

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Радіотехнічний факультет
Кафедра прикладної радіоелектроніки**

«На правах рукопису»
УДК _____

До захисту допущено:

В.о. зав. кафедри

 Андрій МОВЧАНЮК

«___» _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

**за освітньо-професійною програмою «Інтелектуальні технології
радіоелектронної техніки»**

зі спеціальності 172 Електронні комунікації та радіотехніка

**на тему: «Автоматизація керування технологічним процесом завантаження
млина МШЦ»**

Виконав (-ла):

студент (-ка) 2 курсу, групи РЕ-31мп

Божок Дмитро Олександрович

(Прізвище ім'я по батькові)

Керівник проф., д.т.н. Степанов М.М.

(Посада, науковий ступінь, вчене звання)

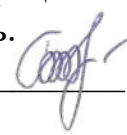
Рецензент _____

(Посада, науковий ступінь, вчене звання)



Засвідчую, що у цій магістерській дисертації
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент (-ка) _____



Київ – 2024 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Радіотехнічний факультет

Кафедра прикладної радіоелектроніки

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 172 Електронні комунікації та радіотехніка

Освітньо-професійна програма «Інтелектуальні технології радіоелектронної техніки»

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. зав. кафедри



Андрій МОВЧАНЮК

« » _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студента
Божок Дмитру Олександровичу
(Прізвище ім'я по батькові)

1. Тема дисертації «Автоматизація керування технологічним процесом завантаження млина МШЦ»
науковий керівник дисертації проф., д.т.н Степанов М.М
затверджені наказом по університету від «08» листопада 2024 р. № 5024-с
2. Термін подання студентом дисертації 09 грудня 2024 року
3. Об'єкт дослідження: інформаційні процеси, що забезпечують технологію збагачення залізорудної сировини в умовах роботи гірничо-збагачувального комбінату
4. Предмет дослідження: методи та засоби автоматизації керування завантаженням млина на основі сигналів отриманих від сенсорів та алгоритмів обробки інформації в режимі реального часу
5. Перелік завдань, які потрібно розробити 1) Аналіз технологічного процесу керування завантаження млина «МШЦ», 2) Аналіз існуючих рішень з керування процесом завантаження млина «МШЦ», 3) Розробка та дослідження системи автоматизації процесу завантаження млина, 4) Практична реалізація системи адаптивного керування процесом завантаження млина

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: Презентація у форматі PowerPoint

7. Орієнтовний перелік публікацій:

9. Дата видачі завдання 05 вересня 2023 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Отримання теми магістерської дисертації	05.09.2023 – 10.10.2023	
2	Розробка плану магістерської дисертації	16.10.2023 – 09.11.2023	
3	Початок збору інформації для дослідження	13.11.2023 – 21.12.2023	
	Аналіз технологічного процесу керування завантаження млина «МШЦ»	15.01.2024 – 21.03.2023	
	Аналіз існуючих рішень з керування процесом завантаження млина «МШЦ»	25.03.2024 – 30.05.2024	
	Розробка та дослідження системи автоматизації процесу завантаження млина	03.06.2024 – 30.09.2024	
	Практична реалізація системи адаптивного керування процесом завантаження млина	07.10.2024 – 15.11.2024	
	Оформлення магістерської дисертації	05.09.2024 – 13.12.2024	

Студент



Божок Д.О.

Науковий керівник

Степанов М.М.

РЕФЕРАТ

Божок Д.О. Розробка системи «Автоматизації керування технологічним процесом завантаження млина МШЦ».

Кваліфікаційна робота на здобуття другого ступеня вищої освіти, за спеціальністю 172 – Інтелектуальні технології радіоелектронної техніки. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Київ, 2024.

Робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку літератури з 16 позицій. Загальний обсяг роботи становить 111 сторінок, з яких основний зміст роботи викладено на 94 сторінках, робота включає 38 рисунки.

Предметом дослідження є інформаційні процеси, що забезпечують технологію збагачення залізорудної сировини в умовах роботи гірничо-збагачувального комбінату.

Об'єктом дослідження є методи та засоби автоматизації керування завантаженням млина на основі сигналів отриманих від сенсорів та алгоритмів обробки інформації в режимі реального часу.

На збагачувальній фабриці ПРАТ «ЦГЗК» пристрій може використовуватися при збагаченні магнетитових руд.

Магістерська робота присвячена розробці та впровадженню адаптивної системи автоматизації керування технологічним процесом завантаження млина типу МШЦ 4500х6000. У роботі проаналізовано існуючі рішення для керування процесами подачі руди та води в млини, виявлено їх недоліки, зокрема низьку адаптивність до змін технологічних параметрів і недостатню ефективність використання ресурсів.

Мета дослідження полягає у створенні інтелектуальної системи керування, яка забезпечує оптимальну продуктивність млина шляхом регулювання подачі руди та води залежно від умов завантаження та технологічних вимог.

У роботі розроблено структурну, принципову та функціональну схеми системи автоматизації, та алгоритми адаптивного керування. Застосовано сенсори

для збору даних (датчик ваги, витратомір, акселерометри), локальну мережу Ethernet (протокол OPC UA), сенсорну мережу 4-20мА, мікроконтролер STM32F769I для первинної обробки даних і серверний ПК для аналізу та прийняття рішень із використанням нейронних мереж і алгоритмів нечіткої логіки.

Практична цінність роботи полягає у зниженні енергетичних витрат, підвищенні ефективності роботи млина та покращенні якості продукту.

Ключові слова: АВТОМАТИЗАЦІЯ, ЗАВАНТАЖЕННЯ МЛИНА, СЕНСОРНІ ТЕХНОЛОГІЇ, ОБРОБКА ДАНИХ, ГІРНИЧО-ЗБАГАЧУВАЛЬНИЙ КОМБІНАТ, ПРОДУКТИВНІСТЬ, ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ.

ABSTRACT

Bozhok D.O. Development of the «Automation of technological process control for Ball mill loading».

Qualification thesis for obtaining the second level of higher education, specialty 172 – Intelligent Technologies of Radio-Electronic Engineering. – National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, 2024.

The thesis consists of an introduction, three chapters, conclusions, a list of references with 16 sources. The total volume of the thesis is 111 pages, with the main content presented on 94 pages, including 38 figures.

The subject of the study is the information processes that ensure the technology of processing iron ore raw materials under the operating conditions of a mining and processing plant.

The object of the study is the methods and tools for automating the control of mill loading based on signals received from sensors and algorithms for real-time information processing.

At the enrichment plant of «CGOK», the device can be used for processing magnetite ores.

The master's thesis is dedicated to the development and implementation of an adaptive automation system for controlling the technological process of loading a ball mill of type MIIIQ 4500x6000. The work analyzes existing solutions for controlling the processes of feeding ore and water into mills, identifies their shortcomings, including low adaptability to changes in technological parameters and insufficient resource utilization efficiency.

The aim of the research is to create an intelligent control system that ensures the optimal productivity of the mill by regulating the supply of ore and water depending on loading conditions and technological requirements.

The thesis develops structural, schematic, and functional diagrams of the automation system and algorithms for adaptive control. Sensors are used for data collection (weight sensor, flowmeter, accelerometers), a local Ethernet network (OPC UA protocol), a sensor

network with 4-20 mA signals, an STM32F769I microcontroller for primary data processing, and a server PC for analysis and decision-making using neural networks and fuzzy logic algorithms.

The practical significance of the work lies in reducing energy consumption, improving mill efficiency, and enhancing product quality.

Keywords: AUTOMATION, MILL LOADING, SENSOR TECHNOLOGIES, DATA PROCESSING, MINING AND PROCESSING PLANT, PRODUCTIVITY, ENERGY CONSUMPTION.

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	4
ABSTRACT	6
ЗМІСТ	8
ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	10
ВСТУП.....	11
1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ КЕРУВАННЯ ЗАВАНТАЖЕННЯ МЛИНА «МШЦ».....	15
1.1 Характеристика технологічного процесу подрібнення залізної руди в умовах ПРАТ ЦГЗК.....	15
1.1.1 Подрібнення вихідної руди і проміжних продуктів збагачення	19
1.1.2 I стадія подрібнення та класифікації.....	19
1.1.3 II СТАДІЯ ПОДРІБНЕННЯ ТА КЛАСИФІКАЦІЇ	20
1.1.4 III СТАДІЯ ПОДРІБНЕННЯ ТА КЛАСИФІКАЦІЇ	21
1.1.5 КУЛЬОВЕ ЗАВАНТАЖЕННЯ МЛИНІВ	23
1.1.6 Режим роботи кульового млина	24
1.2 Аналіз існуючих рішень з керування процесом завантаження руди в млин МШЦ.....	28
1.2.1 Система завантаження млина на ПРАТ «ЦГЗК»	28
1.2.2 Система оптимізації подрібнення Metso Outotec® АСТ.....	31
1.3 Обґрунтування необхідності вдосконалення системи керування процесом завантаження руди в млин МШЦ	35
1.3.1 Вдосконалення системи на ПРАТ «ЦГЗК»	35
1.3.2 Обмеження системи оптимізації АСТ від Metso Outotec.....	36
1.3.3 Переваги проектованої системи.....	36
1.4 Висновки до розділу.....	37
2. РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ ЗАВАНТАЖЕННЯ МЛИНА.....	39
2.1 Математичне забезпечення системи керування процесом завантаження млина.....	39
2.1.1 Ідентифікація об'єкта керування	39
2.1.2 Результати моделювання в MATLAB	43
2.2 Розробка структурної схеми адаптивного керування процесом завантаження млина.....	47

2.2.1	Опис роботи структурної схеми	47
2.3	Розробка функціональної схеми адаптивного керування процесом завантаження млина	50
2.3.1	Опис роботи функціональної схеми	50
2.4	Розробка схеми електричної принципової	53
2.4.1	Опис роботи схеми електричної принципової	53
2.5	Технічне забезпечення системи керування процесом завантаження млина	57
2.5.1	Обґрунтування структури комплексу технічних засобів для реалізації системи	57
2.5.2	Вибір датчиків та первинних перетворювачів	57
2.5.3	Вибір та обґрунтування характеристик виконавчих механізмів	72
2.5.4	Вибір промислового сервера	76
2.5.5	Комутатор Scalance XB205-3LD	79
2.5.6	Вибір системи передачі даних	81
2.6	Висновки до розділу	83
3.	ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ АДАПТИВНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ЗАВАНТАЖЕННЯ РУДИ	85
3.1	Вибір програмного забезпечення для реалізації системи	85
3.1.1	Програмування контролера STM32 для збору та обробки даних	85
3.1.2	Налаштування збору даних із сенсорів (датчик ваги, витратомір, акселерометри)	86
3.1.3	Передача даних на серверний ПК	88
3.1.4	Програмне забезпечення для промислового сервера SIMATIC RACK PS 547G	89
3.2.	Висновки до розділу	94
	ВИСНОВКИ	96
	СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	99
	ДОДАТОК 1	101
	ДОДАТОК 2	104
	ДОДАТОК 3	109

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

AI-застосування – застосування штучного інтелекту (Artificial Intelligence).

АРМ – автоматизоване робоче місце.

АСУ ТП – автоматизована система управління технологічним процесом.

АЦП – аналогово-цифровий перетворювач.

CAN – контролерна мережа (Controller Area Network).

Ethernet – протокол передачі даних у комп'ютерних мережах.

I²C – послідовний інтерфейс для зв'язку між пристроями (Inter-Integrated Circuit).

Modbus – протокол обміну даними між пристроями.

МШЦ – млин шаровий із центральним розвантаженням.

OPC UA – уніфікована архітектура відкритої платформи (Open Platform Communications Unified Architecture).

PCIe – послідовний інтерфейс для підключення периферійних пристроїв (Peripheral Component Interconnect Express).

SPI – послідовний периферійний інтерфейс (Serial Peripheral Interface).

STM32 – серія мікроконтролерів компанії STMicroelectronics.

TensorFlow – платформа з відкритим кодом для машинного навчання.

UART – асинхронний приймач-передавач (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter).

USB – універсальна послідовна шина (Universal Serial Bus).

ОЗП (SRAM) – оперативний запам'ятовувальний пристрій із довільним доступом (Static Random-Access Memory).

ВСТУП

Одним із ключових стовпів економіки України є чорна металургія, яка нині стикається зі значними викликами через недозавантаження виробничих потужностей майже на 40%. Основною причиною цієї ситуації є дефіцит залізорудної сировини. Важливу роль у забезпеченні стабільності галузі відіграють магнетитові концентрати, які становлять більше половини загального обсягу сировини. Їх використання дозволяє знижувати собівартість металу, порівняно з виплавною із бідних руд.

Особливе місце серед технологічних процесів у гірничодобувній промисловості займають процеси подрібнення сипучих матеріалів, які характеризуються значним споживанням енергії. На ці процеси припадає 50-60% всієї електроенергії, витраченої на збагачення руди, що визначає їх вагомий вплив на загальні витрати електроенергії в секції збагачення.

Технологічні процеси збагачення магнетитових кварцитів є складними об'єктами для автоматизованого управління через їх багатовимірність, багатостадійність, нелінійність, нестационарність і значні затримки у надходженні інформації. Крім того, ці процеси ускладнюються наявністю нечіткої та неповної інформації, що створює додаткові труднощі для прогнозування та прийняття управлінських рішень.

Кульові млини, які є одними з найенергоємніших агрегатів у збагачувальних комплексах, відіграють ключову роль у цих процесах. Оптимізація режимів їх роботи є пріоритетним завданням, що дозволяє значно підвищити ефективність використання енергії та знизити витрати, забезпечуючи стабільність і конкурентоспроможність чорної металургії України. Саме це обумовлює актуальність дослідження і впровадження сучасних підходів до автоматизації управління технологічними процесами подрібнення руди.

Актуальність теми.

Процес подрібнення руди за допомогою кульових млинів на гірничозбагачувальному комбінаті (ГЗК) є важливим етапом початкової стадії виробництва чорних металів. Він відзначається високою енерго- та ресурсоемністю, а також значним впливом на якість наступних стадій обробки. Під час експлуатації млинів основним завданням є забезпечення максимальної продуктивності, уникаючи при цьому їх перевантаження або аварійних зупинок. Зупинка млина навіть на одну годину призводить до втрати 290–310 тон продукту, придатного для подальшого збагачення, і супроводжується додатковими витратами, пов'язаними з повторним запуском обладнання.

Погіршення якості руд обумовлює необхідність створення сучасних комп'ютерних систем з підтримки прийняття рішень для технологічних процесів збагачення руди. Це завдання підтверджується фундаментальними дослідженнями вітчизняних учених [1], які запропонували методи математичного опису процесів збагачення та автоматизованого управління із застосуванням сучасних інформаційних технологій.

У роботах багатьох вітчизняних дослідників встановлено, що ключовими етапами технологічного процесу збагачення є подрібнення і класифікація. Аналіз останніх десятирічних наукових публікацій у галузі автоматизації прийняття рішень та оптимізації процесів збагачення залізних руд [2,3] підтверджує актуальність розробки засобів автоматизованого контролю та систем підтримки прийняття рішень для роботи з рудою, характеристики якої змінюються з часом.

Однак, попри існування окремих залежностей між параметрами технологічного процесу, опубліковані дослідження не містять комплексних рекомендацій для створення ефективних автоматизованих систем. Це зумовлює необхідність впровадження інтелектуальних технологій, математичних моделей та методів, які дозволять прогнозувати параметри технологічних процесів і забезпечувати автоматизоване прийняття рішень для вдосконалення оперативного управління основним технологічним обладнанням збагачувальних фабрик.

Метою дослідження є підвищення точності та ефективності автоматизованого керування технологічним процесом завантаження млина МШЦ 4500х6000 шляхом розробки та впровадження системи контролю, заснованої на використанні сенсорних технологій і сучасних методів обробки даних.

Завдання досліджень. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

1. Провести аналіз існуючих методів автоматизації завантаження млинів та визначити їхні обмеження.
2. Обґрунтувати вибір обладнання та датчиків, які забезпечують необхідну точність вимірювань та відповідність вимогам технологічного процесу.
3. Розробити алгоритм обробки сигналів і передачі даних для забезпечення безперервного моніторингу та керування.

Предметом дослідження є інформаційні процеси, що забезпечують технологію збагачення залізорудної сировини в умовах роботи гірничо-збагачувального комбінату.

Об'єктом дослідження є методи та засоби автоматизації керування завантаженням млина на основі сигналів отриманих від сенсорів та алгоритмів обробки інформації в режимі реального часу.

Для досягнення мети використано наступні методи:

1. Методи обробки сигналів для аналізу даних з датчиків ваги, акселерометрів і витратоміра;
2. Системний аналіз: визначено ключові параметри, які впливають на ефективність завантаження млина, та сформульовано вимоги до системи автоматизації;
3. Методи нейронних мереж та нечіткої логіки: розроблено алгоритми адаптивного керування подачею руди та води на основі аналізу вібраційних характеристик і технологічних показників;
4. Програмування мікроконтролерів: реалізовано збір, обробку та передачу даних із сенсорів за допомогою STM32F769I та серверного ПК;

5. Обробка даних: застосовано методи цифрової фільтрації, спектрального аналізу та машинного навчання для аналізу отриманих сигналів.

Наукова новизна. Розроблено систему автоматизованого керування завантаженням млина, яка вперше використовує комбінацію датчиків ваги, акселерометрів і витратоміра для оцінки завантаження. Запропонована методика обробки сигналів від сенсорів в режимі реального часу дозволяє більш точно регулювати подачу руди та води.

Розроблена система підтримки прийняття рішення на основі нейронної мережі.

Практична цінність. Результати дослідження можуть бути впроваджені в промислове виробництво для оптимізації роботи млинів на гірничозбагачувальних комбінатах, що забезпечить зменшення енергоспоживання, підвищення продуктивності, збільшення терміну служби кульового завантаження, зменшення зносу броні млина та поліпшення якості обробки руди.

Особистий внесок здобувача. Автором виконано розробку технічної архітектури системи, зроблено вибір сенсорного обладнання, виконано розробку алгоритмів обробки даних, а також проведено експериментальні дослідження.

РОЗДІЛ 1

1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ КЕРУВАННЯ ЗАВАНТАЖЕННЯ МЛИНА «МШЦ»

1.1 Характеристика технологічного процесу подрібнення залізної руди в умовах ПРАТ ЦГЗК

Згідно зі статистикою, металургійна сировина та продукція є ключовими складовими українського експорту, а Кривий Ріг залишається найбільшим металургійним центром країни. Економіка міста базується на діяльності гірничо-металургійних підприємств. Кожна зі стадій технологічного процесу є складним комплексом операцій, що включає використання значної кількості спеціалізованого обладнання, механізмів і машин. Ринок видобутку та переробки залізорудної сировини контролюється кількома провідними компаніями, такими як «ДСН», «КЖРК», «АрселорМіттал Кривий Ріг» і «Метінвест». Ці підприємства активно працюють як на внутрішньому, так і на міжнародному ринках, відіграючи ключову роль у гірничодобувній та металургійній промисловості України. Їхня діяльність забезпечує значні податкові надходження до державного бюджету.

Подальший розвиток гірничо-металургійної промисловості та впровадження інноваційних технологічних процесів у цій сфері сприятимуть зміцненню позицій української металургії на світовому ринку та її утвердженню як одного з лідерів експорту.

У межах цієї роботи буде детально проаналізовано діяльність одного з ключових підприємств гірничодобувної галузі — Центрального гірничозбагачувального комбінату (Рис. 1.1).



Рисунок 1.1 – ПРАТ «ЦГЗК»

Центральний гірничо-збагачувальний комбінат (ЦГЗК) є одним із провідних гірничодобувних підприємств України. Його засновано в 1961 році у Кривому Розі для видобутку та переробки залізної руди, і вже в перший рік діяльності підприємство розпочало видобуток перших тон сировини.

У 1970–1980-х роках ЦГЗК значно розширив свої виробничі потужності. Цей період ознаменувався активним впровадженням нових технологій, модернізацією обладнання та суттєвим зростанням обсягів видобутку й переробки залізної руди.

У 1990-х роках, після розпаду Радянського Союзу та здобуття Україною незалежності, підприємство зіткнулося з серйозними економічними та політичними викликами. У цей час ЦГЗК пройшов через низку реформ та адаптацій до нових ринкових умов.

З початку 2000-х років комбінат почав впроваджувати сучасні технології, спрямовані на підвищення ефективності видобутку та переробки руди. Значна увага приділялася екологічним аспектам виробництва, що дозволило підприємству відповідати сучасним стандартам сталого розвитку.

Сьогодні ЦГЗК є одним із ключових учасників гірничо-металургійної галузі України. Продукція комбінату експортується на світові ринки та використовується в металургії та інших промислових галузях, забезпечуючи стратегічно важливу роль підприємства в економіці країни.

ПРАТ «ЦГЗК» є провідним виробником високоякісної залізорудної сировини в Україні. Підприємство випускає залізорудний концентрат із вмістом заліза 70,0–70,5% у обсязі до 5,3 млн тон на рік, а також залізорудні окатиші з масовою часткою заліза 67,5%, які є сировиною для технології прямого відновлення заліза (DRI).

Центральний гірничо-збагачувальний комбінат спеціалізується на виробництві сировини для чорної металургії, зокрема:

- DRI-окатишів із вмістом заліза від 67,3%;
- окатишів 0,1 BF із вмістом заліза від 66,9%;
- окатишів 1,0 BF із вмістом заліза від 64,7%;
- залізорудного концентрату марок:

A0 (Fe не менше 69,7%);

A1 (Fe не менше 67,9%);

A2 (Fe не менше 67,5%).

Ця продукція відповідає найвищим стандартам якості та використовується для задоволення потреб сучасної чорної металургії.

В даній роботі буде розглядатись технологічний процес та система автоматизації збагачувальної фабрики.

До складу збагачувальної фабрики входять одинадцять секцій. Але більш детально буде розглянуто спарку секцій №8-9.

Технологічна схема секцій №8-9 включає:

3-ох стадійне подрібнення матеріалу;

3-ох стадійну класифікацію подрібненого матеріалу;

4-ох стадійну магнітну сепарацію;

2-ох стадійне знешламлення продуктів, що здійснюється у два прийоми на кожній стадії.

Перша стадія подрібнення виконується в кульових барабанних млинах із центральним розвантаженням типу МШЦ-4500х6000. Корисний об'єм млина становить 82 м³, і він працює в замкненому циклі з двоспиральним класифікатором 2КСН2,5х14,5, оснащеним спіраллю діаметром 2500 мм.

Продуктивність основних млинів за рудним промпродуктом ДФ у секціях №8-11 досягає 160–230 т/год, залежно від фізико-механічних властивостей та збагачуваності рудної шихти. Практика показує, що підтримання оптимального рівня заповнення млина матеріалом забезпечує максимальні показники якості подрібнення та запобігає перевантаженню обладнання.

Друга і третя стадії подрібнення здійснюються в млинах кульових барабанного типу з центральним розвантаженням МШЦ-4500х6000 з корисним об'ємом 82м³, що працюють в замкненому циклі з гідроциклонами типу ГЦМ-710. Структурно, гідроциклон показано на (Рис. 1.2).

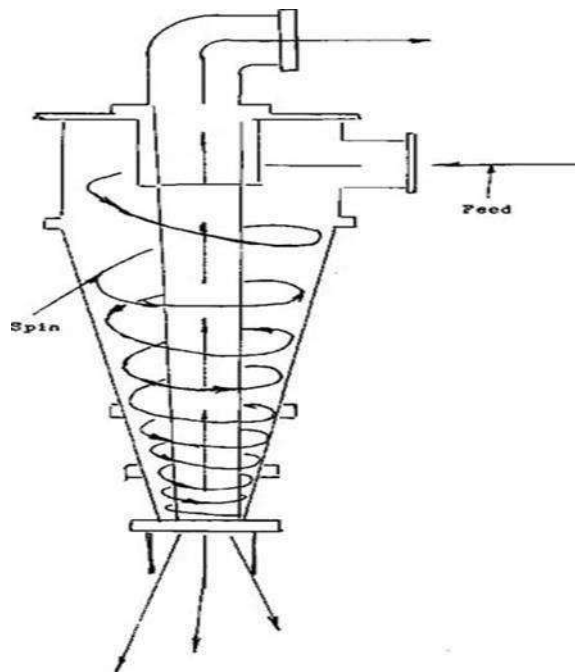


Рисунок 1.2 – Гідроциклон ГМЦ - 710

Співвідношення млинів по стадіях і об'ємах 2:1:1.

Магнітне збагачення здійснюється на магнітних сепараторах типу ПБМП120/300 і ПБМ-ПП-120/300 з протитечійними і напівпротитечійними ваннами.

Для знешламлювання матеріалу перед магнітною сепарацією III і IV стадій застосовуються магнітні дешламатори типу МД-9А.

1.1.1 Подрібнення вихідної руди і проміжних продуктів збагачення

Подрібнення магнетитової руди і додаткове подрібнення проміжних продуктів магнітної сепарації секцій здійснюється в три стадії в кульових млинах з центральним розвантаженням, з класифікацією подрібненого матеріалу при послідовному підключенні подрібнювального і класифікуючого устаткування. У процесі застосовуються млини типу МШЦ.

1.1.2 I стадія подрібнення та класифікації

Рудний промпродукт ДФ, крупністю +20 -0 мм (масова частка кл. +20мм (%)), подрібнюється в I стадії в кульових млинах барабанного типу з центральним розвантаженням типу МШЦ-4500х6000, що працюють в замкненому циклі з двоспиральним класифікатором 2КСН-2,5х14,5 (секції №№ 8-11).

Находження рудного промпродукту ДФ з бункерів відбувається самопливно через живильники на горизонтальний конвеєр (В=1000) із перевантаженням руди на похилі конвеєри (В=1000), що подають руду в млини.

Регулювання продуктивності відбувається зміною швидкості руху стрічки горизонтальних конвеєрів при фіксованій висоті встановлення бункерів-живильників над стрічкою горизонтальних конвеєрів. Вимір продуктивності відбувається за показанням механічних вагів типу ВКТ-4А на секціях № 8 -13, встановлених на похилих конвеєрах.

Кульовий млин працює в режимі з класифікацією подрібненого продукту в замкненому циклі із спіральним класифікатором. Процес подрібнення і класифікації ведеться в режимі мокрого подрібнення з додаванням води в млин.

Злив млина (розвантаження), що потрапляє в спіральний класифікатор, розділяється на піски і злив класифікатора. Піски класифікатора (циркулююче навантаження складає 100÷150%) повертаються спіраллю в зворотній жолоб і разом з вихідною рудою надходять в млин на додаткове подрібнення. Злив класифікатора самопливно по жолобах надходить на I стадію магнітної сепарації. Для розжижування пульпи зливів класифікаторів до 35÷50% твердого в пульпорозподільник магнітної сепарації додається додаткова вода.

На технологічних секціях №8-11 встановлені класифікатори виробництва Дніпропетровського заводу гірничого устаткування, на секціях №12-17 - класифікатори виробництва заводу «Техномаш» м. Дніпро. Млини I стадії подрібнення типу МШЦ-4500х6000 і МШЦ-3600х5000 футеруються сталеву бронею (виробництво ВАТ «КЦРЗ»), млини II і III стадій подрібнення футеруються гумову бронею (виробництво ВТП «МАГ» і НВП «ЕЛАСТ»).

1.1.3 II СТАДІЯ ПОДРІБНЕННЯ ТА КЛАСИФІКАЦІЇ

У II стадії подрібнення кульовий млин з центральним розвантаженням МШЦ працює в режимі з класифікацією подрібненого продукту в замкнутому циклі з гідроциклонами ГЦМ-710 (на секціях №№8-11; 14-17). Розвантаження млинів самопливно по жолобах надходить на другу стадію магнітної сепарації. На секціях №№12-13 кульовий млин II стадії подрібнення з центральним розвантаженням МШЦ працює в режимі з класифікацією подрібненого продукту в замкнутому циклі з гідроциклонами ГЦМ- 710 або Multotec D8-50/8 c/w HC500- 20-0/A-A/55c/w.

У технологічний зумпф II стадії класифікації надходить магнітний продукт I та II стадії магнітної сепарації, звідки насосами типу Грк1600/50 (секції №9,11) продуктивністю 1250÷1300 м³/год подається на класифікацію в гідроциклонів ГЦМ-710 (один насос подає живлення на батарею з трьох гідроциклонів). На секціях №15, 17 живлення на гідроциклони із зумпфа подається насосами типу Грк400/40 продуктивністю 400 м³/год. Для класифікації матеріалу у II стадії секцій №9,11 встановлені три батареї по три гідроциклони ГЦМ-710, на секціях №15,17 встановлено три гідроциклони ГЦМ-710 (один насос подає живлення на один гідроциклон).

Піски гідроциклонів секцій №9,11,15,17 подрібнюються в млині другої стадії подрібнення і спрямовуються на магнітну сепарацію II стадії. Магнітний продукт II стадії магнітної сепарації повертається в зумпф II стадії класифікації. Циркуляційне навантаження по пісках в операції складає 180÷210%. Злив гідроциклонів другої стадії класифікації самопливно по жолобах спрямовується на першу стадію знешламливання в дешламатори магнітні: типу МД-9А - на секціях №9,11,13, а

також типу МД-5А на секціях №15,17. На секціях №9,11,13,15,17 у першій стадії знешламлення встановлено по два дешламатори на секцію. Злив гідроциклонів третьої стадії класифікації самопливно по жолобах спрямовується на другу стадію знешламлювання в магнітні дешламатори: типу МД-9А – на секціях №8,10,12 та типу МД-5А на секціях №14,16. На секціях №8,10,12,14,16 у другій стадії знешламлення встановлено по два дешламатори на секцію.

У разі аварійної зупинки насосних агрегатів або млина II стадії подрібнення секцій №9,11,13,15,17 передбачено подання промпродукта із зумпфа II стадії класифікації на знешламлювання в магнітні дешламатори типу МД-9А; МД-5А.

На секції №13 в технологічний зумпф II стадії класифікації (зумпф 1-го прийому) спрямовується магнітний продукт I стадії магнітної сепарації, звідки насосами ГРК 1600/50 подається на класифікацію в гідроциклони ГЦМ-710 (один насос подає живлення на три гідроциклони) або насосом типу 12/10W-II(6)-800R120-PET подається на батарею гідроциклонів Multotec D8-50/8 c/w HC500-20-0/AA/55c/w (виробник ПАР).

Для класифікації матеріалу II стадії встановлені дві батареї по три гідроциклони ГЦМ-710 і батарея гідроциклонів Multotec D8-50/8c/wHC500-200/AA/55c/w. Піски гідроциклонів подрібнюються в млині другої стадії подрібнення і спрямовуються на магнітну сепарацію II стадії. Магнітний продукт II стадій магнітної сепарації повертається в зумпф II стадії класифікації. Злив гідроциклонів другої стадії класифікації самопливно по ненапірному трубопроводу спрямовується в трьохструминний пульпорозподільник на першу стадію знешламлювання в магнітні дешламатори типу МД-9А. Піски дешламатора I стадії першого прийому спрямовуються на дешламацію I стадії другого прийому в дешламатор типу МД-9А. На секції встановлено по два дешламатори на кожну стадію знешламлювання.

1.1.4 III СТАДІЯ ПОДРІБНЕННЯ ТА КЛАСИФІКАЦІЇ

У III стадії подрібнення кульовий млин з центральним розвантаженням МШЦ-4500х6000 (8, 10 секції) і МШЦ-3600х5000 (14,16 секції) працює в режимі з

класифікацією подрібненого продукту в замкненому циклі з гідроциклонами ГЦМ-710. На 12 секції кульовий млин з центральним розвантаженням МШЦ4500х6000 III стадії подрібнення працює в режимі з класифікацією подрібненого продукту в замкнутому циклі з гідроциклонами ГЦМ-710 або Multotec D1035/10с/wHC350-15-1/A-A/35с/w.

Піски гідроциклонів подрібнюються в млині III стадії і спрямовуються в зумпф III стадії класифікації. Циркуляційне навантаження по пісках в операції складає 70÷130%.

У технологічний зумпф III стадії класифікації секцій №8,10 надходять: розвантаження млина III стадії подрібнення, магнітний продукт III стадії магнітної сепарації (другого прийому) і насосами типу Грк1600/50 продуктивністю 1250÷1300 м³/год під тиском подаються на гідроциклони ГЦМ710. Передбачено подання пульпи одним насосом на одну батарею гідроциклонів. Для класифікації III стадії подрібненого матеріалу встановлено три батареї гідроциклонів, зв'язаних з насосами типу Грк1600/50. На технологічних секціях №14,16 в технологічний зумпф III стадії класифікації надходять: магнітний продукт III стадії магнітної сепарації (другого прийому), магнітний продукт IV стадії магнітної сепарації і насосами типу Грк400/40 продуктивністю 400 м³/год під тиском подаються на класифікацію в гідроциклони ГЦМ-710. Подання пульпи здійснюється одним насосом на один гідроциклон.

У разі аварійної зупинки насосних агрегатів секції №8,10,12,14,16 або МШЦ III стадії подрібнення передбачено подання промпродукта із зумпфа III стадії класифікації на знешламлення в МД-9А та МД-5А відповідно.

На 12 секції в технологічний зумпф III стадії класифікації надходить розвантаження млина III стадії подрібнення і магнітний продукт III стадії магнітної сепарації (другого прийому), звідки насосами ГРК1600/50 під тиском подаються на батарею гідроциклонів ГЦМ - 710 або насосом 12/10W-II- (6)800R120-PET на батарею гідроциклонів Multotec D10-35/10. Передбачено подання пульпи одним насосом на одну батарею гідроциклонів. Для класифікації III стадії подрібненого матеріалу встановлені 2 батареї по три гідроциклони ГЦМ - 710 і батарея

гідроциклонів Multotec D10-35/10 c/wHC350-15-1/A-A/35. Злив гідроциклонів III стадії класифікації самопливно спрямовується в другу стадію знешламлення в дешламатори типу МД-9А на секціях №8,10,12 і МД-5А - на секціях №14,16. Піски дешламаторів МД-9А II стадії першого прийому секцій №8,10,12 спрямовуються на знешламлення II стадії другого прийому в дешламатори МД-9А. На секціях №14,16 піски дешламатора МД-5А другої стадії першого прийому знешламливання спрямовуються в II стадію другого прийому знешламлення.

1.1.5 КУЛЬОВЕ ЗАВАНТАЖЕННЯ МЛИНІВ

Для подрібнення руди і проміжних продуктів збагачення в млинах застосовуються сталеві кулі. Завантаження млинів кулями здійснюється:

- млини I стадії подрібнення - сталеву кулею діаметром 100 мм;
- млини II стадії подрібнення секції №9,11,13,15,17 - сталеву кулею діаметром 40 мм;
- млини III стадії подрібнення секції №8,10,12,14,16 - сталеву кулею діаметром 30 мм.

Заповнення кулями у I та II стадіях складає 36-40% об'єму млина, у III стадії – 31-33%.

Первинне завантаження тіл, що мелють, по стадіях подрібнення виконується з метою підтримки найбільш раціонального гранулометричного складу кульового завантаження для зменшення часу входження млинів в оптимальний режим роботи:

- в млини I стадії подрібнення ($V = 82 \text{ м}^3$) куль вживаних, але що не втратили форму кулі - 75-80 т; після запуску в роботу млина відбувається довантаження куль діаметром 100 мм до норми (8-13 секцій);
- в млини I стадії подрібнення ($V = 42 \text{ м}^3$) куль вживаних, але що не втратили форму кулі - 40-45 т, після запуску в роботу млина відбувається довантаження нових куль діаметром 100 мм до норми (14-17 секцій);
- в млини II стадії подрібнення ($V = 82 \text{ м}^3$) нових куль діаметром 40 мм – 75-80 т; після запуску в роботу млина робиться довантаження куль вживаних, але таких, що не втратили форму кулі до норми (8- 13 секцій);

- в млини II стадії подрібнення ($V = 42 \text{ м}^3$) куль вживаних, але таких, що не втратили форму кулі - 40-45 т, після запуску в роботу млина відбувається довантаження нових куль діаметром 40 мм до норми (14-17секції);
- в млини III стадії подрібнення ($V = 82 \text{ м}^3$) нових куль діаметром 30 мм – 75-80 т; після запуску в роботу млина робиться довантаження куль вживаних, але таких, що не втратили форму кулі до норми (8- 13 секцій);
- в млини III стадії подрібнення ($V = 42 \text{ м}^3$) завантажуються кулі, вживані, - 40-45 т, нових куль діаметром 30-40 мм до норми (14-17 секцій).

Завантаження відбувається тарованими мірними ємностями: – місткість ємності з кулями діаметром 100 мм складає – 2,5 т; – місткість ємності з кулями діаметром 30-40 мм – 3,0 т.

Періодичність подальших довантажень млинів в процесі подрібнення відбувається залежно від зносу куль, згідно з прийнятими питомими нормами витрати.

1.1.6 Режими роботи кульового млина

Як описано в [4]. Подрібнення матеріалу здійснюється внаслідок ударів падаючих помольних куль та стирання частинок між тілами, що мелють. При заповненні млина кулями на 40–50% і використанні нерівної футеровки ковзання зовнішніх шарів куль практично не спостерігається, тоді як внутрішні шари куль ковзають одне відносно одного залежно від режиму роботи млина.

У разі одношарового заповнення млина помольними тілами, вони обертаються навколо своєї осі, паралельної осі обертання барабана, і при наявності гладкої футеровки не залучаються до кругового руху навіть за високих швидкостей обертання.

При багатошаровому заповненні барабана помольними тілами можливі три основні режими руху, залежно від частоти обертання:

Каскадний режим: помольні кулі перекочуються без відриву від поверхні барабана, польоту не відбувається.

Змішаний режим: частина куль перекочується, а частина здійснює польоти.

Водоспадний режим: рух куль характеризується переважним польотом із мінімальним перекочуванням.

Кожен із цих режимів має свої особливості, які впливають на ефективність подрібнення матеріалу.

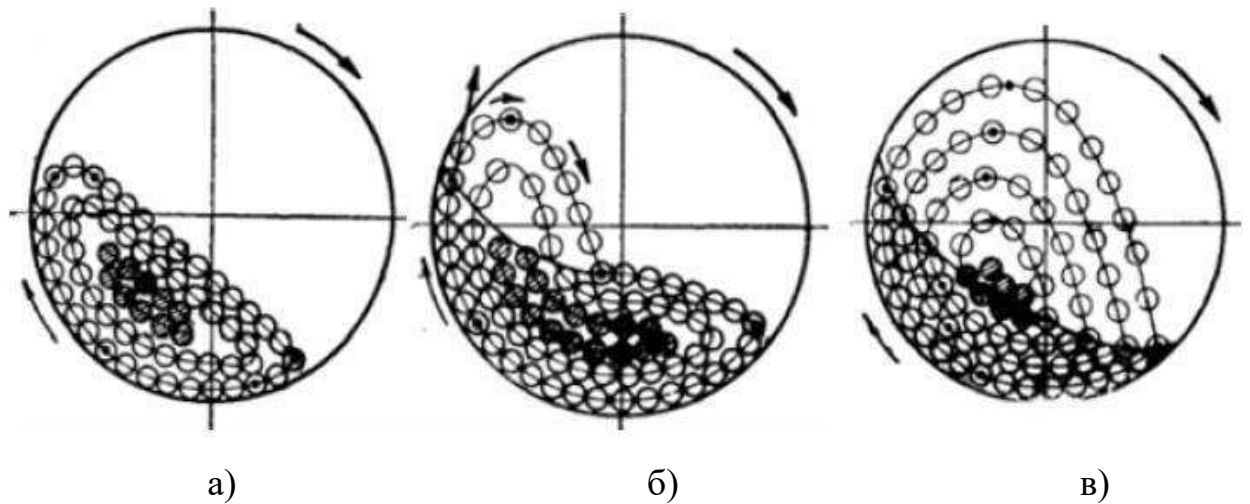


Рисунок 1.3 – Режими роботи кульових млинів

а – каскадний режим; б – змішаний режим; в – водоспадний режим

Режими руху тіл, що мелють, у кульових млинах, показані на (Рис. 1.3).

Каскадний режим спостерігається при низькій частоті обертання барабана млина. Під час запуску подрібнюоче середовище зміщується на певний кут, після чого помольні кулі починають рухатися замкнутими траєкторіями. Криволінійна поверхня природного скосу матеріалу в барабані наближається до площини, нахиленої під кутом, що дорівнює граничному куту повороту. У стабільному режимі мелючі тіла піднімаються по коловим траєкторіям і «каскадом» скочуються до вихідної точки. У центральній частині барабана формується малорухлива зона — так зване «ядро». Подрібнення в каскадному режимі відбувається за рахунок розчавлювання та стирання частинок між кулями. Цей режим характерний для кульових млинів із центральним розвантаженням.

Змішаний режим відрізняється тим, що до роботи залучаються кулі, розташовані між зовнішніми шарами та малорухливим «ядром». Вони циркулюють навколо ядра, забезпечуючи більш активний процес подрібнення.

Водоспадний режим реалізується при частоті обертання барабана, достатній для того, щоб кулі переходили з кругових на параболічні траєкторії. У цьому режимі кулі піднімаються по коловим траєкторіям, а потім відриваються і падають за параболічною траєкторією. У точках падіння кулі знову повертаються до кругової траєкторії відповідного шару. Основним механізмом подрібнення у водоспадному режимі є удар падаючих куль, а також, частково, стирання і розчавлювання матеріалу. Цей режим широко застосовується, особливо для матеріалів, які важко піддаються подрібненню.

Вимоги до помольних куль

Для ефективної роботи кульових млинів вага куль повинна бути достатньою для подрібнення найбільших частинок матеріалу. Важливим є правильне співвідношення розміру куль і завантажуваного матеріалу. Надлишок великих неподрібнених шматків може призвести до їх накопичення між кулями, що зрештою зупинить млин. У таких випадках необхідно або зменшити розмір частинок, що завантажуються, або збільшити розмір куль. Однак збільшення розміру куль зменшує робочу поверхню, що може знизити продуктивність млина.

Також необхідно контролювати ступінь заповнення барабана кулями. При надмірному заповненні, кулі, що піднімаються, стикаються з тими, що падають, що негативно впливає на ефективність подрібнення. Оптимальне співвідношення параметрів забезпечує максимальну продуктивність та якість роботи млина.

Для ефективного подрібнення матеріалу в кульових млинах необхідно, щоб вага куль була достатньою для руйнування найбільших фрагментів завантажуваного матеріалу. Досягнення оптимальної продуктивності залежить від правильного співвідношення між розмірами куль і частинками матеріалу. Наявність великої кількості шматків, які важко піддаються подрібненню, може призвести до їх накопичення між кулями, що зрештою блокує роботу млина. У таких випадках необхідно або зменшити розмір завантажуваного матеріалу, або збільшити розмір куль. Проте збільшення розміру куль знижує робочу поверхню млина, що може негативно вплинути на його продуктивність. Важливо також контролювати рівень

заповнення барабана кулями, оскільки надмірне заповнення призводить до зіткнення піднятих куль із падаючими, що знижує ефективність подрібнення.

Продуктивність млинів також залежить від конструктивних особливостей і типу футеровки. Практичні дані свідчать, що млини з низьким рівнем пульпи демонструють дещо вищу продуктивність порівняно з млинами з високим рівнем пульпи. Зокрема, продуктивність млинів із гратчастим розвантаженням на 15% перевищує продуктивність млинів із центральним розвантаженням. Також встановлено, що ребриста футеровка забезпечує вищу продуктивність порівняно з гладкою.

На продуктивність кульових млинів впливають інші фактори, серед яких частота обертання барабана, товщина подрібнення, вологість і крупність матеріалу, а також своєчасне видалення готового продукту. Невідповідність цих параметрів може призвести до зниження ефективності роботи обладнання.

Кульові млини характеризуються високим споживанням енергії. Навіть при роботі вхолосту, тобто без матеріалу, енергоспоживання майже таке ж, як і при повному завантаженні. Це робить експлуатацію млина з неповним завантаженням економічно недоцільною. Витрата енергії залежить від багатьох факторів: питомої ваги і твердості матеріалу, ступеня заповнення барабана кулями, частоти обертів барабана тощо. Фото млина показано на (Рис. 1.4).

ККД кульових млинів залишається низьким — не більше 15%. Більшість енергії витрачається на знос куль і корпусу млина, тертя, нагрівання матеріалу й інші непродуктивні процеси, що зумовлює потребу в оптимізації їх роботи.

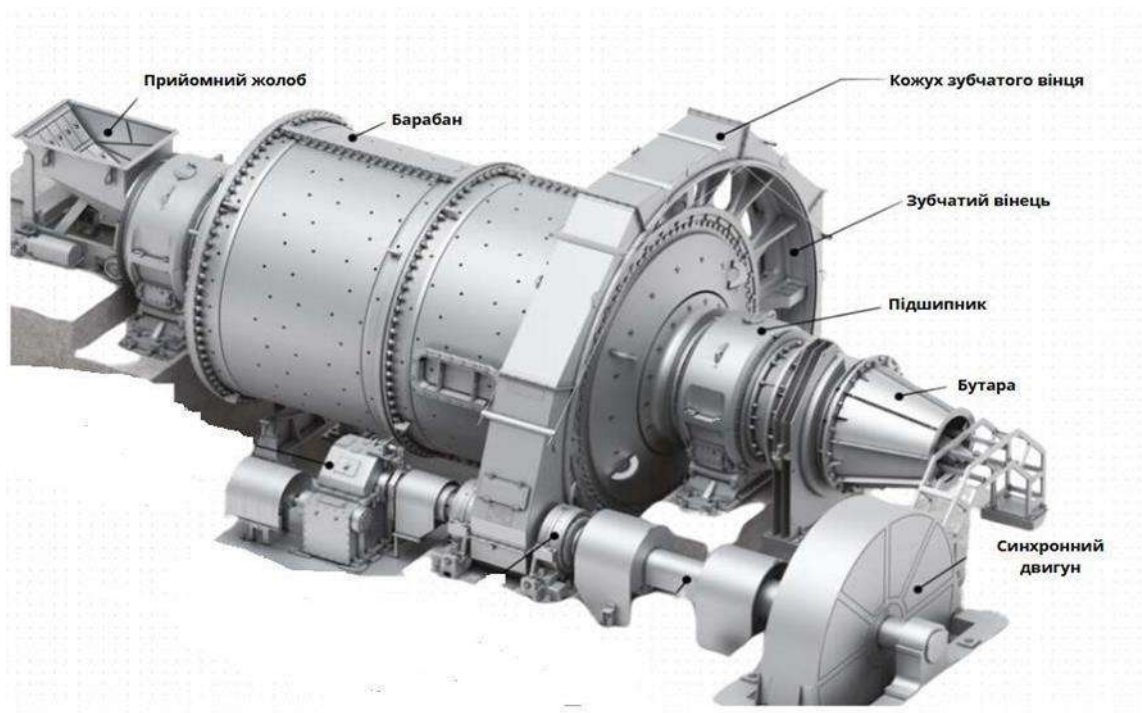


Рисунок 1.4 – Млин МШЦ

1.2 Аналіз існуючих рішень з керування процесом завантаження руди в млин МШЦ

1.2.1 Система завантаження млина на ПРАТ «ЦГЗК»

Система завантаження руди в млин МШЦ на ПРАТ «ЦГЗК» включає кілька ключових компонентів, які забезпечують автоматизоване керування подачею руди та води. До складу системи входять: датчик ваги «ВКТ-4», витратомір «SITRANS» для контролю подачі води, частотний перетворювач «EMOTRON FDU 2.0 – AC drive» для управління подачею руди, електропривод «AUMA SQR» для регулювання подачі води, а також регулятори «МІК-21», які підтримують стабільність технологічного процесу. Регулятор «МІК-21» показано на (Рис. 1.5). Далі розглянемо послідовність роботи контурів підтримки завдання для руди та води окремо.



Рисунок 1.5 – Регулятор мікропроцесорний «МІК-21»

1. Контур подачі руди

Датчик ваги «ВКТ-4», встановлений на конвеєрі, безперервно вимірює масу руди, яка транспортується стрічкою до млина. Він передає сигнал про поточну масу руди на вхід регулятора «МІК-21», який відповідає за підтримку стабільного потоку матеріалу в млин. Регулятор «МІК-21» обробляє сигнал від датчика «ВКТ-4» і, відповідно до заданого значення потоку руди, передає керуючий сигнал на частотний перетворювач «EMOTRON FDU 2.0 – AC drive». Частотний перетворювач «EMOTRON FDU 2.0 – AC drive», показаний на (Рис. 1.6), регулює швидкість обертання двигуна приводу конвеєра, що дозволяє контролювати кількість руди, що подається в млин. Швидкість конвеєра збільшується або зменшується залежно від заданого рівня маси руди на стрічці.



Рисунок 1.6 – Частотний перетворювач

Система автоматично коригує швидкість подачі руди на основі поточних даних від датчика «BKT-4». Якщо маса руди на стрічці зменшується нижче встановленого рівня, регулятор «MIK-21» підвищує швидкість конвеєра через частотний перетворювач «EMOTRON FDU 2.0 – AC drive». І навпаки, якщо маса руди перевищує допустимий рівень, швидкість конвеєра зменшується.

Цей контур забезпечує стабільне завантаження млина, що сприяє підвищенню ефективності процесу подрібнення і знижує ризик збоїв у роботі млина.

2. Контур подачі води

Витратомір «SITRANS» вимірює поточну витрату води, яка подається до млина, і передає ці дані на інший регулятор «MIK-21». Регулятор обробляє сигнал від витратоміра, порівнюючи його з заданим рівнем витрати води, який є необхідним для забезпечення оптимальних умов подрібнення. Регулятор «MIK-21» передає керуючий сигнал на електропривод «AUMA SQR», який, у свою чергу, відкриває або закриває подачу води, забезпечуючи її стабільну витрату.

Система дозволяє підтримувати потрібний рівень заповнення пульпою у млині, що сприяє більш рівномірному подрібненню матеріалу всередині млина. За наявності відхилень від заданого рівня витрати води регулятор «MIK-21» відповідно коригує положення приводу «AUMA SQR». Якщо витрата води нижча за встановлену норму, регулятор збільшує подачу води; якщо ж вона надмірна – зменшує її.

Завдяки цьому контуру регулювання, забезпечується точна подачі води, що сприяє стабільному.

3. Загальна послідовність та взаємодія контурів

Контури подачі руди та води працюють в інтегрованій системі, яка забезпечує синхронне регулювання обох параметрів для досягнення стабільного завантаження млина. Дані з датчиків та регуляторів обробляються в режимі реального часу, що дозволяє системі швидко реагувати на зміни в параметрах потоку матеріалу. Така інтеграція забезпечує рівномірне завантаження млина, знижує знос обладнання та

підвищує загальну ефективність подрібнення руди, дозволяючи оптимізувати подальші стадії збагачення.

Переваги:

1. Стабільність процесу: автоматичний контроль подачі руди та води забезпечує рівномірне завантаження млина, що підвищує якість подрібнення.
2. Зменшення зносу обладнання: регулювання подачі запобігає перевантаженням, знижуючи знос ключових компонентів.
3. Зменшення витрат води: точний контроль подачі води допомагає уникнути надмірного зволоження руди.

Недоліки:

1. Складність налаштування: потребує точної калібровки датчиків ваги та регуляторів для забезпечення стабільної роботи.
2. Висока вартість обслуговування: регулярне технічне обслуговування сенсорного обладнання та регуляторів підвищує експлуатаційні витрати.
3. Не чутливість до змін якості руди: відхилення у щільності чи твердості руди можуть впливати на точність контролю.

Ця система не є достатньо ефективною для забезпечення стабільного подрібнення, і вимагає якісного обслуговування та точного налаштування для максимальної ефективності.

1.2.2 Система оптимізації подрібнення Metso Outotec® АСТ

Система оптимізації подрібнення АСТ від Metso Outotec — з аналізатором розміру частинок руди RockSense на конвеєрній стрічці показаний на (Рис. 1.7), аналізатором завантаження MillSense та аналізатором розміру частинок PSI — є комплексним рішенням щодо оптимізації всього контуру подрібнення.



Рисунок 1.7 – аналізатор розміру частинок руди RockSense

Система оптимізації подрібнення АСТ від Metso Outotec показана на (Рис. 1.8).

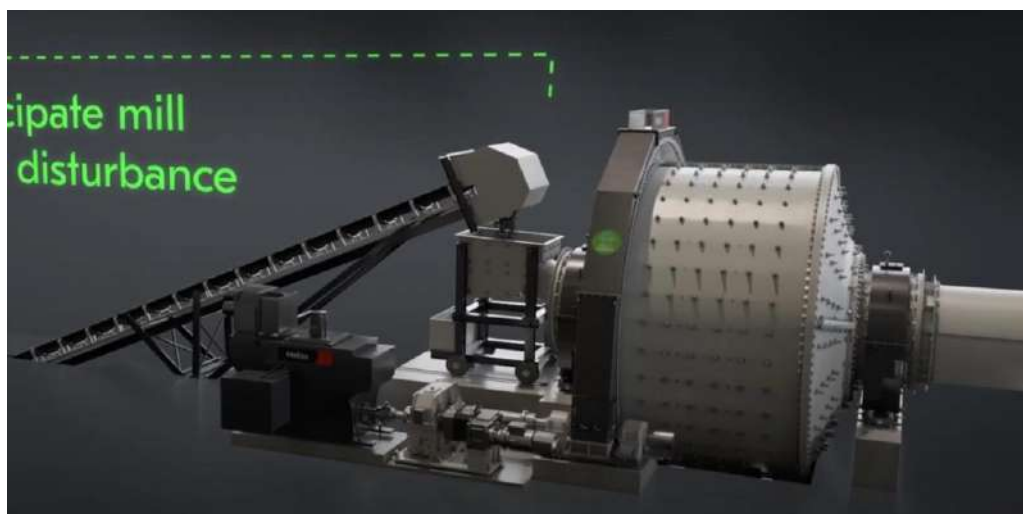


Рисунок 1.8 – Система оптимізації подрібнення АСТ від Metso Outotec

Система стабілізує технологічний процес, максимізує вироблення, ефективніше контролює розмір частинок і виконує точний потоковий аналіз найбільш критичних показників.

Процес подрібнення відрізняється дуже високим споживанням енергії і часто є вузьким місцем на збагачувальній фабриці. Тому подрібнення завжди прагнуть оптимізувати насамперед. Для досягнення високої ефективності подрібнення та вироблення виключно важлива подача матеріалу з відповідним гранулометричним

складом, особливо в контурах подрібнення з млинами самоподрібнення або напівподрібнення. Інвестиції в оптимізацію подрібнення окупляться за рахунок зниження витрати електроенергії та підвищення продуктивності.

Metso Outotec АСТ — це передова платформа управління технологічним процесом для створення індивідуальних систем управління, що дозволяють стабілізувати та оптимізувати операції, починаючи з процесів з однією установкою та закінчуючи виробництвом у масштабі всього підприємства. Рішення Metso Outotec АСТ можна інтегрувати у всі існуючі системи керування підприємством.

Система оптимізації подрібнення Metso Outotec АСТ є системою керування контурами подрібнення з індивідуальним налаштуванням. Вона забезпечує стабільний стан контуру подрібнення, підтримує оптимальний розмір частинок для подальших процесів та підвищує продуктивність при мінімальному витраті енергії. Система оптимізації подрібнення Metso Outotec АСТ використовує дані про розмір частинок у подачі від RockSense, дані аналізу завантаження від MillSense та результати вимірювання розміру частинок у суспензії від PSI, а також результати інших потокових вимірювань.

Система Metso Outotec RockSense — це потокова система визначення розміру частинок руди, що проходить конвеєрною стрічкою. У системі реалізовано високопродуктивну тривимірну технологію лазерного формування зображень, яка не залежить від зовнішнього освітлення. Система RockSense аналізує частки руди під час звичайного руху конвеєрної стрічки та не впливає на її пропускну здатність. Чудова роздільна здатність та достовірний масштаб зображень досягається за рахунок поєднання тривимірного лазерного сканера високої роздільної здатності з кутовим енкодером. Система Metso Outotec RockSense дозволяє аналізувати наступне:

1. Гранулометричний склад з індивідуально заданими статичними вимірами.
2. Кумулятивну оцінку об'ємної витрати.

Система Metso Outotec MillSense виконує потоковий аналіз положення завантаження млина та об'єм, вимірюючи безпосередньо нижній та верхній кути розкочування. Результати об'ємного вимірювання завантаження є найціннішими

вхідними даними для оптимізації роботи млина та зменшення невідповідностей, викликаних зміною якості руди. Датчик MillSense встановлений безпосередньо на болті футерування, для його живлення та передачі даних використовується бездротова технологія.

Аналізатори розміру частинок Metso Outotec Outotec PSI — це потокова система визначення розміру частинок для мінеральних суспензій, що лідирує на ринку. Контроль та регулювання розміру частинок підвищують продуктивність та дозволяють досягти цільового помелу в контурі подрібнення. Крім того, система оптимізує наступні процеси за рахунок мінімальної витрати реагентів, підвищення ефективності вилучення, згущення та фільтрації. В асортимент Metso Outotec входять два аналізатори розміру частинок. Metso Outotec PSI 300i — це найкраща система КВП для більшості контурів подрібнення, що дозволяє вимірювати крупність від P40 до P90 в діапазоні від 25 до 1000 мкм. Аналізатори Metso Outotec PSI 500i рекомендується використовувати для розмірів частинок від 0,5 до 1000 мкм.

Переваги:

1. Стабілізація процесу подрібнення завдяки потоковому аналізу критичних параметрів;
2. Оптимізація продуктивності за рахунок точного контролю розміру частинок;
3. Зниження енергоспоживання і оптимізація витрат на реагенти;
4. Легке інтегрування з іншими системами управління, що дозволяє покращити операційний контроль на всьому підприємстві.

Недоліки:

1. Надзвичайно висока вартість впровадження: комплексні системи потребують значних початкових інвестицій;
2. Система по суті являє собою «чорний ящик» без можливості зміни програмного забезпечення та коду.

1.3 Обґрунтування необхідності вдосконалення системи керування процесом завантаження руди в млин МШЦ

Процес подрібнення руди на збагачувальних комбінатах є одним з найбільш енергоємних і часто виступає слабким місцем у технологічному процесі. Тому необхідність удосконалення систем керування завантаженням млина обумовлена потребою підвищення стабільності, енергоефективності та продуктивності процесу. Аналіз існуючих рішень на прикладі ПРАТ «ЦГЗК» та системи оптимізації АСТ від Metso Outotec виявив ряд недоліків та обмежень, які виправдовують потребу у вдосконаленні та впровадженні нових підходів у керуванні процесом завантаження млина.

1.3.1 Вдосконалення системи на ПРАТ «ЦГЗК»

Система керування на ПРАТ «ЦГЗК» базується на використанні датчика ваги, витратоміра та регуляторів для забезпечення базового контролю подачі руди та води. Однак вона має кілька обмежень:

1. Обмежений контроль завантаження млина: Використання лише маси руди на конвеєрі не дає повної інформації про стан завантаження млина, що може призводити до перевантаження або недостатнього завантаження, впливаючи на стабільність процесу.

2. Недостатній моніторинг якості подрібнення: Відсутність інструментів для оцінки ефективності подрібнення обмежує можливість оптимізації процесу і підвищення продуктивності.

Удосконалення системи на основі нових методів контролю вібрації та додавання контролю гранулометричного складу руди дозволить підвищити стабільність процесу та зменшити енергоспоживання.

1.3.2 Обмеження системи оптимізації АСТ від Metso Outotec

Хоча система АСТ є передовим комплексним рішенням для оптимізації контуру подрібнення, вона також має ряд особливостей, що обмежують її застосування:

1. Надзвичайно висока вартість впровадження та обслуговування: Система вимагає значних початкових інвестицій, а також регулярного технічного обслуговування, що може бути непідйомним для деяких підприємств.

Чутливість до змін у процесі: Незважаючи на високу точність, система може потребувати частих коригувань для адаптації до зміни властивостей руди або умов роботи.

Складність інтеграції з локальними системами: Інтеграція АСТ з існуючими системами управління може вимагати адаптації, що підвищує складність впровадження.

Таким чином, необхідність у вдосконаленні полягає у створенні менш дорогих рішень, здатних забезпечити оптимізацію параметрів подрібнення без значних затрат на адаптацію та обслуговування.

1.3.3 Переваги проектованої системи

Проектована система, що орієнтується на контроль вібраційних характеристик та інтегрує сучасні сенсорні технології, має наступні переваги:

Контроль в режимі реального часу: система використовує акселерометри для моніторингу вібрації на підшипниках, що дозволяє контролювати завантаження млина на основі параметрів роботи механічної частини.

Зниження вартості та простота обслуговування: Впровадження простих у налаштуванні сенсорів та контролера STM32 забезпечує значне зменшення витрат на обладнання та обслуговування у порівнянні з системами, що використовують дорогі аналізатори.

Стабільність процесу подрібнення: Забезпечується стабільний потік руди та контроль подачі води, що дозволяє уникати перевантаження або недостатнього завантаження млина.

Таким чином, вдосконалення системи завантаження млина за рахунок впровадження проектованої системи дозволить забезпечити високий рівень стабільності та ефективності подрібнення з меншими витратами на обладнання і обслуговування. Це дає можливість підвищити конкурентоспроможність підприємства, оптимізуючи процес подрібнення без високих капіталовкладень.

У разі не адаптивної роботи системи автоматизації, можуть виникати аварійні ситуації, як наприклад, перевантаження млина. Результат перевантаження млина показаний на рис. (Рис. 1.9).



Рисунок 1.9 – Результат перевантаження млина МШЦ

1.4 Висновки до розділу

У першому розділі роботи проведено огляд та аналіз технологічного процесу подрібнення залізної руди на ПРАТ «ЦГЗК», досліджено існуючі системи керування процесом завантаження млина МШЦ та обґрунтовано необхідність їх вдосконалення.

У пункті 1.1 розглянуто характеристику технологічного процесу подрібнення залізної руди на ПРАТ «ЦГЗК». Процес подрібнення було визначено як ключовий етап збагачення руди, що вимагає стабільного завантаження та ефективного контролю параметрів подрібнення для забезпечення високої продуктивності та зниження енергоспоживання.

У пункті 1.2 проведено аналіз існуючих рішень щодо керування процесом завантаження руди в млин МШЦ, зокрема системи на ПРАТ «ЦГЗК» та системи оптимізації подрібнення АСТ від Metso Outotec. Було виявлено, що, хоча обидві системи забезпечують базову стабільність завантаження, існують обмеження щодо точного контролю розміру частинок та автоматизації процесу подрібнення, що знижує загальну ефективність.

У пункті 1.3 обґрунтовано необхідність вдосконалення існуючих систем керування. Проектована система запропонована як більш економічно вигідне рішення, що забезпечує стабільний контроль подачі руди та води із використанням акселерометрів для моніторингу вібрацій, а також сенсорних технологій для адаптивного керування процесом завантаження. Це дозволяє підвищити стабільність роботи млина, оптимізувати енергоспоживання та зменшити витрати на обслуговування.

Отже, перший розділ підтверджує, що вдосконалення системи керування процесом завантаження руди є необхідним та виправданим для досягнення більшої ефективності подрібнення, підвищення продуктивності та зниження експлуатаційних витрат.

РОЗДІЛ 2

2. РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ ЗАВАНТАЖЕННЯ МЛИНА

2.1 Математичне забезпечення системи керування процесом завантаження млина

Математичне забезпечення адаптивної системи керування процесом завантаження млина є ключовим для реалізації стабільного та точного керування технологічним процесом. Модель об'єкта керування включає динаміку подачі руди, воду та взаємодію між компонентами системи. Основним завданням є розробка математичної моделі для подальшого аналізу та побудови ефективних алгоритмів керування.

2.1.1 Ідентифікація об'єкта керування

Ідентифікація об'єкта керування, тобто процесу завантаження млина, полягає у визначенні математичних залежностей між вхідними (подача руди, витрата води) та вихідними (вібраційні характеристики, маса завантаження, продуктивність млина) параметрами. Цей процес дозволяє досить точно описати динаміку системи та враховує вплив різних факторів на роботу млина.

1. Опис вхідних параметрів системи:

Подача руди (через частотний перетворювач «EMOTRON FDU 2.0 – AC drive», відбувається зміна маси руди, яка подається в млин): позначаю як Q_r , що залежить від швидкості подачі V_c та маси на стрічці m_r .

Подача води (через витратомір SITRANS і електропривод AUMA SQR): позначаю як Q_w , регулюється залежно від оптимального значення співвідношення «руда – вода» для подрібнення.

2. Опис вихідних параметрів системи:

Вібраційні характеристики: сигнал акселерометрів, що позначається як A_v , залежить від рівня завантаження млина та може бути індикатором перевантаження або нестабільності в роботі.

Маса завантаження M : є результатом подачі руди Q_r і визначається як інтеграл масової подачі за певний проміжок часу.

Продуктивність млина P : залежить від маси завантаження M і параметрів подачі води Q_w , що забезпечує стабільне подрібнення

3. Побудова математичної моделі:

Модель подачі руди: може бути описана диференціальним рівнянням, що враховує залежність між швидкістю подачі V_c , масою на конвеєрі m_r та впливом частотного перетворювача.

$$\frac{dQ_r}{dt} = f(V_c, m_r)$$

Модель вібраційної характеристики: встановлює зв'язок між рівнем вібрації A_v та параметрами завантаження, відображаючи реакцію на динамічні зміни в об'ємі завантаження.

$$A_v = g(M, Q_r)$$

Модель завантаження млина: визначається як функція масової подачі руди та води, що забезпечує необхідний рівень подрібнення.

$$M = \int (Q_r + Q_w) dt$$

4. Ідентифікація параметрів моделі:

Використовуються методи регресійного аналізу для отримання параметрів моделей за даними з датчиків під час стабільної роботи та зміни режимів завантаження.

Адаптивні методи дозволяють динамічно коригувати модель у випадку змін в якості руди або зовнішніх умов.

Завдяки цій математичній моделі система керування може адаптуватися до змін у завантаженні, реагувати на вібраційні коливання та підтримувати оптимальні параметри подачі руди і води, що забезпечить високу ефективність роботи млина.

Принцип роботи системи.

Основним принципом роботи є метод вимірювання вібраційного прискорення за допомогою акселерометрів ABC-117A, встановлених на вході та виході шийки млина (опорних підшипниках). Отримані дані математично обробляються серверним ПК SIMATIC IPC547G з використанням алгоритмів нейронних мереж.

Амплітуда вібраційного прискорення залежить від товщини шару матеріалу між кулями та металевими поверхнями млина і змінюється в залежності від рівня завантаження млина матеріалом. При відсутності матеріалу вібраційне прискорення досягає максимальних значень, тоді як при збільшенні кількості матеріалу між кулями та поверхнями воно зменшується.

На вібраційне прискорення також впливають діаметр куль та фізико-механічні властивості подрібнюваного матеріалу.

Датчики ABC-117 обробляють сигнал вібраційного прискорення та видають аналоговий струмовий сигнал у діапазоні 4-20 мА, який відображає рівень завантаження млина матеріалом від 0 до 100%.

Сигнал рівня завантаження млина показує його поточний потенціал до подрібнення. Коли рівень завантаження становить 0% (млин порожній), він максимально готовий приймати матеріал для подрібнення, тобто його потенціал подрібнення є максимальним. Навпаки, при завантаженні близько 100% (млин не працює або повністю завалений) потенціал подрібнення майже нульовий.

Будь-які зміни параметрів технологічного процесу або фізико-хімічних властивостей матеріалу для подрібнення призводять до зміни рівня завантаження. При оптимальній роботі середній рівень завантаження млина має бути в межах від 65% до 85%, залежно від властивостей матеріалу та якості кінцевого продукту. В окремих випадках рівень може досягати 90%. При перевищенні цього рівня

знижується якість подрібнення матеріалу (розкриття зерен). Обмеження максимального середнього рівня завантаження запобігає заваленню млина. Низький середній рівень завантаження призводить до збільшеного зносу кульового заряду та футеровки млина. Не рекомендується утримувати середній рівень нижче 50%, а при рівні нижче 30% тривала експлуатація млина заборонена. При середньому рівні завантаження від 75% і вище спостерігається зниження витрат електроенергії на подрібнення приблизно на 10%. Крім того, оптимальне завантаження продовжує термін служби кульового заряду та зменшує знос броні млина. Принцип вимірювання показаний на (Рис. 2.1).

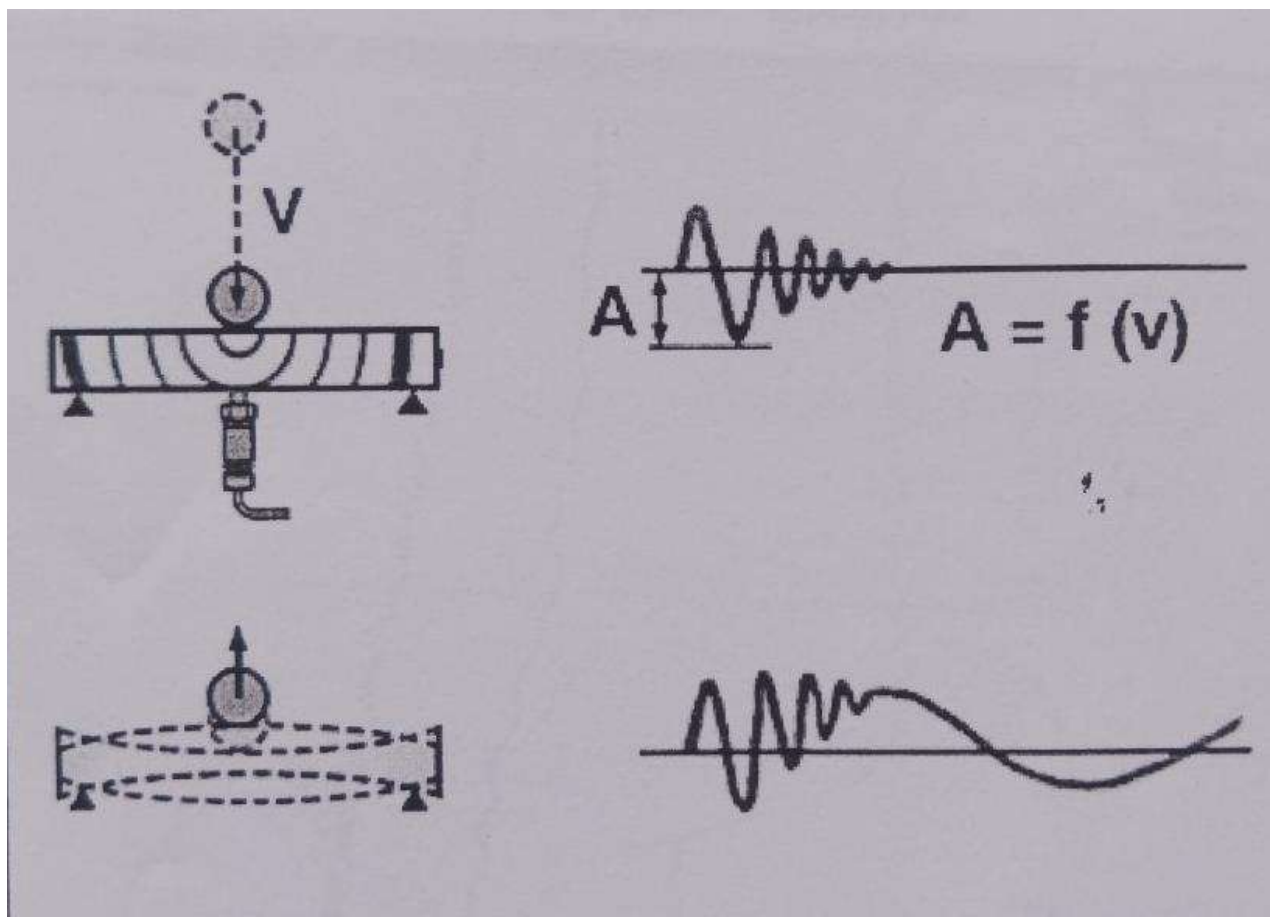


Рисунок 2.1 – Вимірювання вібрації акселерометром

Роль витрат води у технологічному процесі подрібнення

Ефективний процес подрібнення передбачає заповнення всього простору між шарами у млині пульпою (матеріалом, що подрібнюється). Швидкість проходження матеріалу всередині млина визначає рівень заповнення пульпи та продуктивність для заданого класу крупності. При цьому швидкість проходження різних класів крупності залежить від кількості води, що подається в процес.

Режим граничного подрібнення визначається граничною щільністю пульпи на виході з млина (вмістом твердого у зливі). Гранична щільність пульпи на виході з млина становить 80% твердого, тоді як перевантаження млина настає при 82–83% вмісту твердого у зливі.

Дослідження, проведені виробничими лабораторіями різних гірничо-збагачувальних підприємств, показали, що витрата води у млин має бути пропорційною витраті сировини, і складати 0,25...0,28 від ваги руди. Це співвідношення дозволяє досягти оптимального рівня – близько 80% твердого у зливі з млина, що забезпечує ефективність технологічного процесу.

2.1.2 Результати моделювання в MATLAB

На основі математичної моделі було розроблено скрипт для моделювання системи в MATLAB, який показано в **ДОДАТКУ 1**.

Структура нейромережі, показана на (Рис. 2.2) демонструє інтерфейс інструменту MATLAB Neural Network Training Tool (nntool), який широко використовується для навчання та оптимізації нейронних мереж у середовищі MATLAB. На даному етапі тренування видно всі ключові аспекти, що характеризують як структуру мережі, так і процес її навчання.

Структура нейронної мережі

Мережа складається з трьох основних шарів: вхідного, двох прихованих і вихідного. Вхідний шар має 1 вхідний параметр, який представляє дані, що обробляються. Кожен із прихованих шарів містить по 10 нейронів, що дозволяє моделювати складні нелінійні залежності. Вихідний шар містить один нейрон, який відповідає за формування кінцевого результату. Вказані вагові коефіцієнти (W) і

зсуви (b), які налаштовуються під час навчання для оптимального представлення даних.

Алгоритми навчання

Для навчання нейронної мережі обрано алгоритм Levenberg-Marquardt (trainlm), який забезпечує швидку збіжність і високу ефективність при роботі з невеликими мережами. Для оцінки ефективності використовується функція помилки Mean Squared Error (MSE), яка мінімізує різницю між передбаченими та реальними значеннями. Дані поділяються випадковим методом (random) на три множини: навчальну, валідаційну та тестову.

Хід навчання

На момент зняття скриншоту процес навчання перебуває на початковій стадії (епоха 0 із 1000). Тривалість навчання становить 13 секунд, а поточна помилка (performance) дорівнює 410. Значення градієнта ($1.5e+03$) свідчить про початкову інтенсивність змін параметрів. Регуляризаційний параметр μ , який відповідає за баланс між швидкістю навчання та стабільністю, дорівнює 0.0010. Валідаційні перевірки поки не зафіксували зупинки через погіршення точності.

Візуалізація та графіки

Результати візуалізації показані на (Рис. 2.3). Інструмент передбачає можливість аналізу процесу навчання через низку графіків. Графік Performance демонструє зміну функції помилки під час навчання, а Training State відображає стан параметрів мережі. Error Histogram дозволяє побачити розподіл помилок, тоді як Regression і Fit забезпечують оцінку відповідності результатів мережі до цільових значень.

Інтерактивне управління

Інтерфейс містить кнопки управління, такі як Stop Training для зупинки навчання в реальному часі та Cancel для повного припинення процесу. Це забезпечує гнучкість і контроль за ходом роботи нейронної мережі.

Таким чином, наведений інтерфейс демонструє детальну структуру і параметри процесу навчання нейронної мережі, що є ключовим етапом для ефективної реалізації моделі у складних технічних системах. Порівняння на (Рис. 2.4).

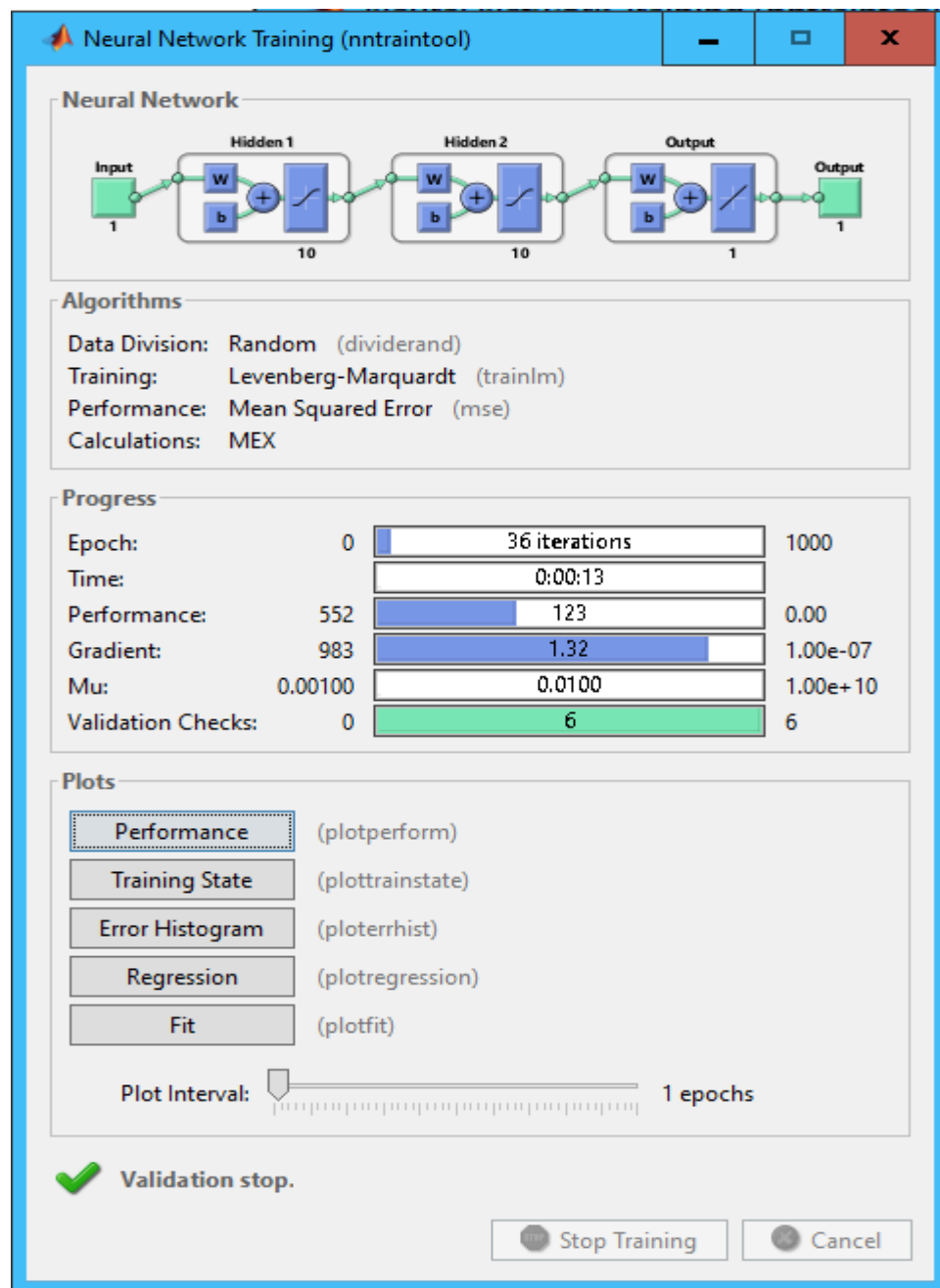


Рисунок 2.2 – Структура нейромережі

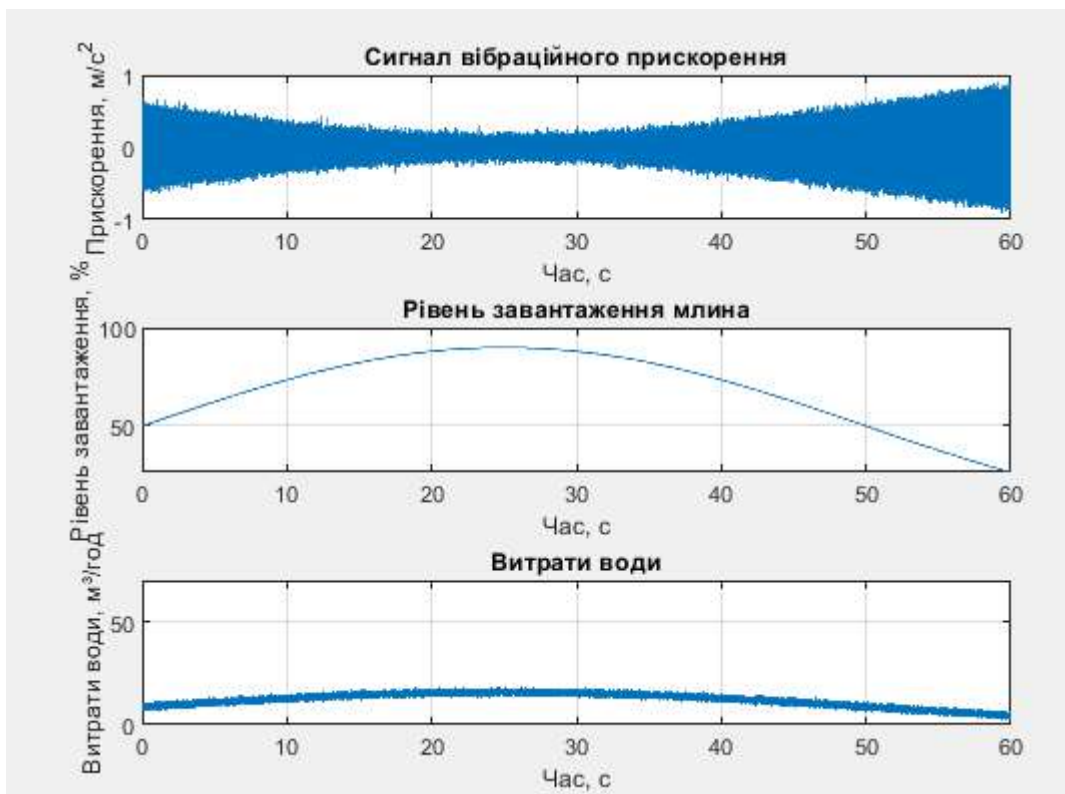


Рисунок 2.3 – Результати моделювання

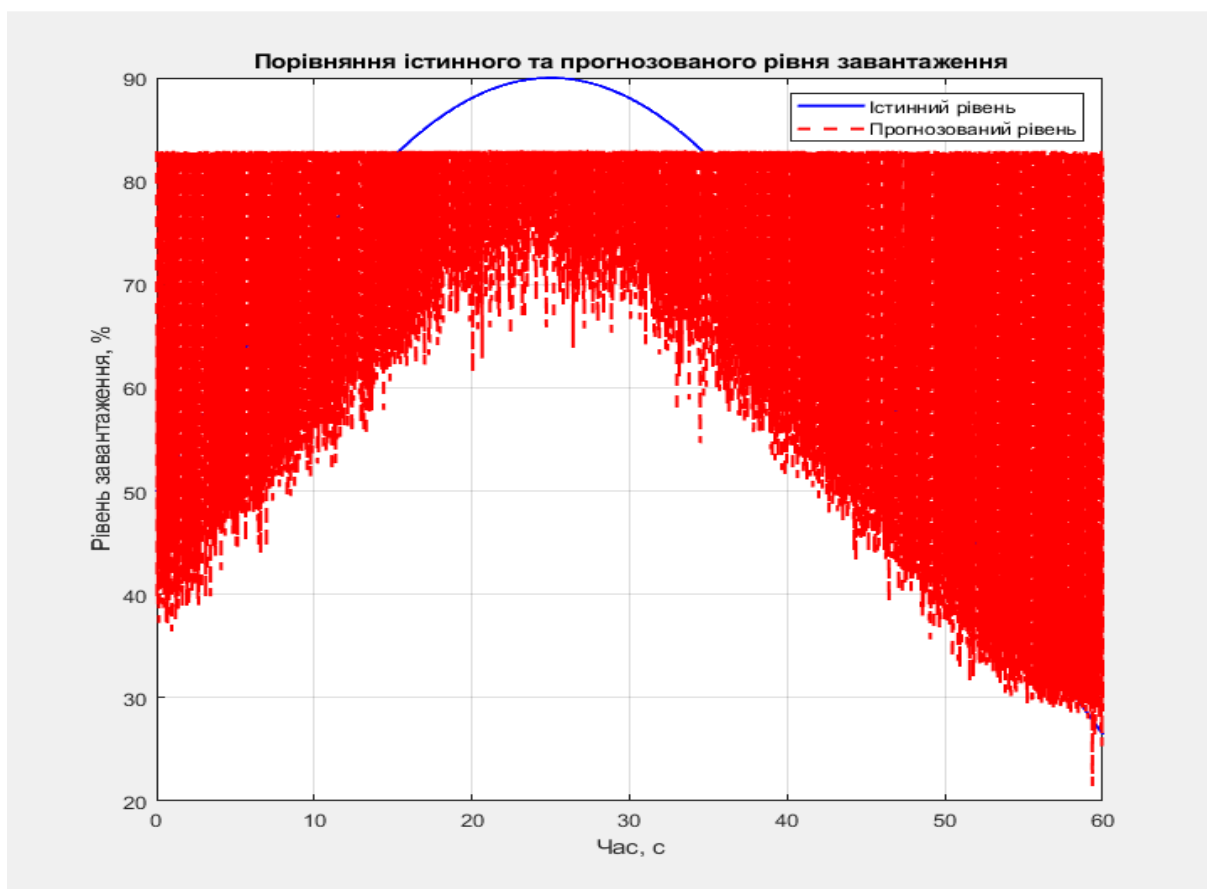


Рисунок 2.4 – Порівняння

2.2 Розробка структурної схеми адаптивного керування процесом завантаження млина

Структурна схема адаптивного керування процесом завантаження млина розроблена для забезпечення стабільної подачі руди та води, ефективного контролю завантаження та адаптації системи до змінних умов. Система інтегрує сенсори, контролер, виконавчі механізми та сервер для аналізу і прийняття рішень, що дозволяє ефективно керувати процесом у режимі реального часу.

2.2.1 Опис роботи структурної схеми

Адаптивна система керування процесом завантаження млина забезпечує безперервний моніторинг і контроль параметрів завантаження завдяки використанню сенсорів, мікроконтролера STM32 і промислового сервера, що виконує глибоку обробку даних. Передача даних здійснюється через Ethernet, протоколом OPC UA, забезпечує надійність і швидкість обміну інформацією. Структурна схема показана на (Рис. 2.5).

Датчик ваги ВКТ-4А постійно фіксує вагу руди на стрічковому конвеєрі. Цей параметр є одним із основних для регулювання подачі руди, оскільки він дозволяє адаптувати швидкість конвеєра під поточні умови.

Витратомір SITRANS FM MAGFLO вимірює витрати води, яка подається в млин. Дані про витрату допомагають підтримувати оптимальний рівень пульпового заповнення млина, необхідний для ефективного подрібнення.

Акселерометри ABC-117 встановлені на корінних підшипниках млина забезпечують моніторинг вібраційних характеристик. Дані акселерометрів інформують про рівень завантаження і дозволяють виявити можливі ознаки перевантаження чи недозавантаження.

Контролер STM32 приймає сигнали від сенсорів і виконує початкову обробку даних, усереднюючи вимірювання та усуваючи випадкові коливання.

Для кожного параметра формується масив даних, який підготовлений для передачі на серверний ПК для подальшого аналізу.

Контролер STM32 підключений до серверного ПК через Ethernet за допомогою комутатора ХВ 205, що забезпечує високошвидкісну передачу даних.

STM32 збирає дані у вигляді пакетів, які містять інформацію про масу руди, витрату води та вібраційні характеристики.

Пакети передаються на сервер з визначеною частотою, що залежить від вимог до швидкості оновлення даних (наприклад, 1-10 разів за секунду, в залежності від потреби).

Промисловий сервер SIMATIC RACK PC 547G отримує дані через Ethernet, по протоколу OPC UA, і обробляє їх у режимі реального часу. Використовуючи алгоритми аналізу, сервер оцінює рівень завантаження млина, рівень вібрації та стабільність подачі руди і води.

Сервер передає коригувальні команди на STM32 для регулювання швидкості конвеєра або витрати води. STM32 взаємодіє з частотним перетворювачем «EMOTRON FDU 2.0 – AC drive» (регулюючи подачу руди) і електроприводом AUMA SQR (регулюючи подачу води).

Наприклад, якщо маса руди на конвеєрі падає нижче оптимального рівня, сервер збільшує швидкість конвеєра, щоб стабілізувати подачу. Якщо вібрації перевищують норму, знижуються витрата води або швидкість подачі, щоб уникнути перевантаження.

Система працює в замкнутому контурі, що дозволяє забезпечити постійний моніторинг стану млина і завантаження.

Через Ethernet, сервер може також надсилати історичні дані для архівування або для подальшого аналізу з метою вдосконалення алгоритмів управління.

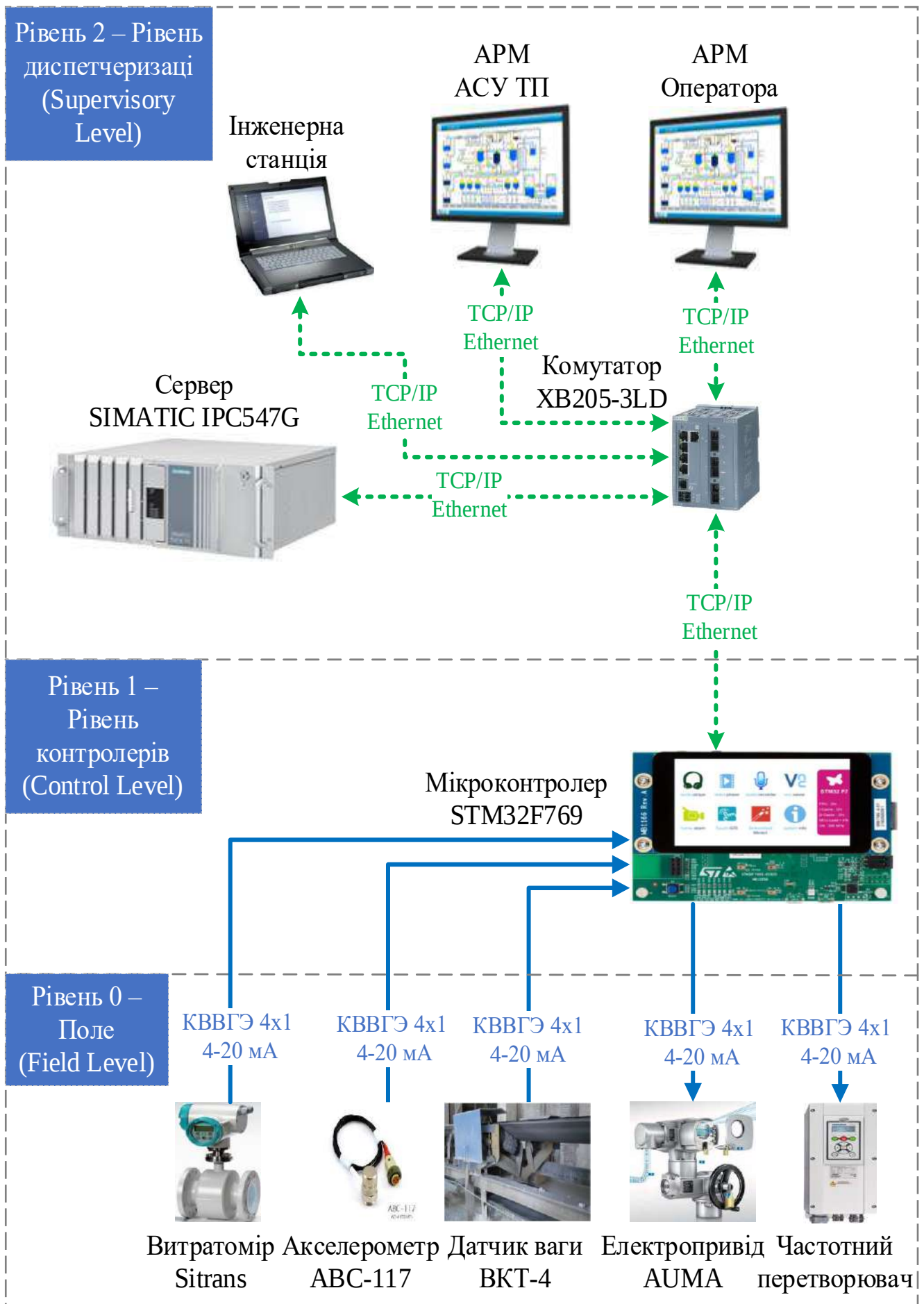


Рисунок 2.5 – Структурна схема автоматизації

2.3 Розробка функціональної схеми адаптивного керування процесом завантаження млина

Метою розробки функціональної схеми є створення зрозумілої та структурованої моделі, яка демонструє, як система автоматизації здійснює збір, обробку і передачу даних, а також приймає рішення для оптимального завантаження млина. Це забезпечує зручність у проектуванні, реалізації та вдосконаленні системи.

2.3.1 Опис роботи функціональної схеми

Руда транспортується з бункера на конвеєр Н-8. На конвеєрі встановлений датчик ваги (Поз. 1а), який вимірює масу руди, яка надходить до прийомного жолоба млина МШЦ. Цей параметр передається в систему автоматизації, поступає на вхід мікроконтролера STM32, дозволяє здійснювати контроль подачі руди в млин.

Технічна вода подається до млина через трубопровід Ду 100. Для регулювання потоку використовується електропривод AUMA SQR, який управляє запірною арматурою. Витратомір води (Поз. 2а) вимірює фактичні витрати води і передає до системи управління, що забезпечує контроль за співвідношенням «вода/руда».

Млин МШЦ здійснює подрібнення руди. Контроль рівня завантаження млина здійснюється за допомогою відповідних акселерометрів (Поз. 3 і Поз. 4), які змонтовані на корпусі опірних підшипників млина. Дані з цих датчиків аналізуються для забезпечення оптимальної продуктивності.

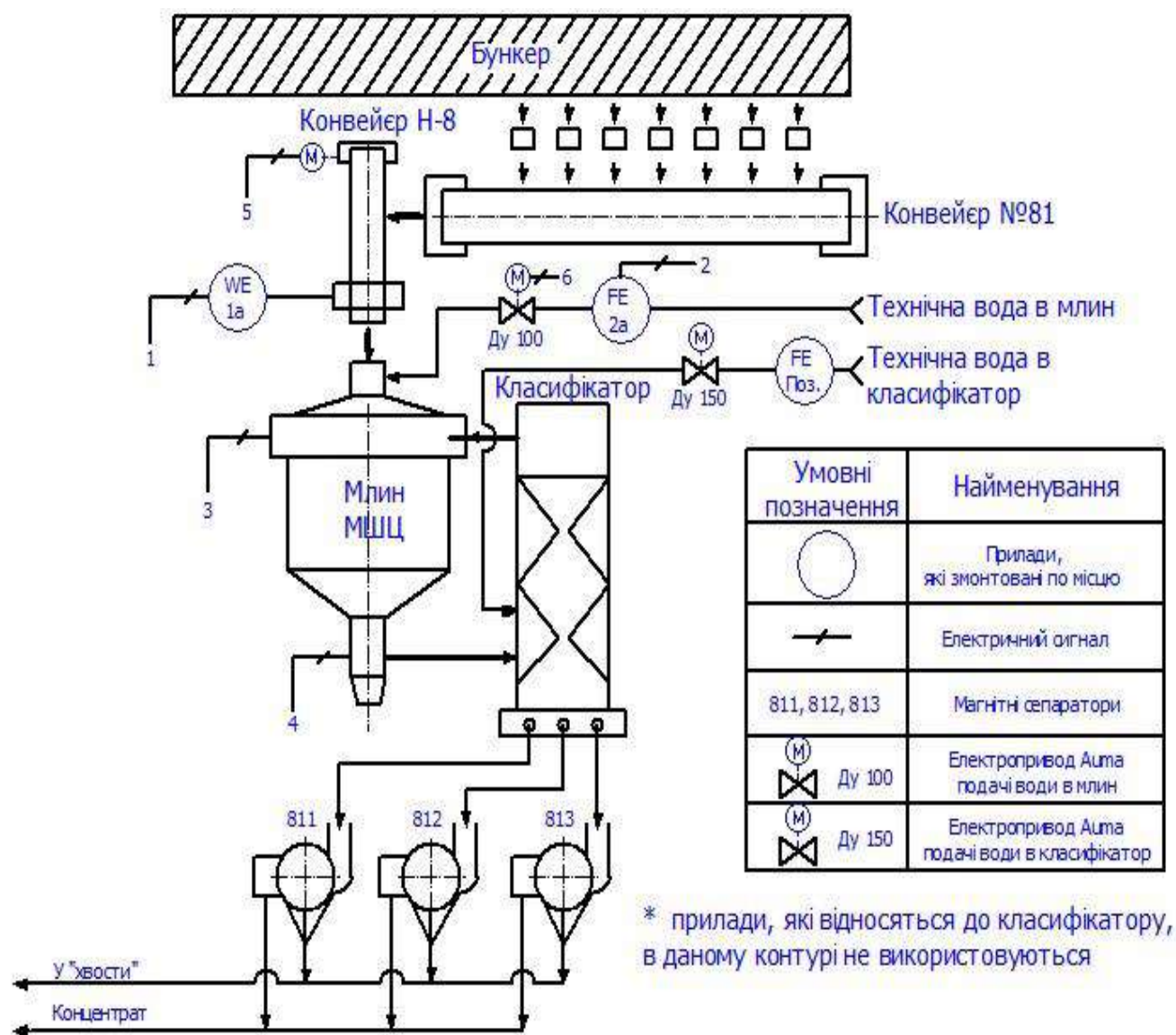
Подрібнена маса надходить до класифікатора, де відбувається розділення продукту на фракції. Основна частина продукту спрямовується на магнітні сепаратори (811, 812, 813) для подальшого збагачення. В результаті виділяється концентрат і хвости.

Система автоматизації базується на мікроконтролері STM32F769I, який виконує первинну обробку сигналів з датчиків: ваги (руди), витратоміра (води), акселерометрів (вібрації млина). Передача даних здійснюється через Ethernet до

серверів АСУ ТП і оператора фабрики. Прийняті рішення впливають на роботу виконавчих механізмів (електроприводів АУМА і частотного перетворювача).

Всі ключові параметри, такі як маса руди, витрати води, рівень завантаження млина, рівень розвантаження і параметри класифікації, контролюються і коригуються системою. Це забезпечує оптимальний режим роботи технологічного процесу.

Функціональна схема показана на (Рис. 2.6).



				1 250 т/год	2 70 м3/год	3 0-99 %	4 0-99 %	5 0-100 %	6 0-100 %
Прилади, які монтуються по місцю	Мікроконтролер STM32F769I	Аналоговий вхід		-A1P1W3	-A2P1W2	-A3P1W1	-A4P1W6		
		Аналоговий вихід						-A5P1W5	-A6P1W2
		Ethernet							
Серверна АСУ ТП	АРМ АСУ ТП	Ethernet							
Операторна фабрика	АРМ оператора	Ethernet							
Контролюваний параметр			Конвейер Н-8	Параметри млина МШЦ 4500x6000					
			Маса руди	Витрати води	Рівень заправки	Рівень розгр.	Керув. руди	Керув. води	

Рисунок 2.6 – Функціональна схема

2.4 Розробка схеми електричної принципової

2.4.1 Опис роботи схеми електричної принципової

Система використовує три основні типи датчиків: витратомір води Sitrans FM MAGFLO, ваговий датчик ВКТ-4А та акселерометри АВС-117А. Схема електрична принципова показана на (Рис. 2.7).

Витратомір води Sitrans FM MAGFLO відповідає за вимірювання витрати технічної води, яка подається в млин. Сигнал з витратоміра має аналоговий вихід у діапазоні 4-20 мА, що пропорційний витратам води. Цей сигнал передається на мікроконтролер STM32F769I для первинного аналізу та обробки.

Ваговий датчик ВКТ-4А забезпечує вимірювання ваги руди на конвеєрі перед подачею до млина. Як і витратомір, датчик формує аналоговий сигнал (4-20 мА), який також передається до мікроконтролера.

Акселерометри АВС-117А, встановлені на вузлах завантаження та розвантаження млина, вимірюють вібраційні характеристики млина. Ці дані допомагають оцінювати рівень завантаження млина рудою.

Мікроконтролер STM32F769I виконує роль первинного вузла збору та обробки даних від усіх датчиків. Аналогові сигнали з датчиків передаються на відповідні канали мікроконтролера, де вони:

Перетворюються в цифровий формат за допомогою вбудованого АЦП.

Піддаються фільтрації для зменшення шумів та отримання точних значень.

Аналізуються для визначення поточного стану завантаження млина.

STM32 передає дані до серверного ПК через Ethernet-з'єднання, по протоколу OPC UA, для подальшої обробки, архівування та відображення оператору.

Оброблені дані передаються на серверний ПК Siemens SIMATIC PC547G, який виконує такі функції:

Додатковий аналіз даних, зокрема нейронні обчислення для прогнозування оптимальних параметрів завантаження.

Генерація команд для регулювання подачі руди та води.

Регулювання подачі води здійснюється за допомогою електропривода AUMA AC01.2, який керує подачею води. Мікроконтролер передає сигнали для зміни положення клапана залежно від вимог технологічного процесу.

Регулювання подачі руди виконується через частотний перетворювач Emotron, який змінює частоту обертання двигуна конвеєрної стрічки. Цей механізм дозволяє точно дозувати кількість руди, що надходить до млина.

Мікроконтролер та блок перетворювача сигналу (БПС), зосереджені в захисній шафі, виконанням IP 68, яка змонтована біля млина МШЦ. Це забезпечує безпеку роботи системи та її захист від зовнішніх впливів.

Система побудована таким чином, щоб забезпечити повний цикл автоматизації завантаження млина:

Дані збираються з усіх датчиків і передаються на мікроконтролер.

Після первинної обробки дані надходять на сервер для подальшого аналізу.

На основі аналізу формуються керуючі впливи, які передаються на виконавчі механізми.

Виконавчі механізми змінюють витрату води та руди для досягнення оптимальних умов роботи млина.

Така архітектура забезпечує гнучкість, адаптивність і можливість масштабування системи.

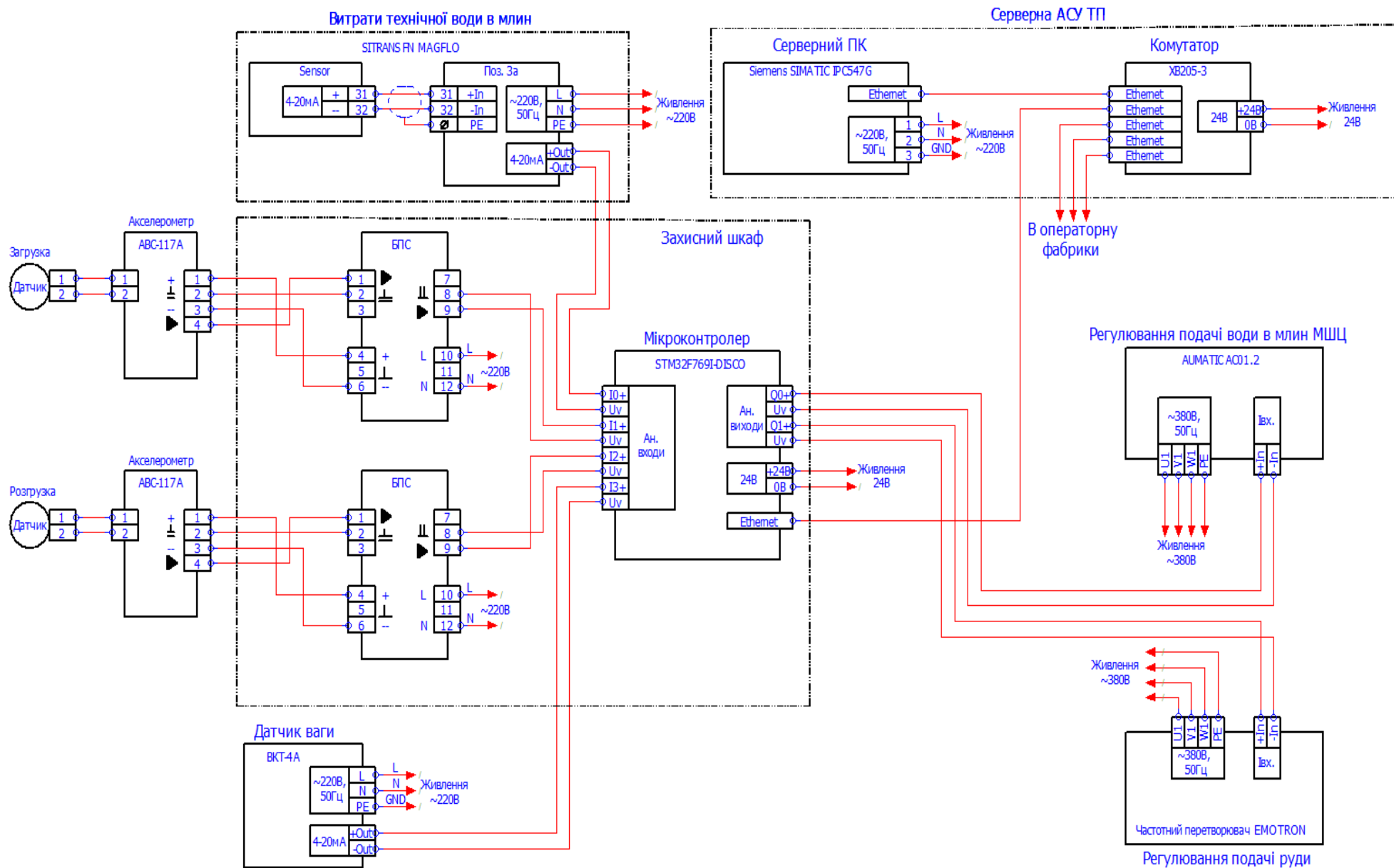


Рисунок 2.7 – Схема електрична принципова системи автоматики

На (Рис. 2.8) показана схема електрична принципова, перетворювача на операційному підсилювачі, сигналу «струм – напруга». А на (Рис. 2.9) її макет. Дана схема перетворює сигнал 4-20 мА. в сигнал 0-5В для аналогового входу мікроконтролера STM32.

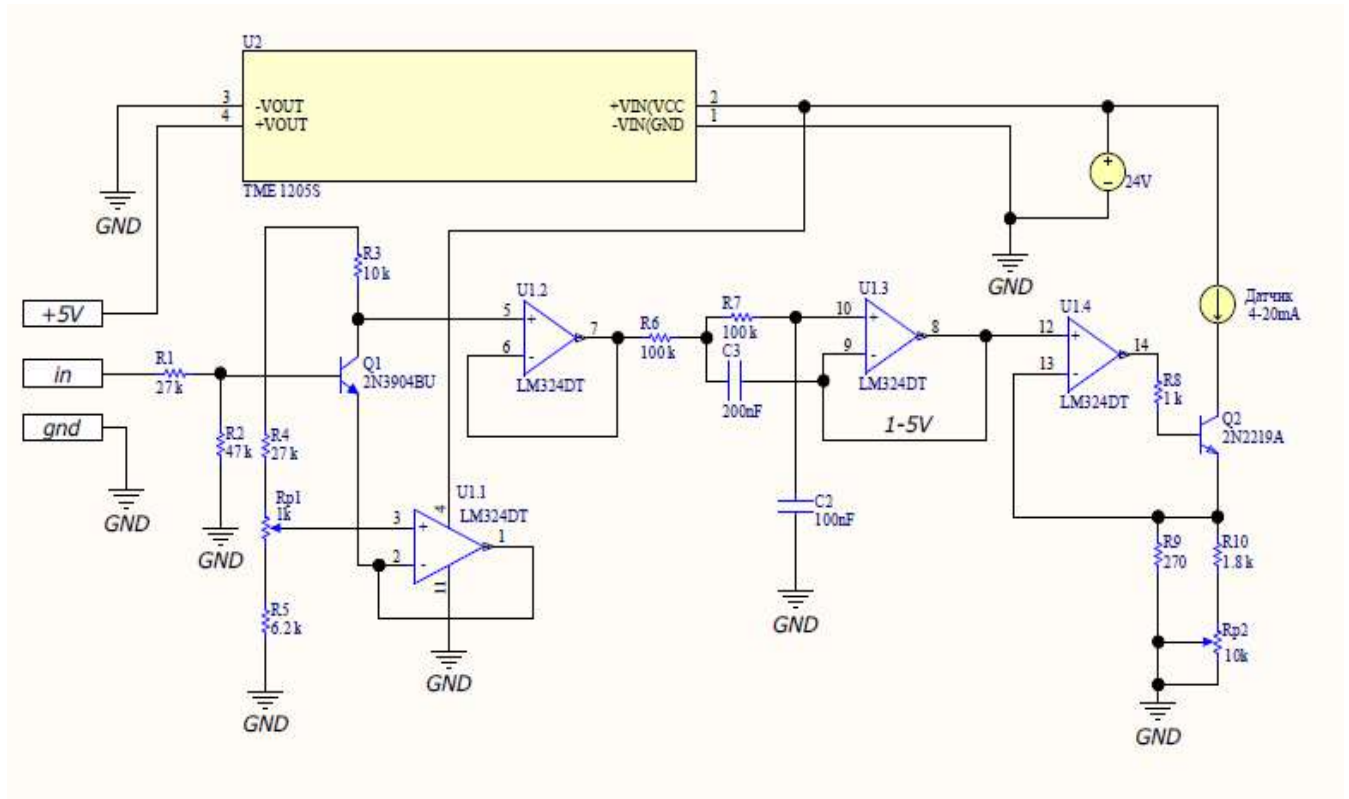


Рисунок 2.8 – Схема електрична принципова

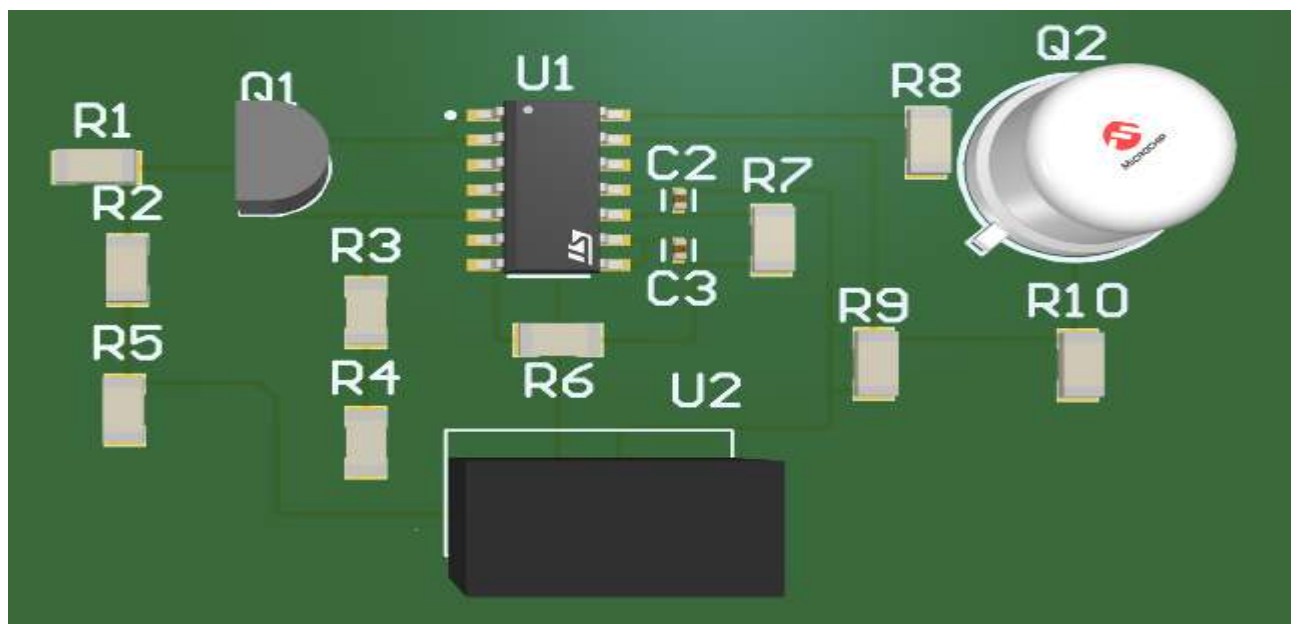


Рисунок 2.9 – Зовнішній вигляд спроектованої друкованої плати

2.5 Технічне забезпечення системи керування процесом завантаження млина

2.5.1 Обґрунтування структури комплексу технічних засобів для реалізації системи

Розробка технічної структури комплексу заснована на потребах системи у надійних і точних датчиках для збору даних, обчислювальних ресурсах для обробки інформації та виконавчих пристроях для регулювання процесу завантаження млина. Основними критеріями вибору технічних засобів є їх надійність, точність, сумісність з промисловими стандартами, а також здатність працювати в складних виробничих умовах.

2.5.2 Вибір датчиків та первинних перетворювачів

Вибір датчиків та первинних перетворювачів для системи керування процесом завантаження млина має вирішальне значення для забезпечення точності збору даних, що необхідні для адаптивного керування. Враховуючи особливості процесу, розглянемо основні вимоги до датчиків, їхні параметри та обґрунтування вибору конкретних моделей.

Основні вимоги до датчиків

Стійкість до умов експлуатації — датчики мають працювати в умовах підвищеного рівня пилу та вібрацій, характерних для середовища млина.

Висока точність — для забезпечення точності керування необхідні датчики з мінімальними похибками.

Швидкість відгуку — швидка реакція на зміни параметрів забезпечує оперативне керування.

Сумісність із системою керування — датчики повинні мати інтерфейси, сумісні з мікроконтролером та іншими компонентами системи.

Датчик ваги

У гірничо-збагачувальних комбінатах (ГЗК) для вимірювання ваги застосовуються різні типи вагових датчиків, які можна розділити на такі основні категорії:

1. Тензометричні датчики (датчики з тензорезисторами)

Переваги: Висока точність, широке застосування, здатність працювати з важкими навантаженнями.

Недоліки: Чутливі до механічних та температурних навантажень, можуть вимагати додаткового захисту від вологи та пилу.

2. Гідравлічні вагові датчики

Переваги: Простота конструкції, надійність в умовах високих вібрацій та ударних навантажень.

Недоліки: Менша точність порівняно з тензометричними датчиками, залежність від змін температури та рівня гідравлічної рідини.

3. П'єзоелектричні датчики ваги

Переваги: Висока швидкодія та стійкість до вібрацій, добре підходять для динамічних вимірювань.

Недоліки: Чутливі до температури та вологості, потребують стабільного температурного режиму, що може бути складно забезпечити в умовах ГЗК.

4. Електромагнітні датчики ваги

Переваги: Стійкість до пилу та вологи, можливість застосування в агресивних середовищах.

Недоліки: Залежність точності від зовнішніх магнітних полів, вимагають ретельного калібрування та можуть бути об'ємні.

Я вибрав тензометричний датчик ВКТ-4А, показаний на (Рис. 2.10) тому що це високоточний ваговий датчик, розроблений для використання у промислових автоматизованих системах контролю і управління. ВКТ-4А є важливим елементом у системах моніторингу технологічних процесів, де критичним є точне вимірювання

ваги або навантаження. Завдяки своїй надійності, точності та можливості інтеграції в складні автоматизовані системи, цей датчик успішно використовується на підприємствах гірничої, металургійної, харчової промисловості, а також в складних транспортно-логістичних системах.



Рисунок 2.10 — Конвеєр Н-1000 та ваги ВКТ-4А

Витратомір води

У гірничо-збагачувальних комбінатах (ГЗК) для вимірювання витрати води найчастіше застосовуються такі типи витратомірів:

1. Електромагнітні витратоміри

Приклад: Siemens SITRANS FM MAGFLO, Endress+Hauser Proline Promag.

Переваги: Висока точність, відсутність рухомих частин, що зменшує знос і робить їх надійними в умовах забрудненої води. Не чутливі до вібрацій та забруднень.

Недоліки: Потребують провідних рідин для роботи (неможливо застосовувати з непровідними рідинами), залежність точності від правильної установки.

2. Ультразвукові витратоміри

Приклад: Flexim FLUXUS, Dynasonics TFX-5000.

Переваги: Можуть встановлюватися зовні трубопроводів, підходять для великих труб та рідин з твердими частинками. Висока точність і довговічність у складних умовах.

Недоліки: Точність може знижуватися при значних бульбашках повітря у воді чи високій вібрації.

3. Турбінні витратоміри

Переваги: Доступна ціна, висока точність на середніх та високих швидкостях потоку, компактність.

Недоліки: Потребують регулярного обслуговування, чутливі до механічного зносу, можуть засмічуватися в умовах високої забрудненості.

4. Вихрові витратоміри

Приклад: Yokogawa DY Vortex, Krohne OPTISWIRL.

Переваги: Підходять для широкого діапазону рідин та газів, точні на великих витратах, не мають рухомих частин, що робить їх надійними.

Недоліки: Можуть бути чутливими до вібрацій, вимагають правильної установки.

5. Кориолісові витратоміри

Приклад: Micro Motion Coriolis, Endress+Hauser Proline Promass.

Переваги: Дуже висока точність, можуть вимірювати не лише об'ємну, але й масову витрату, підходять для в'язких рідин і рідин з високим вмістом домішок.

Недоліки: Висока вартість, складна установка та обслуговування.

Електромагнітні та ультразвукові витратоміри найкраще підходять для умов ГЗК через їх стійкість до забрудненої води та низький знос.

Саме тому, я вибрав витратомір SITRANS FM MAGFLO, показаний на (Рис. 2.11), тому, що це промислова система вимірювання витрат, розроблена для високоточної оцінки потоків рідин у трубопроводах. Система складається з датчика MAG 3100 та перетворювача MAG 5000 і забезпечує надійні та точні дані навіть у

найскладніших умовах. Це рішення часто використовується в гірничо-збагачувальній, хімічній та водоочисній промисловості, де критично важливо контролювати витрати та обсяги транспортованих рідин.

Основні компоненти системи SITRANS FM MAGFLO

Датчик MAG 3100:

Принцип роботи: Датчик використовує електромагнітний принцип вимірювання, який дозволяє безконтактно визначати швидкість потоку рідини. Згідно з законом Фарадея, рух заряджених частинок у провідній рідині через магнітне поле створює електричну напругу, що пропорційна швидкості потоку.

Матеріали та стійкість: Оболонка MAG 3100 виготовлена з високоякісної сталі, а внутрішнє покриття доступне в різних матеріалах, таких як гума чи тефлон, що забезпечує хімічну стійкість у агресивних середовищах та тривалий термін експлуатації. Це дозволяє ефективно працювати в середовищах із високим вмістом твердих частинок або агресивними хімічними речовинами.

Особливості конструкції: MAG 3100 має вбудовані електроди, що розташовані під кутом до потоку для мінімізації осадів та утворення відкладень.

Це забезпечує стабільну роботу навіть у складних умовах і підвищує точність вимірювань.

Перетворювач MAG 5000:

Призначення та функціональність: MAG 5000 виконує обробку сигналів, які надходять з датчика MAG 3100, і перетворює їх на стандартизований вихідний сигнал для подальшого аналізу. Перетворювач підтримує кілька вихідних сигналів, зокрема аналоговий (4-20 мА), імпульсний та частотний, що дозволяє інтегрувати його з різними системами автоматизації.

Технології обробки сигналів: MAG 5000 забезпечує високоточну обробку сигналів завдяки фільтрам та алгоритмам компенсації перешкод. Його конструкція знижує вплив електромагнітних завад, що є критично важливим у промислових умовах.

Інтуїтивний інтерфейс: Перетворювач оснащений дисплеєм і кнопковим інтерфейсом, що дозволяє легко налаштовувати параметри вимірювання,

калібрувати та перевіряти працездатність системи. Наявність цифрового інтерфейсу зв'язку (наприклад, HART) спрощує моніторинг та налаштування параметрів віддалено.

Ключові переваги SITRANS FM MAGFLO

Висока точність вимірювання: Система забезпечує точність у межах $\pm 0,2\%$ від вимірюваного значення, що дозволяє отримувати надійні дані про потік рідини, навіть при низькій швидкості потоку.

Низька втрата тиску: Завдяки безконтактному методу вимірювання датчик практично не створює опору потоку, що знижує втрати тиску у системі та оптимізує енерговитрати на перекачування рідини.

Широкий діапазон застосувань: Використання високоякісних матеріалів і варіативність покриттів дозволяють використовувати SITRANS FM MAGFLO у складних середовищах з високим вмістом агресивних хімікатів, абразивів та суспензій, що робить систему універсальною для багатьох галузей.

Сценарії використання SITRANS FM MAGFLO в промислових умовах SITRANS FM MAGFLO оптимально підходить для вимірювання витрат у таких сферах:

Гірничо-збагачувальна промисловість: Контроль витрат води та суспензій, що транспортуються в системах подрібнення та збагачення. Здатність працювати з рідинами, що містять тверді частинки, робить систему ідеальною для моніторингу потоків у шахтах та кар'єрах.

Хімічна та нафтохімічна промисловість: Завдяки стійкості до корозійних речовин і здатності працювати з агресивними середовищами, система може використовуватися для моніторингу потоків кислот, лугів та інших реагентів.

Водоочисні споруди: Вимірювання витрат у процесах очищення та фільтрації води. Електромагнітний принцип дозволяє точно вимірювати навіть низькі потоки, що важливо для контролю дозування та витрат води.

Система SITRANS FM MAGFLO, що складається з датчика MAG 3100 та перетворювача MAG 5000, є інноваційним рішенням для точного контролю витрат рідин у промислових умовах. Надійність, точність і стійкість до складних умов

роблять цю систему одним із найкращих виборів для застосувань, де потрібен контроль витрат і забезпечення безперервного процесу. Завдяки універсальності і високій надійності, SITRANS FM MAGFLO гарантує ефективний контроль і надає критично важливі дані для оптимізації процесів у найрізноманітніших галузях.



Рисунок 2.11 – Витратомір SITRANS FM MAGFLO

У гірничо-збагачувальних комбінатах (ГЗК) для аналізу вібрацій використовуються різні типи датчиків, залежно від мети вимірювання, умов експлуатації та характеристик обладнання. Ось основні типи датчиків вібрації, які знаходять застосування на ГЗК:

1. П'єзоелектричні акселерометри

Приклад: Акселерометри IMI Sensors, PCB Piezotronics, ABC-117.

Переваги: Висока точність, стійкість до агресивних середовищ та механічних ударів. П'єзоелектричні акселерометри надійні в умовах високих температур і вібрацій.

Недоліки: Вимагають спеціального монтажу та захисту від надмірного забруднення, оскільки пил може впливати на точність показів.

2. Мембранні вібраційні датчики (сейсмічні акселерометри)

Переваги: Підходять для вимірювання низькочастотних вібрацій, стійкі до низьких температур. Їх можна використовувати для моніторингу стану великих машин і установок.

Недоліки: Чутливість до механічних пошкоджень, вимагають ретельного монтажу та можуть бути об'ємними.

3. Магнітострикційні акселерометри

Приклад: Magnetostriction-основані датчики, такі як Honeywell типу G-862.

Переваги: Стійкість до магнітних полів, висока чутливість і здатність до безконтактного вимірювання. Їх часто застосовують для моніторингу вібраційних характеристик руди та обладнання.

Недоліки: Залежність від точності калібрування, чутливість до перепадів температур.

4. Мікроелектромеханічні системи (MEMS) акселерометри

Приклад: Bosch BMA400, STMicroelectronics IIS2DH.

Переваги: Компактні розміри, низьке енергоспоживання, можуть вбудовуватись у складні системи моніторингу, наприклад, у контролери. Добре підходять для локальних систем контролю на машинах середнього розміру.

Недоліки: Менша точність порівняно з п'єзоелектричними, обмеження по температурі та умовам експлуатації в суворих промислових середовищах.

П'єзоелектричні акселерометри є найкращим вибором для точного аналізу вібрацій у жорстких умовах ГЗК. MEMS-акселерометри також можуть використовуватися для моніторингу дрібніших механізмів, тоді як оптоволоконні та магнітострикційні датчики підійдуть для специфічних завдань, де важливіша стійкість до перешкод і робота на великих відстанях.

Саме тому, для даного проекту я вибрав акселерометр ABC-117, тому, що це високочутливий інструмент для вимірювання вібраційних характеристик обладнання, спеціально розроблений для застосувань у промисловості, де критично важливим є моніторинг стану і точний контроль динамічних параметрів. Завдяки

своїй високій чутливості і здатності працювати у складних умовах, ABC-117 стає ідеальним вибором для безперервного моніторингу стану механізмів, таких як млини, насоси, редуктори, електродвигуни та інше обладнання з інтенсивними вібраційними навантаженнями.

Основні технічні характеристики акселерометра ABC-117

ABC-117 використовує п'єзоелектричний або MEMS-принцип вимірювання, що забезпечує точність і стабільність вихідного сигналу навіть при високих динамічних навантаженнях. Акселерометри цього типу здатні вловлювати найменші зміни у вібраційних характеристиках, що є важливим для діагностики стану обладнання.

Датчик підтримує вимірювання у широкому діапазоні частот, часто від 0,1 Гц до 20 кГц, що дозволяє контролювати як низькочастотні коливання, пов'язані з основними режимами роботи, так і високочастотні коливання, які можуть свідчити про аномалії або початкові стадії дефектів. Такий діапазон є особливо корисним для діагностики стану підшипників, валів та передач.

ABC-117 характеризується високою чутливістю (наприклад, 100 мВ/г), що дозволяє точно вимірювати вібрації навіть при мінімальних змінах динамічних параметрів. Це робить датчик придатним для прецизійних досліджень, коли необхідно фіксувати найменші відхилення від нормального режиму роботи.

Міцний металевий корпус і захисні елементи роблять акселерометр ABC117 стійким до агресивних умов експлуатації: пилу, вологи, високих температур і вібрацій. Його конструкція розроблена таким чином, щоб забезпечити стабільність і тривалий термін служби навіть в умовах інтенсивного навантаження. Це критично важливо для роботи в гірничодобувній промисловості, на сталеплавильних і хімічних заводах.

Акселерометр ABC-117 має аналоговий вихідний сигнал (наприклад, 4-20 мА), що дозволяє легко інтегрувати його в промислові системи автоматизації, такі як PLC або мікроконтролери. Це спрощує його підключення до систем обробки сигналів і контролю, а також дозволяє передавати дані на великі відстані без втрати точності.

Завдяки своїй чутливості та широкому діапазону частот, ABC-117 дозволяє виявляти навіть незначні зміни у вібраційних характеристиках, що є ознакою зносу або несправностей. Це робить акселерометр незамінним для систем прогнозованого технічного обслуговування, де важливо запобігти несподіваним зупинкам і мінімізувати витрати на ремонт.

Висока чутливість та низька затримка вимірювань дають змогу миттєво виявляти відхилення від нормального режиму роботи, що дозволяє оперативно реагувати на потенційні проблеми та уникнути аварійних ситуацій.

Корпус акселерометра ABC-117 забезпечує надійний захист у суворих промислових умовах, що значно збільшує його довговічність та надійність. Це дозволяє використовувати його у критичних додатках, де стабільність вимірювань є пріоритетною.

Приклади застосування акселерометра ABC-117

Моніторинг вібрацій у кульових млинах: Вібрації млина можуть змінюватися залежно від рівня завантаження та характеристик матеріалу. ABC117 забезпечує точний контроль цих параметрів, дозволяючи системам адаптивного керування автоматично налаштовувати процес завантаження для підтримки оптимальних умов роботи.

Контроль стану підшипників та редукторів: Акселерометр ефективно виявляє ранні ознаки зносу, таких як нестабільні або аномально високі вібрації, що є свідченням погіршення стану підшипників або зубчастих передач. Це дозволяє мінімізувати ризики аварійних зупинок і планувати обслуговування на основі фактичного стану обладнання.

Прогнозоване обслуговування: Завдяки високій точності та широкому діапазону частот, акселерометр ABC-117 ідеально підходить для систем моніторингу та діагностики, орієнтованих на прогнозоване обслуговування. Він дозволяє накопичувати дані, які згодом можуть бути використані для аналізу трендів і побудови моделей зносу.

Акселерометр ABC-117, показаний на (Рис. 2.12), (Рис. 2.13), є надзвичайно ефективним інструментом для вимірювання вібрацій, який відповідає найвищим

стандартам промислової точності та надійності. Його використання дозволяє не лише підтримувати стабільний режим роботи обладнання, але й значно покращити процеси прогнозованого технічного обслуговування, що сприяє зниженню витрат та підвищенню продуктивності. Завдяки універсальності і можливості інтеграції в автоматизовані системи, акселерометр АВС-117 є ключовим компонентом сучасних промислових рішень у галузі моніторингу та управління.



Рисунок 2.12 – Акселерометр АВС-117



Рисунок 2.13 – Фото змонтованого датчика акселерометра АВС-117

Вибір первинного перетворювача

Виконує збір даних з датчиків, фільтрацію сигналів та їх попередню обробку, забезпечуючи стабільний зв'язок з обчислювальним модулем.

Для роботи в умовах гірничо-збагачувальних комбінатів (ГЗК) підходять мікроконтролери з високою надійністю, стійкістю до жорстких умов експлуатації (температурні перепади, вібрації, пил, вологість) та розширеними можливостями обробки даних. Розглянемо кілька типів мікроконтролерів, які часто обирають для таких умов:

1. STM32 (STMicroelectronics)

Переваги: Широкий діапазон моделей, потужні обчислювальні можливості, наявність моделей з підтримкою промислових протоколів зв'язку (Ethernet, CAN, OPC UA). Деякі моделі мають захист від електромагнітних перешкод та температури, що робить їх придатними для використання в промислових умовах.

Приклад: STM32F4, STM32F7 для обробки сигналів і складних обчислень; STM32L для енергоефективних застосувань.

2. Texas Instruments TMS320 (C2000)

Переваги: Висока обчислювальна потужність, спеціалізація на обробці сигналів та керуванні електродвигунами, наявність моделей для жорстких умов. Підходить для задач, де необхідна швидка обробка вібраційних або звукових сигналів.

Приклад: TMS320F28335 – потужний DSP-контролер для керування двигунами, роботи з ПІД-регуляторами, обробки сигналів.

3. NXP i.MX RT (ARM Cortex-M)

Переваги: Серія i.MX RT має високу обчислювальну потужність та енергоефективність, підтримує безліч протоколів зв'язку, включаючи Ethernet та CAN. Підходить для систем автоматизації та контролю, де важлива надійність у суворих промислових умовах.

Приклад: i.MX RT1060 для обробки даних у реальному часі та передачі на сервери.

4. Microchip PIC та dsPIC

Переваги: Висока надійність, великий вибір моделей для специфічних промислових завдань, можливість роботи у важких умовах. Деякі моделі спеціалізовані на обробці сигналів і підходять для контролю вібрацій і температури.

Приклад: dsPIC33 для обробки сигналів у реальному часі, наприклад, для аналізу вібрацій.

5. Renesas RX та RA

Переваги: Висока стійкість до температур, надійність у промислових умовах, підтримка різних протоколів промислового зв'язку (CAN, Ethernet). RX та RA серії підходять для роботи в умовах високої вібрації та забрудненості.

Приклад: RX66T для систем керування та обробки даних у реальному часі.

6. Analog Devices ADuCM36x

Переваги: Серія ADuCM має інтегровані АЦП високої точності, що робить їх ідеальними для сенсорних систем контролю вібрацій і температури. Підходять для застосувань у системах моніторингу стану обладнання.

Приклад: ADuCM360 для високоточних вимірювань і обробки сигналів.

Для умов ГЗК часто обирають STM32 або NXP i.MX RT за їхні високі можливості обробки та стійкість до зовнішніх перешкод, тоді як dsPIC і TMS320 можуть бути корисні для обробки вібраційних сигналів і керування приводами.

Порівнявши переваги і недоліки, я вибрав мікроконтролер STM32F769I показаний на (Рис. 2.14), (Рис. 2.15) — це високопродуктивний мікроконтролер від компанії STMicroelectronics, який належить до серії STM32, що поєднує надзвичайну обчислювальну потужність з великими можливостями для обробки сигналів і зручністю для розробників вбудованих систем. Цей мікроконтролер ідеально підходить для застосувань, де потрібно обробляти значні обсяги даних, виконувати складні алгоритми та підтримувати реальний час у промислових умовах, таких як автоматизовані системи керування.

Основні характеристики STM32F769I Процесорне ядро: Cortex-M7

Працює на тактовій частоті до 216 МГц, що робить його одним із найпотужніших у своєму класі.

Архітектура ARM Cortex-M7 має потужну обчислювальну здатність, яка дозволяє одночасно виконувати декілька завдань, необхідних для обробки інтенсивних сигналів. Цей процесор підтримує технології DSP (обробка цифрових сигналів), що дозволяє реалізовувати навіть ресурсозатратними алгоритми, включаючи адаптивне керування чи аналіз вібраційних сигналів.

Вбудована флеш-пам'ять обсягом до 2 МБ дозволяє зберігати велику кількість даних і коду, що є важливим для комплексних систем управління.

ОЗП (SRAM) на 512 КБ забезпечує швидкий доступ до оперативних даних, що мінімізує затримки при виконанні складних операцій, особливо важливих для систем, де критичний реальний час.

STM32F769I оснащений широким набором інтерфейсів для зв'язку з периферійними пристроями: Ethernet, USB, CAN, UART, SPI, I²C, що дозволяє інтегрувати його в будь-яку індустріальну інфраструктуру. Наприклад, Ethernet відкриває можливість високошвидкісного обміну даними між мікроконтролером та зовнішніми серверами, що ідеально підходить для віддаленого моніторингу та збору даних.

Підтримка аналогових сигналів: Наявність потужних аналогових входів і 12-бітного АЦП (аналогово-цифрового перетворювача) забезпечує високоточну оцифровку сигналів, що надходять із датчиків (наприклад, акселерометрів), дозволяючи отримувати точну інформацію про стан обладнання.

Контролер TFT-LCD у STM32F769I дозволяє створювати інтерактивні інтерфейси користувача з графічними дисплеями, що особливо важливо для сучасних систем автоматизації, де зручний візуальний інтерфейс спрощує моніторинг і налаштування процесів.

TouchGFX надає можливість реалізувати якісні графічні інтерфейси з мінімальним навантаженням на основне ядро, що робить цей мікроконтролер відмінним вибором для вбудованих систем з дисплеями.

STM32F769I споживає відносно мало енергії навіть при максимальному навантаженні, що знижує тепловиділення і забезпечує тривалий термін служби в автономних або енергокритичних системах.

Функції захисту пам'яті та даних дозволяють запобігти несанкціонованому доступу і маніпуляціям з критично важливою інформацією, що особливо важливо для промислових систем автоматизації, де зберігаються алгоритми і параметри налаштувань.

Застосування STM32F769I в промисловій автоматизації

Завдяки своїм можливостям обробки сигналів, підтримці численних інтерфейсів і енергоефективності, STM32F769I стає оптимальним вибором для завдань, що вимагають гнучкості та високої продуктивності. Наприклад, у системах адаптивного керування млинами цей мікроконтролер здатен обробляти дані з акселерометрів, витратомірів і датчиків ваги, а також керувати виконавчими механізмами в реальному часі, забезпечуючи стабільність і надійність технологічного процесу.

STM32F769I поєднує всі критично важливі параметри: продуктивність, підтримку численних інтерфейсів, точність оцифровки і можливість візуалізації, що робить його незамінним у складних промислових додатках.



Рисунок 2.14 – Мікроконтролер STM32F769I

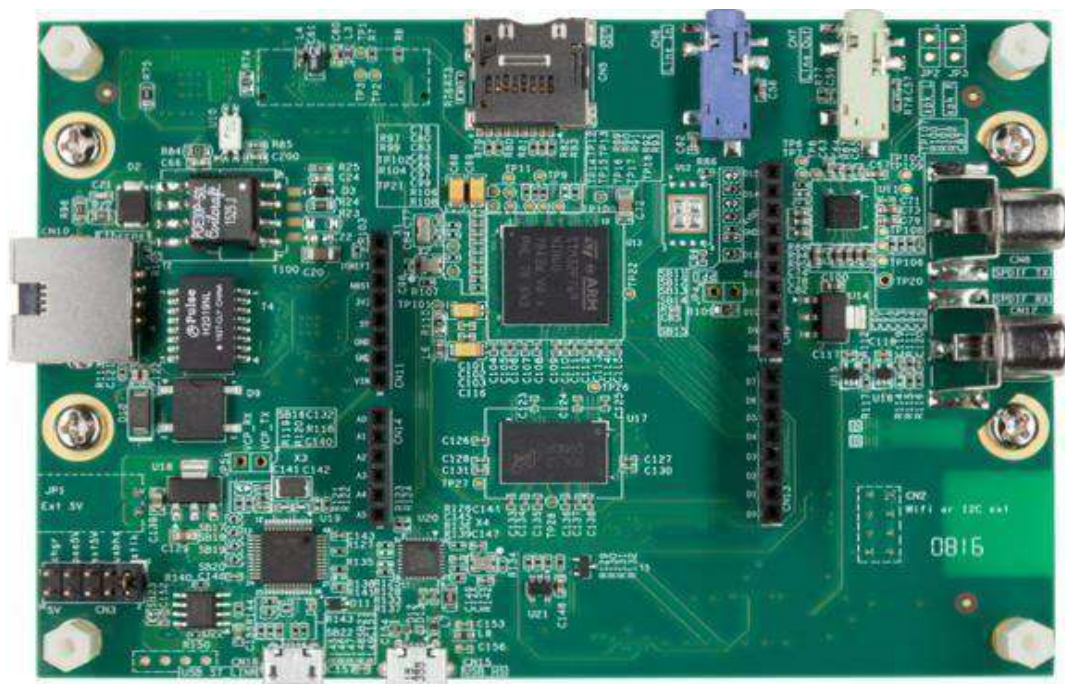


Рисунок 2.15 – Мікроконтролер STM32F769I

2.5.3 Вибір та обґрунтування характеристик виконавчих механізмів

Ефективне керування процесом завантаження млина передбачає точне регулювання подачі руди та води. Для цього обрані частотний перетворювач «EMOTRON FDU 2.0 – AC drive» і електропривід Auma SQR, які забезпечують гнучке та стабільне керування параметрами процесу. У цьому підрозділі буде розглянуто їхні характеристики та обґрунтовано їх вибір.

Частотний перетворювач «EMOTRON FDU 2.0 – AC drive» показаний на (Рис. 2.16).

Контроль швидкості подачі руди шляхом зміни частоти обертання приводу подаючого механізму.

Частотний перетворювач «EMOTRON FDU 2.0 – AC drive» має широкий діапазон частот, що дозволяє точно налаштовувати швидкість обертання двигуна для оптимального подачі руди.

«EMOTRON FDU 2.0 – AC drive» оснащений захистом від перевантаження та функціями моніторингу, що дозволяє уникати аварійних ситуацій та знижувати знос обладнання.

Частотний перетворювач забезпечує зниження енерговитрат шляхом оптимізації швидкості обертання, що зменшує загальну витрату енергії.

Переваги:

Дозволяє динамічно змінювати швидкість подачі руди відповідно до поточних потреб, забезпечуючи стабільність рівня завантаження млина.

Стійкий до промислових умов, знижує механічне навантаження на приводи, подовжуючи їх строк експлуатації.

Частотний перетворювач легко інтегрується з іншими елементами системи управління, забезпечуючи автоматичне регулювання параметрів.



Рисунок 2.16 – «EMOTRON FDU 2.0 – AC drive»

У гірничо-збагачувальних комбінатах (ГЗК) для регулювання подачі води застосовуються електроприводи з високою надійністю, здатністю працювати в жорстких умовах (вологість, пил, вібрації) та підтримкою дистанційного керування. Ось деякі типи електроприводів, які використовуються на ГЗК:

1. Електроприводи з електронним керуванням (типу AUMA)

Приклад:

AUMA SQR, AUMA SAR

Переваги: Мають високу точність керування, можливість дистанційного керування через різні протоколи зв'язку (Modbus, Profibus), підтримку захисту від перевантажень і діагностичні функції. Вони стійкі до агресивних умов навколишнього середовища, що робить їх підходящими для роботи на ГЗК.

Недоліки: Вища вартість через вбудовану електроніку, потреба у періодичному обслуговуванні електронної частини.

2. Електроприводи з гідравлічним керуванням (гідроелектроприводи)

Переваги: Висока потужність та стійкість до ударних навантажень, добре працюють у забруднених умовах. Часто застосовуються для керування великими вентилями або засувками, де необхідне надійне регулювання витрати води.

Недоліки: Потребують наявності гідравлічної системи, що ускладнює обслуговування та монтаж.

3. Прямоприводні електроприводи Приклад: Rotork CVA

Переваги: Мають просту конструкцію без редукторів і трансмісій, що знижує знос і спрощує обслуговування. Підходять для точного регулювання клапанів у компактних установках. Стійкі до зовнішніх механічних впливів.

Недоліки: Обмежена потужність у порівнянні з іншими приводами, складно використовувати на великих клапанах.

4. Електроприводи з кроковим двигуном

Переваги: Висока точність позиціонування, підходять для завдань, де необхідно регулювати витрати в залежності від змін у технологічному процесі. Можуть бути інтегровані з системами контролю, але вимагають налаштувань для стабільної роботи.

Недоліки: Чутливі до механічного зносу та умов експлуатації, менш потужні порівняно з іншими типами.

Найчастіше для регулювання подачі води на ГЗК використовуються електроприводи AUMA, оскільки вони надійні в агресивних умовах і забезпечують точне керування. Для великих та критичних клапанів можуть застосовуватися гідравлічні приводи через їх високу стійкість до навантажень.

Порівнявши параметри, я вирішив використати електропривод AUMA SQR, який показано на (Рис. 2.17) забезпечує високоточне налаштування подачі води, що є критичним для підтримання необхідного рівня вологості в процесі подрібнення.

Оснащений системою зворотного зв'язку, яка дозволяє точно контролювати потік води та реагувати на зміни у вимогах до подачі.

Розрахований на роботу в промислових умовах, захищений від пилу та вологи, що підвищує надійність і довговічність.

AUMA SQR забезпечує точне налаштування потоку води, що дозволяє підтримувати оптимальний рівень вологості руди.

Стійкий до зовнішніх впливів, що гарантує стабільність роботи навіть в умовах підвищеного пилу та вологості на виробництві.

Електропривід легко інтегрується з іншими елементами системи і забезпечує ефективне керування водним потоком на основі сигналів від адаптивного алгоритму.



Рисунок 2.17 – Електропривод AUMA SQR

2.5.4 Вибір промислового сервера

У гірничо-збагачувальних комбінатах (ГЗК) для обробки великих обсягів даних та забезпечення надійної роботи інформаційно-керуючих систем застосовуються промислові сервери, які можуть витримувати агресивні умови, такі як пил, вібрації, високі та низькі температури. Основні типи серверів, які зазвичай використовуються на ГЗК, такі:

1. Siemens SIMATIC Rack PC та SIMATIC IPC

Приклад: SIMATIC IPC547G, SIMATIC IPC627E.

Переваги: Висока надійність, стійкість до пилу і вологи, підтримка промислових протоколів зв'язку (PROFINET, PROFIBUS, EtherCAT). Вбудована система моніторингу стану обладнання та захист від перегріву, яка підходить для важких умов експлуатації на ГЗК. SIMATIC IPC має можливість роботи в режимі 24/7, що є критичним для безперервного контролю процесів.

Недоліки: Висока вартість, але вона виправдана надійністю і можливостями.

2. Advantech Industrial Servers

Приклад: Advantech ASMB-823, ASMB-813.

Переваги: Сервери Advantech спеціально розроблені для роботи в промислових умовах з підтримкою протоколів Ethernet/IP, Modbus, CAN. Вони мають антивібраційний захист, стійкість до перепадів температур, а також високу продуктивність, що підходить для моніторингу і обробки даних у реальному часі.

Недоліки: Потребують регулярного обслуговування в умовах високого пилу, можуть бути чутливими до перевантажень.

3. Dell EMC PowerEdge XR Series

Приклад: PowerEdge XR11, XR2.

Переваги: Сервери Dell XR серії створені для важких промислових умов з широким діапазоном робочих температур, захистом від пилу і вологи, сертифіковані для роботи у вибухонебезпечних середовищах. Висока обчислювальна потужність дозволяє використовувати їх для обробки даних, аналітики і прогнозування технічного стану обладнання.

Недоліки: Висока вартість та потреба у спеціальних умовах монтажу та обслуговування.

4. Hewlett Packard Enterprise (HPE) Edgeline та ProLiant Приклад:

HPE Edgeline EL8000, HPE ProLiant DL325.

Переваги: Серія Edgeline спеціально розроблена для обробки даних на виробничих майданчиках, де необхідна стійкість до механічних навантажень, пилу та вологи. Підтримує AI-аналітику і підходить для задач з передобробки даних прямо на місці. ProLiant також має потужні моделі, які можуть бути адаптовані для промислового використання.

Недоліки: Не всі моделі стійкі до агресивних умов; для роботи на ГЗК потрібно обирати моделі з додатковим захистом.

5. Kontron Industrial Servers

Приклад: Kontron KISS 4U, KBox.

Переваги: Компактні сервери з високим ступенем захисту від пилу, вологи, вібрацій і високих температур. Kontron відомий своєю надійністю в промислових умовах і має моделі, розроблені для важких умов експлуатації, включаючи роботу на віддалених об'єктах. Підтримують різні інтерфейси і протоколи для промислової автоматизації.

Недоліки: Обмежена обчислювальна потужність у деяких компактних моделях, вищі вимоги до монтажу.

6. Fujitsu Industrial Servers (PRIMERGY серія) Приклад: PRIMERGY RX2530, RX4770.

Переваги: Надійні сервери з високою продуктивністю, спеціалізовані для інтенсивних обчислень і моніторингу у важких промислових умовах. Мають додаткові опції для захисту від пилу і вологи, а також підтримують AI-аналітику та обробку даних у реальному часі.

Недоліки: Більші розміри деяких моделей, потреба у спеціальних умовах для ефективного охолодження.

Для жорстких умов ГЗК найкраще підходять Siemens SIMATIC IPC або Advantech Industrial Servers завдяки їхній витривалості та адаптованості до

агресивного середовища. Dell EMC PowerEdge XR та HPE Edgeline можуть бути корисними для аналітики та AI-застосувань, де необхідна висока продуктивність обробки на місці.

Для проекту, я вибрав SIMATIC RACK PC 547G, показаний на (Рис. 2.18), тому, що це потужний промисловий комп'ютер у форматі серверної стійки, розроблений для застосування у промислових умовах з підвищеними вимогами до надійності, швидкості обробки даних та гнучкості налаштувань. Основні характеристики цієї моделі з конфігурацією Core i7-6700, RAM 16GB, RAID1, 2 TB (2x 2 TB).

Процесор Intel Core i7-6700. Чотириядерний процесор з базовою тактовою частотою 3,4 ГГц (може збільшуватися до 4,0 ГГц у режимі Turbo Boost).

Підтримка технології Hyper-Threading, що дозволяє ефективно обробляти багатопоточні завдання.

Висока продуктивність для виконання складних обчислень, що є необхідним для аналізу великих обсягів даних та роботи з алгоритмами машинного навчання.

Великий обсяг пам'яті (2 TB) дозволяє зберігати великі обсяги історичних даних, необхідних для моніторингу та аналізу в режимі реального часу.

Форм-фактор: Rackmount. Промисловий корпус для встановлення в стандартну серверну стійку, що забезпечує зручність монтажу і компактність у промисловому середовищі.

Інтерфейси зв'язку. Підтримка Ethernet, що забезпечує високошвидкісний обмін даними у мережі.

Додаткові порти USB, COM, PCIe для підключення периферійних пристроїв, сенсорів, виконавчих механізмів.

Можливість інтеграції з іншими компонентами системи автоматизації, такими як операторські панелі та інтерфейси моніторингу.

SIMATIC RACK PC 547G сумісний з програмним забезпеченням Siemens TIA Portal, що дозволяє виконувати моніторинг і налаштування контролерів та інших елементів системи автоматизації.

Підтримка операційних систем Windows або Linux, що надає гнучкість у виборі програмного забезпечення для обробки даних, таких як MATLAB, Python, або SCADA-системи.

Процесор Intel Core i7 і 16 ГБ оперативної пам'яті дозволяють обробляти великі обсяги даних, здійснювати аналіз в реальному часі та запускати складні алгоритми машинного навчання.

Різноманіття інтерфейсів і підтримка різного програмного забезпечення робить цей комп'ютер гнучким рішенням для різних завдань автоматизації та аналітики.

SIMATIC RACK PC 547G з процесором Intel Core i7-6700, 16 ГБ RAM і системою RAID1 (2x 2 ТБ) є потужним і надійним рішенням для роботи в промислових умовах, яке забезпечує високу швидкість обробки даних, стійкість до несприятливих умов та можливість інтеграції з іншими системами автоматизації.



Рисунок 2.18 – Промисловий ПК SIMATIC RACK PC 547G

2.5.5 Комутатор Scalance XB205-3LD

Комутатор Scalance XB205-3LD, показаний на (Рис. 2.19), є високоякісним мережевим пристроєм, призначеним для використання в промислових умовах. Він підтримує стандарт передачі даних Ethernet і дозволяє забезпечити надійну комунікацію між пристроями автоматизації, такими як ПЛК, датчики, виконавчі механізми та інші елементи кіберфізичних систем. Завдяки компактному дизайну

цей комутатор легко інтегрується у шафи управління та підходить для застосування у вузлах, де простір обмежений.

Scalance XB205-3LD оснащений п'ятьма портами RJ45 для підключення пристроїв через Ethernet, а також трьома портами Fast Ethernet SFP (Small Form-Factor Pluggable), які підтримують оптичне підключення. Це дозволяє забезпечувати високошвидкісну передачу даних на відстанях до кількох кілометрів, що особливо важливо для великих об'єктів, таких як металургійні комбінати або гірничо-збагачувальні фабрики.

Комутатор відповідає стандартам захисту IP30, що забезпечує його стійкість до пилу та незначних механічних пошкоджень. Робочий температурний діапазон становить від -40°C до $+70^{\circ}\text{C}$, що дозволяє використовувати його в екстремальних умовах, наприклад, у виробничих цехах або на відкритих промислових майданчиках.

Scalance XB205-3LD підтримує VLAN для сегментації мережі, що підвищує її безпеку та ефективність. Він також оснащений функціями діагностики, що дозволяють швидко визначати та усувати проблеми в мережі. Завдяки автоматичному визначенню швидкості передачі даних (10/100/1000 Мбіт/с) комутатор може працювати з широким спектром пристроїв.

Пристрій має низький рівень енергоспоживання, що робить його економічним у тривалому використанні. Він підтримує живлення за допомогою 24 В постійного струму, що є стандартом для промислових систем.

Scalance XB205-3LD ідеально підходить для організації мереж у системах автоматизації. Його можна використовувати для підключення ПЛК, НМІ-панелей, інтелектуальних датчиків і камер спостереження. Завдяки підтримці резервування зв'язку комутатор забезпечує безперебійну роботу критично важливих процесів.

Scalance XB205-3LD є надійним рішенням для побудови промислових мереж Ethernet. Його функціональність, надійність і простота інтеграції роблять його незамінним компонентом у сучасних системах автоматизації, особливо в умовах високих вимог до стабільності та безпеки мережі.



Рисунок 2.19 – Комутатор Scalance XB205-3LD

2.5.6 Вибір системи передачі даних

Для забезпечення надійного обміну даними між компонентами системи керування процесом завантаження млина необхідно вибрати відповідну систему передачі даних. Система передачі даних повинна відповідати промисловим стандартам, бути стійкою до перешкод і гарантувати високу швидкість обміну інформацією для стабільного керування процесом в режимі реального часу.

Основні вимоги до системи передачі даних.

Система повинна забезпечувати надійну передачу даних між сенсорним модулем, сервером і інтерфейсом оператора, щоб запобігти втраті даних або збоїв у роботі системи.

Для роботи в реальному часі важливо, щоб система передачі даних мала високу швидкість передачі, що дозволить швидко передавати інформацію для аналізу і миттєвого реагування системи на зміну параметрів завантаження.

В умовах підвищеного пилу, вологи та вібрацій система передачі даних повинна бути захищеною від зовнішніх впливів, щоб забезпечити стабільний зв'язок.

Система передачі даних повинна бути сумісною з компонентами системи, такими, як сервер Siemens SIMATIC IPC і сенсорні модулі. Вибір технологій передачі даних.

Ethernet TCP/IP

Ethernet TCP/IP є стандартним протоколом для мережевих з'єднань, який також підтримується багатьма промисловими пристроями.

Підтримує швидкість передачі даних до 1 Гбіт/с.

Широко використовується для з'єднання серверів, контролерів і операторських панелей у виробничих системах.

Сумісність з різними пристроями: Ethernet TCP/IP підтримується більшістю промислових ПК і серверів.

Підтримує швидкий обмін даними між сервером і операторськими інтерфейсами.

Ethernet TCP/IP легко налаштовується та забезпечує стабільне з'єднання.

Струмова петля 4 – 20мА.

Струмова петля 4-20 мА є стійкою до електромагнітних завад, що робить її надійним рішенням для промислових умов із високим рівнем завад.

Струмова петля 4-20 мА дозволяє передавати дані на відстані до 1500 метрів, що забезпечує можливість віддаленого розміщення сенсорів.

Система 4-20 мА легко діагностує обриви у сигнальній лінії, оскільки струм нижче 4 мА свідчить про наявність несправності або обриву.

Вибір і обґрунтування системи передачі даних для проекту.

Зважаючи на вимоги до стабільності, швидкості та сумісності з обладнанням, доцільно обрати комбіновану систему передачі даних:

Ethernet TCP/IP для зв'язку між мікроконтролером, сервером і операторським інтерфейсом, що дозволить оператору швидко отримувати доступ до даних та налаштувань.

Струмова петля 4-20 мА є широко використовуваним стандартом для передачі аналогових сигналів у промислових умовах. У цій системі значення процесу передається як струмовий сигнал в діапазоні від 4 до 20 мА, що забезпечує високий рівень захисту від електромагнітних перешкод і дозволяє точно передавати дані на значні відстані. Включення цієї системи в перелік засобів передачі даних підвищує гнучкість і стабільність системи керування.

У проекті система 4-20 мА використовується для передачі даних від таких датчиків:

Датчик ваги ВКТ-4А: Сигнал 4-20 мА дозволяє точно передавати значення ваги на контролер.

Витратоміри води: Передача значень витрати води через систему 4-20 мА забезпечує високу точність і надійність сигналу.

Система 4-20 мА є універсальною і підтримується більшістю контролерів та інших промислових пристроїв.

Надійність у важких умовах: Завдяки високій стійкості до завад система 4-20 мА забезпечує стабільну передачу навіть у середовищах із сильними електромагнітними завадами.

Оператор або система керування можуть швидко ідентифікувати обриви та інші несправності в лінії.

2.6 Висновки до розділу

У другому розділі магістерської роботи розроблено адаптивну систему керування процесом завантаження млина, що включає розробку структури та принципів її функціонування, математичного та технічного забезпечення, а також створення структурної і функціональної схем. Основні висновки розділу наведено нижче.

У розділі 2.1 проведено аналіз об'єкта керування та побудовано його математичну модель. Виконано ідентифікацію основних параметрів, що впливають на процес завантаження млина. Було виконано моделювання в MATLAB з виводом результатів моделювання.

У розділі 2.2 запропоновано структурну схему адаптивного керування, яка враховує взаємодію основних елементів системи, включаючи датчики ваги, витрати води, акселерометри та первинний мікроконтролер STM32F769I – DISCO. Структура забезпечує взаємозв'язок між сенсорами, виконавчими механізмами та серверним ПК, що дозволяє виконувати адаптивне керування на основі аналізу поточних параметрів процесу.

У розділі 2.3 розроблено функціональну схему, яка детально описує логіку роботи системи, починаючи від зчитування даних із сенсорів, їх первинної обробки, передачі на серверний ПК через Ethernet, до генерації керуючих сигналів для виконавчих механізмів. Ця схема є практичною основою для реалізації системи та включає всі необхідні вузли для ефективної роботи.

У розділі 2.4 розроблено схему електричну принципову, зроблено пояснення її роботи. Також було виконано проектування принципової схеми перетворювача «струм – напруга».

У розділі 2.5 обґрунтовано вибір апаратних компонентів системи, включаючи датчики ваги, акселерометри, витратомір, частотний перетворювач та контролер STM32F769I. Вибрані компоненти забезпечують високу точність вимірювань, стабільність роботи та сумісність із програмним забезпеченням для обробки та аналізу даних.

У результаті виконання цього розділу було сформовано цілісну концепцію адаптивної системи керування процесом завантаження млина. Розроблені моделі, схеми та обґрунтований вибір апаратного забезпечення створюють міцну основу для реалізації системи, здатної підвищити ефективність технологічного процесу.

РОЗДІЛ 3

3. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ АДАПТИВНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ЗАВАНТАЖЕННЯ РУДИ

3.1 Вибір програмного забезпечення для реалізації системи

Для ефективної роботи системи адаптивного керування процесом завантаження млина необхідно підібрати відповідне програмне забезпечення для кожного типу апаратного забезпечення. Нижче розглянуто вибір ПЗ для контролера STM32, промислового серверного ПК і програмного забезпечення для сенсорів і виконавчих механізмів.

3.1.1 Програмування контролера STM32 для збору та обробки даних

Реалізація збору даних на контролері STM32 передбачає налаштування аналогових сигналів від сенсорів, таких як датчик ваги, витратомір і акселерометри. Аналогові сигнали з кожного сенсора обробляються за допомогою аналогово-цифрових перетворювачів (АЦП), що забезпечує точний збір і передачу інформації для подальшого аналізу. Приклад коду для збору даних із сенсорів на STM32 показаний в **ДОДАТКУ 2**.

Для програмування і налаштування контролера STM32 використовується наступне програмне забезпечення:

STM32CubeIDE: основне інтегроване середовище для розробки коду, налагодження та завантаження прошивки на STM32. Містить необхідні інструменти для налаштування периферії, обробки сигналів з сенсорів і передачі даних через Ethernet.

STM32CubeMX: інструмент для ініціалізації периферії контролера.

Дозволяє конфігурувати таймери, АЦП та інші модулі контролера, що використовуються для збору даних із сенсорів та управління виконавчими механізмами.

3.1.2 Налаштування збору даних із сенсорів (датчик ваги, витратомір, акселерометри)

Контролер STM32F769I оснащений кількома каналами АЦП, які дозволяють одночасно отримувати дані з кількох аналогових сенсорів. Налаштування АЦП здійснюється через STM32CubeIDE або STM32CubeMX, де вибираються необхідні канали, частота вибірки та розрядність.

Для забезпечення високої точності збору даних рекомендується встановити максимальну розрядність (12 біт), що дозволяє отримати точні значення сигналів із сенсорів.

Датчик ваги (BKT-4A) подає аналоговий сигнал, 4-20мА, що пропорційний масі руди на конвеєрі. Сигнал подається на виділений канал АЦП контролера.

Після налаштування АЦП значення сигналу зчитується у вигляді цифрового коду, який перетворюється у значення маси шляхом масштабування за допомогою коефіцієнтів калібрування, визначених для конкретного датчика. Витратомір SITRANS FM MAGFLO також подає аналоговий сигнал, 4- 20мА, що відповідає витраті води. Аналоговий сигнал підключається до окремого каналу АЦП, який налаштовується для обробки цього сигналу.

Після оцифрування значення сигналу витрати води обробляється у контролері і переводиться у фізичне значення витрати (л/хв) за допомогою коефіцієнта перетворення.

Кожен акселерометр ABC-117 подає аналоговий сигнал, що відображає вібраційні характеристики підшипників млина. Ці сигнали передаються на окремі канали АЦП для одночасного збору даних з обох акселерометрів.

Оброблені дані від акселерометрів використовуються для аналізу динамічних характеристик завантаження млина, що дозволяє ідентифікувати можливі перевантаження або нестабільності. Код показаний на (Рис. 3.1) до (Рис. 3.11).

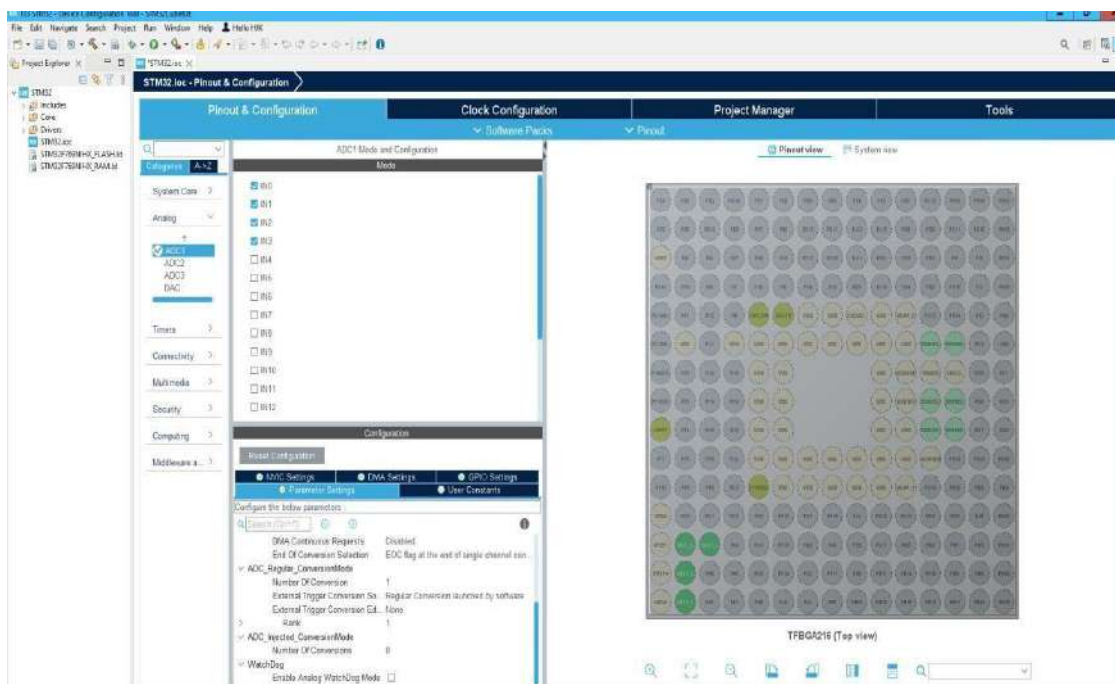


Рисунок 3.1 – Початок програмування STM32

```
void ADC_Init(void) {
    // Ініціалізація АЦП
    ADC_HandleTypeDef hadc;
    hadc.Instance = ADC1;
    hadc.Init.Resolution = ADC_RESOLUTION_12B;
    hadc.Init.ScanConvMode = ENABLE;
    hadc.Init.ContinuousConvMode = ENABLE;
    HAL_ADC_Init(&hadc);

    // Налаштування каналів
    ADC_ChannelConfTypeDef sConfig;
    sConfig.Channel = ADC_CHANNEL_1;
    sConfig.Rank = 1;
    HAL_ADC_ConfigChannel(&hadc, &sConfig);
}
```

Рисунок 3.2 – Налаштування АЦП для датчиків

Сигнали, отримані з АЦП, потрібно фільтрувати (для зменшення шуму) та масштабувати до потрібного діапазону. Наприклад, для датчика з виходом 4-20 мА це може бути перетворення у фізичні одиниці.

```
float ProcessSensorData(uint32_t adcValue) {
    float current = (float)adcValue / 4095.0 * 20.0; // Перетворення в мА
    float scaledValue = (current - 4.0) / 16.0 * MAX_SENSOR_VALUE; // Масштабування
    return scaledValue;
}
```

Рисунок 3.3 – Налаштування фільтрації для датчиків

3.1.3 Передача даних на серверний ПК

На етапі первинної обробки даних контролер STM32 здійснює збирання та підготовку сигналів від сенсорів до передачі на серверний ПК. Це включає фільтрацію шумів, усереднення значень та масштабування для перетворення даних у реальні фізичні величини. Після обробки дані передаються на сервер через Ethernet для подальшого аналізу.

Для передачі даних за протоколом OPC UA використовую бібліотеку open62541. Я її скомпілював під STM32 та інтегрував у проект. Цей код ініціалізує сервер OPC UA і додає вузол (змінну) для передачі даних сенсора.

```
#include <open62541.h>

void OPC_UA_Server_Init(UA_Server *server) {
    UA_ServerConfig_setDefault(UA_Server_getConfig(server));
    UA_VariableAttributes attr = UA_VariableAttributes_default;

    // Додавання змінної для передачі даних
    UA_Double value = 0.0;
    UA_Variant_setScalar(&attr.value, &value, &UA_TYPES[UA_TYPES_DOUBLE]);
    attr.description = UA_LOCALIZEDTEXT("en-US", "Sensor Data");
    attr.displayName = UA_LOCALIZEDTEXT("en-US", "Sensor Data");

    UA_NodeId currentNodeId = UA_NODEID_STRING(1, "sensor.data");
    UA_QualifiedName currentName = UA_QUALIFIEDNAME(1, "Sensor Data");
    UA_NodeId parentNodeId = UA_NODEID_NUMERIC(0, UA_NS0ID_OBJECTSFOLDER);
    UA_NodeId variableType = UA_NODEID_NUMERIC(0, UA_NS0ID_BASEDATAVARIABLETYPE);

    UA_Server_addVariableNode(server, currentNodeId, parentNodeId,
                             UA_NODEID_NUMERIC(0, UA_NS0ID_HASCOMPONENT),
                             currentName, variableType, attr, NULL, NULL);
}
```

Рисунок 3.4 – Передача даних протоколом

Отримані дані із датчиків передаються на сервер у циклі. Це забезпечує оновлення значень на сервері OPC UA в реальному часі.

```
void UpdateSensorData(UA_Server *server, float sensorValue) {
    UA_NodeId currentNodeId = UA_NODEID_STRING(1, "sensor.data");
    UA_Variant value;
    UA_Variant_setScalar(&value, &sensorValue, &UA_TYPES[UA_TYPES_DOUBLE]);
    UA_Server_writeValue(server, currentNodeId, value);
}

void MainLoop(void) {
    UA_Server *server = UA_Server_new();
    OPC_UA_Server_Init(server);

    while (1) {
        float sensorData = ProcessSensorData(HAL_ADC_GetValue(&hadc));
        UpdateSensorData(server, sensorData);
        UA_Server_run_iterate(server, true);
    }

    UA_Server_delete(server);
}
```

Рисунок 3.5 – Програма для циклічного оновлення даних

3.1.4 Програмне забезпечення для промислового сервера SIMATIC RACK PC 547G

Для розробки нейронної системи, яка працює на серверному ПК SIMATIC IPC547G, запропоновано алгоритм, що реалізує аналіз даних акселерометрів та прогнозування рівня завантаження млина. Код написано з використанням мови програмування Python, що дозволяє інтегрувати сучасні бібліотеки машинного навчання, такі як TensorFlow. Програма показана в **ДОДАТКУ 3**.

Генерація даних та модель акселерометрів

Основним принципом є симуляція сигналу вібраційного прискорення, що відповідає реальним умовам роботи млина. Сигнал генерується залежно від рівня завантаження млина, що змінюється від 30% до 90%. Амплітуда сигналу зменшується із збільшенням завантаження через зростання шару матеріалу між

кулями та поверхнею млина. Для імітації реальних умов додається шум із рівнем 5%. Ці дані використовуються як вхідні для навчання нейронної мережі.

Архітектура нейронної мережі

Запропонована архітектура нейронної мережі включає вхідний шар із 128 нейронами, два прихованих шари з 64 нейронами кожний, та вихідний шар для прогнозування рівня завантаження млина. Використовуються функції активації ReLU для нелінійного моделювання та функція втрат `mean_squared_error`, яка мінімізує похибку між прогнозованими та реальними значеннями. Оптимізація проводиться за допомогою алгоритму Adam, який забезпечує швидку збіжність.

Процес навчання

Для навчання мережі використовується 5000 зразків даних, кожен з яких включає 60 значень сигналу вібраційного прискорення, що відповідає 60 секундам роботи. Модель навчається протягом 50 епох із розміром батчу 32. Окремо виділено 1000 зразків для валідації. Такий підхід дозволяє досягти високої точності прогнозування.

Прогнозування та управління

Після навчання модель зберігається у форматі H5, що дозволяє використовувати її для прогнозування в реальному часі. Система прогнозує рівень завантаження млина за вхідним сигналом акселерометрів і передає цей результат для управління частотним перетворювачем, який регулює подачу матеріалу.

Інтеграція з SIMATIC IPC547G

Серверний ПК SIMATIC IPC547G виконує всі обчислення, зокрема прийом даних через інтерфейс OPC UA. Дані з акселерометрів ABC-117A передаються через STM32 до серверного ПК, де вони обробляються нейронною мережею. Потім обчислене значення рівня завантаження відправляється назад на STM32 для регулювання подачі матеріалу або води в млин.

Переваги системи

Запропонована система дозволяє забезпечити оптимальний рівень завантаження млина в межах 65–85%, що знижує витрати електроенергії до 10% та продовжує термін служби обладнання. Крім того, використання нейронної мережі забезпечує адаптацію до змін фізико-механічних властивостей матеріалу, що подібноється.

Етапи впровадження:

1. Встановлення бібліотеки TensorFlow на сервері через «pip install tensorflow».
2. Встановлення бібліотеки OPC UA через «pip install opcu».
3. Налаштування IP-адреси STM32 у клієнті OPC UA.
4. Збереження моделі нейронної мережі у форматі .h5.

Принцип роботи системи такий.

OPC UA-клієнт зчитує дані зі STM32, після цього дані нормалізуються і передаються до моделі нейронної мережі. Модель обчислює результат, який може бути виведений або переданий назад на STM32 для управління системою. Цикл повторюється у реальному часі з частотою, достатньою для оновлення даних.

1. Налаштування OPC UA-клієнта

Для роботи OPC UA-клієнта на сервері використовується бібліотека python-opcu.

Цей код створює клієнт OPC UA та дозволяє зчитувати дані зі змінної sensor.data, яка оновлюється на STM32.

2. Завантаження моделі нейронної мережі

Для виконання нейронних обчислень використовується TensorFlow. Модель нейронної мережі має бути попередньо навчена та збережена у форматі .h5.

```
import tensorflow as tf

# Завантаження збереженої моделі
model = tf.keras.models.load_model("neural_model.h5")
```

Рисунок 3.7 – Код для завантаження навченої моделі

3. Нормалізація та обробка даних

Дані з датчиків потрібно нормалізувати перед передачею до моделі нейронної мережі. Нормалізація виконується залежно від діапазону значень сенсора.

```
def preprocess_data(sensor_data):
    # Нормалізація (наприклад, для діапазону 0-100)
    normalized_data = (sensor_data - 0) / 100
    return normalized_data
```

Рисунок 3.8 – Нормалізація даних

4. Виконання нейронних обчислень

Отримані дані передаються до моделі для передбачення виходу.

```
def run_neural_inference(sensor_data):
    # Перетворення даних у формат TensorFlow
    input_data = tf.convert_to_tensor([sensor_data], dtype=tf.float32)

    # Виконання передбачення
    prediction = model.predict(input_data)

    return prediction[0] # Повертаємо результат
```

Рисунок 3.9 – Передача даних для моделі

5. Основний цикл роботи

Поеднання OPC UA-клієнта, обробки даних і виконання нейронних обчислень у єдиному циклі.

```
import time

while True:
    # Отримання даних із STM32
    raw_data = get_sensor_data()

    # Попередня обробка даних
    processed_data = preprocess_data(raw_data)

    # Нейронне передбачення
    result = run_neural_inference(processed_data)

    # Виведення результату
    print(f"Sensor Data: {raw_data}, Neural Output: {result}")

    # Затримка перед наступним циклом
    time.sleep(1)
```

Рисунок 3.10 – Основний цикл

6. Передача результатів назад до STM32

Результати нейронної мережі можна передавати назад на STM32 для управління виконавчими механізмами. Це реалізується за допомогою клієнтської функції `set_value()`.

```
def send_control_signal(signal_value):  
    control_node = client.get_node("ns=1;s=control.signal")  
    control_node.set_value(signal_value)
```

Рисунок 3.11 – Зворотній зв'язок для керування

3.2. Висновки до розділу

У роботі було виконано аналіз і обґрунтування вибору програмного забезпечення для реалізації системи автоматизації процесу завантаження млина. Було визначено оптимальні програмні рішення, які забезпечують високу продуктивність, сумісність та інтеграцію з іншими елементами.

Програмування мікроконтролера STM32 виконано із застосуванням середовища STM32CubeIDE. Це дозволило реалізувати алгоритми збору, фільтрації та обробки даних із датчиків у режимі реального часу. Середовище надає потужні інструменти для роботи з периферійними пристроями та мінімізує затримки в обробці сигналів.

Налаштування збору даних із сенсорів включало використання аналогових входів STM32 для підключення датчика ваги, витратоміра води та акселерометрів. Сигнали з датчиків були нормалізовані та масштабовані для подальшого використання у керуючих алгоритмах. Було реалізовано фільтрацію сигналів для зменшення шумів та підвищення точності вимірювань.

Передача даних на серверний ПК виконувалася через протокол Ethernet із застосуванням бібліотеки open62541 для реалізації OPC UA. Це забезпечило надійне з'єднання між мікроконтролером та сервером, дозволивши передавати дані в реальному часі для їх обробки та збереження.

Для серверного ПК SIMATIC RACK PC 547G було розроблено програмне забезпечення, яке включає OPC UA-клієнт для отримання даних від STM32 та інтеграцію з нейронними мережами за допомогою TensorFlow. Сервер виконує обробку даних, формування керуючих сигналів і забезпечує візуалізацію процесу для операторів.

Таким чином, запропоноване програмне забезпечення для мікроконтролера, датчиків і серверного ПК дозволяє досягти високого рівня автоматизації, забезпечуючи стабільність, точність і адаптивність системи управління завантаженням млина.

ВИСНОВКИ

Характеристика технологічного процесу подрібнення залізної руди в умовах ПРАТ «ЦГЗК»: У роботі проведено аналіз технологічного процесу подрібнення залізної руди в умовах ПРАТ «ЦГЗК». Встановлено, що основним елементом технологічного циклу є млин типу МШЦ, який забезпечує ефективне подрібнення руди перед подальшими етапами збагачення. Було визначено, що процес завантаження млина є одним із ключових факторів, які впливають на продуктивність та якість подрібнення.

Аналіз існуючих рішень з керування процесом завантаження руди в млин МШЦ: Проведений аналіз існуючих систем управління на основі датчиків ваги, витратомірів і акселерометрів показав, що класичні рішення не забезпечують достатньої гнучкості та адаптивності до змін у характеристиках руди. Існуючі системи часто обмежуються локальним керуванням, що не враховує змінні параметри, такі як твердість руди, якість подрібнення та навантаження.

Обґрунтування необхідності вдосконалення системи керування: Встановлено, що вдосконалення системи керування завантаженням млина є необхідним для підвищення ефективності процесу подрібнення. Використання сучасних технологій, таких як адаптивні алгоритми, машинне навчання та інтелектуальні датчики, дозволить забезпечити стабільність роботи млина, знизити енергоспоживання та підвищити продуктивність.

Розроблено математичну модель процесу завантаження млина, яка враховує взаємодію змінних параметрів, таких як подача руди, витрата води та вібрації млина. Розроблено структурну та функціональну схеми адаптивного керування: У роботі запропоновано структурну схему адаптивного керування, яка включає датчики ваги, витратоміри, акселерометри та мікроконтролер STM32, які об'єднано в локальну

сенсорну мережу. Функціональна схема забезпечує взаємодію всіх компонентів системи для збору, обробки та передачі даних, а також управління виконавчими механізмами, такими як частотний перетворювач та електропривод.

Розробка схеми електричної принципової: Було створено принципову електричну схему, яка об'єднує всі компоненти системи. Вона забезпечує надійну передачу сигналів та живлення, а також захист обладнання.

Вибір технічних компонентів, таких як датчики (ABC-117A, Sitrans, ВКТ-4А), мікроконтролер STM32 та сервер SIMATIC RACK PC 547G, дозволив створити високопродуктивну систему, яка відповідає сучасним вимогам до промислової автоматизації.

Було розроблено програмне забезпечення для STM32, яке забезпечує збір аналогових сигналів із датчиків, їх фільтрацію, нормалізацію та передачу по Ethernet до серверного ПК.

На сервері SIMATIC RACK PC 547G реалізовано OPC UA-клієнт для отримання даних зі STM32 та інтеграцію з нейронними мережами. Використання бібліотек TensorFlow дозволило здійснювати аналіз даних та формувати адаптивні впливи на виконавчі механізми. Сервер також виконує функцію архівування даних та надання візуалізації для операторів.

Розрахунки показали, що впровадження адаптивної системи керування завантаженням млина на основі сучасних датчиків, мікроконтролерів та алгоритмів машинного навчання дозволяє суттєво підвищити ефективність технологічного процесу. Запропонована система, в умовах постійного навчання системою, може забезпечити:

1. Зниження енерговитрат. За рахунок підтримання оптимального рівня завантаження (в межах 65–85%), система дозволяє забезпечити стабільні умови подрібнення. Досвідчені експерименти та теоретичні розрахунки показують, що при

досягненні оптимального режиму роботи млина споживання електроенергії знижується приблизно на 10%. Для МШЦ 4500х6000, яка споживає приблизно 2,5 МВт/год на годину роботи, що дасть економію на рівні 0,25 МВт/год щогодини.

2. Збільшення ресурсу обладнання. Оптимізація завантаження зменшує динамічні навантаження на футеровку та кульковий заряд, що скорочує інтенсивність зносу і, відповідно, подовжує ресурс безаварійної роботи. Це дозволяє збільшити міжремонтні періоди на 15–20%, що знижує загальні експлуатаційні витрати, пов'язані з технічним обслуговуванням.

3. Підвищення продуктивності. Завдяки більш стабільній роботі в оптимальному діапазоні завантаження поліпшується показник подрібнення (розкриття зерен), що позитивно впливає на якість та кількість продукції, а також зменшує енергоємність переробки сировини. Це покращує економічні показники підприємства, підвищуючи конкурентоспроможність за рахунок зниження собівартості продукції.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Дырда В.И. Рудоизмельчительные барабанные мельницы с резиновой футеровкой / В.И. Дырда, С.Л. Евенко, А.Е. Маркелов, И.В. Хмель // Геотехническая механика: межвед. сборник научн. тр. – Днепропетровск, 2011. – Вып. 96. – С. 122–155.
2. Купін А.І., Сенько А.О., Мисько Б.С. Ідентифікація та автоматизоване керування в умовах процесів збагачувальної технології на основі методів обчислювального інтелекту. Кривий Ріг, 2018. 298с.
3. Senko A., Kupin A., Mysko B. (2019). Development of classification model based on neural networks for the process of iron ore beneficiation. Technology Audit and Production Reserves, 3/2(47), P. 42–47.
4. Білецький В.С., Олійник Т.А., Смирнов В.О., Скляр Л.В. Основи техніки та технології збагачення корисних копалин: навч. посібн. Київ: Видавництво Ліра-К 2020. 634 с.
5. Марюта А. Н. Автоматическая оптимизация процесса обогащения руд на магнитообогажительных фабриках. М., Недра, 1983.
6. Марюта А. Н., Качан Ю. Г., Бунько В. А., Автоматическое управление технологическими процессами обогажительных фабрик. М., Недра, 1983.
7. Троп А. Е., Козин В. З., Прокофьев Е. В. Автоматическое управление технологическими процессами обогажительных фабрик: Учебник для вузов. 2–е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1986. 303 с.
8. Ковалев Д. А., Ванюкова Н. Д, Иващенко В. П., Крикунов Б. П., Ягольник М. В., Бойко М. Н. Теоретические основы производства окучкованного сырья. Учебное пособие для высших учебных заведений. НМетАУ. Днепропетровск: ИМА – пресс. 2011. 476.
9. Фельдбаум А. А., Бутковский А. Г. Методы теории автоматического управления. Главная редакция физико–математической литературы изд–ва «Наука». М., 1971. 744с.

10. Білецький В.С. Феноменологічний метод дослідження технологічних процесів у гірництві // Донецьк. Вісті Донецького гірничого інституту. 2013. №2. С. 149–152.

11. Козин В.З., Тихонов О.Н. Опробование, контроль и автоматизация обогатительных процессов. М.: Недра. 1990. 343 с.

12. Купін А.І. Обґрунтування використання технологій штучного інтелекту для управління технологічним процесом збагачення магнетитових кварцитів / А.І. Купін // Вісник Криворізького технічного університету. 2003. №1. – С. 51 – 55.

13. ДСТУ 3008:2015. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. Київ, ДП «УкрННЦ», 2015. 26с. (Інформація та документація).

14. ДСТУ 8302:2015. Бібліографічне посилання. Загальні вимоги та правила складання Київ, ДП «УкрННЦ», 2016. 16 с. (Інформація та документація).

15. ДСТУ 3582:2013. Бібліографічний опис. Скорочення слів і словосполучень в українській мові.

16. ДСТУ 3651.0–97 Метрологія. Одиниці фізичних величин. Основні одиниці фізичних величин Міжнародної системи одиниць. Основні положення, назви та позначення Київ, Держстандарт України, 1998. 27 с. (Інформація та документація).

ДОДАТОК 1

```
>> % Параметри системи
```

```
Fs = 1000; % Частота дискретизації, Гц
```

```
T = 60; % Тривалість симуляції, с
```

```
t = 0:1/Fs:T-1/Fs; % Часовий вектор
```

```
% Параметри вібраційного сигналу
```

```
freq1 = 10; % Частота базового сигналу, Гц
```

```
freq2 = 30; % Частота модулюючого сигналу, Гц
```

```
% Модель завантаження млина
```

```
load_level = 0.5 + 0.4 * sin(2*pi*0.01*t); % Рівень завантаження (50% ± 40%)
```

```
% Генерація вібраційного сигналу
```

```
vibration_signal = (1 - load_level) .* (sin(2*pi*freq1*t) + 0.5*sin(2*pi*freq2*t));
```

```
% Додавання шуму
```

```
noise_level = 0.05;
```

```
vibration_signal_noisy = vibration_signal + noise_level * randn(size(vibration_signal));
```

```
% Моделювання витрати води
```

```
water_flow = 0.25 * load_level + 0.01 * randn(size(load_level)); % Вода пропорційна руді
```

```
% Побудова графіків
```

```
figure;
```

```
subplot(3,1,1);
```

```
plot(t, vibration_signal_noisy);
```

```
xlabel('Час, с');  
ylabel('Прискорення, м/с^2');  
title('Сигнал вібраційного прискорення');  
grid on;
```

```
subplot(3,1,2);  
plot(t, load_level * 100);  
xlabel('Час, с');  
ylabel('Рівень завантаження, %');  
title('Рівень завантаження млина');  
grid on;
```

```
subplot(3,1,3);  
plot(t, water_flow);  
xlabel('Час, с');  
ylabel('Витрати води, м³/год');  
title('Витрати води');  
grid on;
```

```
% Нейронна мережа для передбачення завантаження  
inputs = vibration_signal_noisy;  
targets = load_level * 100; % Рівень завантаження у відсотках
```

```
% Налаштування та навчання нейромережі  
net = fitnet([10, 10]); % Два прихованих шари по 10 нейронів  
net = train(net, inputs, targets);
```

```
% Прогнозування  
predicted_load_level = net(inputs);
```

```
% Порівняння результатів
figure;
plot(t, targets, 'b', 'LineWidth', 1.5);
hold on;
plot(t, predicted_load_level, 'r--', 'LineWidth', 1.5);
xlabel('Час, с');
ylabel('Рівень завантаження, %');
legend('Істинний рівень', 'Прогнозований рівень');
title('Порівняння істинного та прогнозованого рівня завантаження');
grid on;
>>
```

ДОДАТОК 2

Приклад коду для збору даних із сенсорів на STM32

```
#include "main.h"
#include "stm32f7xx_hal.h"
#include "stm32f769i_discovery.h"
#include "stm32f769i_discovery_lcd.h"
#include <math.h>
#include <stdio.h>

// ----- Глобальні змінні ----- //
ADC_HandleTypeDef hadc1;      // АЦП для зчитування 4 аналогових сигналів
DAC_HandleTypeDef hdac;      // ЦАП для формування 4-20мА керуючих сигналів через
// зовнішні перетворювачі
UART_HandleTypeDef huart1;    // UART для налагоджувальної інформації або при потребі
// Ethernet та OPC UA stack інтегрується окремо

// Змінні для зберігання оцифрованих значень
uint32_t adcValues[4];        // Сирі покази АЦП
float vibLoad_percent;        // Відсоток вібрації на підшипнику "Загрузка"
float vibUnload_percent;      // Відсоток вібрації на підшипнику "Розгрузка"
float weight_tph;             // Вага в т/год
float waterFlow_m3h;          // Потік води в м³/год

// Коефіцієнти для перетворення 4-20мА на реальний діапазон
// Припустимо, що використаний 250 Ом шунт, 4-20мА -> 1-5В
// АЦП 12-бітний з опором 3.3В (приклад), тоді counts_per_volt = 4095/3.3 ~ 1240.9
float adc_counts_per_volt = 4095.0f / 3.3f;
float input_resistance = 250.0f; // 250 Ом шунт

// Діапазони вимірювання
// Вібрація 0-100% відповідно 4мА=0%, 20мА=100%
float vib_min = 0.0f;
float vib_max = 100.0f;
// Вага 0-250 т/год
float weight_min = 0.0f;
float weight_max = 250.0f;
// Витрати води 0-70 м³/год
float water_min = 0.0f;
float water_max = 70.0f;

// Допоміжні буфери для відображення та налагодження
char lcdBuffer[50];

// ----- Прототипи функцій ----- //
static void SystemClock_Config(void);
static void MX_GPIO_Init(void);
static void MX_ADC1_Init(void);
static void MX_DAC_Init(void);
static void MX_LCD_Init(void);
void readSensors(void);
void displayTrends(void);
void sendOPCUData(void);
void controlOutputs(void);

// ----- Головна функція ----- //
int main(void)
{
    HAL_Init();
```

```

SystemClock_Config();

MX_GPIO_Init();
MX_ADC1_Init();
MX_DAC_Init();
MX_LCD_Init();

// Ініціалізація LCD
BSP_LCD_Init();
BSP_LCD_LayerDefaultInit(0, LCD_FRAME_BUFFER);
BSP_LCD_SelectLayer(0);
BSP_LCD_Clear(LCD_COLOR_WHITE);
BSP_LCD_SetBackColor(LCD_COLOR_WHITE);
BSP_LCD_SetTextColor(LCD_COLOR_BLACK);
BSP_LCD_SetFont(&LCD_DEFAULT_FONT);
BSP_LCD_DisplayOn();

while (1)
{
    // 1. Зчитуємо дані з датчиків
    readSensors();

    // 2. Відображаємо дані на дисплеї (тренди або поточні значення)
    displayTrends();

    // 3. Відправляємо дані на OPC UA сервер (псевдокод)
    sendOPCUAData();

    // 4. Формуємо керуючі сигнали
    controlOutputs();

    HAL_Delay(1000);
}

// ----- Функції ----- //

// Функція зчитування даних з АЦП та перетворення до фізичних величин
void readSensors(void)
{
    // Запуск АЦП та читання 4 каналів
    HAL_ADC_Start(&hadc1);
    for (int i=0; i<4; i++)
    {
        if (HAL_ADC_PollForConversion(&hadc1, 10) == HAL_OK)
        {
            adcValues[i] = HAL_ADC_GetValue(&hadc1);
        }
    }
    HAL_ADC_Stop(&hadc1);

    // Переводимо АЦП-коди у струм (мА) і потім у фізичні одиниці
    // Формула для струму:  $I(\text{mA}) = (U/V) * 1000$  , де  $U = (\text{adcValue} / \text{adc\_counts\_per\_volt})$ ,  $V = U * 1 \text{ В}$ 
    //  $U = (\text{adcValue} / \text{adc\_counts\_per\_volt})$ 
    //  $I = (U / R) * 1000$ , але ми вже знаємо  $R=250 \text{ Ом}$ ,  $U=I*R \Rightarrow I=U/R$ 

    // Вхідний струм:
    //  $I = ((\text{adcValues}[i] / \text{adc\_counts\_per\_volt}) / R) * 1000$  але оскільки в нас 4-20мА
    відповідають 1-5В,
    //  $I = ((\text{adcValues}[i] / \text{adc\_counts\_per\_volt}) / (R=250 \text{ Ом}))$ 
    // Наведемо приклад:

```

```

// I(mA) = (adcValue/adc_counts_per_volt)/ (250 Ом) * 1000
// Але 1В на 250 Ом = 4мА, 5В на 250 Ом = 20мА. Проверимо масштаб:
// Для adcValue = 1240 (прибл. 1В): I ≈ (1/250)*1000=4мА
// Для adcValue = 6200 (прибл. 5В): I≈20мА
// Все вірно.

// Датчик1: Вібрація "Загрузка" (0-100%)
float I1 = ((float)adcValues[0]/adc_counts_per_volt)/ (1.0f*250.0f)*1000.0f;
vibLoad_percent = ((I1 - 4.0f)/(20.0f-4.0f))*(vib_max - vib_min) + vib_min;

// Датчик2: Вібрація "Розгрузка"
float I2 = ((float)adcValues[1]/adc_counts_per_volt)/ (1.0f*250.0f)*1000.0f;
vibUnload_percent = ((I2 - 4.0f)/(20.0f-4.0f))*(vib_max - vib_min) + vib_min;

// Датчик3: Вага (0-250 т/год)
float I3 = ((float)adcValues[2]/adc_counts_per_volt)/ (1.0f*250.0f)*1000.0f;
weight_tph = ((I3 - 4.0f)/(20.0f-4.0f))*(weight_max - weight_min) + weight_min;

// Датчик4: Витрати води (0-70 м³/год)
float I4 = ((float)adcValues[3]/adc_counts_per_volt)/ (1.0f*250.0f)*1000.0f;
waterFlow_m3h = ((I4 - 4.0f)/(20.0f-4.0f))*(water_max - water_min) + water_min;
}

// Виведення даних на LCD
void displayTrends(void)
{
    BSP_LCD_Clear(LCD_COLOR_WHITE);
    sprintf(lcdBuffer, "Vib Load: %.2f %%", vibLoad_percent);
    BSP_LCD_DisplayStringAt(0, 20, (uint8_t*)lcdBuffer, CENTER_MODE);
    sprintf(lcdBuffer, "Vib Unload: %.2f %%", vibUnload_percent);
    BSP_LCD_DisplayStringAt(0, 40, (uint8_t*)lcdBuffer, CENTER_MODE);
    sprintf(lcdBuffer, "Weight: %.2f t/h", weight_tph);
    BSP_LCD_DisplayStringAt(0, 60, (uint8_t*)lcdBuffer, CENTER_MODE);
    sprintf(lcdBuffer, "Water: %.2f m3/h", waterFlow_m3h);
    BSP_LCD_DisplayStringAt(0, 80, (uint8_t*)lcdBuffer, CENTER_MODE);

    // Для виведення тренду можливо задіяти графічні функції STemWin/TouchGFX
    // Тут просто текст. Реально: малювати осцилограму за останні N значень.
}

// Відправлення даних по OPC UA (псевдокод)
void sendOPCUAData(void)
{
    // Псевдокод:
    // UA_Server *server = UA_Server_new();
    // UA_ServerConfig_setDefault(UA_Server_getConfig(server));
    // UA_NodeId currentNodeId = UA_NODEID_STRING(1, "CurrentData");

    // UA_Variant value;
    // UA_Variant_setScalar(&value, &vibLoad_percent, &UA_TYPES[UA_TYPES_FLOAT]);
    // UA_Server_writeValue(server, UA_NODEID_STRING(1, "VibLoad"), value);

    // Аналогічно для інших змінних.
    // UA_Server_run_iterate(server, false);
    // Реальна реалізація вимагає ініціалізації Ethernet, TCP/IP стеку, Open62541 або інший
    OPC UA стек.
}

// Формування керуючих сигналів для перетворювача частоти та клапану AUMA
void controlOutputs(void)
{
    // Припустимо, що керування частотою барабану виконується за вібраціями:

```

```

// Наприклад, частота = f( vibLoad_percent, vibUnload_percent )
// Тут - простий приклад: чим вище вібрація, тим нижча частота:
float frequency_setpoint = 50.0f - ((vibLoad_percent + vibUnload_percent)/2.0f)*0.5f;
// Це довільна формула, реальне регулювання - складніше

// Керування подачею води за співвідношенням "руда - вода":
// Наприклад, water_setpoint = (weight_tph / 250.0)*70.0 = пряме відношення
float water_setpoint = (weight_tph/250.0f)*70.0f;

// Тепер частоту та витрати переводимо у 4-20мА сигнал через DAC
// Припустимо діапазон керування перетворювачем 0-100% відповідає 4-20мА
// Для частоти 0-50 Гц - 4-20мА
float freq_current = ((frequency_setpoint - 0.0f)/(50.0f))* (20.0f-4.0f)+4.0f;
float water_current = ((water_setpoint - 0.0f)/(70.0f))* (20.0f-4.0f)+4.0f;

// Перетворимо знову мА у цифровий код для DAC
// DAC зазвичай 12-біт, 0-3.3В. Для 4-20мА потрібен зовнішній перетворювач V->I.
// Припустимо, 4-20мА формується DAC: 4мА = 1В, 20мА=5В (через зовнішній підсилювач).
// Для 1В на DAC: код = (1/3.3)*4095 ≈1240
// Для 5В потрібно зовнішнє джерело, або інша схема. Тут лише приблизно.

float freq_voltage = (freq_current - 4.0f)* ( (5.0f-1.0f)/(20.0f-4.0f) ) + 1.0f; // 1-
5B float water_voltage = (water_current - 4.0f)* ( (5.0f-1.0f)/(20.0f-4.0f) ) + 1.0f;

uint32_t freq_DAC_code = (uint32_t)((freq_voltage/3.3f)*4095.0f);
uint32_t water_DAC_code = (uint32_t)((water_voltage/3.3f)*4095.0f);

HAL_DAC_SetValue(&hdac, DAC_CHANNEL_1, DAC_ALIGN_12B_R, freq_DAC_code);
HAL_DAC_SetValue(&hdac, DAC_CHANNEL_2, DAC_ALIGN_12B_R, water_DAC_code);
}

// ----- Ініціалізація периферії ----- //
static void MX_ADC1_Init(void)
{
    __HAL_RCC_ADC1_CLK_ENABLE();
    ADC_ChannelConfTypeDef sConfig = {0};

    hadc1.Instance = ADC1;
    hadc1.Init.Resolution = ADC_RESOLUTION_12B;
    hadc1.Init.ContinuousConvMode = DISABLE;
    hadc1.Init.DataAlign = ADC_DATAALIGN_RIGHT;
    hadc1.Init.ScanConvMode = ENABLE;
    hadc1.Init.NbrOfConversion = 4;
    if (HAL_ADC_Init(&hadc1) != HAL_OK)
    {
        Error_Handler();
    }

    // Конфігурація кожного каналу (припускаємо, що під'єднано до ADC1_IN0..IN3)
    sConfig.Channel = ADC_CHANNEL_0;
    sConfig.Rank = 1;
    sConfig.SamplingTime = ADC_SAMPLETIME_3CYCLES;
    HAL_ADC_ConfigChannel(&hadc1, &sConfig);

    sConfig.Channel = ADC_CHANNEL_1;
    sConfig.Rank = 2;
    HAL_ADC_ConfigChannel(&hadc1, &sConfig);

    sConfig.Channel = ADC_CHANNEL_2;
    sConfig.Rank = 3;

```

```

    HAL_ADC_ConfigChannel(&hadc1, &sConfig);

    sConfig.Channel = ADC_CHANNEL_3;
    sConfig.Rank = 4;
    HAL_ADC_ConfigChannel(&hadc1, &sConfig);
}

static void MX_DAC_Init(void)
{
    __HAL_RCC_DAC_CLK_ENABLE();

    DAC_ChannelConfTypeDef sConfig = {0};

    hdac.Instance = DAC;
    HAL_DAC_Init(&hdac);

    // Канал 1
    sConfig.DAC_Trigger = DAC_TRIGGER_NONE;
    sConfig.DAC_OutputBuffer = DAC_OUTPUTBUFFER_ENABLE;
    HAL_DAC_ConfigChannel(&hdac, &sConfig, DAC_CHANNEL_1);

    // Канал 2
    HAL_DAC_ConfigChannel(&hdac, &sConfig, DAC_CHANNEL_2);

    HAL_DAC_Start(&hdac, DAC_CHANNEL_1);
    HAL_DAC_Start(&hdac, DAC_CHANNEL_2);
}

static void MX_LCD_Init(void)
{
    // Ініціалізація ЖК-дисплею належить BSP функціям, тут можна нічого не прописувати
    // Якщо потрібно - ініціалізація LTDC, DSI HOST і т.д. за допомогою CubeMX
}

static void MX_GPIO_Init(void)
{
    __HAL_RCC_GPIOA_CLK_ENABLE();
    // Ініціалізація GPIO по необхідності
}

// Системний такт
static void SystemClock_Config(void)
{
    // Код ініціалізації системного такту (CubeMX автогенерація)
    // Налаштувати на 216МГц, наприклад
    // ...
    // Тут пропущено для стислості
}

// Помилка
void Error_Handler(void)
{
    while(1){}
}

```

ДОДАТОК 3

```
import numpy as np

import tensorflow as tf

from tensorflow.keras.models import Sequential

from tensorflow.keras.layers import Dense, Dropout

from tensorflow.keras.optimizers import Adam


# Конфігурація серверного ПК

DATA_FREQUENCY = 1000 # Частота зчитування даних, Гц

INPUT_SIZE = 60      # Кількість вхідних значень (60 секунд сигналу)

OUTPUT_SIZE = 1      # Рівень завантаження млина (%)


# Функція для симуляції даних з акселерометрів

def simulate_acceleration_data(load_level, noise_level=0.05):

    time = np.linspace(0, 60, DATA_FREQUENCY * 60)

    base_signal = (1 - load_level) * (np.sin(2 * np.pi * 10 * time) + 0.5 * np.sin(2 *
np.pi * 30 * time))

    noise = noise_level * np.random.randn(len(base_signal))

    return base_signal + noise


# Генерація даних для навчання

def generate_training_data(samples=1000):

    X, y = [], []

    for _ in range(samples):

        load_level = np.random.uniform(0.3, 0.9) # Рівень завантаження від 30% до
90%
```

```

    signal = simulate_acceleration_data(load_level)

    X.append(signal[:INPUT_SIZE]) # Використовуємо перші 60 значень
    y.append(load_level * 100)    # Перетворення на відсотки

    return np.array(X), np.array(y)

# Створення нейронної мережі
def create_model():
    model = Sequential([
        Dense(128, activation='relu', input_shape=(INPUT_SIZE,)),
        Dropout(0.2),
        Dense(64, activation='relu'),
        Dropout(0.2),
        Dense(OUTPUT_SIZE, activation='linear')
    ])
    model.compile(optimizer=Adam(learning_rate=0.001),
loss='mean_squared_error', metrics=['mae'])

    return model

# Навчання моделі
X_train, y_train = generate_training_data(samples=5000)
X_test, y_test = generate_training_data(samples=1000)

model = create_model()

history = model.fit(X_train, y_train, validation_data=(X_test, y_test), epochs=50,
batch_size=32)

```

```
# Збереження моделі
```

```
model.save("mill_load_predictor.h5")
```

```
# Завантаження моделі та прогнозування
```

```
def predict_mill_load(signal):
```

```
    loaded_model = tf.keras.models.load_model("mill_load_predictor.h5")
```

```
    prediction = loaded_model.predict(signal.reshape(1, -1))
```

```
    return prediction[0][0]
```

```
# Приклад прогнозу
```

```
test_signal = simulate_acceleration_data(0.75)[:INPUT_SIZE] # Сигнал для 75%
```

```
завантаження
```

```
predicted_load = predict_mill_load(test_signal)
```

```
print(f'Прогнозований рівень завантаження млина: {predicted_load:.2f}%')
```