, який охоплює всі рівні – від польових пристроїв до систем планування підприємства – є вирішальним для досягнення максимальної ефективності та безпеки.

На думку авторів, системи SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) відіграють центральну роль у моніторингу та контролі конвеєрних стрічок. Вважається доцільним використання SCADA для відстеження швидкості конвеєрних стрічок, моніторингу якості руди в реальному часі та аналізу історичних даних. Це дозволяє гірничодобувним підприємствам ухвалювати швидші та більш обґрунтовані рішення. Завдяки інтеграції з передовими аналітичними інструментами, системи SCADA можуть прогнозувати результати процесів та пропонувати покращення, що значно підвищує операційну ефективність.


У статті [22] розглядається застосування десяти ключових технологій Інтернету речей (IoT) для підвищення сталості та ефективності у гірничій промисловості. На думку авторів, впровадження IoT-рішень є невід'ємною частиною модернізації та оптимізації процесів видобутку. Особливу увагу приділено ролі IoT у моніторингу конвеєрних систем.

Вважається доцільним використовувати такі технології, як волоконно-оптичні кабелі, акустичні датчики та системи Рейліївського зворотного розсіювання, для моніторингу стану конвеєрних стрічок. Як свідчить проведений аналіз, ці сенсори дозволяють виявляти критичні проблеми, такі як неспіввісність, поломки підшипників та перегрів, що є надзвичайно важливим для забезпечення ефективного транспортування мінералів. Завдяки IoT, дані з конвеєрів можуть бути зібрані та проаналізовані в реальному часі, сприяючи предиктивному технічному обслуговуванню.

Застосування IoT-технологій у конвеєрному транспорті гірничої галузі призводить до значного підвищення операційної ефективності та зменшення незапланованих простоїв. Це, у свою чергу, прямо впливає на зниження експлуатаційних витрат та сприяє досягненню цілей сталої гірничої промисловості.

У статті [24] представлено інноваційне AI-кероване рішення "DataMind AI" для предиктивного технічного обслуговування в гірничодобувній промисловості. На думку авторів, ця платформа є всеосяжним інструментом, що дозволяє суттєво підвищити надійність обладнання та ефективність операцій.

Вважається доцільним інтегрувати дані сенсорів з гірничого обладнання та використовувати нейронні мережі для виявлення прихованих несправностей та прогнозування відмов. Як свідчить проведений аналіз, це дозволяє операторам передбачати та запобігати дорогавартісним поломкам, що призводить до усунення незапланованих простоїв, збільшення продуктивності та підвищення безпеки. У статті наведено конкретний приклад впровадження: на австралійській вугільній



шахті система DataMind AI виявила проблему з підшипником двигуна конвеєра, що дозволило провести проактивне технічне обслуговування.

Як свідчить проведений аналіз, завдяки цьому вдалося уникнути незапланованих зупинок, продовжити термін служби обладнання та зменшити витрати на технічне обслуговування. Автори підкреслюють, що комплексне предиктивне технічне обслуговування може призвести до скорочення витрат на обслуговування до 30%. Крім того, рішення використовує технологію цифрових двійників, що покращує моделювання та аналіз. Таким чином, стаття демонструє значний економічний ефект та успішне впровадження передових AI-рішень у гірничій галузі.


У статті [26] представлено десять ключових переваг впровадження предиктивного технічного обслуговування для бізнесу. На думку авторів, перехід від реактивного або планового обслуговування до предиктивного є стратегічним кроком, який може кардинально трансформувати операційну ефективність будь-якого підприємства, зокрема в гірничій галузі.

Вважається доцільним інвестувати в предиктивне технічне обслуговування, оскільки, як свідчить проведений аналіз, це дозволяє значно зменшити час простою обладнання (до 35–50%). Крім того, впровадження таких підходів сприяє збільшенню терміну служби активів на 20–40%, що веде до прямої економії на заміні обладнання. Автори також наголошують на зниженні загальних витрат на обслуговування, підвищенні безпеки працівників, покращенні якості продукції, оптимізації управління запасами та матеріалами, а також вдосконаленню планування робочої сили.

Проведений аналіз показує, що, незважаючи на наявність окремих технічних засобів автоматизації на транспортному тракті «Східний-2» горизонту –300 м ПрАТ «ІНГЗК», потенціал сучасних частотних перетворювачів у керуванні стрічковими конвеєрами використовується неповною мірою. Наявні частотно-керовані приводи функціонують переважно в локальному режимі та не задіяні як активний елемент регулювання технологічного процесу в цілому.

На практиці керування швидкістю стрічки не пов'язане з реальним навантаженням на конвеєр, динамікою зміни потоку гірничої маси та енергетичними характеристиками приводу. Частотні перетворювачі застосовуються переважно для пуско-гальмівних режимів, без реалізації алгоритмів плавної адаптації швидкості, що призводить до перевитрат електроенергії, підвищених механічних навантажень та зростання зносу стрічки й приводних вузлів.

Аналіз літературних джерел та досвіду аналогічних об'єктів свідчить, що ефективне використання частотних перетворювачів можливе лише за умови їх інтеграції в єдину систему автоматизованого керування з централізованим збором технологічних параметрів, математичним описом динаміки конвеєра та формуванням керуючих впливів у режимі реального часу. Водночас для умов діючого підземного виробництва



відсутні адаптовані рішення, які поєднували б такі підходи з можливостями існуючої інфраструктури без радикальної заміни обладнання.

Таким чином, невирішеною залишається задача розробки та дослідження системи керування стрічковими конвеєрами на базі частотних перетворювачів, у якій регулювання швидкості руху стрічки здійснюється залежно від навантаження, інерційних властивостей транспортного тракту та змінних умов експлуатації.



## 2 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТА ОБГРУНТУВАННЯ СТРУКТУРИ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТА СИГНАЛІЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

2.1 Загальні підходи до автоматизації технологічного процесу транспортування гірничої маси

Технологічний процес транспортування гірничої маси на горизонті –300 м тракту «Східний-2» є складною багатокомпонентною системою, функціонування якої визначається взаємодією дробарного обладнання, живильників та стрічкових конвеєрів. Процес характеризується значною кількістю змінних параметрів, що залежать як від режимів роботи обладнання, так і від властивостей транспортуємого матеріалу – його маси, фракційного складу, вологості та нерівномірності надходження.

Особливістю стрічкового транспорту є виражена динамічність: зміна навантаження в одному вузлі призводить до перерозподілу режимів роботи по всьому транспортному тракту. За таких умов традиційні схеми керування, орієнтовані на ручне або напівавтоматичне управління, не забезпечують стабільності технологічного процесу та раціонального використання енергоресурсів.

У зв'язку з цим автоматизація процесу транспортування гірничої маси повинна базуватися на принципах безперервного контролю технологічних параметрів, адаптивного регулювання режимів роботи та централізованої координації роботи обладнання. Особливу роль у реалізації цих принципів відіграє застосування частотно-керованих електроприводів, які дозволяють гнучко змінювати швидкість стрічкових конвеєрів залежно від поточного навантаження та умов експлуатації.

### 2.2 Технологічний процес як об'єкт управління

Для детального вивчення динамічних властивостей об'єкта та визначення специфіки його автоматизації було побудовано структурну схему «Технологічний процес як об'єкт управління» (див. рис.2.1, креслення АВЕРС.1НА.МКП-14355273.ОУ-ТП та рисунок у Додатку А). Технологічний процес переміщення гірничої маси стрічковим конвеєром розглядається як складна динамічна система, робота якої залежить від широкого спектра змінних параметрів, серед яких присутні як керовані, так і зовнішні збурення. Основним елементом, що підлягає автоматизованому управлінню, є стрічковий конвеєр, який забезпечує безперервне транспортування корисної копалини між виробничими горизонтами гірничого підприємства.

У структурі системи керування можна виокремити такі основні керуючі дії:

- регулювання частоти обертання привідного барабана;
- підтримання необхідного натягу стрічки;

- коригування кута нахилу конвеєра (за умов, коли цей параметр може змінюватися);
- дозування мастильних матеріалів до вузлів тертя.

#### Технологічний процес як об'єкт управління

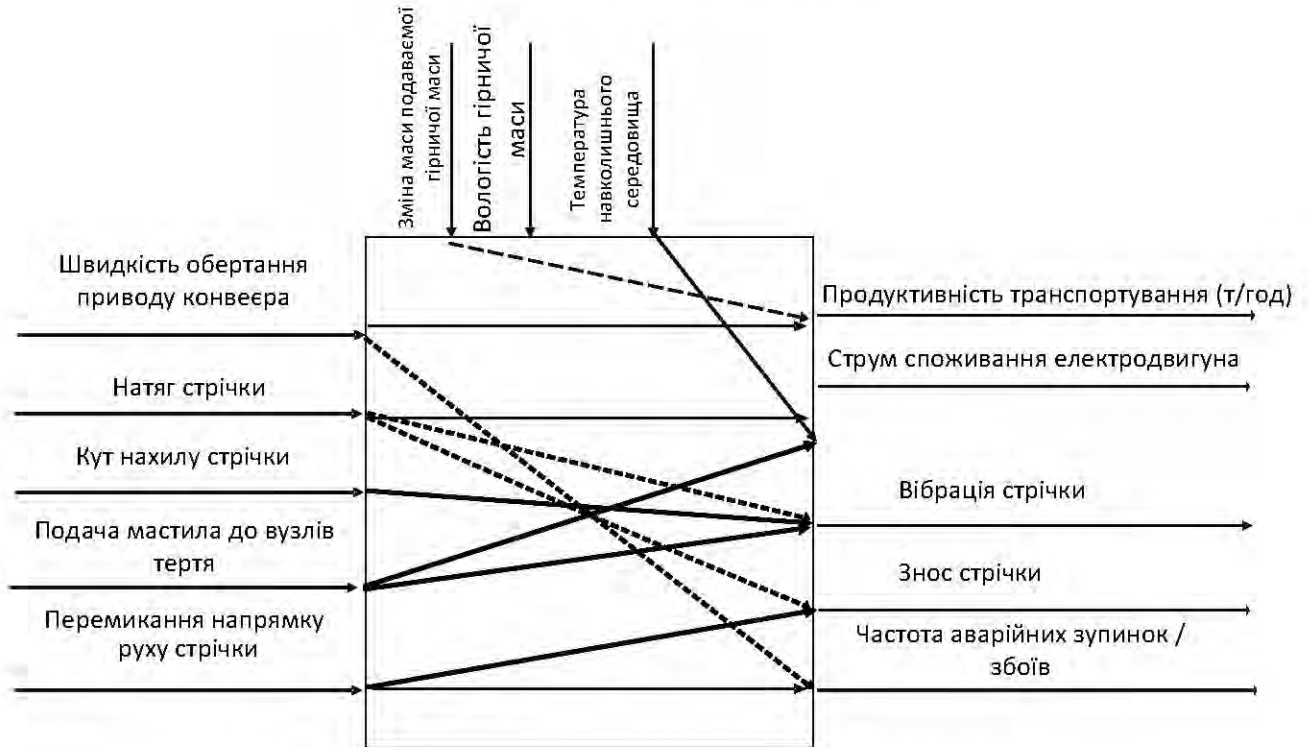


Рисунок 2.1 – Технологічний процес як об'єкт управління

Завдяки впливу на ці параметри можливе адаптивне керування робочими режимами конвеєра з метою стабілізації продуктивності, зменшення енергоспоживання та зниження інтенсивності зношування основних елементів приводу та стрічки.


Під час експлуатації стрічковий конвеєр зазнає дії низки некерованих факторів, серед яких [30]:

- зміни маси та гранулометричного складу вантажу;
- коливання вологості транспортуємого матеріалу;
- температурні зміни у виробничому середовищі;
- підвищена запиленість у зоні роботи обладнання.

Ці чинники не піддаються прямому регулюванню, однак вони значною мірою визначають реальні навантаження на систему та, відповідно, потребують впровадження компенсуючих алгоритмів у контурах автоматичного керування.

Серед вихідних контрольованих параметрів, що характеризують якість роботи конвеєра, виділяють:

- фактичну продуктивність (т/год);
- величину струму, що споживається електроприводами;
- рівень вібрації приводного обладнання та роликкоопор;

- 
- температуру окремих конструктивних вузлів;
  - ступінь зношування стрічки;
  - частоту аварійних відмов та позапланових зупинок.

Окреме значення має контроль швидкості зміни продуктивності (градієнта навантаження), адже різкі зміни в потоці матеріалу можуть створювати надлишкові динамічні навантаження на привід та стрічку. Такі стани ведуть до прискореного зносу елементів та підвищують імовірність аварійних зупинок. Гранично допустимі значення градієнтів визначаються технологічними нормативами або експериментальними дослідженнями, у тому числі шляхом аналізу параметрів потоку в режимі реального часу.

Отже, процес транспортування гірничої маси стрічковим конвеєром є складною багатопараметричною системою з вираженими нелінійностями та часовими затримками, що обґрунтовує застосування адаптивних або інтелектуальних методів автоматичного керування.

### 2.3 Постановка основних задач автоматизації


Постановка задач автоматизації для технологічного процесу транспортування гірничої маси стрічковими конвеєрами тракту «Східний-2» ґрунтується на результатах аналізу об'єкта управління, умов експлуатації обладнання та вимог до надійності, безпеки й енергоефективності процесу. Особливістю даного об'єкта є змінний характер навантаження, значна протяжність транспортного тракту та наявність інерційних і запізнювальних ланок, що ускладнює реалізацію стабільних режимів роботи без застосування автоматизованих засобів керування.

З урахуванням зазначених факторів автоматизована система керування повинна забезпечувати не лише підтримання заданих технологічних параметрів, але й адаптацію режимів роботи обладнання до поточних умов транспортування. Це зумовлює необхідність формування комплексу взаємопов'язаних задач керування, моніторингу, сигналізації та захисту, які реалізуються на різних рівнях автоматизації.

#### 2.3.1 Задачі керування

Задачі керування є базовими для функціонування АСУ ТП та спрямовані на забезпечення стабільної та ефективної роботи конвеєрного транспорту. Основною задачею керування є підтримання продуктивності конвеєрної лінії у заданому діапазоні шляхом регулювання швидкості руху стрічки. Регулювання здійснюється з урахуванням фактичного навантаження на конвеєр, що дозволяє уникати як перевантажень обладнання, так і нераціональних режимів роботи з підвищеним енергоспоживанням.

Важливою задачею є адаптивне керування швидкісними режимами конвеєрів при зміні властивостей гірничої маси, зокрема маси, фракційного складу та вологості матеріалу. Реалізація цієї задачі передбачає використання частотно-керованих електроприводів, які



забезпечують плавну зміну швидкості та можливість оперативного коригування режимів роботи без зупинки технологічного процесу.

Окрему групу задач керування становить координація роботи дробарки, живильників та стрічкових конвеєрів як єдиного технологічного комплексу. Узгодження режимів роботи цих агрегатів дозволяє забезпечити рівномірне надходження матеріалу на конвеєрну лінію та зменшити динамічні навантаження на приводи. Крім того, у межах задач керування передбачається оптимізація енергоспоживання електроприводів за рахунок вибору раціональних швидкісних режимів і зниження пікових навантажень.

### 2.3.2 Задачі моніторингу

Задачі моніторингу забезпечують інформаційну підтримку процесів керування та є основою для формування керуючих впливів. У межах автоматизованої системи передбачається безперервний контроль основних технологічних параметрів, зокрема струмів електроприводів, швидкості руху стрічки, навантаження на конвеєр, температури підшипникових вузлів і редукторів, а також рівня вібрації приводного обладнання.


Отримані в процесі моніторингу дані використовуються для оцінювання поточного технічного стану обладнання та виявлення перед аварійних режимів. Аналіз динаміки параметрів дозволяє своєчасно виявляти тенденції до перевантаження або зносу елементів конвеєрної лінії, що створює передумови для переходу від реактивного до прогнозного технічного обслуговування.

Крім того, система моніторингу забезпечує накопичення статистичних даних, необхідних для подальшого аналізу ефективності роботи АСУ ТП та розрахунку техніко-економічних показників.

### 2.3.3 Задачі сигналізації та захисту

Задачі сигналізації та захисту спрямовані на забезпечення безпечної експлуатації технологічного обладнання та мінімізацію наслідків аварійних ситуацій. Система повинна забезпечувати своєчасне інформування оператора про відхилення технологічних параметрів від допустимих значень, а також автоматичне формування попереджувальних і аварійних сигналів.

У межах задач захисту реалізуються програмні та апаратні блокування, які запобігають запуску обладнання в небезпечних умовах, а також забезпечують аварійну зупинку конвеєрів і дробарки при виникненні критичних режимів, таких як перевищення струму електроприводів, обрив стрічки або різке зростання навантаження.



## 2.4 Розподіл функціональних завдань за рівнями автоматизації

Вибір та обґрунтування структури автоматизованої системи керування здійснено на основі ієрархічного принципу, який передбачає розподіл функціональних задач між рівнями автоматизації відповідно до їх складності, часових вимог і функціонального призначення. Такий підхід дозволяє забезпечити масштабованість системи, підвищити її надійність та спростити процес експлуатації.

Нижній (польовий) рівень. Нижній рівень автоматизації забезпечує безпосередню взаємодію з технологічним обладнанням і реалізацію задач реального часу. На цьому рівні здійснюється опитування модулів вводу/виводу, фільтрація та масштабування сигналів від первинних датчиків, а також формування бази даних контролерів. Ключовою функціональною задачею нижнього рівня є регулювання швидкості стрічкових конвеєрів залежно від навантаження шляхом керування частотними перетворювачами електроприводів.

Крім того, на нижньому рівні реалізуються задачі звукової та світлової сигналізації, а також блокування, спрямовані на запобігання аварійним режимам роботи обладнання.

Керуючий (середній) рівень. Середній рівень автоматизації виконує функції координації роботи технологічного комплексу в цілому. На цьому рівні реалізуються алгоритми керування транспортним трактом, здійснюється запуск і зупинка дробарки, обробка аварійних ситуацій та формування керуючих впливів для нижнього рівня.

Важливим завданням середнього рівня є реалізація математичних моделей та алгоритмів оптимізації енергоспоживання, які на основі даних моніторингу дозволяють коригувати режими роботи конвеєрів з урахуванням поточних умов транспортування.

Інформаційний (верхній) рівень. Верхній рівень автоматизації забезпечує централізований моніторинг, візуалізацію та інформаційну підтримку персоналу. На цьому рівні реалізується відображення мнемосхем технологічного процесу, побудова графіків і діаграм параметрів, а також відображення поточного стану обладнання в реальному часі. Інформація верхнього рівня використовується оператором для контролю процесу та прийняття рішень у нештатних ситуаціях.

## 2.5 Взаємозв'язок функціональних завдань модернізованої автоматизованої системи керування

Модернізована автоматизована система керування технологічним процесом транспортування гірничої маси побудована за ієрархічним принципом і включає сукупність взаємопов'язаних функціональних підсистем, кожна з яких виконує визначене коло задач на відповідному рівні автоматизації. Взаємозв'язок функціональних завдань системи наведено на кресленні «Взаємозв'язок функціональних завдань» (див.




рис. 2.2, креслення АВЕРС.1623л.КРМ-14355273.ВФЗ графічної частини та рисунок в Додаток Б).

Основу системи становить підсистема нижнього (польового) рівня, яка забезпечує безпосередню взаємодію з технологічним обладнанням.

На цьому рівні реалізуються задачі опитування модулів вводу/виводу, фільтрації та масштабування первинних сигналів від датчиків навантаження, швидкості, температури та вібрації. На основі оброблених вимірjuвальних даних формується база даних контролерів, яка використовується для реалізації алгоритмів автоматичного регулювання. Ключовою функціональною задачею нижнього рівня є регулювання швидкості стрічкового конвеєра залежно від навантаження шляхом керування частотними перетворювачами електроприводів, а також керування основними параметрами дробарного обладнання. Додатково на цьому рівні реалізуються задачі звукової та світлової сигналізації, а також апаратні та програмні блокування, спрямовані на запобігання аварійним режимам роботи.

Функціональні завдання нижнього рівня логічно пов'язані з підсистемою керуючого (середнього) рівня, яка виконує задачі координації роботи всього транспортного тракту. На цьому рівні здійснюється запуск та зупинка дробарки, реалізація алгоритмів керування трактом у цілому, обробка аварійних ситуацій та формування керуючих впливів для нижнього рівня. Важливою функцією є реалізація математичних моделей та алгоритмів оптимізації енергоспоживання, які на основі інформації про поточний стан процесу формують коригувальні впливи на швидкісні режими конвеєрів. Таким чином, середній рівень забезпечує адаптивний характер керування та узгоджену роботу окремих технологічних вузлів.

Інформаційна підсистема верхнього рівня виконує функції централізованого моніторингу та інформаційної підтримки персоналу. На цьому рівні здійснюється візуалізація технологічного процесу у вигляді мнемосхем тракту в реальному часі, відображення поточного стану обладнання у вузлах, побудова графіків та діаграм технологічних параметрів, а також розрахунок і відображення поточного навантаження. Отримана інформація використовується оператором для контролю процесу та прийняття рішень у нештатних ситуаціях, а також передається до підсистеми керування базами даних.

Підсистема керування базами даних забезпечує збір агрегованих даних з усіх рівнів автоматизації, їх обробку, збереження та архівацію. У межах цієї підсистеми формується журнал аварій і подій, ведеться поточна база даних технологічних параметрів та здійснюється копіювання інформації в архів. Наявність централізованого сховища даних створює основу для подальшого аналізу роботи системи, оцінювання надійності обладнання та формування техніко-економічних показників.

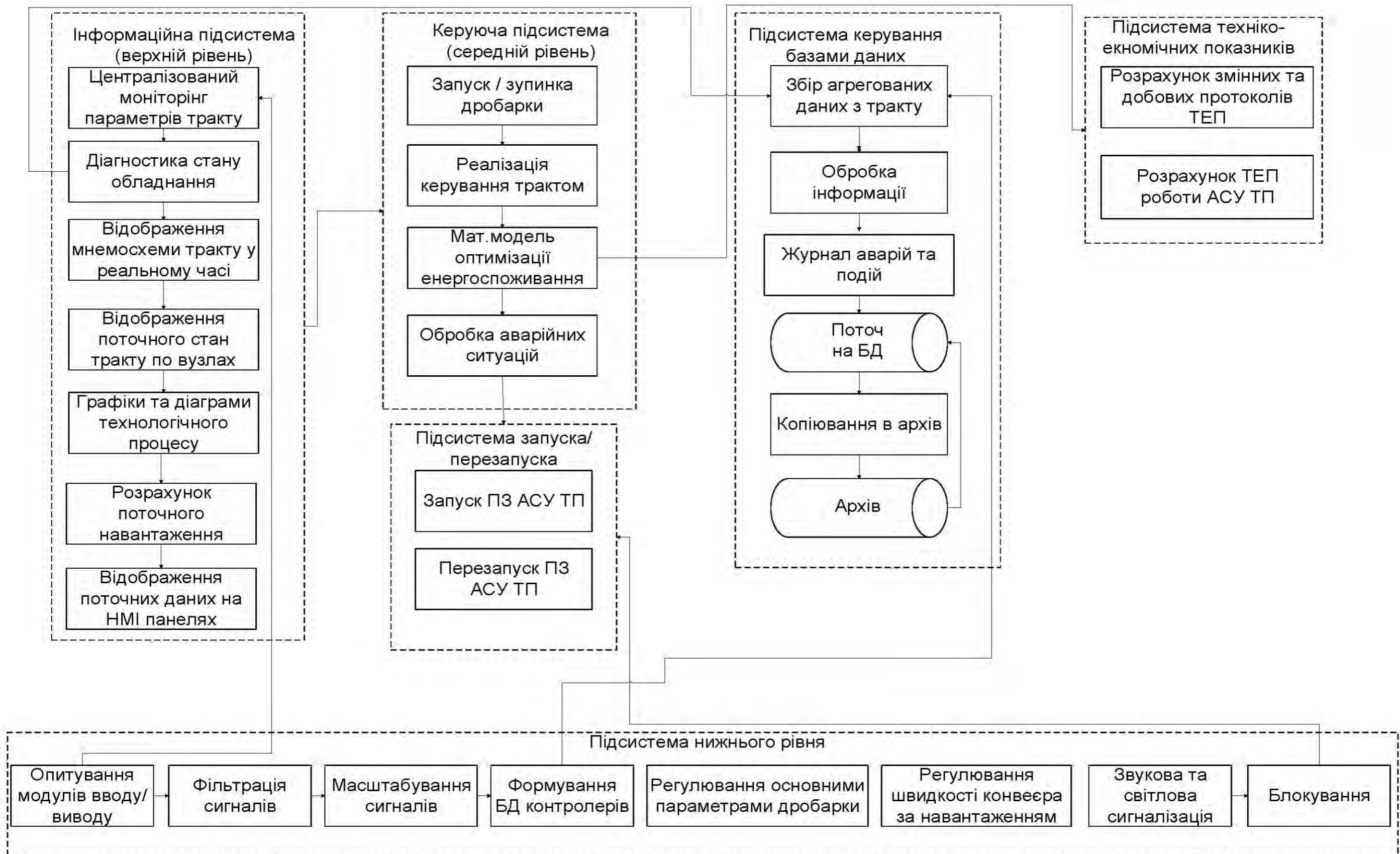


Рисунок 2.2 - Взаємозв'язок функціональних завдань АСК



Завершальним елементом функціональної структури є підсистема розрахунку техніко-економічних показників, яка використовує архівні та поточні дані для формування змінних і добових протоколів, а також для розрахунку техніко-економічних показників роботи АСУ ТП. Результати цієї підсистеми можуть використовуватися для оцінювання ефективності впроваджених рішень, аналізу енергоспоживання та обґрунтування подальших заходів з оптимізації технологічного процесу.

Таким чином, взаємозв'язок функціональних завдань модернізованої автоматизованої системи керування реалізується у вигляді замкненого інформаційно-керуючого циклу, який включає вимірювання технологічних параметрів, їх обробку, формування керуючих впливів, візуалізацію, архівацію та аналітичну обробку результатів. Запропонована структура забезпечує узгоджену роботу всіх рівнів автоматизації, адаптивне керування режимами транспортування гірничої маси та підвищення енергоефективності й надійності роботи конвеєрного тракту.

## 2.6 Опис структурної схеми комплексу технічних засобів дробильної фабрики тракту «Східний-2»

Структурна схема комплексу технічних засобів АСК трактом «Східний-2» дробильної фабрики відображає склад задіяного обладнання та логіку побудови автоматизованої системи керування, сформовану з урахуванням протяжності транспортного тракту, значної енергоємності приводів та підвищених вимог до безперервності технологічного процесу на горизонті –300 м (див. рис.2.3, креслення АВЕРС.1НА.МКП-14355273.ОУ-ТП та рисунок у Додатку В). Застосування трирівневої архітектури автоматизації у даному випадку є технічно обґрунтованим рішенням, оскільки дозволяє розмежувати функції збору інформації, прийняття керуючих рішень та безпосереднього впливу на виконавчі механізми, не перевантажуючи окремі елементи системи.

Нижній рівень автоматизації. Нижній рівень автоматизації безпосередньо пов'язаний із фізичним технологічним процесом транспортування гірничої маси. Саме на цьому рівні формується первинна інформація про стан обладнання та параметри процесу, а також реалізується фізичний вплив на механізми.

До складу нижнього рівня входять датчики технологічних і захисних параметрів, електродвигуни приводів та частотні перетворювачі. Датчики температури, стану, аварійних умов і положення встановлені безпосередньо на механізмах конвеєра К-6Б, його приводах та допоміжних вузлах. Вони безперервно фіксують зміну режимів роботи та перетворюють фізичні величини у електричні сигнали, придатні для подальшої обробки.

Використання датчиків різного типу дозволяє контролювати ключові параметри роботи механізмів і своєчасно виявляти відхилення від нормального режиму.

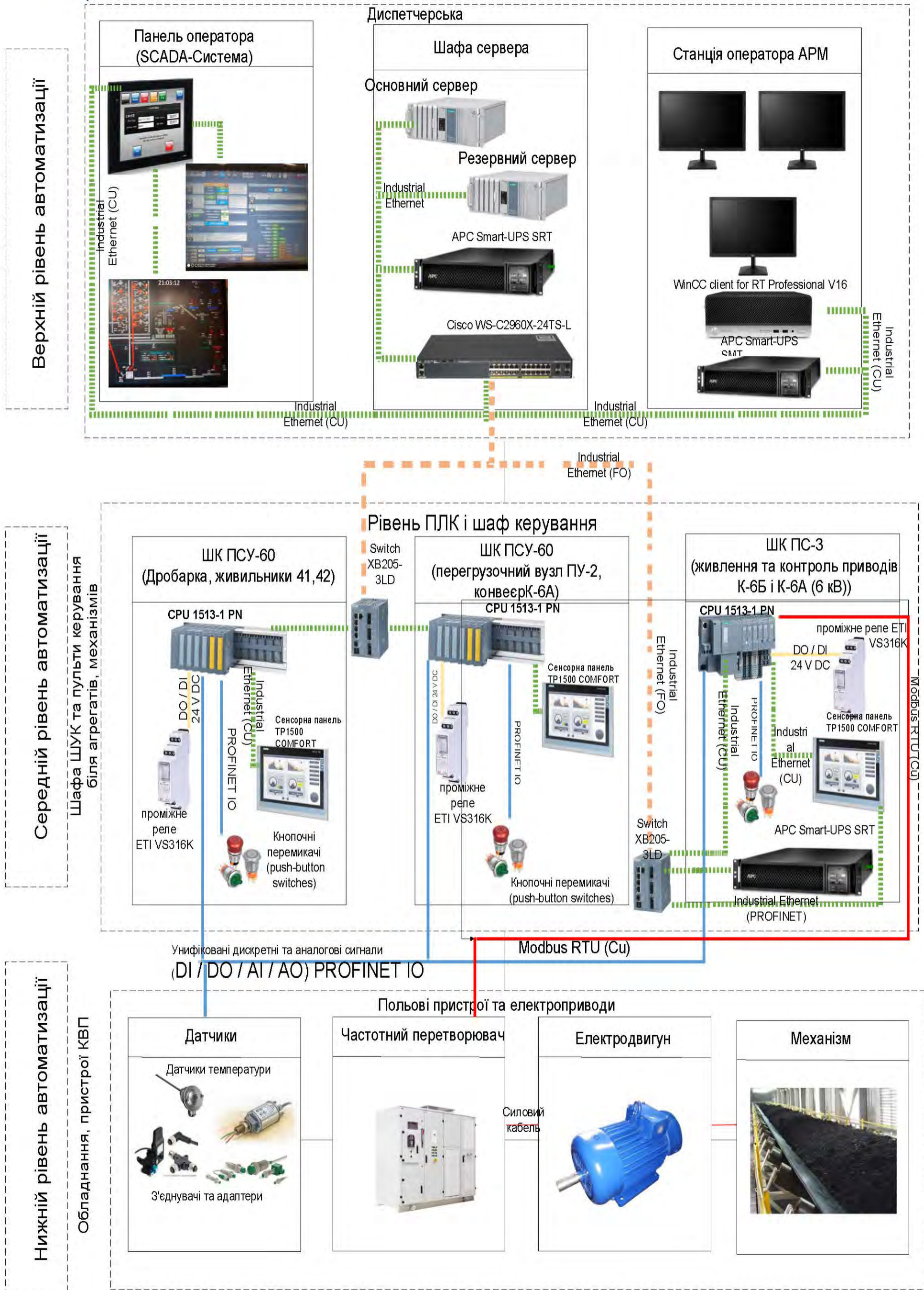



Рисунок 2.3 - Схема структурна комплексу технічних засобів



Передача сигналів у стандартизованих форматах (дискретні та аналогові) забезпечує сумісність з контролерами середнього рівня та спрощує технічне обслуговування системи.

Сформовані сигнали з нижнього рівня надходять на середній рівень автоматизації, передусім у шафу керування конвеєра К-6Б. За необхідності окремі сигнали можуть передаватися також до інших шаф середнього рівня, що забезпечує узгоджену роботу суміжного обладнання.

Особливу роль на нижньому рівні відіграє частотний перетворювач приводу конвеєра. Він є проміжною ланкою між системою керування та електродвигуном і виконує функцію адаптації електричної енергії до поточних потреб технологічного процесу. Частотний перетворювач отримує керуючі сигнали від центрального процесора шафи керування конвеєра К-6Б і, змінюючи частоту та напругу живлення, регулює швидкість обертання електродвигуна. Застосування частотних перетворювачів для керування електроприводами конвеєрів є технічно та економічно доцільним рішенням.


Регулювання здійснюється з урахуванням навантаження на конвеєр: при зростанні маси гірничої породи на стрічці частотний перетворювач забезпечує корекцію режиму роботи двигуна, запобігаючи перевантаженню та різким динамічним ударам. Таким чином, електродвигун працює не у фіксованому, а в адаптивному режимі, що безпосередньо впливає на плавність руху стрічки, зменшення зносу механічних елементів та стабільність технологічного процесу.

Механічний зв'язок між електродвигуном і конвеєром реалізується через приводний барабан, який перетворює обертальний рух у поступальний рух стрічки. Зміна швидкості двигуна миттєво відображається на швидкості транспортування гірничої маси, а отже – на продуктивності всього тракту.

Середній рівень автоматизації: логіка керування та обробка сигналів. Середній рівень автоматизації є ключовим з точки зору реалізації алгоритмів автоматичного керування та формування керуючих впливів. Саме на цьому рівні зосереджено логіку пуску, зупинки, міжблокувань і захистів, яка визначає стабільність роботи всього дробильно-транспортного комплексу.

Шафа керування ПСУ-60 призначена для обміну даними зі шафою управління дробарки та живильниками №41 і №42. У складі шафи розміщено центральний процесор контролера, модулі дискретних та аналогових входів і виходів, комунікаційні модулі, а також допоміжне обладнання. Контролер забезпечує реалізацію логіки пуску та зупинки обладнання, міжблокувань, контролю технологічних параметрів і захисних функцій. Для локального керування та обслуговування передбачені панелі оператора, а також кнопкові пости аварійної зупинки.

Шафа керування ПСУ-61 відповідає за керування обладнанням перевантажувального вузла ПУ-2 та конвеєра 6-А. Контролер цієї шафи



здійснює синхронізацію роботи транспортного обладнання, контроль навантаження, швидкості руху стрічки та стану електроприводів. Для взаємодії з частотними перетворювачами та іншими пристроями використовується промислова мережа Modbus RTU, що дозволяє передавати як керуючі команди, так і технологічні параметри.

Шафа ПС-3 призначена для контролю та керування високовольтними приводами конвеєрів К-6Б і К-6А, що живляться від мережі 6 кВ. У складі цієї шафи реалізовано функції контролю стану комірок, сигналізації, а також передачі інформації про режими роботи приводів до верхнього рівня автоматизації. Для забезпечення надійності та безпеки керування передбачено використання джерел безперебійного живлення та проміжних комутаційних елементів.

Розподіл функцій між кількома шафами керування (ПСУ-60, ПСУ-61, ПС-3) обумовлений територіальною рознесеністю обладнання та необхідністю локального прийняття рішень у разі аварійних ситуацій. Такий підхід зменшує залежність окремих ділянок тракту від центрального вузла керування та підвищує загальну живучість системи.


Процес керування на середньому рівні має чітко визначену послідовність.

Керування обладнанням реалізується як у автоматичному, так і в ручному режимах. У ручному режимі оператор формує команду за допомогою кнопок постів або панелі оператора. Сигнал від кнопки надходить на дискретний вхід контролера, після чого проходить логічну обробку з урахуванням міжблокувань, стану аварійних ланцюгів та дозволів. Далі керуючий сигнал передається через вихідні модулі контролера на проміжні реле, які забезпечують електричну розв'язку та підвищують надійність керування.

Через релейні ланцюги сигнал надходить до частотного перетворювача або силових кіл, формуючи команду пуску, зупинки або зміни режиму роботи. Паралельно інформація про виконання команди повертається у контролер у вигляді зворотних сигналів стану (працює/зупинено, аварія, перевантаження).

Сформовані керуючі сигнали надходять до частотного перетворювача приводу конвеєра К-6Б. Частотний перетворювач знаходиться у безпосередньому зв'язку з центральним процесором шафи керування та отримує від нього команди на зміну режиму роботи. У відповідь він регулює частоту та напругу живлення електродвигуна, адаптуючи його роботу до поточного навантаження на конвеєр. Таким чином реалізується замкнений контур керування, у якому зміна технологічних умов безпосередньо впливає на параметри електропривода.

Зворотні сигнали від частотного перетворювача та силових кіл (стан «робота», «аварія», «перевантаження») повертаються у контролер, формуючи актуальний стан системи. Ця інформація використовується як



для подальшої логічної обробки на середньому рівні, так і для передачі на верхній рівень автоматизації з метою відображення та аналізу.

Шафа ПС-3, що відповідає за керування та контроль високовольтних приводів 6 кВ, винесена в окремий вузол, що є виправданим з точки зору електробезпеки та експлуатаційної надійності. Її інтеграція в загальну систему керування дозволяє контролювати стан потужних приводів у єдиному інформаційному просторі SCADA-системи.

Сигнали використовуються для актуалізації стану системи та формування інформації для верхнього рівня.

Для забезпечення надійності та безпеки керування передбачено використання джерел безперебійного живлення та проміжних комутаційних елементів.

Між шафами середнього рівня реалізовано мережеву взаємодію з використанням промислових комутаторів, що забезпечує обмін даними між контролерами та їх інтеграцію в єдину систему керування дробильної фабрики.

Важливою особливістю середнього рівня є те, що він не лише передає команди, а й забезпечує причинно-наслідковий зв'язок між подіями. Наприклад, спрацювання аварійної кнопки на конвеєрі К-6Б призводить не просто до зупинки двигуна, а до формування аварійного повідомлення та передачі інформації на диспетчерський рівень.

Обмін інформацією між компонентами середнього та верхнього рівнями автоматизації здійснюється за допомогою промислової мережі Industrial Ethernet, що забезпечує високу швидкість передачі даних, надійність та можливість резервування мережевих з'єднань.

Верхній рівень автоматизації: диспетчерський контроль і аналітика. Верхній рівень автоматизації виконує функції централізованого контролю, візуалізації та аналізу роботи тракту «Східний-2». Дані, сформовані на середньому рівні, передаються по промисловій мережі до серверів та автоматизованих робочих місць операторів.

Використання SCADA-системи з серверною архітектурою дозволяє не лише відображати поточні параметри, але й накопичувати історичні дані, формувати архіви подій та аварій, а також аналізувати причини простоїв і нештатних режимів. Застосування основного та резервного серверів у складі серверної шафи є обґрунтованим з точки зору вимог до надійності: відмова окремого серверного елемента не повинна призводити до втрати диспетчерського контролю над технологічним процесом. Це особливо важливо для підземних умов експлуатації, де затримка у прийнятті рішень може мати критичні наслідки для безпеки персоналу та збереження обладнання.

Автоматизовані робочі місця операторів забезпечують доступ до інформації та функцій керування без прямого втручання у роботу контролерів середнього рівня. Такий підхід мінімізує ризик помилкових дій оператора та реалізує принцип розмежування відповідальності між рівнями системи керування. Передача даних між верхнім і середнім



рівнями здійснюється через Industrial Ethernet, що забезпечує необхідну пропускну здатність для обміну великою кількістю технологічних параметрів у реальному часі та дозволяє масштабувати систему без зміни базової архітектури.

Для забезпечення безперебійної роботи верхнього рівня застосовуються джерела безперебійного живлення, які дозволяють коректно завершити роботу системи або підтримувати її функціонування при короткочасних зникненнях напруги.

Обмін даними та протоколи зв'язку між компонентами системи. Обмін інформацією між компонентами автоматизованої системи керування дробильної фабрики тракту «Східний-2» реалізовано з використанням стандартних промислових протоколів зв'язку, вибір яких обумовлений вимогами до швидкодії, надійності та сумісності обладнання на різних рівнях автоматизації.


Зв'язок нижнього та середнього рівнів автоматизації. Передача інформації від польових пристроїв (датчиків, кнопкових постів, аварійних вимикачів) до контролерів середнього рівня здійснюється за допомогою уніфікованих дискретних та аналогових сигналів (DI/DO, AI/AO). Дискретні сигнали використовуються для передачі станів «пуск», «зупинка», «аварія», «дозвіл», тоді як аналогові сигнали застосовуються для контролю технологічних параметрів (температура, струм, інші вимірювані величини).

Обмін даними між контролерами шаф керування та частотними перетворювачами реалізовано за протоколом Modbus RTU по послідовному інтерфейсу. Даний протокол використовується для передачі команд керування, завдання режимів роботи, а також для зчитування діагностичної та технологічної інформації з частотних перетворювачів приводів конвеєрів.

У межах середнього рівня автоматизації зв'язок між центральними процесорами контролерів, модулями введення-виведення та панелями оператора здійснюється за допомогою промислової мережі PROFINET IO, що забезпечує детермінований обмін даними в реальному часі та високу швидкість реакції системи керування.

Зв'язок між шафами середнього рівня. Мережева взаємодія між шафами керування ПСУ-60, ПСУ-61 та шафою ПС-3 реалізована через промислові комутатори з використанням Industrial Ethernet. Такий підхід забезпечує узгоджену роботу територіально рознесеного обладнання, синхронізацію пускових та аварійних алгоритмів, а також передачу інформації про стан приводів і технологічних вузлів у межах усього транспортного тракту.

Зв'язок середнього та верхнього рівнів автоматизації. Обмін даними між контролерами середнього рівня та диспетчерським рівнем (сервери SCADA, автоматизовані робочі місця операторів) здійснюється по мережі Industrial Ethernet. Через дану мережу передаються технологічні параметри, сигнали стану обладнання, аварійні повідомлення та архівні



дані. Використання Industrial Ethernet на цьому рівні забезпечує необхідну пропускну здатність для одночасного обслуговування декількох клієнтів SCADA-системи, підтримує резервування серверів і дозволяє масштабувати систему без зміни базової мережевої архітектури.

Таким чином, у структурі комплексу технічних засобів застосовано ієрархічну систему протоколів зв'язку:

- дискретні та аналогові сигнали – для безпосереднього зв'язку з польовими пристроями;

- Modbus RTU – для обміну даними з частотними перетворювачами та окремими виконавчими пристроями.

- PROFINET IO – для внутрішнього обміну даними на середньому рівні автоматизації;

- Industrial Ethernet – для інтеграції контролерів із диспетчерським рівнем та міжшафного обміну.

Такий розподіл протоколів відповідає сучасним вимогам до побудови промислових АСУ ТП і забезпечує надійний, масштабований та прозорий обмін інформацією між усіма компонентами системи.

Таким чином, запропонована структурна схема комплексу технічних засобів дробильної фабрики тракту «Східний-2» може бути результатом інженерного компромісу між вимогами до надійності, керованості та можливості подальшої модернізації. Чітке розмежування функцій між рівнями автоматизації забезпечуватиме стабільну роботу технологічного процесу, мінімізує вплив людського фактору та створює основу для впровадження більш складних алгоритмів керування і цифрових методів оптимізації у майбутньому.



### 3 РЕАЛІЗАЦІЯ ЗАПРОПОНОВАНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ

Реалізація автоматизованої системи управління технологічним процесом транспортування гірничої маси на тракті «Східний-2» передбачає формування цілісної технічної та програмної архітектури, здатної забезпечити стабільний контроль параметрів, своєчасну реакцію на їх відхилення та інтеграцію із загальноцеховими підсистемами. На основі проведеного аналізу технологічного процесу, структури обладнання та динаміки зміни навантаження сформовано вимоги до апаратних та програмних компонентів, які забезпечують досягнення необхідного рівня автоматизації.

У процесі реалізації запропонованої системи управління особливу увагу приділено поєднанню класичних методів автоматичного регулювання з інтелектуальними алгоритмами адаптації. Такий підхід дозволяє забезпечити стійку роботу системи в умовах змінного навантаження та невизначеності параметрів об'єкта керування, що є характерним для конвеєрного транспорту гірничих підприємств.

Система реалізується за принципами модульності, надійності та функціональної повноти, що відповідає підходам стандартів АСУ ТП та вимогам функціональної безпеки (IEC 61511). Ключовими елементами є:


- комплекс сенсорів контролю технічних станів;
- частотно-регульовані приводи основних конвеєрів;
- промислові контролери з підтримкою протоколів реального часу;
- підсистеми верхнього рівня SCADA-візуалізації, сигналізації та журналювання;
- блоки алгоритмічного керування, у тому числі ПІД-регулятори, логічні інструкції та блокування.

Особливу увагу приділено забезпеченню стійкого керування продуктивністю, що є критичним параметром для роботи конвеєра К-6Б. Реалізація системи включає вибір засобів збору даних, обробку сигналів, налаштування регуляторів, формування алгоритмів безпечного запуску, перезапуску та аварійної зупинки.

#### 3.1 Вибір та обґрунтування технічних засобів автоматизації

##### 3.1.1 Загальні положення та вихідні умови проектування

Вибір технічних засобів автоматизації для реалізації запропонованої системи керування конвеєром К-6Б тракту «Східний-2» виконано на основі комплексного аналізу технологічного процесу транспортування гірничої маси, фактичного стану діючого обладнання, а також вимог до подальшого впровадження автоматичних та інтелектуальних алгоритмів керування. При формуванні апаратної частини АСУ ТП враховано результати аналізу існуючої системи.



Конвеєр К-6Б є одним з ключових елементів циклічно-поточної технології доставки гірничої маси з горизонту –300 м та працює в умовах змінного вантажопотоку, підвищеної запиленості, вібраційних впливів і значних пускових навантажень. За таких умов ефективність роботи конвеєра значною мірою визначається якістю системи керування електроприводом, достовірністю вимірювальної інформації та швидкодією засобів обробки сигналів.

У межах магістерського проєкту прийнято концепцію поетапної модернізації АСУ ТП, яка передбачає збереження основних механічних вузлів і електродвигунів конвеєра та оновлення насамперед засобів керування, вимірювання й діагностики. Такий підхід дозволяє мінімізувати капітальні витрати, знизити ризики порушення технологічного процесу та забезпечити сумісність запропонованих рішень з існуючою інфраструктурою дробильної фабрики.

### 3.1.2 Обґрунтування вибору виробника та платформи автоматизації

Як базового виробника технічних засобів автоматизації в проєкті обрано компанію Siemens, обладнання якої широко застосовується на гірничо-збагачувальних підприємствах України та, зокрема, використовується в діючій АСУ ТП тракту «Східний-2». Це забезпечує високий рівень уніфікації, спрощує інтеграцію нових компонентів у наявну систему та зменшує витрати на експлуатацію й обслуговування.

Перевагами використання платформи Siemens у даному проєкті є:

- відповідність обладнання вимогам промислової експлуатації в умовах важких режимів роботи;
- наявність єдиного інженерного середовища проєктування та налаштування;
- підтримка стандартних промислових протоколів обміну даними;
- можливість масштабування системи та впровадження інтелектуальних алгоритмів керування.

В якості базової апаратно-програмної платформи прийнято концепцію TIA (Totally Integrated Automation), яка забезпечує тісну інтеграцію програмованих логічних контролерів, частотно-регульованих приводів, засобів введення-виведення та систем візуалізації.

### 3.1.3 Вибір та обґрунтування програмованого логічного контролера

Центральним елементом системи автоматизації конвеєра К-6Б є програмований логічний контролер SIMATIC S7-1500. Контролери даної серії характеризуються високою обчислювальною продуктивністю, розширеними діагностичними можливостями та підтримкою сучасних мереж реального часу.

Вибір контролера SIMATIC S7-1500 обґрунтовано такими факторами:

- можливістю реалізації контурів автоматичного регулювання з використанням стандартних ПІД-функціональних блоків;
- підтримкою обробки аналогових сигналів у реальному масштабі часу;
- інтеграцією з частотно-регульованими приводами через мережу PROFINET;
- резервом обчислювальних ресурсів для реалізації адаптивних і нечітких алгоритмів керування.

Контролер виконує функції збору інформації від датчиків, формування керуючих впливів на електропривод конвеєра, реалізації алгоритмів безпечного пуску та зупинки, а також передачі інформації на верхній рівень АСУ ТП.

#### 3.1.4 Застосування розподілених модулів введення-виведення

Для підключення польових датчиків і виконавчих механізмів у системі автоматизації конвеєра К-6Б передбачено використання розподілених модулів введення-виведення серії ET 200SP. Застосування розподіленої архітектури дозволяє розміщувати модулі безпосередньо поблизу об'єкта керування, що зменшує довжину кабельних трас та підвищує завадостійкість системи.


Модулі ET 200SP забезпечують:

- підключення дискретних і аналогових сигналів стандарту 24 В DC та 4–20 мА;
- підтримку датчиків температури типу Pt100;
- повну сумісність з контролером SIMATIC S7-1500 та середовищем TIA Portal;
- можливість подальшого розширення системи без суттєвих конструктивних змін.

#### 3.1.5 Вибір та обґрунтування частотно-регульованого електропривода конвеєра К-6Б

Ключовим напрямом модернізації системи керування конвеєром К-6Б є впровадження частотно-регульованого електропривода для керування швидкістю руху стрічки. У базовій схемі конвеєр працює з фіксованою швидкістю, що не дозволяє адаптувати продуктивність до фактичного навантаження та призводить до підвищених динамічних навантажень під час пуску.

Для реалізації регульованого електропривода рекомендовано використання частотних перетворювачів серії SINAMICS. Дана лінійка приводів призначена для роботи з асинхронними електродвигунами великої потужності та підтримує режими векторного керування, що є критично важливим для конвеєрних механізмів з нерівномірним навантаженням.



Застосування частотно-регульованого привода SINAMICS забезпечує:

- плавний пуск і зупинку конвеєра, що знижує механічні навантаження;
- можливість регулювання швидкості стрічки залежно від вантажопотоку;
- зменшення пікових струмів і підвищення енергоефективності;
- реалізацію замкненого контуру регулювання швидкості з використанням зворотного зв'язку.

Частотний перетворювач інтегрується з ПЛК SIMATIC S7-1500 через промислову мережу PROFINET, що забезпечує обмін технологічними параметрами, діагностичною інформацією та командами керування в реальному часі.

### 3.1.6 Вибір засобів вимірювання та контролю параметрів конвеєра

Для забезпечення надійної роботи системи автоматичного керування електроприводом конвеєра К-6Б та реалізації алгоритмів регулювання, захисту і діагностики в проєкті передбачено застосування промислових засобів вимірювання та дискретного контролю виробництва компанії Siemens, сумісних з апаратною платформою SIMATIC S7-1500 та розподіленою системою введення-виведення ET 200SP.

Контроль навантаження електродвигуна конвеєра здійснюється шляхом вимірювання фазного струму з використанням промислових перетворювачів струму серії Siemens SITRANS T. Перетворювачі забезпечують формування уніфікованого аналогового сигналу 4–20 мА, пропорційного фактичному струму електродвигуна, що дозволяє:


- оцінювати реальний режим роботи електропривода;
- реалізувати алгоритми обмеження перевантажень;
- використовувати сигнал струму як вхідну величину для контурів автоматичного регулювання швидкості.

Аналогові сигнали від перетворювачів SITRANS T надходять на модулі аналогового введення системи ET 200SP та обробляються програмованим логічним контролером SIMATIC S7-1500 у реальному масштабі часу.

Для контролю теплового стану електродвигуна та підшипникових вузлів конвеєра застосовуються термодатчики опору типу Pt100 промислового виконання Siemens. З метою уніфікації сигналів та підвищення завадостійкості системи датчики Pt100 підключаються через температурні перетворювачі серії Siemens SITRANS TH (TH100 / TH200), які формують стандартний аналоговий вихід 4–20 мА.

Отримана температурна інформація використовується для:

- контролю допустимих теплових режимів роботи електродвигуна;
- раннього виявлення перегріву підшипникових вузлів;
- формування попереджувальних та аварійних сигналів у системі керування.



Система дискретного контролю конвеєра К-6Б реалізується на базі промислових датчиків і вимикачів серії Siemens SIRIUS, які призначені для експлуатації в умовах підвищеної запиленості, вібрацій та механічних навантажень.

До складу системи дискретного контролю входять:

- аварійні тросові вимикачі з фіксацією спрацювання;
- датчики сходу конвеєрної стрічки;
- кінцеві вимикачі положення механізмів;
- сигнали міжблокувань від суміжного обладнання.

Дискретні сигнали підключаються до модулів дискретного введення ET 200SP та використовуються в алгоритмах аварійного зупину, блокування пуску та формування сигналів безпеки (див. Додаток Г).

Обрані засоби вимірювання та контролю логічно інтегровані в структуру комплексу технічних засобів (КТС)(див. рис.2.3, креслення АБЕРС.1нА.МКП-14355273.ОУ-ТП та рисунок у Додатку В) конвеєра К-6Б. На структурній схемі КТС вони відображаються такими узагальненими групами:

- AI (4–20 мА) – датчики струму SITRANS T, температурні перетворювачі SITRANS TH;
- DI (24 В DC) – аварійні тросові вимикачі, датчики сходу стрічки, кінцеві вимикачі серії SIRIUS;
- PLC – SIMATIC S7-1500;
- Remote I/O – ET 200SP.

Таке рішення забезпечує уніфіковану структуру сигналів, спрощує розширення системи та створює основу для подальшої реалізації адаптивних і діагностичних алгоритмів керування електроприводом конвеєра.


Обрані технічні рішення для конвеєра К-6Б розглядаються як базові та масштабовані для інших конвеєрів тракту і верхнього рівня автоматизації, що обґрунтовується у наступних підпунктах.

### 3.1.7 Вибір технічних засобів автоматизації для інших конвеєрів тракту

Для забезпечення уніфікованої системи керування всім конвеєрним трактом «Східний-2» у межах проєкту прийнято рішення застосувати аналогічну апаратну платформу автоматизації не лише для конвеєра К-6Б, але й для суміжних конвеєрів (К-6А, К-2А, К-15), що входять до єдиного технологічного ланцюга транспортування гірничої маси.

Як базові засоби керування для інших конвеєрів доцільно використовувати програмовані логічні контролери серії SIMATIC S7-1500 (CPU 1511-1 PN або CPU 1512-1 PN), що відповідає технічним рішенням існуючої АСУ ТП та забезпечує повну сумісність із мережевою інфраструктурою Industrial Ethernet / PROFINET.

Для підключення датчиків і виконавчих механізмів інших конвеєрів рекомендовано застосування розподілених модулів введення-виведення



ET 200SP, що дозволяє реалізувати компактну архітектуру шаф керування та мінімізувати довжину кабельних трас.

Керування електроприводами конвеєрів K-6A та K-2A доцільно реалізувати із застосуванням частотно-регульованих приводів серії SINAMICS, що забезпечує уніфікацію алгоритмів пуску, зупинки та регулювання швидкості по всьому тракту. Обмін даними між ПЛК та частотними перетворювачами здійснюється за протоколами PROFINET або Modbus RTU залежно від типу привода, що відповідає рішенням існуючої системи.

### 3.1.8 Вибір комп'ютерів та серверного обладнання верхнього рівня

Для реалізації функцій диспетчерського контролю, візуалізації та архівування технологічних параметрів на верхньому рівні автоматизації у проєкті передбачено використання промислових комп'ютерів та серверів, сумісних із SCADA-системою WinCC.

Як серверне обладнання доцільно застосувати промислові сервери SIMATIC IPC (наприклад IPC547G або еквівалентні), призначені для безперервної роботи в умовах підвищених навантажень та промислового середовища. Сервери використовуються для розгортання WinCC Server з підтримкою резервування, що забезпечує високу надійність диспетчерського керування.

Автоматизовані робочі місця операторів реалізуються на базі промислових або офісних ПК підвищеної надійності з встановленим програмним забезпеченням WinCC Client. Обчислювальні характеристики АРМ обираються з урахуванням кількості відображуваних тегів, графічних екранів та архівних даних.

Для забезпечення безперебійної роботи серверів і АРМ застосовуються джерела безперебійного живлення типу APC Smart-UPS, що дозволяє зберегти працездатність верхнього рівня при короткочасних зникненнях напруги та коректно завершувати роботу SCADA-системи.

Вибір технічних засобів автоматизації виробництва Siemens обумовлений широким застосуванням даного обладнання на гірничо-збагачувальних підприємствах України та його доведеною ефективністю в умовах важких режимів експлуатації. Платформа Siemens забезпечує повну сумісність програмованих логічних контролерів, розподілених систем введення-виведення, частотно-регульованих електроприводів і вимірювальних засобів у межах єдиного інженерного середовища TIA Portal. Використання уніфікованих промислових інтерфейсів та стандартних сигналів 4–20 мА і 24 В DC підвищує надійність обміну даними та спрощує інтеграцію обладнання в існуючу АСУ ТП. Обладнання Siemens характеризується розширеними діагностичними можливостями, що дозволяє реалізувати функції раннього виявлення аварійних режимів та технічного стану електропривода. Важливою перевагою є наявність сервісної підтримки, технічної документації та досвіду експлуатації на підприємстві, що знижує ризики впровадження та експлуатаційні витрати.

Зазначені фактори роблять рішення Siemens доцільним вибором для модернізації АСУ ТП конвеєра К-6Б тракту «Східний-2».

Обраний комплекс технічних засобів автоматизації (SIMATIC S7-1500, розподілені модулі введення-виведення ET 200SP, частотно-регульований електропривод SINAMICS, вимірювальні перетворювачі SITRANS та промислові датчики і вимикачі серії SIRIUS) формує єдину апаратно-програмну платформу для реалізації системи автоматичного регулювання швидкості конвеєра К-6Б. Така структура забезпечує технічну можливість впровадження класичного ПІД-регулювання, а також створює основу для реалізації нечіткого супервізорного керування з адаптивною корекцією параметрів регулятора, що детально розглядається в наступних підрозділах розділу 3.

### 3.2 Конфігурування системи автоматичного регулювання швидкості конвеєра в середовищі TIA Portal

Конфігурування системи автоматичного регулювання (САР) швидкості стрічкового конвеєра виконано в інтегрованому інженерному середовищі TIA Portal [43], яке забезпечує єдиний підхід до налаштування апаратної частини, мережевої взаємодії та параметризації електроприводів. Використання даного середовища дозволяє реалізувати узгоджену роботу програмованого логічного контролера, частотних перетворювачів і операторської панелі в межах єдиної проєктної структури.

На рисунку 3.1 наведено фрагмент конфігурації апаратної частини програмованого логічного контролера в середовищі TIA Portal у режимі Device view.

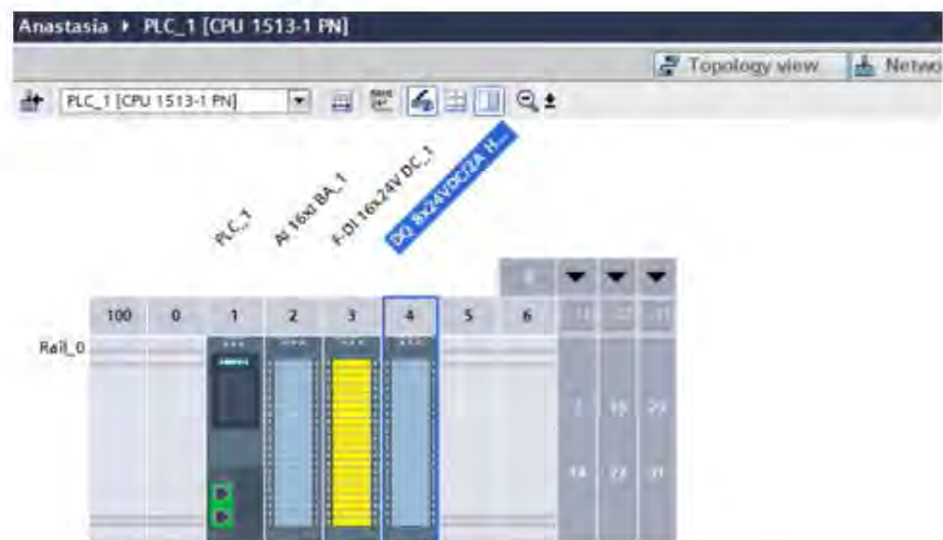



Рисунок 3.1. - Конфігурація апаратної частини ПЛК Siemens S7-1500 (CPU 1513-1 PN) з модулями введення-виведення в середовищі TIA Portal



Представлена станція автоматизації побудована на базі контролера Siemens S7-1500, зокрема центрального процесорного модуля CPU 1513-1 PN, який встановлено у головному слоті монтажної рейки (*Rail\_0*).

До складу конфігурації входять модулі введення та виведення сигналів, розміщені послідовно на монтажній рейці контролера. Зокрема, використано модуль AI 16x VA, призначений для приймання аналогових сигналів від технологічних датчиків, а також дискретний модуль DI 16x24V DC, який забезпечує обробку сигналів від кінцевих вимикачів, датчиків стану та аварійних пристроїв. Для формування керуючих впливів на виконавчі механізми застосовано модуль DQ 8x24V DC/2A, що забезпечує видачу дискретних вихідних сигналів з номінальною напругою 24 В постійного струму.

Графічне відображення конфігурації дозволяє наочно оцінити структуру апаратної частини системи керування, кількість задіяних каналів введення-виведення та резерв для подальшого розширення. Застосування контролера серії S7-1500 з модульною архітектурою забезпечує гнучкість побудови системи автоматизації та відповідність вимогам керування технологічним процесом транспортування гірничої маси.

У складі автоматизованої системи керування використано контролер Siemens S7-1500 (CPU 1513-1 PN), який виконує функції центрального вузла обробки інформації та реалізує алгоритм регулювання швидкості руху конвеєрної стрічки. Для забезпечення взаємодії з обслуговуючим персоналом у систему інтегровано операторську панель HMI TP1900 Comfort, яка використовується для візуалізації технологічних параметрів, індикації станів обладнання та введення керуючих команд. Привідна частина конвеєра реалізована на базі частотних перетворювачів SINAMICS G110M PN, що підтримують прямий обмін даними через промислову мережу Profinet. Загальна структурна взаємодія зазначених компонентів у межах автоматизованої системи наведена на рис. 3.2.

На етапі конфігурування мережевої взаємодії в середовищі TIA Portal виконано побудову логічної структури з'єднань між пристроями в режимі Network view. Усі основні компоненти системи – програмований логічний контролер, операторська панель та частотні перетворювачі – об'єднані в єдиний мережевий сегмент Profinet, як показано на рис. 3.2, із визначеним доменом синхронізації Sync-Domain\_1. Така організація мережі забезпечує узгоджений обмін технологічними даними в реальному часі та підвищує стабільність роботи системи автоматичного регулювання.

Для уточнення фізичної структури підключення обладнання та контролю коректності побудови мережі додатково використано режим Topology view. У цьому режимі відображено топологічну організацію промислової мережі з урахуванням фактичного розташування та підключення пристроїв. Відповідна топологія автоматизованої системи керування представлена на рис. 3.3. Застосування топологічного

представлення підвищує наочність структури системи, спрощує процеси діагностики та полегшує подальше технічне обслуговування мережевої інфраструктури.

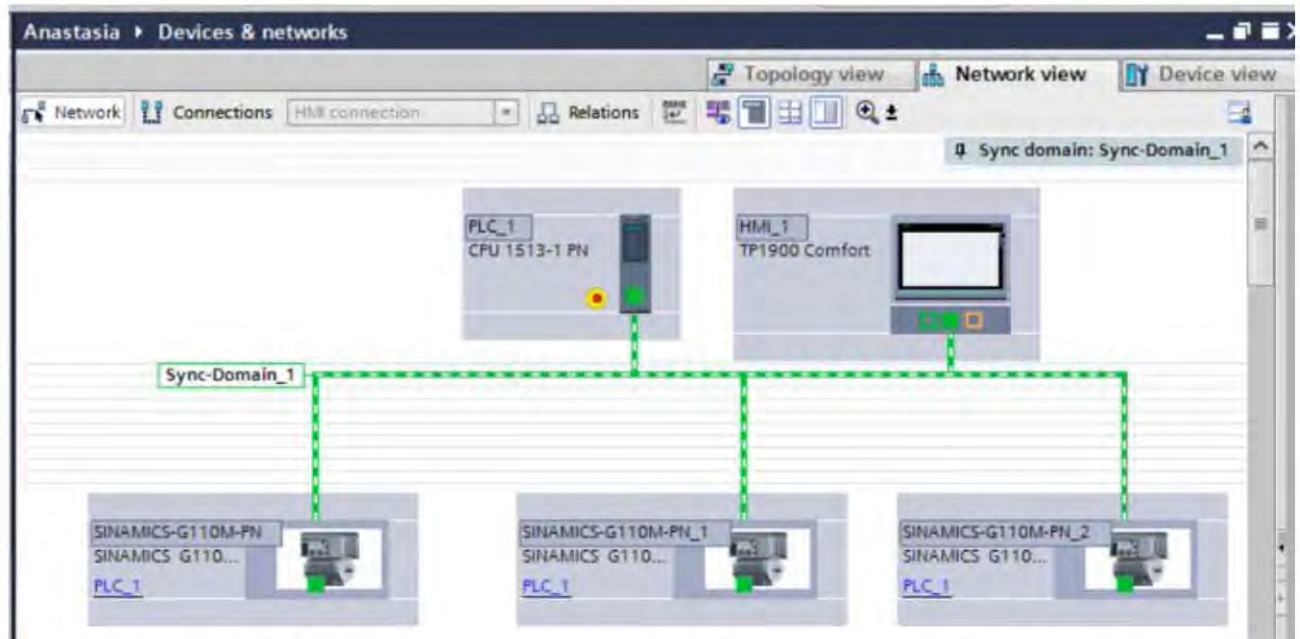


Рисунок 3.2 - Структура мережевої взаємодії між контролером, операторською станцією та периферійними пристроями системи керування

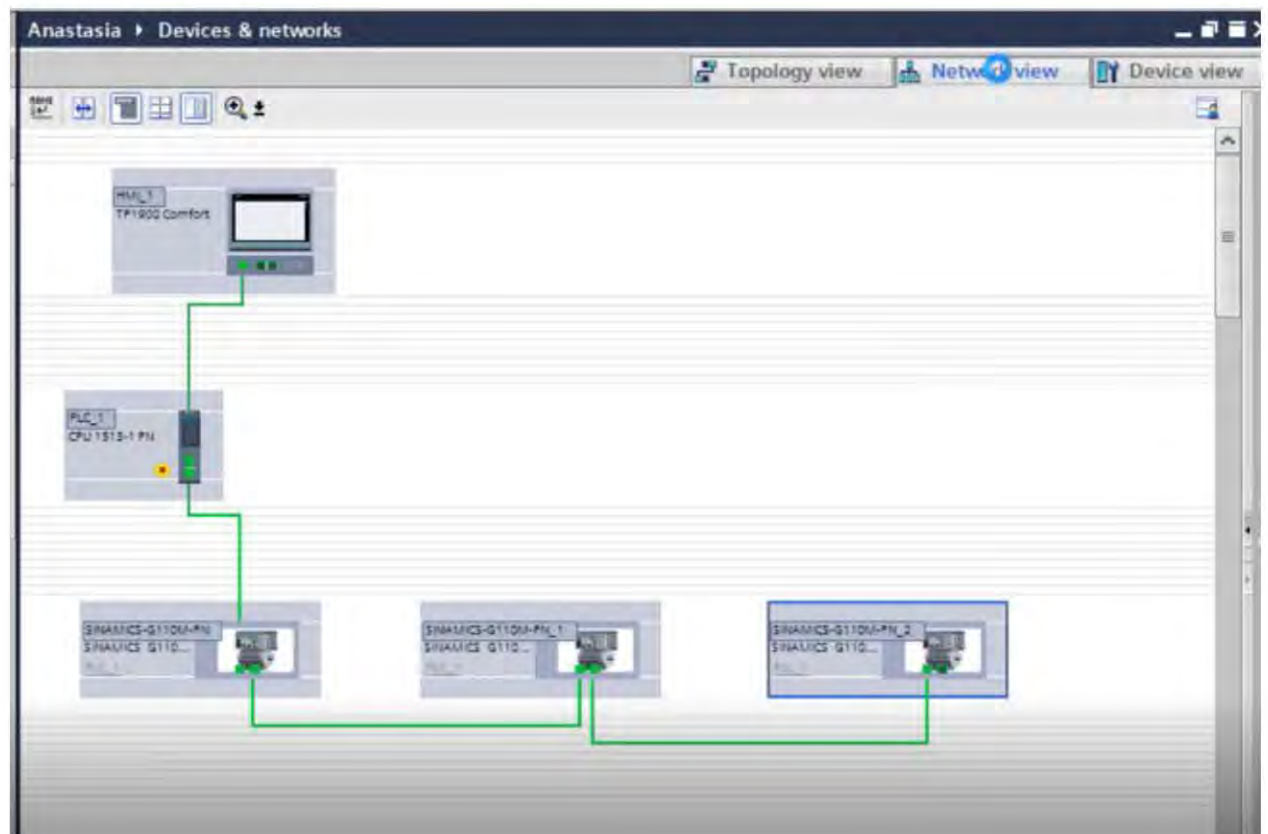



Рисунок 3.3 - Топологія промислової мережі системи автоматизованого керування конвеєрним трактом на базі ПЛК та SCADA



Параметризація частотних перетворювачів SINAMICS G110M PN виконана безпосередньо в середовищі TIA Portal із прив'язкою до контролера CPU 1513-1 PN. Обмін керуючими сигналами та зворотною інформацією між контролером і приводами здійснюється через мережу Profinet, що наочно ілюструється схемою мережевої взаємодії, наведеною на рис. 3.2. Такий підхід дозволяє передавати завдання на швидкість, команди пуску та зупинки, а також отримувати інформацію про фактичні режими роботи, аварійні стани та діагностичні повідомлення.

У межах САР швидкості конвеєра контролер формує керуючий вплив у вигляді завдання на швидкість руху стрічки залежно від поточних технологічних умов та стану обладнання. Частотні перетворювачі забезпечують плавну зміну частоти живлення електродвигунів, що сприяє зменшенню динамічних навантажень, підвищенню надійності механічних вузлів і зниженню енергоспоживання. Реалізація зворотного зв'язку за швидкістю дозволяє забезпечити стабільність процесу регулювання та своєчасне реагування системи на зміну навантаження.

Таким чином, виконане конфігурування системи автоматичного регулювання швидкості конвеєра в середовищі TIA Portal забезпечує інтегровану взаємодію апаратних і програмних компонентів автоматизованої системи керування. Реалізована структура створює надійну основу для подальшого впровадження алгоритмів оптимізації режимів транспортування гірничої маси та підвищення ефективності функціонування конвеєрного комплексу.

### 3.3 Нечітке супервізорне керування з корекцією коефіцієнтів регулятора швидкості

Для підвищення якості регулювання швидкості стрічкового конвеєра в умовах змінного навантаження та наявності зовнішніх збурень у роботі запропоновано використання нечіткого супервізорного керування, яке здійснює адаптивну корекцію параметрів ПІД-регулятора в реальному часі. Такий підхід дозволяє поєднати переваги класичного ПІД-регулювання з можливостями нечіткої логіки щодо урахування нелінійних і слабоформалізованих властивостей об'єкта керування.

Запропонований підхід до керування швидкістю стрічкового конвеєра ґрунтується на використанні нечіткого супервізорного рівня, який здійснює адаптивну корекцію параметрів класичного ПІД-регулятора. При цьому базова структура системи автоматичного регулювання зберігається, а інтелектуальний компонент виконує функції надбудови, що підвищує якість регулювання без ускладнення апаратної реалізації.

Математична модель системи керування реалізована в середовищі Matlab/Simulink (рис. 3.4), яке використовується як інструмент імітаційного моделювання та цифрового прототипування алгоритмів автоматизованого керування.

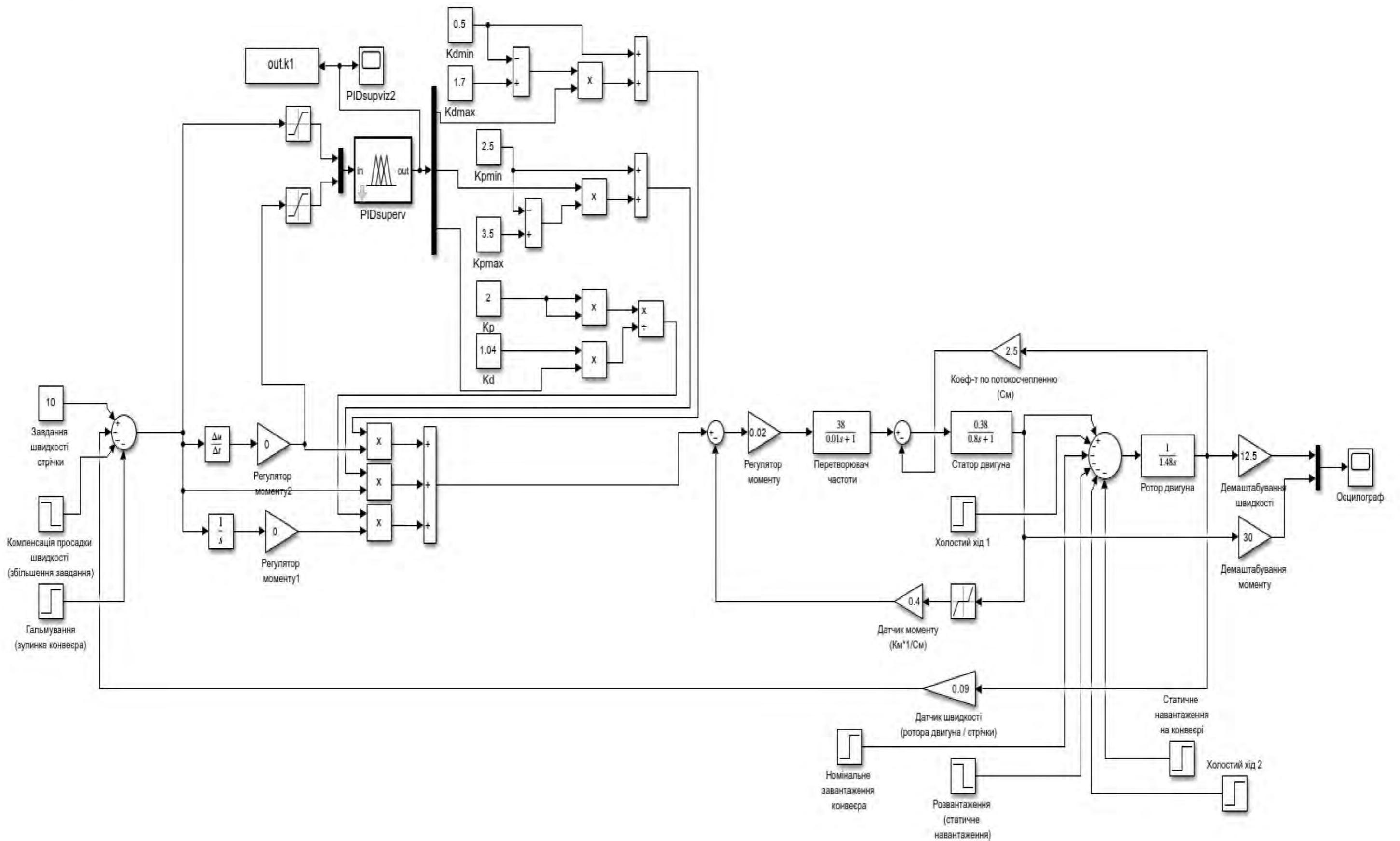



Рисунок 3.4 – Структурна схема математичної моделі системи регулювання швидкості конвеєра з нечітким супервізорним керуванням



Структура моделі відображає ієрархічний принцип побудови АСУ ТП та включає контур регулювання швидкості з класичним ПІД-регулятором, а також нечіткий супервізор, що здійснює корекцію його параметрів у реальному часі.

### 3.3.1 Математична модель системи керування зі супервізором

У замкненій системі автоматичного регулювання швидкості конвеєра основним регулятором є ПІД-регулятор, коефіцієнти якого змінюються під дією нечіткого супервізора [38, 39].

Вхідними змінними супервізора обрано помилку регулювання

$$e(t) = \omega_{\text{зад}}(t) - \omega(t), \quad (3.1)$$

та похідну помилки

$$e'(t) = \frac{de(t)}{dt}, \quad (3.2)$$

де  $e(t)$  – помилка регулювання швидкості стрічкового конвеєра;  
 $\omega_{\text{зад}}(t)$  – задане значення швидкості руху стрічки;  
 $\omega(t)$  – фактичне значення швидкості електропривода конвеєра;  
 $e'(t)$  – похідна помилки регулювання за часом, що характеризує швидкість зміни відхилення стрічки від заданого значення.

Коефіцієнти пропорційної та диференціальної складових ПІД-регулятора вважаються такими, що змінюються в заданих допустимих межах:

$$K_p \in [K_{p.min}, K_{p.max}], \quad (3.3)$$

$$K_d \in [K_{d.min}, K_{d.max}], \quad (3.4)$$

де  $K_p$  – коефіцієнт пропорційної складової ПІД-регулятора;  
 $K_d$  – коефіцієнт диференціальної складової ПІД-регулятора;  
 $K_{p.min}, K_{p.max}$  – мінімально та максимально допустимі значення коефіцієнта  $K_p$ ;  
 $K_{d.min}, K_{d.max}$  – мінімально та максимально допустимі значення коефіцієнта  $K_d$ .

Межі зміни коефіцієнтів визначаються на основі параметрів, отриманих за методом Зіглера–Ніколса, де  $K_u$  – критичний коефіцієнт підсилення, а  $T_u$  – період автоколивань.

Для нормалізації параметрів використовуються безрозмірні величини:

$$K_p' = \frac{K_p - K_{p.min}}{K_{p.max} - K_{p.min}}; \quad K_d' = \frac{K_d - K_{d.min}}{K_{d.max} - K_{d.min}} \quad (3.5)$$

Зворотне перетворення дозволяє визначати поточні значення коефіцієнтів регулятора в реальному масштабі часу. Інтегральна складова регулятора формується з урахуванням співвідношення між постійними часу інтегрування та диференціювання:

$$T_i = \alpha T_d, \quad (3.6)$$

де  $T_i$  – постійна часу інтегрування ПІД-регулятора;

$T_d$  – постійна часу диференціювання ПІД-регулятора;

$\alpha$  – параметр корекції, що формується нечітким супервізором та визначає співвідношення між інтегральною та диференціальною складовими регулятора, також коригується нечітким супервізором залежно від характеру перехідного процесу. Таким чином, коефіцієнт інтегрування визначається як:

$$K_i = \frac{K_p}{\alpha T_d} = \frac{(K_p)^2}{\alpha K_d}, \quad (3.7)$$

### 3.3.2 Нормалізація та демасштабування змінних системи керування

У процесі синтезу нечіткого супервізорного керування коефіцієнтами ПІД-регулятора вхідні та вихідні змінні системи автоматичного регулювання подаються у нормалізованому (безрозмірному) вигляді, що є загальноприйнятим підходом у теорії автоматичного керування при реалізації адаптивних та інтелектуальних алгоритмів.

Відповідно до п.3.3.1, вхідними змінними супервізора є помилка регулювання та похідна помилки, які визначаються як

$$e(t) = \omega_{зад}(t) - \omega(t), e'(t) = \frac{de(t)}{dt} \quad (3.8)$$

Для забезпечення коректної роботи нечіткої системи логічного висновку ці величини підлягають нормалізації:

$$e^*(t) = \frac{e(t)}{e_{max}}; e'^*(t) = \frac{e'(t)}{e'_{max}} \quad (3.9)$$

Де  $e_{max}$  та  $e'_{max}$  – максимально допустимі значення помилки та її похідної, визначені з урахуванням динамічних властивостей електропривода.

Аналогічно нормалізуються регульовані параметри електропривода – швидкість та електромагнітний момент:

$$\omega^*(t) = \frac{\omega(t)}{\omega_H}; M^*(t) = \frac{M(t)}{M_H} \quad (3.10)$$

де  $\omega_H$  та  $M_H$  - номінальні значення швидкості та моменту відповідно. Застосування нормалізованих змінних дозволяє:

- уніфікувати масштаби сигналів у контурі керування;
- забезпечити інваріантність алгоритму до абсолютних параметрів об'єкта;
- підвищити чисельну стійкість та узгодженість роботи нечіткого супервізора у різних режимах навантаження.

Для інженерної інтерпретації результатів моделювання та оцінювання показників якості перехідного процесу виконується демасштабування (зворотне нормалізування) сигналів. Простими словами це:

- масштабування: перед подачею в нейромережу дані приводять до зручного діапазону (наприклад, 0...1 або -1...1), щоб модель стабільно навчалась.

- демасштабування: після того як нейромережа видала результат у масштабованому вигляді, його повертають у початкові фізичні одиниці (гривні, кВт, °C, мм тощо), щоб результат був зрозумілим і придатним для аналізу.


Демасштабування здійснюється за співвідношеннями:

$$\omega(t) = \omega^*(t) * \omega_H; M(t) = M^*(t) * M_H \quad (3.11)$$

У результаті демасштабування забезпечується перехід від безрозмірних величин до фізичних параметрів, що мають інженерний зміст і дозволяють оцінити перерегулювання, час встановлення та динамічні навантаження на механічні елементи конвеєрного тракту. Саме у нормалізованому вигляді результати моделювання подано на рисунку 3.6, що відповідає вимогам теорії автоматичного керування та спрощує аналіз динамічних характеристик системи.

### 3.3.3 Алгоритмічна структура нечіткого супервізора

Формування бази правил нечіткого супервізора здійснюється з використанням 49 правил типу «якщо-то», що відповідає комбінації семи лінгвістичних термів для кожної з двох вхідних змінних. Зазначені правила встановлюють відповідність між поточним станом системи та необхідною корекцією параметрів ПІД-регулятора. Обрана структура бази правил дозволяє адекватно описати поведінку системи в усьому діапазоні зміни помилки регулювання та її похідної. Загальний вигляд правил можна подати у такій формі: якщо  $e(t)$  належить множині  $A_i$  та  $e'(t)$  належить множині  $B_i$ , то  $(K_p = C_i)$  і  $(K_d = D_i)$  та  $\alpha = \alpha_i$ .



Нечіткий супервізор виконує функції надбудовного рівня керування та не формує безпосередньо керуючий вплив на об'єкт, а змінює параметри ПІД-регулятора залежно від поточного стану системи. Такий підхід дозволяє враховувати нелінійні властивості об'єкта керування та покращувати показники якості перехідного процесу без ускладнення базової структури регулятора [38].

Лінгвістичні змінні «помилка регулювання» та «похідна помилки» описуються набором нечітких термів (NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB), що дозволяє врахувати як знак, так і величину відхилення. Для їх опису використано трикутні функції приналежності, рівномірно розподілені в нормалізованому діапазоні  $[-1; 1]$ .

Вихідні змінні супервізора – нормалізовані коефіцієнти  $K'p$ ,  $K'd$  та параметр  $\alpha$  – описуються обмеженою кількістю термів типу *Small* та *Big*, що спрощує структуру бази правил і зменшує обчислювальну складність алгоритму. Для їх формалізації застосовано дзвоноподібні функції приналежності.

Формування правил здійснюється з урахуванням характерних ділянок бажаного перехідного процесу. На початковому етапі розгону конвеєра необхідно забезпечити високу швидкодію, що досягається збільшенням  $Kp$  та зменшенням  $Kd$ . У зоні наближення до усталеного режиму, навпаки, підсилюється диференціальна складова для зменшення перерегулювання. Такий підхід дозволяє адаптувати поведінку регулятора до поточного стану системи без зміни її базової структури.

### 3.3.4 Програмна реалізація та моделювання

Програмна реалізація нечіткого супервізора виконана в середовищі Matlab/Simulink із використанням пакета Fuzzy Logic Toolbox. Система нечіткого логічного висновку побудована за алгоритмом Мамдані з використанням операцій *min-max* та методу дефазифікації *centroid*. Загальна структура математичної моделі системи керування зі супервізорним ПІД-регулятором наведена на рисунку (див. рис. 3.4).

У процесі моделювання нечіткий супервізор формує коригуючі сигнали для коефіцієнтів ПІД-регулятора, які надалі використовуються в контурі регулювання швидкості електропривода конвеєра. Для перевірки ефективності запропонованого підходу в модель введено збурення за навантаженням, що імітує зміну маси гірничої породи на стрічці. Отримані результати свідчать про зменшення перерегулювання, покращення динамічних показників перехідного процесу та підвищення стійкості системи порівняно з класичним ПІД-регулятором із фіксованими параметрами.

Застосування нечіткого супервізорного керування з адаптивною корекцією коефіцієнтів ПІД-регулятора дозволяє істотно підвищити якість регулювання швидкості стрічкового конвеєра в умовах невизначеності та змінних технологічних режимів. Розроблена математична, алгоритмічна та програмна структура системи керування забезпечує гнучку адаптацію

параметрів регулятора, зменшує вплив збурень і створює передумови для подальшого впровадження інтелектуальних методів керування в АСУ ТП конвеєрних комплексів.

На рис. 3.5 відображені коефіцієнти корекції виходу з супервізора. Показано, що в процесі роботи ПІД-регулятора система фактично переходить до режиму, еквівалентного П-регулюванню, при чому ПІД-регулятор залишається. Це зумовлено тим, що диференціальна та інтегральна складові регулятора (коефіцієнти  $K_d$  і  $K_i$ ) у динамічному режимі остаються постійними, незмінними, а корекція здійснюється, тільки інтегруючи частини.

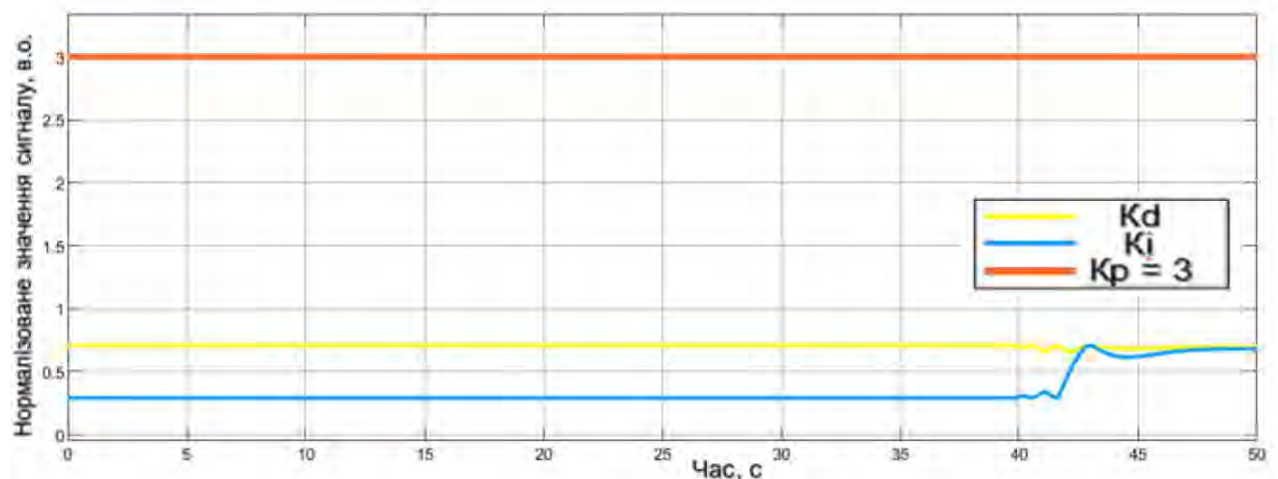


Рисунок 3.5 – Результати моделювання роботи нечіткого супервізора: динаміка зміни коефіцієнтів корекції  $K_p$ ,  $K_i$  та  $K_d$  в середовищі Matlab/Simulink

Така поведінка системи свідчить про коректне налаштування регулятора та забезпечення стійкого функціонування об'єкта керування без значних коливань і перерегулювань.

На рисунку 3.6 відображено результати імітаційного моделювання перехідних процесів швидкості та електромагнітного моменту електропривода з нечітким супервізорним ПІД-керуванням (у нормалізованому вигляді).

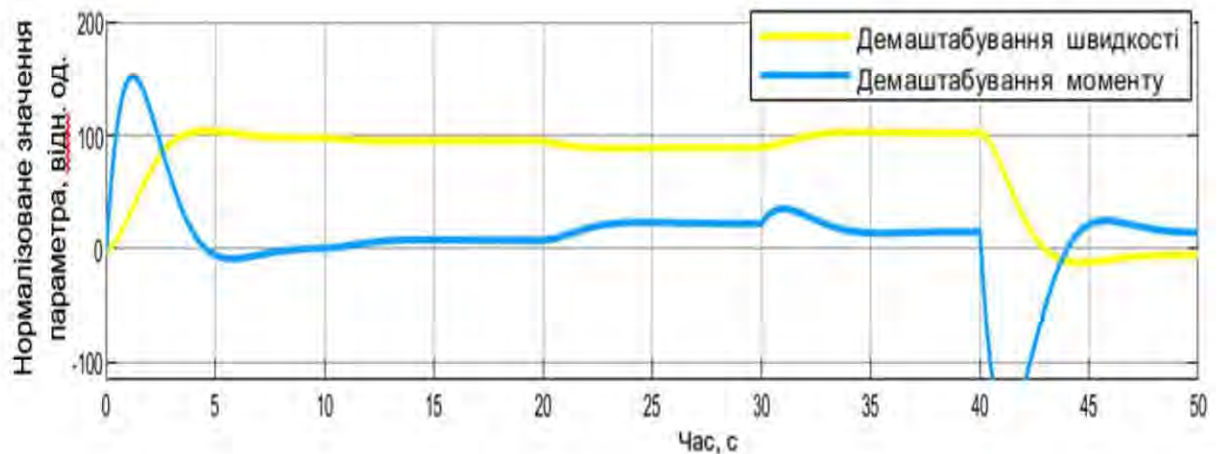


Рисунок 3.6 – Результати імітаційного моделювання перехідних процесів швидкості та електромагнітного моменту електропривода з нечітким супервізорним ПІД-керуванням (у нормалізованому вигляді)

Аналіз графіка (рис. 3.6) перехідних процесів, отриманих у процесі моделювання, дозволяє оцінити вплив нечіткого супервізорного керування на динамічні характеристики системи. При цьому швидкість та електромагнітний момент подано у відносних одиницях, нормалізованих за номінальними значеннями, що забезпечує коректне порівняння та дозволяє узагальнено оцінити динаміку системи незалежно від абсолютних параметрів електропривода. Зокрема, застосування адаптивної корекції коефіцієнтів ПІД-регулятора забезпечує зменшення перерегулювання, скорочення часу встановлення та підвищення стійкості системи при змінних навантаженнях, що підтверджує доцільність використання інтелектуальних методів керування.


### 3.3.5 Аналіз результатів моделювання

Для оцінювання ефективності запропонованого нечіткого супервізорного керування виконано імітаційне моделювання системи автоматичного регулювання швидкості стрічкового конвеєра в середовищі Matlab/Simulink. Моделювання проводилося за умов дії збурень за навантаженням, що імітують зміну маси гірничої породи на стрічці, а також режими пуску, усталеної роботи та гальмування конвеєра.

Аналіз осцилограм перехідних процесів показує, що при використанні супервізорного керування спостерігається зменшення перерегулювання швидкості порівняно з класичним ПІД-регулятором із фіксованими параметрами.

Час встановлення системи скорочується, а коливання швидкості при різких змінах навантаження мають меншу амплітуду, що свідчить про підвищення динамічної стійкості системи.

Зміна коефіцієнтів ПІД-регулятора під дією нечіткого супервізора відбувається плавно та в межах заданих допустимих значень, що



запобігає виникненню нестійких режимів. Зокрема, у фазі розгону та при зростанні навантаження підсилюється пропорційна складова регулятора, тоді як у зоні наближення до усталеного режиму збільшується вплив диференціальної складової, що зменшує перерегулювання.

Отримані результати підтверджують, що використання нечіткого супервізорного керування забезпечує більш якісні показники перехідного процесу, знижує чутливість системи до збурень та створює передумови для зменшення динамічних навантажень на механічні елементи конвеєрного тракту. Це є особливо важливим для умов гірничого виробництва, де стабільність та надійність роботи обладнання мають критичне значення.

Розроблена математична модель системи керування використовується як цифровий прототип алгоритмів, що надалі можуть бути реалізовані у програмованому логічному контролері автоматизованої системи керування. Такий підхід дозволяє виконати попередню перевірку алгоритмів, оптимізувати параметри регуляторів та зменшити ризики під час впровадження програмного забезпечення на реальному промисловому об'єкті.

#### 3.4 Алгоритм керування транспортним трактом «Східний-2»

Робота транспортного тракту «Східний-2» характеризується значною кількістю взаємопов'язаних технологічних вузлів, кожен з яких впливає на загальну стабільність та продуктивність процесу транспортування гірничої маси з горизонту –300 м. У таких умовах ключовим фактором ефективності є не окремі режими роботи обладнання, а узгоджена логіка функціонування всього тракту як єдиного технологічного комплексу.

Саме з цією метою у магістерській роботі розроблено узагальнений алгоритм керування транспортним трактом «Східний-2» (див. рис.3.7. креслення АВЕРС.1п4л.КРМ-14355273.АТХ-БС та рисунок у Додатку Д). Алгоритм охоплює повний цикл роботи тракту – від початкового контролю стану обладнання та поетапного запуску до безперервного моніторингу параметрів, регулювання навантаження та реагування на аварійні ситуації.

На відміну від локальних алгоритмів керування окремими механізмами, представлений алгоритм розглядає тракт «Східний-2» як цілісну систему, у якій дробарка, живильники та стрічкові конвеєри працюють у жорсткій технологічній взаємозалежності.

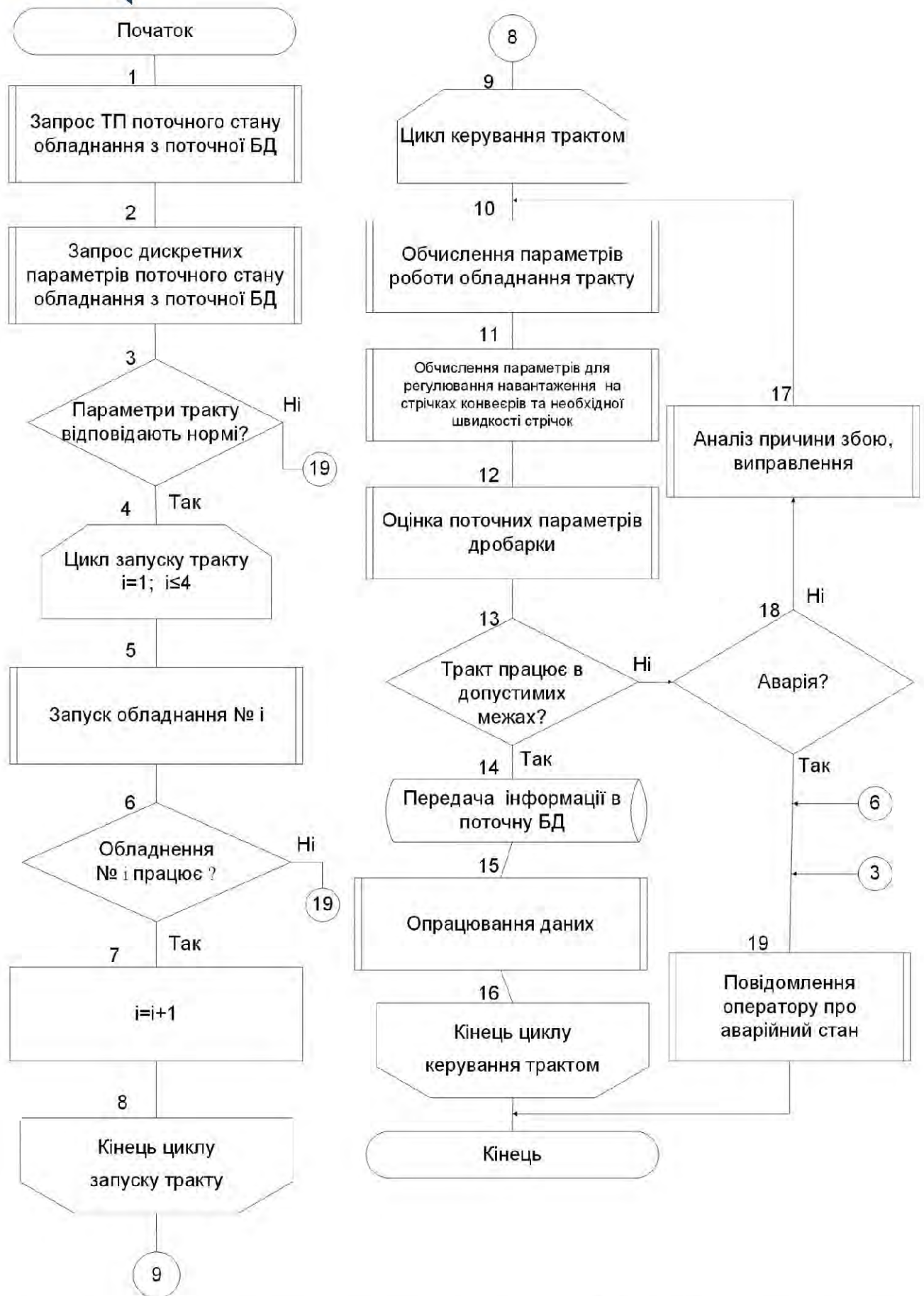


Рисунок 3.7 - Узагальнена блок-схема роботи алгоритму управління тракту «Східний-2»

### 3.4.1 Опис роботи алгоритму відповідно до блок-схеми

На початковому етапі роботи алгоритму система ініціює процес контролю поточного стану обладнання тракту. Після запуску (блок 1) виконується послідовний запит дискретних параметрів з поточної бази даних (блок 2). На цьому етапі формується узагальнене уявлення про реальний стан дробарки, живильників та стрічкових конвеєрів, включаючи сигнали готовності, міжблокування та можливі аварійні ознаки.

Далі алгоритм переходить до логічної оцінки працездатності тракту (блок 3). Тут перевіряється, чи відповідають поточні параметри встановленим допустимим нормам. Така перевірка є критичною, оскільки будь-який некоректний стан окремого вузла може призвести до порушення роботи всього транспортного ланцюга. Якщо на етапі перевірки виявляється, що параметри тракту не відповідають встановленим вимогам, алгоритм блокує запуск обладнання. У цьому випадку система переходить до формування повідомлення оператору про аварійний стан (блок 19) із зазначенням характеру порушення та завершує поточний цикл роботи, очікуючи подальших дій персоналу.

За умови позитивного результату перевірки (блок 3) алгоритм переходить до формування циклу запуску транспортного тракту (блок 4). Запуск здійснюється поетапно, з урахуванням технологічної послідовності та взаємозалежності обладнання транспортного тракту.


У блоці 5 формується команда на запуск чергового вузла тракту, після чого в блоці 6 виконується перевірка фактичного пуску обладнання за зворотними сигналами стану. Перехід до запуску наступного елемента дозволяється лише після підтвердження стабільної роботи попереднього вузла, що забезпечує узгоджений пуск усього тракту.

Якщо ж запуск обладнання не підтверджується, алгоритм формує повідомлення оператору про аварійний стан і завершує поточний цикл роботи (блок 19).

Після успішного запуску всіх елементів тракту цикл запуску завершується (блок 8), і система переходить до основного циклу керування трактом (блок 9).

Така логіка дає змогу запобігти накопиченню гірничої маси у перевантажувальних зонах, обмежити пускові та динамічні навантаження на електроприводи, а також унеможлиблює поширення нештатних режимів на суміжні вузли транспортного ланцюга.

У цьому режимі система працює безперервно, виконуючи розрахунок поточних параметрів роботи обладнання транспортного тракту (блок 10) та визначаючи необхідні режими регулювання навантаження на стрічкових конвеєрах і швидкості їх руху (блок 11). Окрему увагу приділено оцінці поточних параметрів роботи дробарки (блок 12), оскільки рівень її завантаження безпосередньо впливає на стабільність функціонування всього тракту.



Наступним етапом є перевірка допустимості режиму роботи транспортного тракту (блок 13). Якщо всі контрольовані параметри знаходяться в установлених межах, система передає актуальну інформацію про стан обладнання до поточної бази даних (блок 14) та здійснює її подальше опрацювання (блок 15), що забезпечує формування журналів подій і відображення інформації на SCADA-панелі оператора.

У випадку, коли параметри роботи виходять за допустимі межі, алгоритм переходить до перевірки наявності аварійної ситуації (блок 18). Якщо аварійний стан підтверджується, система формує повідомлення оператору про аварію та завершує поточний цикл керування трактом (блок 19). Якщо ж відхилення не класифікується як аварійне, виконується аналіз причин збою та коригування режимів роботи (блок 17) з подальшим поверненням до основного циклу керування.

Таким чином, алгоритм, представлений на кресленні, забезпечує узгоджену, послідовну та безпечну роботу всього транспортного тракту «Східний-2». Його структура відповідає реальній технологічній схемі об'єкта, враховує взаємозв'язки між вузлами та створює основу для стабільної роботи тракту в умовах змінного вантажопотоку та складних експлуатаційних умов.



## 4 ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ

### 4.1 Загальні положення економічного обґрунтування проєкту


Економічне обґрунтування є обов'язковою складовою магістерської кваліфікаційної роботи та спрямоване на оцінку доцільності впровадження запропонованих технічних рішень з позицій ефективності використання виробничих ресурсів. Відповідно до вимог методичних рекомендацій до виконання кваліфікаційних робіт за другим (магістерським) рівнем вищої освіти, економічний розділ повинен відображати взаємозв'язок між технічними рішеннями та можливим економічним ефектом від їх реалізації, а також містити обґрунтовану методику оцінювання ефективності без обов'язкової прив'язки до конфіденційних виробничих показників.

За результатами фундаментальних досліджень магістрального конвеєрного транспорту встановлено, що саме нерівномірність вантажопотоку є ключовим чинником підвищеного електроспоживання, а впровадження регульованих приводів створює найбільший резерв енергозбереження порівняно з іншими технологічними ланками [40].

Об'єктом економічного аналізу в даній роботі є модернізація автоматизованої системи управління технологічним процесом транспортування гірничої маси на горизонті –300 м конвеєрного тракту «Східний-2». Даний технологічний процес характеризується значною протяжністю транспортної лінії, високою енергоємністю електроприводів та змінним характером навантаження. За таких умов економічна ефективність функціонування системи управління визначається не лише стабільністю підтримання технологічних параметрів, але й рівнем експлуатаційних витрат, зокрема витрат на електроенергію, технічне обслуговування та усунення аварійних ситуацій.

У попередніх розділах роботи обґрунтовано доцільність застосування частотно-регульованого електропривода у складі автоматизованої системи управління конвеєрним транспортом, а також вибір сучасної апаратно-програмної платформи керування. З технічної точки зору використання частотних перетворювачів дозволяє адаптувати швидкість руху конвеєрної стрічки до фактичного вантажопотоку, зменшувати пускові струми та динамічні навантаження на механічні вузли, а також реалізовувати функції захисту й діагностики в режимі реального часу [41, 47, 49]. Саме ці технічні фактори формують основу потенційного економічного ефекту від модернізації системи управління.

Метою економічного обґрунтування у даній магістерській роботі є визначення основних складових економічного ефекту від впровадження частотно-регульованого електропривода та автоматизованої системи управління, а також формування універсальної методики оцінювання ефективності, яка може бути використана при практичній реалізації



проєкту на промисловому підприємстві. Для досягнення поставленої мети в межах економічного розділу вирішуються такі основні завдання:

- визначення статей витрат, на які впливають запропоновані технічні рішення;
- аналіз механізмів зниження енергоспоживання електроприводів конвеєрного транспорту;
- обґрунтування можливостей скорочення витрат на технічне обслуговування та ремонт обладнання;
- формування переліку економічних показників, що характеризують ефективність модернізації системи управління.

Економічна доцільність застосування частотно-регульованих електроприводів у конвеєрних системах підтверджується результатами численних науково-технічних досліджень і галузевих аналітичних оглядів. Згідно з опублікованими даними, використання регульованих приводів дозволяє знизити споживання електроенергії за рахунок узгодження швидкості конвеєра з реальним навантаженням, а також уникнення роботи обладнання в неефективних режимах [41, 47, 49]. Додатковий економічний ефект досягається внаслідок зменшення механічного зносу елементів приводу та конвеєрної стрічки, що сприяє скороченню витрат на ремонт і технічне обслуговування.

Особливістю економічного аналізу в межах даної магістерської роботи є відсутність детальних експлуатаційних даних конкретного підприємства, що обумовлено навчально-дослідницьким характером роботи та необхідністю дотримання вимог щодо збереження внутрішньої виробничої інформації. У зв'язку з цим економічне обґрунтування виконується в аналітично-методичному форматі без підстановки числових значень у розрахункові формули. Такий підхід дозволяє продемонструвати логіку формування економічного ефекту та визначити перелік параметрів, які підлягають уточненню на етапі практичного впровадження системи.

У даній роботі економічна ефективність модернізації автоматизованої системи управління технологічним процесом розглядається як сукупність прямих і непрямих ефектів. До прямих ефектів належить зниження витрат на електроенергію та технічне обслуговування обладнання, тоді як непрямі ефекти проявляються у підвищенні стабільності технологічного процесу, зменшенні кількості аварійних зупинок і покращенні керованості конвеєрного тракту. Сукупність зазначених факторів створює передумови для підвищення загальної ефективності функціонування системи транспортування гірничої маси та обґрунтовує доцільність впровадження запропонованих технічних рішень.

## 4.2 Формування вихідних даних та обмеження економічних розрахунків

Коректне виконання кількісного економічного аналізу автоматизованих систем управління технологічними процесами базується на використанні достовірних вихідних даних, що відображають реальні умови експлуатації обладнання. Для систем електропривода конвеєрного транспорту такими даними є фактичні графіки навантаження електродвигунів, тривалість роботи обладнання у різних режимах, обсяги споживаної електроенергії, статистика аварійних зупинок, а також витрати на технічне обслуговування і ремонт.

У промисловій практиці зазначені показники формуються на основі даних енергетичного обліку, експлуатаційної документації та систем диспетчерського контролю. Разом з тим, у межах виконання магістерської кваліфікаційної роботи доступ до детальних експлуатаційних і економічних показників конкретного підприємства, як правило, є обмеженим. Це обумовлено вимогами щодо збереження внутрішньої виробничої інформації та відповідає загальноприйнятій практиці підготовки кваліфікаційних робіт інженерного спрямування.

З огляду на зазначене, у даному економічному розділі застосовується аналітично-методичний підхід до оцінки ефективності модернізації автоматизованої системи управління. Його сутність полягає у формуванні універсальної структури економічних розрахунків без підстановки конкретних числових значень, що дозволяє зберегти наукову коректність аналізу та водночас продемонструвати причинно-наслідковий зв'язок між технічними рішеннями і економічними показниками.

Для економічної оцінки модернізації системи управління конвеєрного транспорту визначається перелік вихідних параметрів, які умовно поділяються на кілька груп.

До енергетичних вихідних даних належать:

- номінальна та середня потужність електроприводів конвеєрів;
- тривалість роботи обладнання протягом року;
- коефіцієнти завантаження електроприводів у різні періоди;
- тариф на електроенергію або приведена вартість


електроспоживання.

Зазначені параметри визначають можливість оцінки економічного ефекту від зниження енергоспоживання при застосуванні частотно-регульованого електропривода, що підтверджується результатами науково-технічних досліджень [41, 47, 49].

До експлуатаційних вихідних даних відносяться:

– витрати на планове технічне обслуговування електроприводів і механічних вузлів;

- частота та вартість ремонтних робіт;
- середня тривалість простоїв обладнання;
- втрати, пов'язані з аварійними зупинками транспортного тракту.



Ці параметри є основою для оцінки економічного ефекту від зменшення механічного зносу та підвищення надійності роботи конвеєрного обладнання внаслідок впровадження сучасних засобів автоматизації.

Окрему групу становлять організаційно-технологічні параметри, до яких належать продуктивність транспортного тракту, узгодженість режимів роботи суміжного обладнання, рівень автоматизації системи та можливості оперативного реагування на зміну технологічних умов. Хоча ці показники складно безпосередньо виразити у грошовій формі, вони істотно впливають на загальну економічну ефективність виробництва через зменшення непрямих витрат і підвищення стабільності технологічного процесу.

У зв'язку з відсутністю конкретних числових значень зазначених параметрів у межах даної роботи, економічні розрахунки виконуються у загальному вигляді з використанням аналітичних залежностей. Зокрема, річна економія електроенергії визначається як різниця між її споживанням у базовому та модернізованому режимах, а економічний ефект від скорочення витрат на технічне обслуговування – як різниця відповідних річних витрат до і після впровадження системи управління.


Такий підхід дозволяє сформулювати універсальну методику економічної оцінки, визначити перелік параметрів, що підлягають уточненню на етапі практичного впровадження, а також забезпечити можливість адаптації розрахунків до конкретних умов експлуатації без зміни загальної структури аналізу. Таким чином, економічні обмеження у даному розділі мають методичний характер і не впливають на обґрунтованість загальних висновків щодо доцільності модернізації системи управління.

Аналогічний аналітичний підхід до оцінки енергоефективності використовується у фундаментальних дослідженнях магістрального конвеєрного транспорту, де наголошується на обмеженості достовірних експлуатаційних даних і доцільності використання узагальнених залежностей для формування економічних висновків [40, 48].

#### 4.3 Економічний ефект від зниження енергоспоживання електропривода

Фундаментальні дослідження показують, що основний енергетичний ефект від регулювання швидкості руху стрічки досягається за рахунок зменшення витрат енергії на переміщення рухомих елементів конвеєра в періоди зниженого або відсутнього вантажопотоку, тоді як енергія, витрачена безпосередньо на транспортування гірничої маси, залишається відносно стабільною [40, 48].

Енергоспоживання є однією з основних статей експлуатаційних витрат при роботі конвеєрного транспорту гірничих підприємств. Особливістю стрічкових конвеєрів є змінний характер вантажопотоку, внаслідок чого електроприводи значну частину часу працюють у режимах,



відмінних від номінального. У традиційних системах керування, де швидкість руху стрічки є сталою, це призводить до неефективного використання електроенергії, оскільки електродвигун експлуатується з пониженим коефіцієнтом корисної дії та підвищеними питомими енерговитратами.

Застосування частотно-регульованого електропривода принципово змінює характер роботи електродвигуна [49]. Регулювання частоти живлення дозволяє адаптувати швидкість руху конвеєрної стрічки до фактичного навантаження, що безпосередньо впливає на величину споживаної активної потужності. У періоди зниженого вантажопотоку зменшується швидкість обертання приводу, а отже – і середня потужність, що споживається електроприводом протягом робочого циклу.

За результатами наукових досліджень і промислових оглядів, впровадження частотно-регульованих електроприводів у конвеєрних системах забезпечує зниження споживання електроенергії в середньому на 10–30% [40], а за умов значної нерівномірності навантаження – до 35–40%. [40, 54, 55] Саме тому енергетичний ефект розглядається як найбільш прогнозована та кількісно значуща складова загального економічного ефекту від модернізації системи управління.

З техніко-економічної точки зору зменшення енергоспоживання має подвійний ефект. По-перше, досягається безпосереднє скорочення витрат на електроенергію. По-друге, зменшуються теплові та електричні навантаження на електродвигуни, силову апаратуру та кабельні лінії, що позитивно впливає на надійність роботи обладнання, особливо в умовах підземного або напівпідземного розміщення конвеєрів.

#### 4.3.1. Методика оцінки енергетичного ефекту

Річне споживання електроенергії електроприводом у базовому режимі (без регулювання швидкості) визначається за залежністю:

$$W_{\text{баз}} = P_{\text{баз}} * T, \quad (4.1)$$

де  $P_{\text{баз}}$  – середня споживана потужність електропривода у базовому режимі, кВт;

$T$  – річний фонд часу роботи електропривода, год.

Річне споживання електроенергії при застосуванні частотно-регульованого електропривода визначається аналогічно:

$$W_{\text{рег}} = P_{\text{рег}} * T, \quad (4.2)$$

де  $P_{\text{рег}}$  – середня споживана потужність електропривода при регульованій швидкості, кВт.

Абсолютна економія електроенергії за рік становить:

$$\Delta W = W_{\text{баз}} - W_{\text{рег}}. \quad (4.3)$$



Для порівняльної оцінки ефективності використовується показник відносної економії електроенергії:

$$\eta W = \frac{W_{\text{баз}}}{\Delta W} * 100\%. \quad (4.4)$$

З урахуванням літературних даних для конвеєрних систем [31, 34, 36]:

$$\eta W = 10 - 30\% \text{ (типові умови)}. \quad (4.5)$$

$$\eta W = 30 - 40\% \text{ (нерівномірне навантаження)}. \quad (4.6)$$

У загальному випадку середня споживана потужність електропривода може бути визначена з урахуванням коефіцієнта використання встановленої потужності [44, 45, 47]:

$$P_{\text{сер}} = P_{\text{ном}} * k_{\text{вик}}, \quad (4.7)$$

де  $P_{\text{ном}}$  – номінальна потужність електродвигуна, кВт;  
 $k_{\text{вик}}$  – коефіцієнт використання встановленої потужності.

#### 4.3.2 Вартісна оцінка енергетичного ефекту

Вартісний ефект від зниження споживання електроенергії визначається як:

$$E_{\text{ел}} = \Delta W \cdot C_{\text{ел}}, \quad (4.8)$$

де  $C_{\text{ел}}$  – тариф на електроенергію, грн/кВт·год.

Додатковий економічний ефект може бути отриманий за рахунок зниження пікових навантажень на електромережу, що особливо актуально для протяжних конвеєрних трас [47]. У цьому випадку економія визначається як:

$$E_{\text{пik}} = (P_{\text{пik, баз}} - P_{\text{пik, рег}}) * C_{\text{пik}}, \quad (4.9)$$


де  $P_{\text{пik, баз}}$  – пікові значення потужності відповідно у базовому та регульованому режимах;

$C_{\text{пik}}$  – приведені витрати, пов'язані з піковими навантаженнями.

Загальний енергетичний економічний ефект визначається як сума окремих складових:

$$E_{\text{ен}} = E_{\text{ел}} + E_{\text{пik}}. \quad (4.10)$$

Таким чином, зниження енергоспоживання електропривода внаслідок впровадження частотно-регульованого керування є найбільш



наочною та кількісно обґрунтованою складовою економічної доцільності модернізації автоматизованої системи управління. Отримані аналітичні залежності дозволяють виконати розрахунок енергетичного ефекту для конкретних умов експлуатації на етапі практичного впровадження проєкту.

#### 4.4 Економічний ефект від зменшення зносу, простоїв та експлуатаційних витрат

Окрім енергетичної складової, суттєвий економічний ефект формується за рахунок зменшення механічного зносу елементів конвеєрного транспорту та скорочення кількості аварійних зупинок. У традиційних системах пуск і зупинка конвеєра супроводжуються різкими змінами крутного моменту, що призводить до підвищених динамічних навантажень на редуктори, підшипники, приводні барабани та стрічку [48, 50].

За результатами експериментальних і модельних досліджень встановлено, що застосування частотно-регульованого електропривода дозволяє істотно знизити інтенсивність зносу механічних елементів конвеєра, що проявляється у кратному зростанні ресурсу роликкоопор і конвеєрної стрічки та безпосередньо впливає на зменшення витрат на технічне обслуговування і ремонт [25, 40, 42, 46, 49].

Частотно-регульований електропривод забезпечує плавний пуск і гальмування, що знижує амплітуду механічних напружень. За даними галузевих досліджень, застосування регульованих приводів дозволяє зменшити інтенсивність механічного зносу на 20–40 %, а ресурс основних вузлів збільшується у 1,3–1,8 раза [25, 38, 40, 46, 52].

##### 4.4.1 Методика оцінки енергетичного ефекту

Для оцінки енергетичного ефекту можуть використовуватися формули наведені далі.

Річні витрати на технічне обслуговування до модернізації:


$$C_{\text{то,баз}} = \sum_{i=1}^n C_{i,\text{баз}}. \quad (4.11)$$

де  $C_{\text{то,баз}}$  – річні витрати на технічне обслуговування обладнання до модернізації, грн/рік;

$C_{i,\text{баз}}$  – витрати на технічне обслуговування  $i$ -го елемента або вузла обладнання до модернізації, грн/рік;

Після модернізації:

$$C_{\text{то,пер}} = \sum_{i=1}^n C_{i,\text{пер}}. \quad (4.12)$$



де  $C_{то,рег}$  – річні витрати на технічне обслуговування обладнання після модернізації (за умови впровадження частотно-регульованого електропривода та вдосконаленої АСУ ТП), грн/рік;

$C_{i,рег}$  – витрати на технічне обслуговування  $i$ -го елемента або вузла обладнання після модернізації, грн/рік;

$n$  - кількість елементів, вузлів або одиниць обладнання, для яких враховуються витрати на технічне обслуговування.

Економія витрат на технічне обслуговування:

$$E_{то} = C_{то, баз} - C_{то, рег}. \quad (4.13)$$

Відносно зменшення витрат:

$$\eta_{то} = \frac{E_{то}}{C_{то, баз}} * 100\%. \quad (4.14)$$

За літературними даними [21, 25, 38]:

$$\eta_{то} = 15 - 35\%. \quad (4.15)$$

Середня тривалість простоїв до модернізації:

$$T_{пр, баз} = \sum_{j=1}^m t_{j, баз}. \quad (4.16)$$

Після модернізації:

$$T_{пр, рег} = \sum_{j=1}^m t_{j, рег}. \quad (4.17)$$

Скорочення простоїв:


$$\Delta T_{пр, баз} = T_{пр, баз} - T_{пр, рег}. \quad (4.18)$$

Відносне скорочення простоїв:

$$\eta_{пр} = \frac{\Delta T_{пр, баз}}{T_{пр, баз}} * 100\%. \quad (4.19)$$

За даними досліджень [8, 23, 27]:

$$\eta_{то} = 10 - 25\%. \quad (4.20)$$



Витрати від простоїв:

$$C_{\text{пр}} = T_{\text{пр}} * C_{\text{год}} \quad (4.21)$$

де  $C_{\text{год}}$  – приведені втрати за 1 год простою.  
Економія від зменшення простоїв:

$$E_{\text{пр}} = C_{\text{пр,баз}} - C_{\text{пр,рег}} \quad (4.22)$$

Загальний експлуатаційний ефект:

$$E_{\text{експ}} = E_{\text{ТО}} + E_{\text{пр}} \quad (4.23)$$

Таким чином, експлуатаційний ефект від впровадження частотно-регульованого електропривода проявляється не лише у зменшенні прямих витрат, але й у підвищенні надійності та прогнозованості роботи конвеєрного транспорту, що має важливе значення для безперервних технологічних процесів [24, 26, 27, 28].

4.5 Узагальнена оцінка економічної ефективності та терміну окупності проекту

У попередніх підпунктах економічного розділу було розглянуто основні складові економічного ефекту від модернізації автоматизованої системи управління конвеєрного транспорту, а саме: ефект від зниження енергоспоживання електропривода та ефект від зменшення механічного зносу, скорочення витрат на технічне обслуговування і зниження простоїв обладнання. У даному підпункті виконується інтеграція зазначених складових з метою отримання узагальненої оцінки економічної доцільності впровадження запропонованих технічних рішень, а також визначення можливого терміну їх окупності.

Сумарний річний економічний ефект від впровадження частотно-регульованого електропривода та модернізації АСУ ТП формується як сукупність окремих складових і у загальному вигляді може бути поданий залежністю:


$$E_{\text{заг}} = E_{\text{ен}} + E_{\text{ТО}} + E_{\text{пр}} \quad (4.24)$$

де  $E_{\text{ен}}$  – економічний ефект від зниження енергоспоживання електропривода;

$E_{\text{ТО}}$  – економія витрат на технічне обслуговування і ремонт;

$E_{\text{пр}}$  – економічний ефект від скорочення втрат, пов'язаних із простоями обладнання.

Такий підхід відповідає загальноприйнятій практиці техніко-економічної оцінки автоматизованих систем управління і дозволяє



комплексно врахувати як прямі, так і непрямі економічні наслідки модернізації.

Для оцінки інвестиційної доцільності проекту необхідно також врахувати капітальні витрати, пов'язані з упровадженням модернізованої системи управління. У загальному вигляді капітальні витрати можуть бути подані у вигляді:

$$K = C_{\text{пч}} + C_{\text{АСУ}} + C_{\text{МОН}} + C_{\text{НАЛ}}. \quad (4.25)$$

де  $C_{\text{пч}}$  – витрати на частотно-регульований електропривод;

$C_{\text{АСУ}}$  – витрати на модернізацію апаратно-програмних засобів АСУ  
ТП;

$C_{\text{МОН}}$  – витрати на монтажні роботи;

$C_{\text{НАЛ}}$  – витрати на пусконаладжувальні роботи.

У межах магістерської кваліфікаційної роботи зазначені витрати не конкретизуються чисельно, однак наведена структура дозволяє виконати подальший аналіз економічної ефективності та окупності після уточнення вихідних даних на етапі практичного впровадження.


Одним із ключових інтегральних показників ефективності інвестицій у технічні системи є термін окупності проекту, який визначається як відношення капітальних витрат до сумарного річного економічного ефекту:

$$T_{\text{ок}} = \frac{K}{E_{\text{ЗАГ}}}. \quad (4.26)$$

З практичної точки зору для систем автоматизації та електроприводів у гірничій промисловості прийнятними вважаються терміни окупності в межах 1,5–3 років [3, 26, 41, 48], що підтверджується галузевими дослідженнями та технічними оглядами виробників приводної техніки.

З огляду на змінність умов експлуатації конвеєрного транспорту та відсутність точних вихідних даних у межах даної роботи, доцільно виконати узагальнену оцінку економічної ефективності за двома сценаріями – обережним (консервативним) та агресивним (оптимістичним).

Обережний сценарій відповідає умовам відносно рівномірного вантажопотоку та стабільної роботи обладнання і передбачає зниження енергоспоживання на рівні 10–15%, скорочення витрат на технічне обслуговування на 15–20 % та зменшення простоїв обладнання на 10–15%. За таких умов сумарний економічний ефект формується переважно за рахунок енергетичної складової, а термін окупності проекту, як правило, наближається до верхньої межі прийнятного діапазону і становить приблизно 2,5–3,0 роки [3, 26, 41, 48].



Агресивний сценарій відповідає умовам значної нерівномірності вантажопотоку, частих пусків і підвищених динамічних навантажень на обладнання. У цьому випадку зниження енергоспоживання може досягати 25–35%, скорочення витрат на технічне обслуговування – 25–35%, а зменшення простоїв – 20–30%. За таких умов сумарний економічний ефект істотно зростає, що забезпечує скорочення терміну окупності до 1,2–1,8 року [3, 26, 41, 48]. Подібні значення є характерними для транспортних трактів зі змінним вантажопотоком, де застосування частотно-регульованого електропривода дозволяє максимально реалізувати потенціал автоматизованого керування [41].

Таким чином, узагальнена оцінка економічної ефективності свідчить про доцільність модернізації АСУ ТП конвеєрного транспорту. Навіть за консервативного сценарію проєкт має прийнятний термін окупності, а за сприятливих умов експлуатації – забезпечує швидке повернення інвестицій та формування стійкого економічного ефекту.

#### 4.6 Адаптація сценаріїв під конкретні умови ІНГЗК

##### 4.6.1 Специфіка умов ІНГЗК, що впливає на економічний ефект

Умови експлуатації конвеєрного транспорту на Інгuleцькому гірничо-збагачувальному комбінаті характеризуються рядом особливостей, які безпосередньо впливають на формування економічного ефекту від впровадження частотно-регульованого електропривода та модернізації АСУ ТП:


- значна протяжність транспортних трактів і велика кількість послідовно з'єднаних конвеєрів;
- циклічно-поточний характер транспортування з нерівномірним надходженням гірничої маси;
- робота обладнання у важких умовах (запиленість, вібрації, температурні коливання);
- висока вартість простоїв через вплив на роботу суміжних технологічних ланок (дроблення, збагачення).

З огляду на це економічний ефект від автоматизації формується не лише за рахунок енергозбереження, а й через підвищення стабільності всього технологічного ланцюга [28].

##### 4.6.2 Обережний сценарій для умов ІНГЗК

Обережний сценарій для ІНГЗК відповідає умовам, за яких модернізація впроваджується без кардинальної зміни технологічних режимів, а частотно-регульований привід використовується переважно для:

- плавного пуску та зупинки конвеєрів;
- обмеження пікових струмів і моментів;
- базового коригування швидкості у межах допустимих технологічних режимів.



За такого підходу основний економічний ефект формується за рахунок:

- зменшення механічних навантажень на привідні вузли та стрічку;
- зниження аварійності при пускових режимах;
- поступового скорочення витрат на ремонти та технічне обслуговування.

Енергетичний ефект у цьому сценарії має допоміжний характер, оскільки швидкість конвеєра змінюється обмежено і лише у визначених технологічних межах. Такий сценарій є найбільш реалістичним на початковому етапі впровадження модернізованої АСУ ТП на ІНГЗК, коли пріоритетом є надійність і безперервність виробництва.

#### 4.6.3 Агресивний сценарій для умов ІНГЗК

Агресивний сценарій відповідає умовам повноцінного використання потенціалу частотно-регульованого електропривода та інтеграції його з алгоритмами адаптивного керування в АСУ ТП. У цьому випадку регулювання швидкості конвеєра здійснюється з урахуванням:

- фактичного навантаження на стрічку;
- струмів електроприводів;
- режимів роботи суміжного обладнання (дробарок, живильників);
- допустимих динамічних навантажень на механічні елементи.

Для ІНГЗК такий сценарій є особливо актуальним через циклічність надходження гірничої маси та значні коливання вантажопотоку. У цьому випадку економічний ефект формується комплексно:

- істотно знижується питомий рівень енергоспоживання за рахунок роботи привода у режимах, близьких до оптимальних;
- зменшується знос стрічки, редукторів і підшипникових вузлів через відсутність різких динамічних перевантажень;
- скорочується кількість аварійних зупинок і технологічних «розривів» у роботі тракту.


Агресивний сценарій доцільний для впровадження після етапу дослідної експлуатації, коли персонал адаптований до нової системи керування, а алгоритми регулювання відпрацьовані та перевірені в реальних умовах.

#### 4.6.4 Порівняльна логіка сценаріїв для ІНГЗК

Таким чином, для умов ІНГЗК доцільно розглядати поетапний перехід від обережного до агресивного сценарію. Це дозволяє:

- мінімізувати виробничі ризики;
- забезпечити стабільність технологічного процесу;
- поступово реалізувати повний економічний потенціал модернізованої АСУ ТП.

Саме така логіка відповідає практиці впровадження автоматизованих систем управління на великих гірничо-збагачувальних підприємствах.



Подібна сценарна логіка узгоджується з результатами досліджень магістрального конвеєрного транспорту, у яких показано, що максимальний економічний ефект від застосування регульованих електроприводів реалізується саме за умов циклічного та нерівномірного надходження вантажопотоків, характерних для гірничо-збагачувальних підприємств [40].

4.7 Обґрунтування практичної доцільності та економічної ефективності запропонованих технічних рішень (з посиланнями на джерела)

Слід зазначити, що якісний розрахунок економічної ефективності розробленої системи за вказаною вище методикою неможливий в зв'язку з відсутністю детальних експлуатаційних та економічних даних підприємства. У зв'язку з цим розрахунок річної економії електроенергії, скорочення експлуатаційних витрат і терміну окупності у грошовому вираженні не виконується, а економічна оцінка має аналітично-методичний характер.


Разом з тим, доцільність і економічна ефективність запропонованих технічних рішень підтверджується результатами незалежних наукових досліджень і промислових впроваджень, виконаних для стрічкових конвеєрів гірничих підприємств з нерівномірним вантажопотоком, аналогічних за умовами експлуатації об'єкту дослідження даної роботи.

Так, у дослідженні [40] показано, що впровадження частотно-регульованих електроприводів у магістральних конвеєрних системах з урахуванням динаміки вантажопотоків забезпечує зниження енергоспоживання на 15–30%, а за умов значної нерівномірності навантаження – до 35%, при одночасному зменшенні динамічних навантажень на механічні елементи та підвищенні загальної енергоефективності транспортного процесу.

Аналогічні результати наведено у науковій статті [16], де за результатами моделювання та експериментальної апробації встановлено, що застосування автоматизованих систем керування електроприводами стрічкових конвеєрів дозволяє знизити споживання електроенергії в середньому на 12–28%, а також скоротити експлуатаційні витрати, пов'язані з технічним обслуговуванням, на 20–30% за рахунок зменшення механічного зносу та кількості аварійних режимів.

Промислові технічні огляди та інженерні звіти компанії Siemens AG (зокрема, для перетворювачів серії SINAMICS) [55, 56] підтверджують, що використання частотно-регульованих приводів у конвеєрних застосуваннях забезпечує економію електроенергії на рівні 10–30%, а також сприяє зниженню пікових навантажень на електромережу і збільшенню ресурсу механічних вузлів, що опосередковано зменшує витрати на ремонти та простой обладнання.

Таким чином, аналіз результатів фундаментальних наукових досліджень, оглядових публікацій та промислових інженерних



впровадження свідчить, що запропонована у даній магістерській роботі модернізована автоматизована система управління конвеєрним трактом «Східний-2» за своїми функціональними та технічними характеристиками відповідає сучасним енергоефективним системам керування конвеєрним транспортом. Зокрема, у працях [41, 48] показано, що застосування регульованих електроприводів у стрічкових конвеєрах забезпечує зниження енергоспоживання до 30–40 % за умов нерівномірного вантажопотоку, тоді як оглядові дослідження [55] підтверджують реалістичність економії електроенергії на рівні 15–35 %, скорочення витрат на технічне обслуговування та ремонт на 20–30 %, а також зменшення простоїв обладнання. Промислові технічні огляди компанії Siemens AG [56] для перетворювачів серії SINAMICS додатково підтверджують досяжність зазначених показників у реальних умовах експлуатації, зниження пікових навантажень на електромережу та збільшення ресурсу механічних вузлів. Сукупність наведених результатів дозволяє обґрунтовано очікувати, що впровадження розробленої системи забезпечить істотний економічний ефект і підтверджує доцільність її практичної реалізації [41, 48, 55].



## ВИСНОВКИ

У магістерській кваліфікаційній роботі розглянуто актуальну проблему підвищення ефективності та надійності автоматизованого управління циклічно-поточною технологією транспортування гірничої маси з горизонту –300 м в умовах ПРАТ «ІНГЗК» на конвеєрному тракті «Східний-2». Актуальність обраної теми зумовлена складними умовами експлуатації конвеєрного транспорту, нерівномірним характером вантажопотоку, високою енергоємністю процесу та необхідністю переходу до сучасних цифрових і інтелектуальних підходів управління.

На підставі проведеного аналізу технологічного процесу, роботи існуючої системи автоматизації та літературних джерел обґрунтовано актуальність реконструкції автоматизованої системи управління трактом «Східний-2» ПРАТ «ІНГЗК» з метою підвищення ефективності виробництва за рахунок використання сучасних технічних засобів та програмного забезпечення.

Здійснено постановку основних задач системи, проведено розподіл цих задач за рівнями та розроблено креслення «Взаємозв'язок функціональних завдань модернізованої автоматизованої системи керування».

Розроблено структурна схема комплексу технічних засобів тракту «Східний-2» дробильної фабрики ІНГЗК, яка відображає склад задіяного обладнання та логіку побудови автоматизованої системи керування, сформовану з урахуванням протяжності транспортного тракту, значної енергоємності приводів та підвищених вимог до безперервності технологічного процесу на горизонті –300 м, здійснено обґрунтування та вибір технічних засобів автоматизації реконструйованої системи.


Розроблено систему автоматичного регулювання швидкості конвеєра в середовищі TIA Portal, визначена структура мережевої взаємодії між контролером, операторською станцією та периферійними пристроями системи керування та топологія промислової мережі системи автоматизованого керування конвеєрним трактом на базі ПЛК та SCADA.

Для підвищення якості регулювання швидкості стрічкового конвеєра в умовах змінного навантаження та наявності зовнішніх збурень у роботі запропоновано використання нечіткого супервізорного керування, яке здійснює адаптивну корекцію параметрів ПІД-регулятора в реальному часі. Розроблено математичну модель системи керування зі супервізором, визначено алгоритмічну структуру нечіткого супервізора. Програмну реалізацію нечіткого супервізора виконано в середовищі Matlab/Simulink із використанням пакета Fuzzy Logic Toolbox.

Розроблено та описано узагальнений алгоритм керування трактом «Східний-2».

Оцінено очікувану економічну ефективність модернізації АСУТП.

Загалом у роботі запропоновано та обґрунтовано комплекс технічних, алгоритмічних і організаційних рішень, спрямованих на



підвищення ефективності функціонування конвеєрного транспорту гірничо-збагачувального підприємства в умовах змінного вантажопотоку та підвищених вимог до надійності виробничих процесів. Запропонований підхід базується на поєднанні класичних методів автоматичного керування із сучасними засобами частотно-регульованого електропривода та елементами інтелектуального супервізорного керування, що дозволяє адаптувати режими роботи обладнання до реальних експлуатаційних умов.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості їх використання при модернізації діючих автоматизованих систем управління технологічними процесами без суттєвої заміни основного механічного обладнання та з мінімальним втручанням у існуючу інфраструктуру. Запропоновані рішення можуть бути впроваджені поетапно, що знижує ризики порушення технологічного процесу та робить модернізацію економічно доцільною. Крім того, розроблена структура системи управління та алгоритмічні рішення створюють основу для подальшого розвитку АСУ ТП у напрямі цифровізації, впровадження елементів прогнозування технічного стану та інтеграції з верхніми рівнями управління підприємством.

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Rio Tinto. Smart mining: Mine Automation System. URL: <https://www.riotinto.com/en/mn/about/innovation/smart-mining> (дата звернення: 17.11.2025).
2. Siemens AG. SINAMICS – Converters for single-axis drives. Motion control drives D31.5-D31.7 (catalogs). URL: [https://cache.industry.siemens.com/dl/files/076/109811076/att\\_1110172/v1/motion-control-drives-D31-7-complete-English-2022-05-Update-2022-07.pdf](https://cache.industry.siemens.com/dl/files/076/109811076/att_1110172/v1/motion-control-drives-D31-7-complete-English-2022-05-Update-2022-07.pdf) (дата звернення: 17.11.2025).
3. Siemens AG. Power Engineering Guide. Remote monitoring and control, energy efficiency with converters. URL: <https://manuals.plus/m/2e56aab5bdfc07813f60e436b5f34e7f4c32ccd78d315543a34b1c5a2d2bd8b3> (дата звернення: 17.11.2025).
4. Rulmeca S.p.A. Rulmeca Monitoring System (RMS. Remote monitoring system for conveyor. URL: <https://www.rulmeca.com/en/rms-monitoring/351/p>. (дата звернення: 17.11.2025).
5. Rulmeca Group. Motorized Pulley. Complete catalogue. Motorized Pulleys for belt conveyors (catalog). URL: [https://www.rulmeca.fi/Rulmeca\\_download/Motorized\\_Pulleys\\_BH\\_complete\\_catalogue.pdf](https://www.rulmeca.fi/Rulmeca_download/Motorized_Pulleys_BH_complete_catalogue.pdf). (дата звернення: 17.11.2025).
6. Rulmeca Group. RMS. Flyer. RMS MP 2025 (презентаційний буклет про систему віддаленого моніторингу). URL: [https://www.rulmeca.fi/Rulmeca\\_download/Flyer\\_RMS\\_MP\\_2025.pdf](https://www.rulmeca.fi/Rulmeca_download/Flyer_RMS_MP_2025.pdf). (дата звернення: 17.11.2025).
7. Equipment and Operations Automation in Mining: A Review. ResearchGate, 2025. URL: [https://www.researchgate.net/publication/384760300\\_Equipment\\_and\\_Operations\\_Automation\\_in\\_Mining\\_A\\_Review](https://www.researchgate.net/publication/384760300_Equipment_and_Operations_Automation_in_Mining_A_Review) (дата звернення: 11.01.2026).
8. Improving the Efficiency of a Conveyor System in an Automated Manufacturing Environment Using a Model-Based Approach. International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research. 2023. URL: <https://www.ijmerr.com/2023/IJMERR-V12N2-107.pdf> (дата звернення: 11.01.2026).
9. SANY Mining Summit 2025: Shaping the Next Mine. 11 Sept. 2025. URL: [https://www.sanyglobal.com/press\\_releases/4804/](https://www.sanyglobal.com/press_releases/4804/) (дата звернення: 10.12.2025).
10. Building Smarter Equipment: SANY Is Accelerating Intelligent Transformation. 7 Aug. 2025. URL: <https://www.plataformamedia.com/en/2025/08/07/building-smarter-equipment-sany-is-accelerating-intelligent-transformation/> (дата звернення: 10.12.2025).
11. SANY Heavy Industry Co., Ltd. Accelerating Digital and Intelligent Transformation: SANY Leads Industry Innovation and Upgrading. 13 May



2024. URL: <https://m.sanygroup.com/news/13839.html> (дата звернення: 10.12.2025).

12. Автоматизація гірничо-збагачувальної промисловості: обладнання та рішення від КСК-Автоматизація : веб-сайт. URL: <https://kck.ua/applications/girnicho-zbagachuvalna-promislovist-2> (дата звернення: 10.11.2025).

13. Автоматизація ГОК. Інноваційні рішення для гірничо-збагачувальних комбінатів : веб-сайт. URL: <https://automatech.com.ua/girnicho-zbagachuvalni-kombinati-gzk> (дата звернення: 10.11.2025).

14. Morkun V., Savitskyi O., Tymoshenko M. Multiagent control and predictive diagnostics of distributed iron ore enrichment system based on CPS. Advances in Cyber-Physical Systems. 2016. URL: <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2017/dec/7535/8.pdf> (дата звернення: 10.11.2025).

15. PLC and SCADA Integration in Mining Industry. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). 2025. Vol. 12, Issue 06. URL: <https://www.irjet.net/archives/V12/i6/IRJET-V12I608.pdf> (дата звернення: 17.11.2025).

16. Research on and Design of an Electric Drive Automatic Control System for Mine Belt Conveyors. MDPI. 2023. URL: <https://www.mdpi.com/2227-9717/11/6/1762> (дата звернення: 17.11.2025).

17. Економіка підприємства : підручник за ред. С. Ф. Покропивного. Київ : КНЕУ, 2019. 528 с.


18. Gabr A. et al. Design of automatic deflection correction device and control system for storage belt bin of retractable belt conveyor. Journal of Engineering and Applied Science. 2025. URL: <https://link.springer.com/article/10.1186/s44147-025-00807-5> (дата звернення: 17.01.2026).

19. Ляшенко О., Стародубцев М., Макаренко Г., Пащенко О. Керування електромеханічними системами конвеєрних ліній. Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості. 2024. URL: <https://www.itssi-journal.com/index.php/itssi/article/view/527> (дата звернення: 17.01.2026).

20. The Mining Automation Pyramid : Mipac. 2025. URL: <https://www.mipac.com.au/mining-automation-pyramid/> (дата звернення: 17.01.2026).

21. Mine Automation & Monitoring Systems : Eaton. URL: <https://www.eaton.com/ca/en-gb/products/safety-security-emergency-communications/mining-communications--monitoring-and-automation-systems/mine-automation---monitoring-systems.html> (дата звернення: 01.12.2025).

22. 10 IoT Technologies for Sustainable Mining : Softweb. 2025. URL: <https://softweb.co.in/blog/10-iot-technologies-for-sustainable-mining/> (дата звернення: 12.01.2025).



23. Revolutionizing Conveyor Belt Systems: Empowering Predictive Maintenance with IoT, Cloud, and Machine Learning. International Journal of Electrical, Electronics and Environmental Engineering. 2024. URL: <https://www.internationaljournals.org/IJEEE/2024/Volume11-Issue6/IJEEE-V11I6P124.pdf> (дата звернення: 12.01.2025).

24. DataMind AI: The All-in-One Predictive Maintenance Solution for Mining : Discovery Alert. 2025. URL: <https://discoveryalert.com.au/news/predictive-maintenance-mining-benefits-challenges-2025/> (дата звернення: 12.01.2025).

25. Advanced monitoring technology for conveyors : Engineering News. 2024. URL: <https://www.engineeringnews.co.za/article/advanced-monitoring-technology-for-conveyors-2024-09-20> (дата звернення: 12.01.2025).

26. Top 10 Benefits of Predictive Maintenance for Businesses : FieldCircle. URL: <https://www.fieldcircle.com/blog/predictive-maintenance/benefits/> (дата звернення: 10.01.2025).

27. Predictive Maintenance in Mining Sector : Nanoprecise. URL: <https://nanoprecise.io/predictive-maintenance-in-mining-sector/> (дата звернення: 12.01.2025).

28. Mining 4.0: The Future of Smart, Safe, and Sustainable Operations : K-MINE. 2025. URL: <https://k-mine.com/articles/mining-4-0-the-future-of-smart-safe-and-sustainable-operations/> (дата звернення: 12.01.2025).

29. Кравець В. Г., Білецький В. С., Смирнов В. О. Техніка і технологія збагачення корисних копалин : навчальний посібник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 286 с.

30. Григор'єв Г. В., Коробко В. І., Солод Г. І. Транспортні машини : підручник для вузів. Київ: Вища школа, 2004. 450 с.

31. Géron A. Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn, Keras & TensorFlow: concepts, tools, and techniques to build intelligent systems. 2nd ed. Sebastopol : O'Reilly Media, 2019. 851 p.

32. Bishop C. M. Pattern Recognition and Machine Learning. New York : Springer, 2006. 738 p.


33. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep Learning. Cambridge, MA: MIT Press, 2016. 775 p.

34. Raschka S., Mirjalili V. Python Machine Learning. 3rd ed. Birmingham: Packt Publishing, 2019. 770 p.

35. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. The Elements of Statistical Learning : data mining, inference, and prediction. 2nd ed. New York : Springer, 2009. 745 p.

36. Scikit-learn Developers. Preprocessing data : User Guide. URL: <https://scikit-learn.org/stable/modules/preprocessing.html> (дата звернення: 16.01.2026).

37. Разживін О. В. Супервізорне управління з корекцією коефіцієнтів ПІД-регулятора на підставі інформації про помилку та її похідну: методичні вказівки до виконання лабораторної роботи. Запоріжжя : Технічний університет «Метінвест Політехніка», 2023. 296 с.



38. Разживін О. В., Ільїнський М. І. Синтез нечіткого супервізора, корекція коефіцієнтів ПІД-регулятора на підставі інформації про помилку та її похідну : наукова стаття. 2023.

39. Койфман О. О., Мірошніченко В. І., Сімкін О. І. Методичні рекомендації до виконання та захисту кваліфікаційної роботи для здобувачів вищої освіти за другим (магістерським) рівнем спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка». Запоріжжя : ТОВ «Технічний університет «Метінвест Політехніка», 2024. 63 с.

40. Прокуда В. М. Енергоефективність магістрального конвеєрного транспорту вугільних шахт з урахуванням динаміки вантажопотоків : монографія. Дніпро : НГУ, 2015.

41. Zhang Y., Xia X. Energy efficiency of conveyor belt systems. Applied Energy. 2011. Vol. 88, No. 6. P. 2180–2187.

42. Siemens AG. SINAMICS: Variable Frequency Drives for Conveyor Applications. Technical Documentation. Erlangen : Siemens AG, 2023. 48 p. URL: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:a8ef818a-056e-4c48-b201-16dce4ae5023/SINAMICS-LV-Drives-Applications-Brochure.pdf> (дата звернення: 22.01.2026).

43. Siemens AG. Totally Integrated Automation Portal (TIA Portal): System overview. Nuremberg: Siemens AG, 2022. 32 p. URL: [https://cache.industry.siemens.com/dl/files/272/109813272/att\\_1117172/v1/tia-portal-system-overview-en-US.pdf](https://cache.industry.siemens.com/dl/files/272/109813272/att_1117172/v1/tia-portal-system-overview-en-US.pdf) (дата звернення: 02.01.2026).

44. Bose B. K. Modern Power Electronics and AC Drives. Upper Saddle River : Prentice Hall, 2002. 710 p.

45. Boldea I. Electric Drives. Boca Raton : CRC Press, 2016. 624 p.

46. Kruse M., Schmitz G. Condition monitoring of belt conveyors. Bulk Solids Handling. 2014. Vol. 34, No. 2. P. 40–46.

47. IEC 61800-9. Adjustable speed electrical power drive systems – Energy efficiency. Geneva : IEC, 2017.

48. Zhang S., Xia X. Optimal control of operation efficiency of belt conveyor systems. Applied Energy. 2014. Vol. 113. P. 193–203.

49. Siemens AG. Energy saving potential with SINAMICS variable speed drives. Technical report.


50. He D., Pang Y. Dynamic analysis of belt conveyor systems. Mechanical Systems and Signal Processing. 2018. Vol. 110. P. 11–25.

51. ISO 14890. Conveyor belts – Specification for rubber- or plastics-covered belts.

52. Siemens AG. Application Guide: Conveyor Drives.

53. ABB. Technical Guide No. 4: Guide to variable speed drives. Zurich : ABB Group, 2011. 44 p. URL: [https://library.e.abb.com/public/a209d9dc29b24b789e0650b8de9c3f22/TechnicalGuideBook\\_EN\\_3AFE64514482\\_Rev1.pdf](https://library.e.abb.com/public/a209d9dc29b24b789e0650b8de9c3f22/TechnicalGuideBook_EN_3AFE64514482_Rev1.pdf) (дата звернення: 22.01.2026).

54. Saidur R. et al. Applications of variable speed drive (VSD) systems in electrical motors energy savings. Renewable and Sustainable Energy



Reviews. 2012. Vol. 16, No. 1. P. 543–550. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032111004308> (дата звернення: 15.01.2026).

55. Konieczna-Fuławka M. Energy-Saving Solutions Applied in Belt Conveyors : A Literature Review. *Energies*. 2025. Vol. 18, No. 12. Article 3019. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/18/12/3019> (дата звернення: 16.01.2026).

56. Siemens AG. Energy efficiency in conveyor applications using SINAMICS variable speed drives. Berlin: Siemens AG, 2021. URL: <https://www.siemens.com/drives> (дата звернення: 18.01.2026).

57. Крушельницька О. В., Мельник Л. Г. Організація та економіка автоматизованого виробництва : навчальний посібник. Київ : Центр учбової літератури, 2018. 312 с.

58. Бондаренко В. І., Коцур М. І. Енергоефективність електроприводів : навчальний посібник. Харків : ХНУРЕ, 2020. 240 с.

59. Костенко Ю. М., Шевченко О. В. Енергозбереження в промисловості : навчальний посібник. Київ : Видавництво КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. 198 с.

60. Каплінський В. В., Лобода О. М. Економіка гірничого підприємства : підручник. Дніпро : НГУ, 2016. 356 с.

61. Методичні рекомендації з оцінки економічної ефективності інвестиційних проєктів та їх відбору для фінансування : затв. наказом Міністерства економіки України. Київ : Мінекономіки України, 2015. 52 с.