

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Факультет інформаційних технологій
Кафедра автоматизації, комп'ютерних наук і технологій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеню вищої освіти – магістр
за освітньо-професійною програмою
«Кіберфізичні системи в промисловості, бізнесі та транспорті»

зі спеціальності

174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

тема роботи:

***«Автоматизована система контролю і управління тонким
грохоченням в умовах рудозбагачувальної фабрики»***

Виконав ст. гр. АКІТР-23-1м. _____ Крицький М. Д.

Керівник _____ Савицький О.І.

Нормоконтроль _____ Маринич І. А.

Завідувач кафедри _____ Рубан С. А.

КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет: інформаційних технологій

Кафедра: автоматизації, комп'ютерних наук і технологій

Ступінь вищої освіти: Магістр

Спеціальність: 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри: к.т.н. Рубан С.А.

« 15 » липня 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу магістра

студентові групи АКІТР-24-1м. Крицькому Максиму Дмитровичу

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Автоматизована система контролю і управління тонким грохоченням в умовах рудозбагачувальної фабрики»

затверджено наказом по університету № 258с від 13.05.2025 р.

2. Термін здачі кваліфікаційної роботи: 01.12.2025 р.

3. Склад кваліфікаційної роботи: Пояснювальна записка обсягом 86с., додатки, презентація у Microsoft PowerPoint (19 слайдів) в електронному та друкованому вигляді

4. Консультанти кваліфікаційної роботи:

Розділ 1-3

доц. Савицький О.І.

Нормоконтроль

доц. Маринич І. А.

5. Календарний план:

№	Етапи роботи	Термін виконання
1	<i>Вступ</i>	<i>10.02.25</i>
2	<i>Розділ 1</i>	<i>15.04.25</i>
3	<i>Розділ 2</i>	<i>18.07.25</i>
4	<i>Розділ 3</i>	<i>19.11.25</i>
5	<i>Висновки</i>	<i>20.11.25</i>
6	<i>Оформлення кваліфікаційної роботи</i>	<i>25.11.25</i>
7	<i>Підготовка презентації та графічного матеріалу</i>	<i>28.11.25</i>
8	<i>Підготовка доповіді до захисту</i>	<i>01.12.25</i>

6. Дата видачі завдання: 24.12.2024р.

Керівник _____ /доц. Савицький О.І./

7. Запевнення: Я, Крицький Максим Дмитрович, запевняю, що ця кваліфікаційна робота виконана самостійно, не містить академічного плагіату, фабрикації, фальсифікації. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Із чинним Положенням про академічну доброчесність Криворізького національного університету ознайомлений.

Чітко усвідомлюю, що в разі виявлення у кваліфікаційній роботі умисних порушень робота не допускається до захисту або оцінюється незадовільно.

Здобувач _____ / Крицький М. Д./

АНОТАЦІЯ

Крицький М.Д. Автоматизована система контролю і управління тонким грохоченням в умовах рудозбагачувальної фабрики : кваліфікаційна робота магістра : 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка. Кривий Ріг. Криворізький національний університет, 2025. 86 с.

Об'єктом дослідження є автоматизована система контролю і управління тонким грохоченням в умовах рудозбагачувальної фабрики.

Метою роботи є підвищення ефективності процесу тонкої класифікації пульпи перед фільтрацією.

У першому розділі розглянуті аналогічні системи керування. Зроблено висновок про неефективну роботу грохотів такого класу при відсутності системи автоматичного керування параметрами грохота, особливо частотою качання дек грохота і подачею води на репульпацію.

В другому розділі розроблено модель в MatLab роботи грохота, як двомасової коливальної системи, зроблено висновок про доцільність розробки системи автоматичного керування.

В третьому розділі показано варіант впровадження системи автоматичного керування роботою грохота на базі контролера і програмного забезпечення Siemens.

Ключові слова:

АВТОМАТИЗАЦІЯ, ПЛК SIEMENS, ПЕРЕТВОРЮВАЧ ЧАСТОТИ, СИСТЕМА КЕРУВАННЯ, ГРОХОТ ПУЛЬПИ

ANNOTATION

Krytskyi M. D. Automated system of control and management of fine screening in the conditions of an ore processing plant: Master's Qualification Thesis :174 – Automation, computer-integrated technologies, and robotics. Kryvyi Rih. Kryvyi Rih National University, 2025. 86 p.

The object of the study is an automated system of control and management of fine screening in the conditions of an ore processing plant.

The purpose of the work is to increase the efficiency of the process of fine pulp classification before filtration.

The first section considers similar control systems. The conclusion is made about the inefficient operation of screens of this class in the absence of a system of automatic control of the screen parameters, especially the frequency of rocking of the screen decks and the supply of water for repulping.

In the second section, a model of the screen operation as a two-mass oscillating system is developed in MatLab, and a conclusion is made about the feasibility of developing an automatic control system.

In the third section, a variant of implementing an automatic control system for the screen operation based on the Siemens controller and software is shown.

Keywords:

AUTOMATIZATION, SIEMENS PLC, FREQUENCY CONVERTER, CONTROL SYSTEM, PULP SCREEN

ЗМІСТ

Вступ	4
Розділ 1 Аналіз підходів до підвищення ефективності процесу	6
1.1 Технологічна схема збагачувальної фабрики	6
1.2 Схема ланцюга апаратів лінії виробництва концентрату для окатків DRI з використанням пристрою тонкого грохочення та зневоднення концентратів	8
1.3 Аналіз літературних джерел за напрямом дослідження	Ошибка! Закладка не определена.
1.4 Патентний пошук по темі дослідження	17
1.5 Постановка задачі. Вимоги до системи керування	20
Розділ 2 Ідентифікація математичної моделі та синтез керування процесом	29
2.1 Функціональна схема керування грохотом по технології мокрого грохочення для залізорудної пульпи	29
2.2 Створення моделі роботи грохота в діапазоні його технічних можливостей і вимог технології збагачення	Ошибка! Закладка не определена.
2.3 Фрагменти програми моделювання роботи мокрого грохота	38
2.4 Подача води на грохот	Ошибка! Закладка не определена.
2.5 Моделювання процесів керування в MatLab	Ошибка! Закладка не определена.
Розділ 3 Програмно-технічна реалізація системи керування процесом	ОШИБКА! ЗАКЛАДКА НЕ ОПРЕДЕЛЕНА.
3.1 Створення системи автоматичного керування ефективністю мокрого грохота Stack Sizer Derrick	Ошибка! Закладка не определена.
3.2 Програмне забезпечення системи автоматичного керування ефективністю мокрого грохота	65
3.3 Вибір та обґрунтування апаратного забезпечення	75

Список використаної літератури

Ошибка! Закладка не определена.

ВСТУП

У сучасних гірничо-збагачувальних комбінатах особливу увагу приділяють покращенню якості готової продукції, економії енергії та комплектуючих розхідних деталей. Одним із напрямків є дослідження класифікаційного обладнання, зокрема грохотів для пульпи, оскільки вони допомагають направляти потоки матеріалу обробки що це як раз і допомагає підвищенню ефективності технологічних процесів і виконати задачі економії. Оптимізація та адаптація систем керування такими грохотами, що виконувалося в цьому проекті, з мінімізацією питомих витрат енергії, надає підприємствам вагому конкурентну перевагу. Це вимагає глибокого розуміння фізичних закономірностей об'єкту керування - процесу мокрого грохочення та створення відповідних алгоритмів автоматичного керування.

Промислові компанії як в Україні, так і за її межами, постійно вдосконалюють конструкції грохотів. Наприклад, фірма Derrick активно займається розробкою нових модифікацій обладнання. Однак експлуатаційні результати та виклики, пов'язані з підвищенням продуктивності й покращенням якості кінцевого продукту — особливо з урахуванням специфіки залізних руд Криворізького регіону — потребують модернізації систем керування класифікаційними процесами.

Це підкреслює важливість подальших наукових досліджень, спрямованих на розробку і впровадження методів комп'ютерного моделювання та автоматизації, що дозволить суттєво покращити якість і продуктивність виробництва та зменшити витрати електроенергії. Грохоти Derrick, оснащені п'ятьма ситами та частотними перетворювачами (ПЧ), вирізняються високою надійністю та здатністю генерувати вібрації потрібної амплітуди й частоти. Це забезпечується дією невідновленої маси, яка при обертанні створює відцентрову силу, ініціюючи коливальні рухи рами грохота із закріпленими на ній деками сит, це теж робиться в ручному режимі. Тому в даній роботі розробляються автоматичні регулятори для керування ПЧ.

Таке обладнання застосовується для мокрого просіювання різноманітних матеріалів — від залізної руди до антрациту, кам'яного вугілля, а також у процесах зневоднення та промивки суспензій. Аналіз наукових публікацій, присвячених створенню грохотів мокрого просіювання, свідчить про значний прогрес у розробці вібраційної техніки. Зокрема, дослідження систем керування зосереджені на використанні аналітичних моделей, що дозволяють визначити ключові конструктивні параметри та оптимізувати їх за допомогою сучасних вібраційних технологій.

У рамках таких досліджень розглядаються різноманітні схеми та моделі, які сприяють створенню ефективних класифікаційних систем. Сучасні підходи також включають комп'ютерне моделювання та використання віртуальної реальності. Наприклад, застосування програмних засобів типу MathLab дає змогу будувати параметричні моделі, проводити спектральний аналіз і вдосконалювати конструкції грохотів. Це забезпечує високу точність, надійність і продуктивність роботи обладнання.

Інформаційні технології відкривають можливості для створення реалістичних візуалізацій і проведення віртуальних експериментів, що сприяє глибшому розумінню процесів і покращенню проектних рішень. Таким чином, сучасні наукові дослідження у сфері класифікаційного обладнання сприяють динамічному розвитку техніки, покращенню її характеристик та підвищенню ефективності виробничих процесів, що забезпечує конкурентоспроможність продукції на світовому ринку.

Отже, впровадження комп'ютерних технологій в системи автоматичного керування інерційними грохотами є не лише бажаним, а й необхідним кроком для досягнення високих стандартів якості, продуктивності та ринкової переваги.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ПІДХОДІВ ДО ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ

1.1 Технологічна схема збагачувальної фабрики

Технологічна схема однієї із збагачувальних фабрик показана на рис.1.1.
Ділянка магнітизуючого випалу на теперішній час не працює.

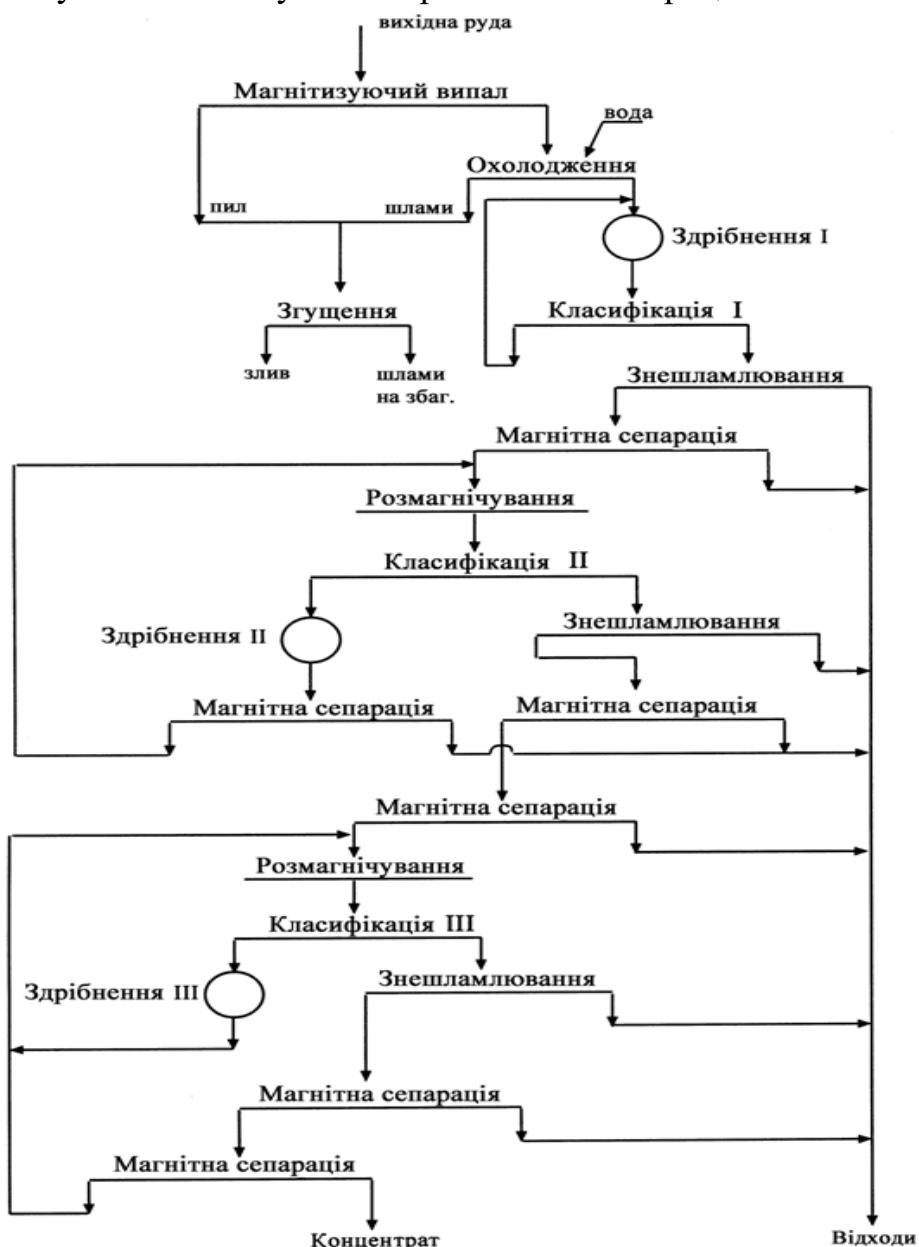


Рисунок 1.1 – Технологічна схема збагачувальної фабрики Центрального ГЗК

Об'єкт дослідження в даній роботі - класифікація ІІІ, розташований на ділянці збагачення ІІІ стадії.

Стан запасів по кар'єрам ЦГЗКа: розкритих запасів 1,6 млн т, підготовлених до розкриття 1,3 млн т, готових до виїмки 1,0 млн т, забезпеченість до виїмки запасами 2,5 млн т сировини на місяць. В середньому ЦГЗКа видобуває 11,9 млн т руди на рік. Основним методом збагачення є магнітний у слабкому полі. Технологічна схема включає 3 стадії подрібнення і 4 стадії магнітної сепарації. У кожній стадії отримують відходи, а промпродукт переробляється далі. Як операції передзбагачення застосовують суху магнітну сепарацію у слабкому полі. В результаті комбінат отримує додаткову товарну продукцію для будівельної промисловості і збільшує концентрацію корисного компоненту на 6,6 %. У результаті повного циклу збагачення із руди з масовою часткою загального заліза ($Fe_{\text{заг}}$) 33,6 % отримують концентрат з масовою часткою $Fe_{\text{заг}}$ 66,3-66,5 %, вологістю бл. 10 %. В середньому на рік комбінатом випускається близько 4,3 млн т концентрату і 1,9 млн т котунів. У останніх масова частка $Fe_{\text{заг}}$ — 63,34-62,14 %. На комбінаті встановлені дробарки типу ККД 1500/180; КСД 2200; КМД 2200; сепаратор 1ВПБС-90/250; на збагачувальних фабриках — млини МШЦ 3,6 x 5,0; МШР 4,5 x 5,0; МШЦ 3,6 x 5,5; МШЦ 4,5 x 6,0; магнітні сепаратори типу ПБМ-90/250; вакуум фільтри Ду-68. Питомі витрати електроенергії станом на 01.01.2003 р. на 1 т концентрату 105,0-107,3 кВтгод, на 1 т котунів 45,1-46,9 кВтгод.

В структурному плані комбінат представляє об'єднання гірничотранспортного і дробильно-збагачувального комплексів, блоку допоміжних цехів (<https://ingok.metinvestholding.com/ua/about/structure>). У інфраструктуру комбінату входить 17 структурних підрозділів (на правах цехів), у тому числі 7 основних:

- Кар'єр, виробничою потужністю з гірничої маси 70 млн. т в рік. Здійснює розробку Інгулецького родовища залізистих кварцитів.

- Цех технологічного автотранспорту – потужністю по об'ємах перевезень понад 60 млн. т в рік. Здійснює перевезення гірничої маси.

- Залізничний цех, що здійснює відвантаження розкривних порід з горизонтів кар'єру, і товарної продукції. Здійснює залізничні перевезення усередині кар'єру, перевезення розкривних порід і вивезення товарної продукції.

- Дробильна фабрика виробничою потужністю з переробки більше 36 млн. т руди в рік. Здійснює дроблення, подрібнення руди до потрібної крупності.

- Дві збагачувальні фабрики річною виробничою потужністю понад 14,5 млн. т концентрату в рік з масовою долею заліза близько 63,7% і 67 %. Забезпечують виробництво і відвантаження товарного концентрату споживачеві.

Кінцевим продуктом збагачення корисних копалин є залізорудний концентрат, який використовується при виробництві агломерату або обкотишів, з метою подальшої переробки (плавки) в чорній металургії.

1.2 Схема ланцюга апаратів лінії виробництва концентрату для окатків DRI з використанням пристрою тонкого грохочення та зневоднення концентратів

Концентрат технологічних секцій № 8-17 гідротранспортом надходить в відділення зневоднення концентрату з корпусу збагачення. Пульпа надходить на 5-ти струменевий пульпо розподільник, який встановлений на відм. + 10,400 в осях 33-34, далі чотири потоки мають можливість надходити на дешламатори типу МД-12 №11, 12, 21, 22, осі 32-36 і один потік в двохструменевий пульпорозподільник на відм. + 2,400 в осях 31-32. Штатна схема передбачає, що пульпа надходить з 5-ти струменевого пульпо розподільника на дешламатори МД-12 №11, 12.

При надходженні обсягу концентрату понад пропускної здатності дешламаторів МД-12 №11, 12, 21, 22, даний обсяг з пульпо розподільника, минаючи

знешламлення, надходить в двохструменевий пульпо розподільник і далі в зумпф насосів 1-4«К», в осях 32-33.

Після дешламаторів згущений продукт надходить в пульпо розподільник на відм. +0,100, в осях 32-33 звідки двома потоками надходить в зумпф насосів 1-2«К» та 3-4«К», розділений на дві частини. Концентрат із зумпфа насосів 1-2«К» та 3-4«К» насосами по двом окремим трубопроводам, на кожному з яких встановлена котушка розмагнічування, подається на два шестиструменевих пульпо розподільника на відм. +12,950, в осях 40-43. Кожен пульпо розподільник живить шість грохотів тонкого грохочення, в осях 39-44 (рис.1.5).

На рис.1.3 наведений зовнішній вигляд грохота Derrick п'яти рівнів, на якому видно живлення грохота.



Рисунок 1.2 – Зовнішній вигляд грохота Derrick

На рисунку 1.3 видно торці кріплення п'яти дек сит грохота та їх живлення.

Більш детально сам процес класифікації представлений на рис.1.4, де показані потоки пульпи живлення, надгрохотного (OVERSIZE) матеріалу та підгрохотного (UNDERSIZE).

Крім того на грохоті використовується процес репульпації для більш якісної очистки отворів сит дек. Цей процес здійснюється подачею технічної води на кожну з п'яти дек грохота.

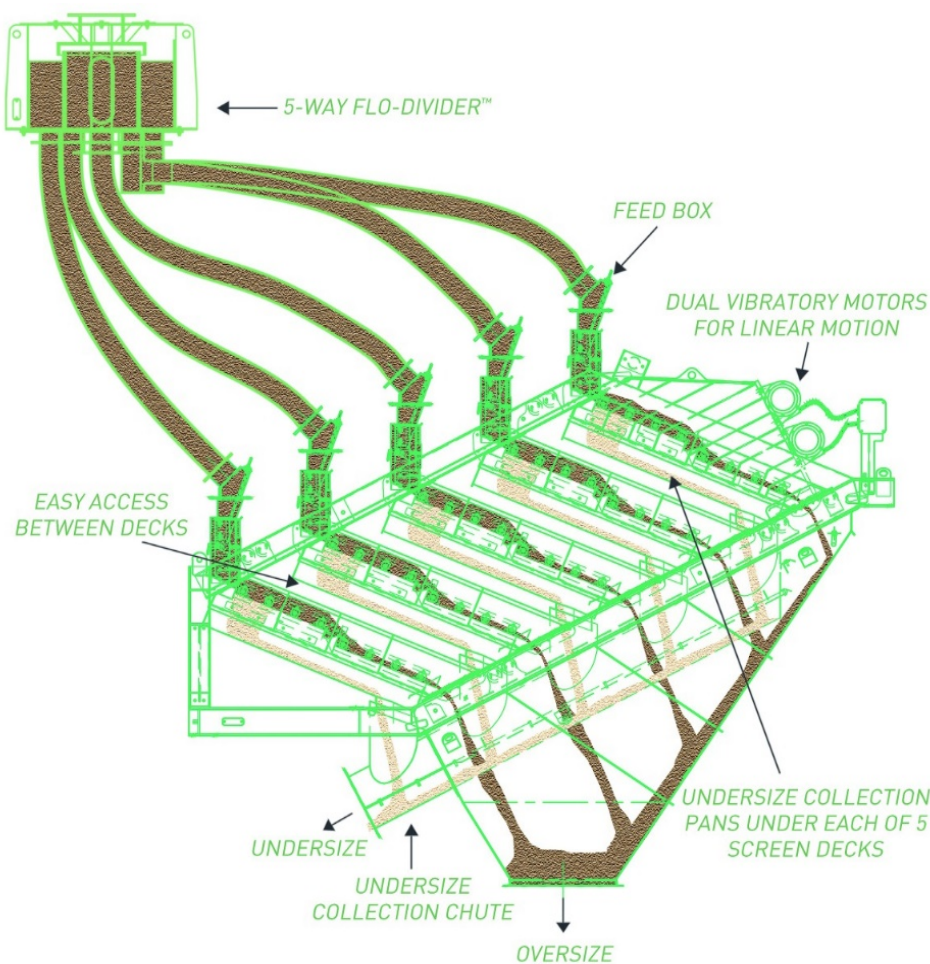


Рисунок 1.3 – Схема розподілу потоків пульпи в грохоті Derrick

Два вібраційних двигуна (**DUAL VIBRATORY MOTORS**) закріплені на рамі, яка скріплює і сита грохота. Ці двигуни здійснюють лінійні коливання рами з амплітудою 2 мм.

На грохот подається пульпа через п'ятиструйний розподільник (**5 – WAY FLO=DIVIDER**) на п'ять фідерів живлення кожної деки (**5 SKREEN DECKS**) грохота.

Для вирішення задач проекту треба буде використовувати обладнання автоматизації збору інформації і керування виконавчими механізмами ділянки

грохотів Derrick (рис.1.5 – 1.6). При цьому є проблеми із закупкою та монтажем нової апаратної частини, майбутньої нової системи керування грохотами, тому необхідно застосувати, так званні “м’які датчики” (тобто завдяки програмному продукту).

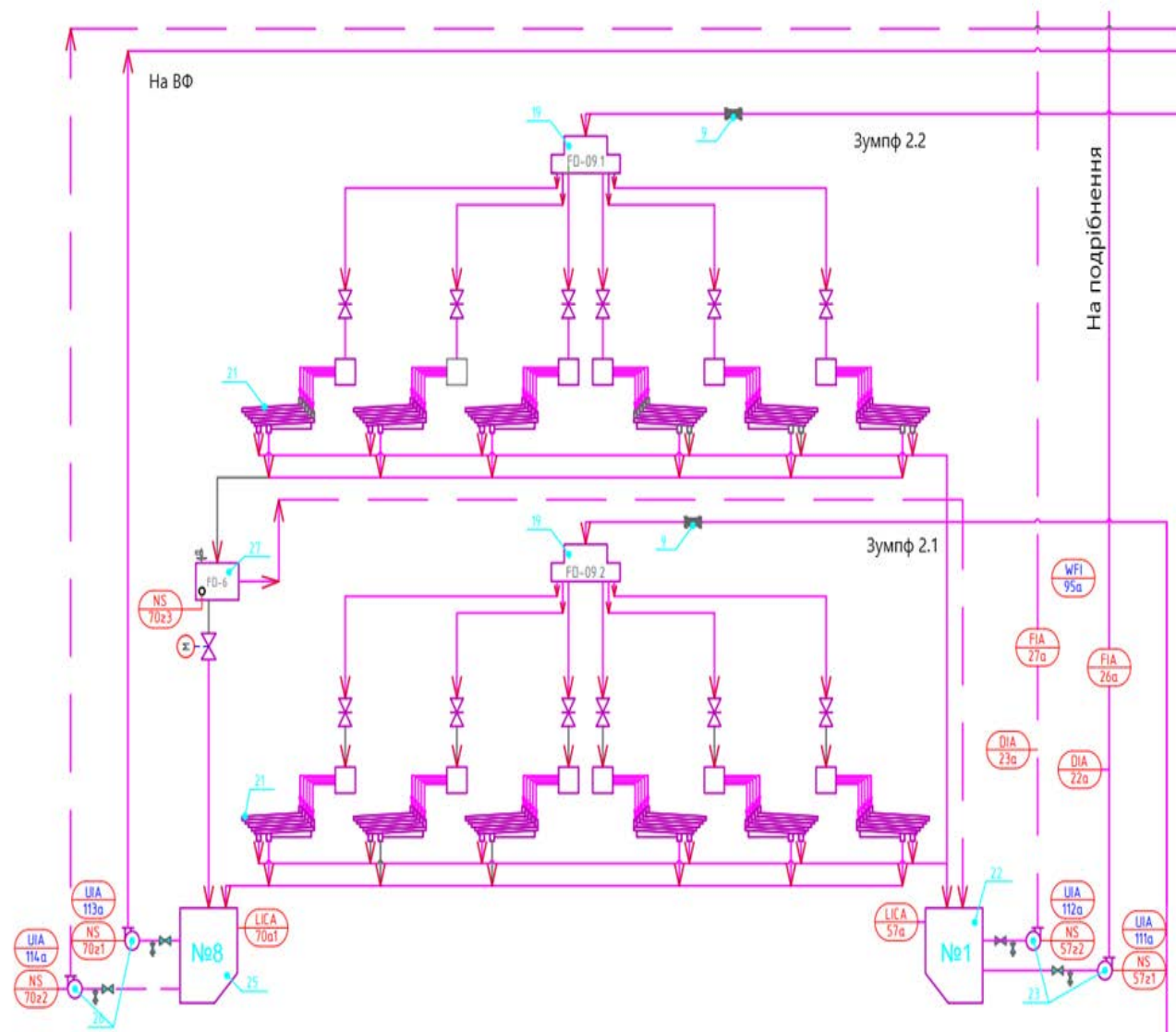


Рисунок 1.4 – Фрагмент існуючої схеми автоматизації ділянки мокрого грохочення

Можна бачити, що живлення грохотів здійснюється через пульпо розподільвач, який поділяє потік на шість струй для шести грохотів.

В свою чергу кожен з цих потоків через п'яти струйний розподільувач розподіляється між п'ятьма деками сит цих грохотів. Це сприяє більш ефективному процесу тонкої класифікації пульпи по крупності окремих твердих включень.

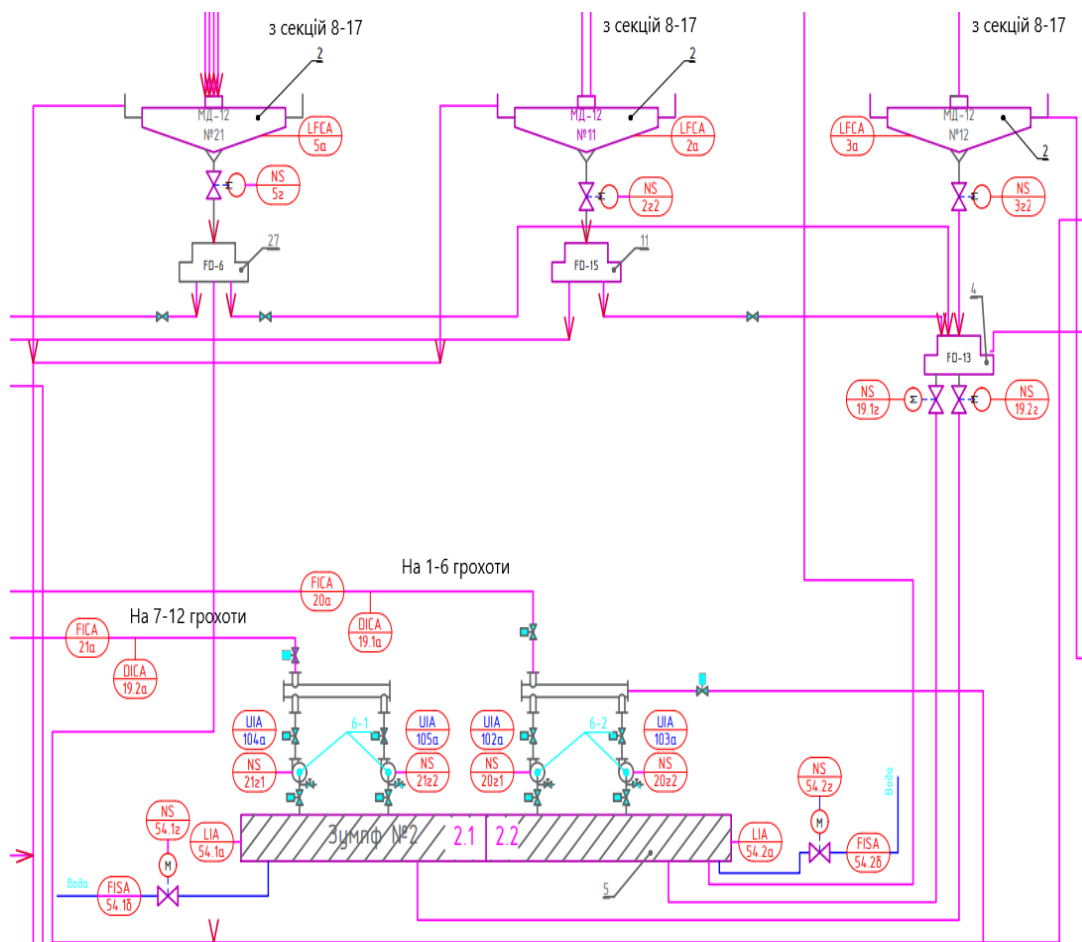


Рисунок 1.5 – Фрагмент схеми автоматизації ділянки дешламації і живлення грохотів

Котушка розмагнічування (рис.1.7) та конденсатори корекції коефіцієнта потужності є статичними пристроями. Вони не вимагають технічного обслуговування, за винятком періодичного огляду



Рисунок 1.6 - Котушка розмагнічування

Котушка розмагнічування ставиться перед грохотом для зменшення кількості намагнічених флокул.

1.3 Аналіз літературних джерел за напрямом дослідження

Як відомо, частинки, тонші розміру поділу, проводяться в підрешітний простір за допомогою пульпової рідини [5]. Таким чином, істотний вплив на ефективність грохочення надає щільність живлення - при зменшенні вмісту твердого збільшується ефективність по підрешітному продукту. З практичної точки зору, щільність живлення при приблизно 20-відсотковому вмісті твердого є розумним компромісом у незначній залежності від питомої ваги твердого. Для мінералу з питомою вагою в 5.0 т/м³ живлення, при забезпеченні достатньої ефективності, має містити 55 відсотків твердого.

Для збільшення ефективності розсіву по під решітному продукту, пульпа живлення може містити меншу кількість твердого (навіть 10-15 відсотків за обсягом). Дані випробувань показують, що більш ефективно додавати рідину, що розпульпує, в підготовку живлення, ніж безпосередньо розпорошувати її в тій же кількості на решітку в процесі грохочення. Навпаки, оскільки для процесів

зневоднення метою є максимальна ефективність над решітного продукту, живлення має подаватися на грохот з максимальною щільністю.

Ситова характеристика

Одним з важливих факторів, що впливають як на продуктивність, так і на ефективність мокрого розсіву, є ситова характеристика живлення. Оскільки частинки менше розміру поділу мають бути проведені в під решітний простір — продуктивність гуркоту зазвичай знижується зі збільшенням частки таких частинок у живленні. Іншим важливим фактором є кількість частинок, близьких за розміром до класу поділу. Цей клас частинок визначається як клас, більший або менший на 2 стандартних меш- розміру, ніж розмір поділу. Близько розмірний клас більшого розміру поділу ускладнює проведення частинок в під решітний простір і, в окремих випадках, призводить до забивання сіток.

Клітина сита та живий перетин.

У загальному випадку, чим більший розмір клітини, тим вища продуктивність гуркоту. Навпаки, при зменшенні розміру поділу зменшується обсяг живлення. Наприклад, в результаті повномасштабного випробувального гуркотіння було визначено, що продуктивність грохоту по клітині в 250 мкм (60 меш, 1 меш – число отворів сита на одному лінійному дюймі, тобто на відстані 25,4 мм.) становить 100т/год. При зменшенні осередку до 150 мкм зниження продуктивності може становити 20-40 відсотків.

Продуктивність грохочення при постійному розмірі клітини також залежить від живого перетину сітки. Іноді, для збільшення терміну служби сітки, доцільно використовувати такі з меншим живим перетином. Однак таке рішення призведе до зменшення продуктивності.

У гірничому секторі застосовуються різні способи класифікації. Важливими процесами в розділенні розмірів є гідроциклони та грохоти. Раніше гідроциклони використовувалися для того, щоб виконати вимоги до тонкого розділу, а грохоти

використовувалися для розмірів вище. [3] Тепер грохоти впроваджуються в більш тонку сферу.

Процес поділу частинок за розмірами показані на рис.1.8. У прикладі [3] сировина q_A ділиться на більший матеріал $g \cdot q_G$ і штрафів $f \cdot q_F$. В ідеалі криві щільності розподілу великого і меншого не перетинаються, але на практиці - вони перетинаються. Матеріал В зоні микс матеріал складається з різних частинок.

Для всіякої точки осі z розподілу є ефективність поділу. Ця ефективність характеризує кількість фракції матеріалу, яка подається, і потрапляє в великий матеріал. Характеристика тонкості є S-подібною кривою. Чим її похідна більша, тим краще вибірковість.

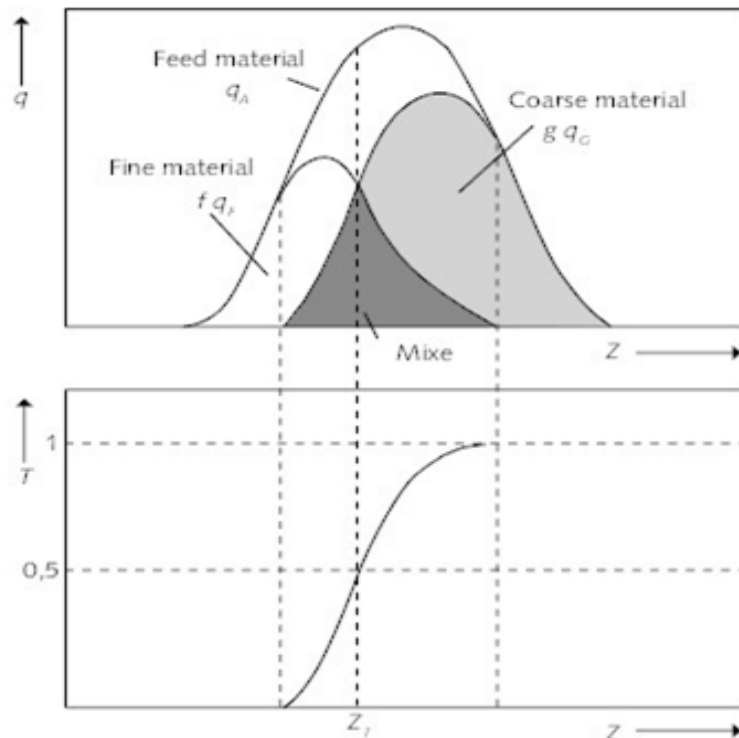


Рисунок 1.7 - Взаємозв'язки поділу фракцій за розмірами

Грохот компанії Metso [3] теж має хороші ситові характеристики, але в нього менші способи регулювання (рис.1.9).

Багаточастотні грохоти [6] KROOSH призначені для вирішення завдань мокрого грохочення. Застосовуючи різні частоти вібрації, вони забезпечують більш

ефективне поділ дрібних частинок, мінімізуючи відходи та максимізуючи вихід якісної вугільної продукції.



Рисунок 1.9 – Компактний грохот тонкого грохочення компанії Metso

Грохоти KROOSH (рис.1.10) особливо ефективні для скорочення скидання хвостів у хвостосховища, допомагаючи компаніям дотримуватись екологічних стандартів і одночасно підвищуючи ефективність виробництва.

Таблиця 1.1 - Специфікація ULS2010.42W

Число модулів	4
Площа поверхні, що просіває, м ²	8.0
Номінальна потужність, кВт	12.8
Номінальна частота коливань коробка, Гц	25
Частотний спектр коливань сітки, Гц	25 – 500
Маса, кг	7600

При просіюванні в'язких середовищ (наприклад, пульпа тонкоподрібнених поліметалевих руд, вугілля тощо) полічастотна дія на потік пульпи, що проходить через гуркіт дозволяє істотно підвищити тиск у шарі рідини, порівняно з відомими конвенційними (одночастотними) грохотами.

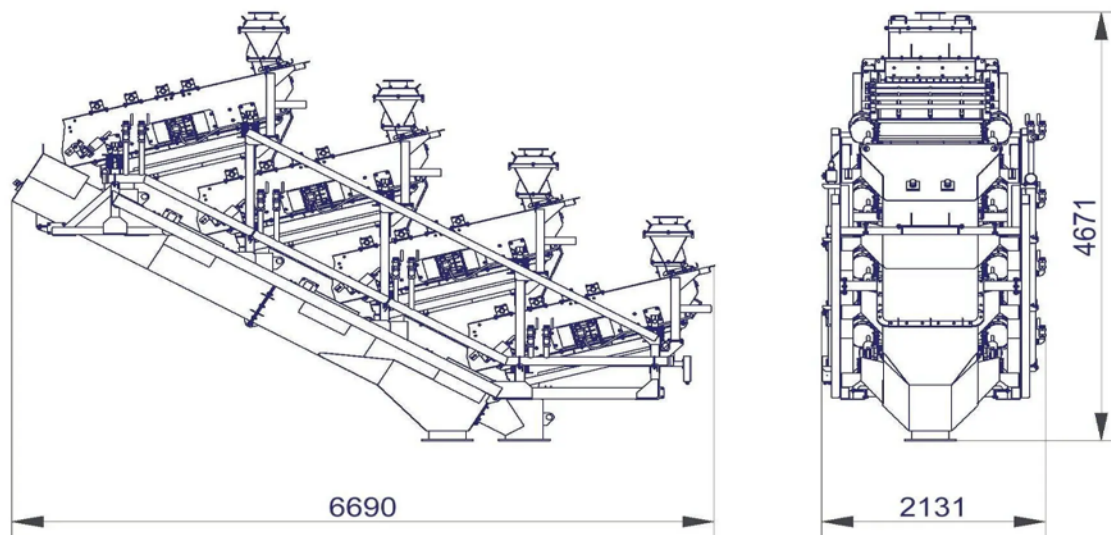


Рисунок 1.9 - Грохот модульний для просіювання пульп, з вертикальним компонуванням.

Саме тому багато частотні грохоти KROOSH ідеальні для мокрого грохочення, у т.ч. для зневоднення та знешламлювання.

Грохот модульний для просіювання пульпи, з вертикальним компонуванням. Індивідуальний привід на кожен модуль від двох електричних вібраторів з бічним розташуванням.

На кожному з двигунів розташований ексцентрик, який налаштовується під сталі параметри пульпи по гранулометричному складу.

1.4 Патентний пошук по темі дослідження

По темі роботи було здійснено патентний пошук в напрямку автоматизації процесів класифікації твердих частинок залізорудної пульпи при застосуванні грохотів типу Derrick.

Під час патентного пошуку була застосована інтелектуальна автоматизована програма Espacenet, що значно полегшило пошук.

Наведемо далі бібліографічні дані патентів, які можуть бути аналогами проектних рішень:

1) Інтелектуальна система вимірювання концентрації, тонкості та метод визначення концентрації та тонкості рудного жому в рудозбагачувальній фабриці.

Винахідник(и): СУНЬ ВЕЙ; СЯО ЯО; ЯН ЮЕ та ін.;

Заявник(и): УНІВ ЦЕНТРАЛЬНИЙ ПІВДЕНЬ

Класифікація: -міжнародний:G01N15/02; G01N5/00; G01N9/04 –

Анотація CN114459942 (A) — 2022-05-10. Винахід розкриває інтелектуальну систему вимірювання концентрації та тонкості та метод визначення концентрації та тонкості рудного жому збагачувального комбінату.

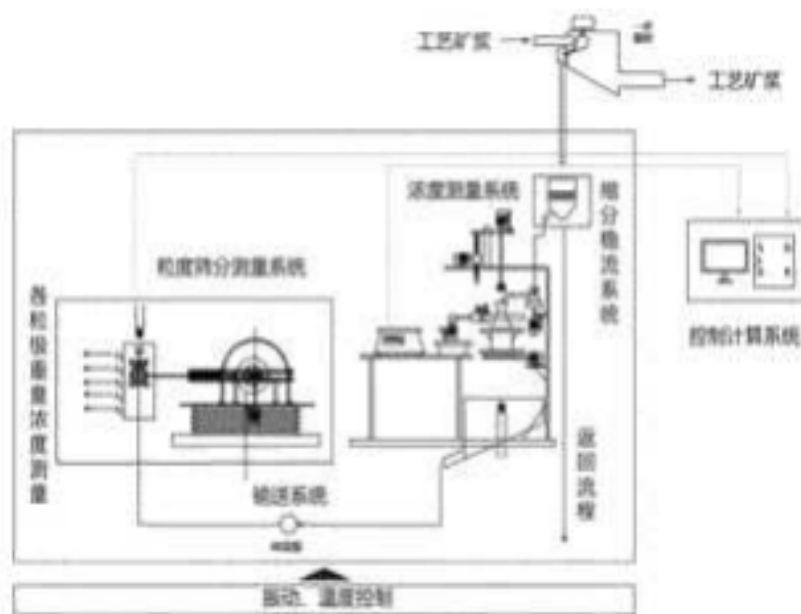


Рисунок 1.11 - Інтелектуальна система вимірювання концентрації рудної

Система включає в себе інтелектуальну систему вимірювання концентрації, систему вимірювання гранульованого скринінгу, систему сталого потоку поділу, систему транспортування та систему контрольного розрахунку. Система може відповідати фактичній операції вимірювання концентрації та тонкості.

Ручні операцій працівників замінені, точність покращується, а метод вимірювання концентрації та тонкості за допомогою системи вимірювання простий

у процесі та зручний у використанні та відповідає вимогам промислового виробництва.

2) CN214638051 (У) — 2021-11-09. Тонкий екран з числовим програмним керуванням композитний просіюваний багатошаровий екран.

Винахідник(и): ВЕЙ ГОШУАЙ; ЧЖАО СЯНЬЛЯН

Заявник(и): ТАНШАНЬ ХОНГЕН ТЕК КО ЛТД

Класифікація: -міжнародний: B03B5/68; B03B7/00; B07B1/28; B07B1/42.

Анотація CN214638051 (У) Корисна модель відноситься до технічної галузі обладнання автоматизації композитного просіювання та забезпечує багатошаровий екран з тонким керуванням композитного просіювання, який складається з опори, коробки екрану, похило розташованої на опорі, порту живлення, утвореного у верхній частині екранної коробки, набору вібраційних вузлів, розташованих на бічній стінці екранної коробки, Ситова сітка розташована на вібраційних вузлах, а мийний вузол влаштований в коробі сита. Мийний вузол складається з групи труб входу води, розташованих у коробці сита паралельно, група форсунок для розпилення води розташована на трубах входу води, вихід тонкого матеріалу утворюється під екраном, вихід грубого матеріалу формується над екраном, екран складається з верхньої половини сита та нижньої половини екрану, А буферна канавка нерухомо з'єднана між верхньою половиною сита та нижньою половиною екрану. На водо впускному патрубку розташована група форсунок для розпилення води, що відповідає положенню буферної канавки, на внутрішній бічній стінці ситової коробки обертально розташований обертовий вал, а група перемішуючих лопатей нерухомо з'єднана з обертовим валом. За допомогою технічної схеми вирішуються проблеми про те, що в попередній техніці рудний жом нерівномірно розподіляється в коробі грохоту, сито схильне до блокування, а ККД низький.

3) CN207222339 (У) — 2018-04-13. Інтелектуальний керуючий посуд строматоліту високочастотним вібраційним тонким екраном.

Винахідник(и): ЧЖОУ ФАН; ЧЖОУ МІН; ЮЙ МІНЛЯН; ЯН ВЕЙМІН

Заявник(и): УНІВ ХУБЕЙ

Класифікація: -міжнародний: B07B1/42

Анотація CN207222339 (У). Корисна модель забезпечує інтелектуальний апарат управління строматолітом височастотним вібраційним тонким екраном, в основному включає блок управління, центральний контролер ПЛК, верхній ПК, зовнішній датчик, перетворювач, пристрій регулювання кута, керуючий модуль вводу-виводу. Центральний контролер PLC через зону з верхнім ПК підключення інтерфейсу Ethernet, все ще через 485 інтерфейсів і безліч зовнішніх датчиків з області, перетворювач, пристрій регулювання кута, модуль вводу-виводу, клапан регулювання води, бути підключений для клапана регулювання кількості руди.

Налаштована робота обладнання та процедуру збору та запису даних, а також програмне забезпечення для обробки аналізу великих даних на ПК, реалізуйте відповідну інтелектуальну функцію керування, корисна модель розкриває відповідно до потоку, концентрації та зернистості рудної пульпи за допомогою зовнішнього датчика вимірювання в реальному часі, частота та кут вібрації автоматичного інтелектуального регулювання досягають найкращої потужності обробки просіювання та ефективності просіювання, підвищили ефективність та якість виробництва.

Третій патент можна було б взяти за прототип системи, яка проектується, але матеріал грохочення – строматоліт (вапняк) дуже відрізняється від залізорудної пульпи, що може накладати інші вимоги до проектування.

Розглядаючи, вище описані патенти підтверджується, що оптимізація частоти качання сит грохотів може істотно знизити витрати виробництва.

1.5 Постановка задачі. Вимоги до системи керування

1.5.1 Вимоги до системи в цілому

Вимоги до структури та функціонування системи.

В систему входять дві підсистеми:

- 1) САК грохотами мокрого процесу класифікації;
 - 2) САК пристроєм подачі води.
2. Зв'язок між ними здійснюється по інтерфейсу з протоколом IO-Link.
3. Система повинна бути стабільною та надійною, щоб уникнути випадків відмови, що для безперервних процесів є обов'язковою умовою.
4. Система повинна надавати можливість моніторингу параметрів пристрою розмагнічування і параметрів класифікації продуктів тонкого грохочення, а також генерувати звіти про їх роботу.
5. Захист від вторгнень: Важливо, щоб система була захищена від несанкціонованого доступу та вторгнень для запобігання можливим проблемам з безпекою.
6. Важливо, щоб система була сумісною з іншими обладнанням та програмним забезпеченням секції РЗФ.

1.5.2 Вимоги до функцій, які реалізуються системою.

1. Перелік функцій і завдань .

1) Функції і завдання САК параметрами пристрою розмагнічування

Контроль параметрів намагнічування пульпи: за допомогою датчиків намагнічування, до і після пристрою розмагнічування і забезпечується підтримка оптимального рівня відношення їх один до одного.

2) Функції і завдання САК грохотів мокрої класифікації

Під час регулювання необхідно враховувати наступне: що,

- а. При зменшенні вмісту твердого, збільшується ефективність по під решітному продукту. З практичної точки зору, щільність живлення при приблизно 20-відсотковому вмісті твердого є розумним компромісом у незначній залежності від питомої ваги твердого. Для мінералу з питомою вагою в 5.0 т/м³ живлення, при забезпеченні достатньої ефективності, має містити 55 відсотків твердого.

б. Для збільшення ефективності розсіву по під решітному продукту, пульпа живлення може містити меншу кількість твердого (навіть 10-15 відсотків за обсягом). Навпаки, оскільки для процесів зневоднення метою є максимальна ефективність над решітного продукту, живлення має подаватися на грохот з максимальною щільністю.

с. Контроль параметрів щільності і витрат вихідної пульпи: за допомогою датчиків щільності і витрат, і забезпечується підтримка оптимального рівня щільності.

Ці параметри повинні відповідати характеристикам грохотів.

Так, для оптимального тонкого мокрого грохочення необхідно, щоб наступні характеристики грохоту і параметри процесів переділу пульпи відповідали один одному:

1. Загальний витрата живлення на гуркіт по твердому (т/год), включаючи циркуляційне навантаження

2. Питома вага сухого твердого

3. Щільність пульпи живлення

4. Очікуваний мінімум і максимум з витрат живлення та його щільності

5. Ситова характеристика живлення

6. Розмір поділу

7. Необхідні специфікації продуктів, обмеження на щільність пульпи до і після гуркоту

- Функції і завдання систем моніторингу та керування

Це включає в себе комп'ютерні системи і контролери, які отримують дані від датчиків і приймають рішення щодо управління різними контурами.

Системи можуть контролювати підтримку параметрів процесу грохочення в заданих діапазонах. В екстрених ситуаціях система сигналізує про необхідність втручання оператора. Система автоматизації виконує ті ж завдання, що й звичайний персонал, з більшою точністю та швидкістю. Система складається з набору

датчиків, апаратно-програмного комплексу для збору та обробки інформації, що надходить, і формування керуючих сигналів. Системою можна керувати на місці або дистанційно через веб-інтерфейс. Це дозволяє збирати дані, аналізувати та прогнозувати.

1.5.3. Вимоги до видів забезпечення.

- Вимоги до прикладного програмного забезпечення.

ПЗ повинні бути незалежними від типу обчислювальної техніки і операційного середовища. Якість ПЗ і надійність повинна відповідати вимогам для безперервних технологій. Контроль роботи ПЗ повинен здійснюватися за допомогою сигналізації і сповіщень оператору.

d. Вимоги до інформаційного забезпечення.

Данні системи по складу розділені на два типи – на данні, які он-лайн знімаються з датчиків в автоматичному режимі аналізуються в контролерах системи і використовуються для керування виконавчими механізмами, друга частина з них передається в буфер обміну для бази даних підсистеми прогнозування зміни показників пульпи.

Данні з контролерів передаються по мережі контролери – ПК на базі протоколу Profinet. Періоди сканування і передачі даних уточнюватимуть по результатам статистики підприємства або проведенням експериментам.

Бази даних будуть формуватися в сервері підприємства

- Вимоги до лінгвістичного забезпечення.

-. Вимоги до стандартного програмного забезпечення.

Для роботи ПЗ потрібно установити системне програмне забезпечення на ПК - Windows 10 (11), для роботи ПЛК Siemens S7 1200 – TIA-Portal, S7-PLCSIM (v16-18), WINCC Runtime Start,

- Вимоги до технічного забезпечення.

Для контролю параметрів пульпи після дефлокулятора і перед розподільниками грохотів мокрої класифікації ставлять датчики щільності і витрат по одному на кожну групу із 6 грохотів.

Для контролю стану пульпи ставляться датчики залишкової намагніченості на кожний дефлокулятор.

Для контролю сигналів з датчиків і керування виконавчими механізмами застосовується два ПЛК Siemens S7 1200.

- Вимоги до метрологічного забезпечення.

Метрологічне забезпечення здійснюється у формі внутрішніх калібровок на цеховому рівні. Метрологічна атестація системи не проводиться.

Методи оптимізації частоти качання сит грохотів, які будуть досліджуватися:

- Аналіз вібраційних характеристик:

Використання датчиків вібрації для моніторингу та аналізу вібраційних характеристик сит. Це дозволяє виявити оптимальну частоту качання, яка забезпечує максимальну ефективність сепарації та мінімальний знос обладнання.

- Моделювання та симуляція:

Використання комп'ютерного моделювання та симуляції для визначення оптимальних параметрів роботи грохотів. Це дозволяє провести численні експерименти без необхідності зупинки виробничого процесу.

- Автоматичне регулювання частоти:

Впровадження систем автоматичного регулювання частоти качання на основі зворотного зв'язку. Такі системи можуть автоматично налаштовувати частоту качання в залежності від змінних умов роботи, забезпечуючи стабільну продуктивність.

- Оптимізація конструкції сит:

Розробка та впровадження нових конструкцій сит, які дозволяють ефективніше використовувати енергію та знижувати знос. Це може включати використання нових матеріалів та геометричних форм сит.

- Енергетичний аналіз:

Проведення енергетичного аналізу роботи грохотів для визначення оптимальних параметрів частоти качання, які забезпечують мінімальне енергоспоживання при максимальній продуктивності.

Ці методи можуть допомогти вам оптимізувати частоту качання сит грохотів та підвищити ефективність виробничого процесу.

Автоматичне регулювання частоти широко застосовується в різних галузях промисловості для підвищення ефективності та зниження витрат. Ось кілька прикладів:

- Частотні перетворювачі: Вони використовуються для регулювання швидкості обертання електродвигунів. Це дозволяє точно налаштувати роботу двигуна відповідно до потреб конкретного процесу, знижуючи енергоспоживання та підвищуючи продуктивність.

- Регулювання електроприводів: Частотне регулювання електроприводів дозволяє знизити споживання електроенергії, зменшити пускові навантаження та автоматизувати управління виробничими процесами.

Ці приклади демонструють, як автоматичне регулювання частоти може підвищити ефективність та знизити витрати в промисловості.

Автоматичне регулювання частоти використовує різні технології для забезпечення стабільної та ефективної роботи систем:

- Нечітка логіка: Використовується для автоматичного регулювання частоти та потужності в теплових енергоблоках. Ця технологія дозволяє враховувати невизначеності та неточності в системі, забезпечуючи більш точне регулювання.

- Моделювання та симуляція: Використовується для аналізу та оптимізації роботи систем автоматичного регулювання частоти та потужності. Це дозволяє враховувати динаміку групових регуляторів та забезпечувати стабільну роботу енергосистем.

- Програмні комплекси: Використовуються для розробки та дослідження структур систем автоматичного керування режимами електроенергетичних систем. Це дозволяє вдосконалювати структурні схеми та забезпечувати ефективне керування.

Ці технології допомагають забезпечити стабільну та ефективну роботу систем автоматичного регулювання частоти в різних галузях промисловості.

Оптимізація частоти качання сит грохотів може істотно знизити витрати виробництва завдяки кільком ключовим чинникам:

- Енергоефективність: Налаштування оптимальної частоти качання дозволяє значно знизити енергоспоживання. Використання меншої кількості енергії для досягнення того ж результату зменшує витрати на електроенергію, що є важливим чинником у зменшенні загальних виробничих витрат.

- Знос обладнання: Правильне регулювання частоти качання запобігає надмірному зносу сит та інших частин грохотця. Це дозволяє продовжити термін служби обладнання, зменшуючи витрати на заміну та ремонт.

- Оптимізація продуктивності: За допомогою оптимальної частоти качання можна досягти більш ефективного відокремлення частинок, що підвищує продуктивність процесу сепарації. Висока продуктивність дозволяє виробляти більше кінцевого продукту за той самий проміжок часу, що знижує витрати на одиницю продукції.

- Зниження кількості відходів: Ефективне налаштування частоти качання дозволяє мінімізувати втрати матеріалу та зменшити кількість відходів. Зниження витрат на утилізацію відходів та ефективніше використання сировини сприяє зменшенню загальних витрат.

- Підвищення якості продукту: Оптимальна частота качання дозволяє покращити якість кінцевого продукту, що може зменшити кількість браку та повернень. Це забезпечує стабільний дохід та знижує витрати, пов'язані з дефектними продуктами.

Усі ці чинники сприяють зниженню загальних витрат виробництва та підвищенню ефективності процесу.

Висновок за розділом

Мета і задачі проекту

Мета – забезпечення планової продуктивності секції і отримання більш якісного концентрату за рахунок підвищення ефективності процесу тонкої класифікації пульпи перед фільтрацією при мінімальних витратах сировини, куль для подрібнення, електроенергії, технічної води та інших матеріалів.

Задачі:

1. Розробка автоматичної системи керування параметрами грохотів тонкого грохочення в умовах змінних входних параметрів пульпи, корекція алгоритмів керування:

1.1 Визначення параметрів регуляторів частоти коливання сит в умовах змінних входних параметрів пульпи і витрат надрешітної і підрешітної пульпи, корекція алгоритмів керування.

1.2 Визначення параметрів регуляторів подачі води в зумпф №2 в умовах змінних входних параметрів пульпи і витрат надрешітної і підрешітної пульпи, корекція алгоритмів керування. Регулювання частоти качання сит є критично важливим для досягнення ефективного процесу сепарації рудної пульпи. Ось кілька причин, чому це важливо:

1. Підвищення ефективності сепарації: Оптимальна частота качання забезпечує кращу відділення твердих частинок від рідини, що дозволяє отримати більш чисті концентрати та покращує якість готового продукту.

2. Запобігання засміченню - під час роботи грохоту частинки можуть налипати на сита, що призводить до зниження продуктивності. Регулювання частоти качання допомагає уникнути засмічення та забезпечує безперебійну роботу грохоту.

3. Енергозбереження - оптимизована частота качання дозволяє зменшити енергоспоживання, що важливо для зниження витрат на виробництво та підтримання екологічної стійкості.

4. Правильне регулювання частоти качання допомагає знизити знос сит та інших компонентів грохоту, що продовжує термін служби обладнання та зменшує витрати на ремонт і обслуговування.

5. Регулювання частоти качання дозволяє краще контролювати розмір частинок у кінцевому продукті, що є важливим для відповідності вимогам ринку та стандартам якості.

Таким чином, автоматичне регулювання частоти качання сит, дозволяє підвищити ефективність виробничого процесу, знизити витрати та покращити якість кінцевого продукту.

Оптимізація частоти качання сит грохотів може істотно знизити витрати виробництва завдяки кільком ключовим чинникам:

1. Енергоефективність;
2. Зменшено знос обладнання;
3. Оптимізація продуктивності;
4. Зниження кількості відходів;
5. Підвищення якості продукту

Усі ці чинники сприяють зниженню загальних витрат виробництва та підвищенню ефективності процесу.

РОЗДІЛ 2

ІДЕНТИФІКАЦІЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТА СИНТЕЗ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ

2.1 Функціональна схема керування грохотом по технології мокрого грохочення для залізорудної пульпи

Основні принципи роботи

Мокре грохочення залізорудної пульпи на грохотах Derrick базується на поєднанні високочастотної вібрації та гідравлічного розділення частинок. Технологія забезпечує ефективне розділення матеріалів розміром від 38 мкм до 6 мм. Таке грохочення ефективне для розділення тонких фракцій залізорудної пульпи. Вода сприяє кращому проходженню частинок через отвори сита та запобігає засміченню.

Завдяки дослідженням спеціалістів ГЗК, та науковцям КНУ було прийнято рішення по застосуванню цих грохотів з характеристиками, що наведені нижче. Вони можуть змінюватись в залежності від змін навколишніх умов, але в характеристиках апаратів вказані обмежуючі параметри.

Це рішення сприяло підвищенню виробництва по готовій продукції та економії витрат на електроенергію.

Технічні особливості

- Модель Derrick Stack Sizer: до 5 ярусів сит, високочастотна вібрація від двигунів з ексцентриком з оборотами -1500 об/хв
- Мокре грохочення: врахування витрат води на репульпацію
- Поліуретанові сита: висока зносостійкість, не засмічуються
- Точність розрахунків: ефективність 60-95%, розділення до 38 мкм
- Параметри для моделювання

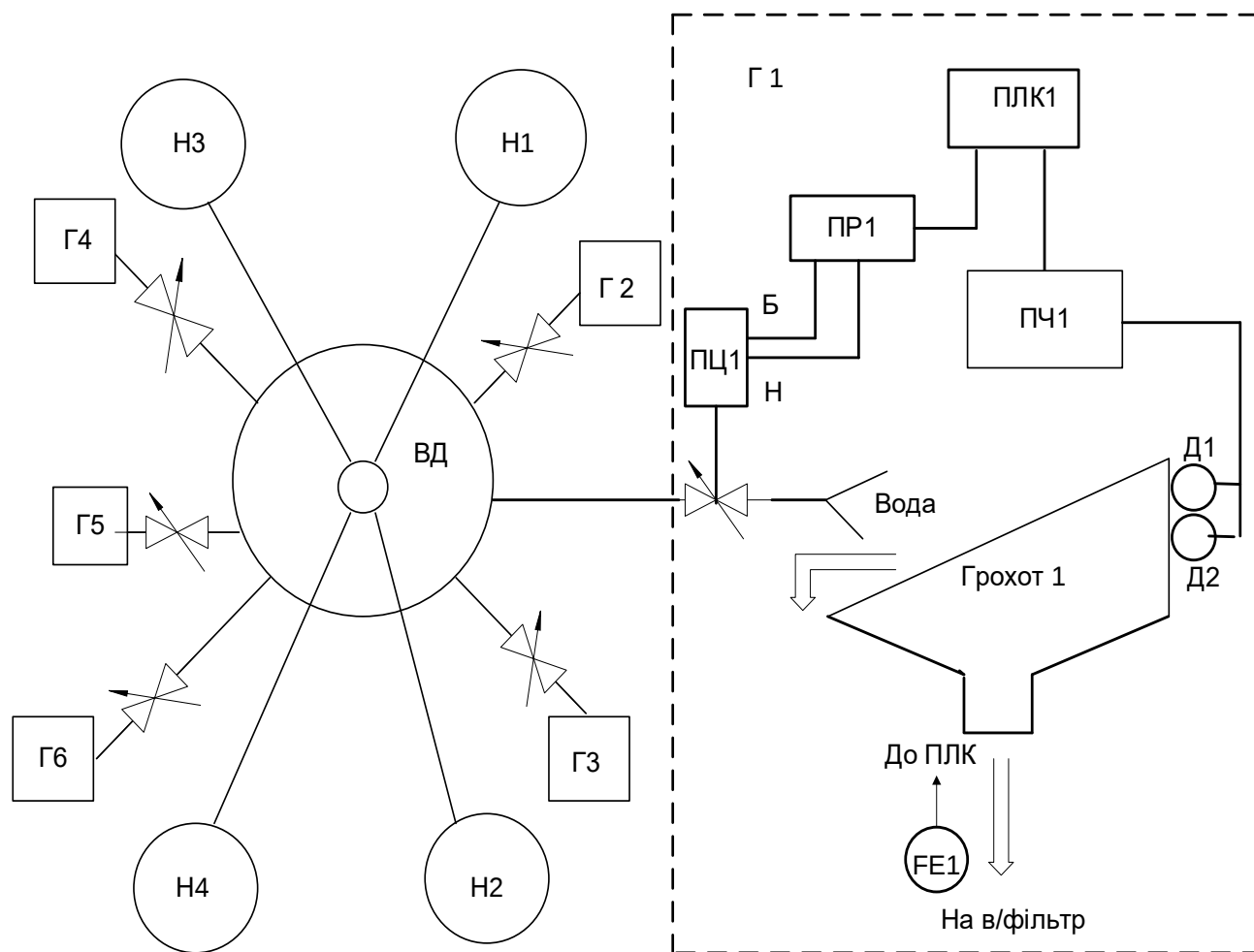
- Продуктивність пульпи: 100-800 м³/год
- Вміст твердої фази: 15-50%
- Розмір отворів сита: 0.038-2.0 мм
- Площа сита: 3.6-5.4 м²
- Маса ексцентрика: 13,61 кг
- Напруга живлення двигуна: 460В±10%
- Потужність двигуна: 1,37 кВт (2 шт)
- Кут нахилу сит: 22,5° (можна змінювати від 15° до 25°)
- Статичне навантаження: 4990 кГ
- Динамічне навантаження: 203 кГ
- Багатоярусні грохоти
- Derrick Stack Sizer мають до 8 ярусів сит, що працюють паралельно, забезпечуючи високу продуктивність при компактних розмірах.
- Поліуретанові сита
- Сита з поліуретану мають високу зносостійкість і не засмічуються, що забезпечує стабільну роботу грохота.

Бачимо що грохоти не обмежуються кількістю дек до восьми.

Для означення кількості апаратів та пристрої їх взаємодії, функціонального призначення приведемо схему на рис.2.1.

На рисунку 2.1 показаний тільки фрагмент технологічної схеми ланцюгів апаратів живлення водою грохотів Г1- Г6 насосами Н1- Н4 з водозбірника ВД (Повну схему автоматики дивись рис.1.6). Також на схемі 2.1 наведена функціональна схема керування грохотом Г1 по каналу щільність пульпи – частота вібрації рами з п'ятьма деками сит від збудників Д1, Д2. Регулювання частоти цими вібродвигунами Д1, Д2 здійснюється за рахунок САУ з ПЛК та перетворювача частоти ПЧ.

Для управління швидкістю спрацювання пневмопривода застосуємо дроселі і зворотні клапани. Керування швидкості штоку циліндра зробимо на лінії виходу. Тоді в приводі рівень тиску буде вищим, ніж при дроселюванні в лінії нагнітання.



ВД – водоподільник, ПР1 - пневморозподільник, ПЦ1 - пневмоциліндр,
FE1 – датчик витрат, ПЧ – перетворювач частоти

Рисунок 2.1 – Функціональна схема системи керування частоти коливання рами з деками сит, та автоматичної подачі води в грохот

Для управління швидкістю спрацювання пневмопривода застосуємо дроселі і зворотні клапани. Керування швидкості штоку циліндра зробимо на лінії виходу. Тоді в приводі рівень тиску буде вищим, ніж при дроселюванні в лінії нагнітання.

Система автоматичного керування пневмопривода (одного з шести) виконавчих органів представлена на рис.2.2.

В якості виконавчого механізму використовується пневматичний циліндр з пристроєм керування

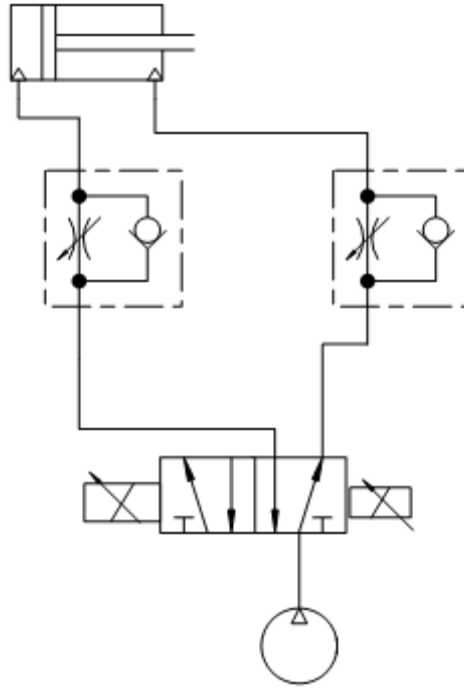


Рисунок 2.2 - Схема пневмопривода клапана подачі води в грохот

Як видно зі схеми рис. 2.2, для керування пневмоприводом застосовується повітря з мережі стисненого повітря цеха.

2.2 Створення моделі роботи грохота в діапазоні його технічних можливостей і вимог технології збагачення

Створимо інтерактивний інженерний калькулятор

- Розрахунок продуктивності: автоматичний розрахунок продуктивності грохота на основі вихідних параметрів

- Аналіз ефективності: оцінка ефективності грохочення залежно від розміру частинок і отворів сита
- Візуалізація процесу: анімована демонстрація руху частинок через грохот
- Графічний аналіз: інтерактивні графіки залежності ефективності від параметрів

Технічні особливості

- Модель Derrick Stack Sizer: до 8 ярусів сит, високочастотна вібрація 1500-3000 об/хв
- Мокре грохочення: врахування витрат води та репульпації
- Поліуретанові сита: висока зносостійкість, не засмічуються
- Точність розрахунків: ефективність 60-95%, розділення до 38 мкм

Початкові параметри для моделювання

- Продуктивність пульпи: 100-800 м³/год
- Вміст твердої фази: 15-50%
- Розмір отворів сита: 0.038-2.0 мм
- Площа сита: 3.6-5.4 м²

Інтерфейс реалізовано в сучасному дизайні з адаптивною версткою, інтерактивними елементами та професійною візуалізацією даних. Всі розрахунки базуються на реальних інженерних формулах, використовуваних у гірничодобувній промисловості.

Математичне забезпечення

1. Продуктивність грохота

$$Q = q_0 \times F \times K_1 \times K_2 \times K_3 \times K_4 \quad 2.1$$

де: Q - продуктивність (т/год)

q_0 - базова продуктивність (т/год/м²)

F - площа сита (м²)

K_1 - коефіцієнт розміру отворів

K_2 - коефіцієнт частоти вібрації

K_3 - коефіцієнт відкритої площі

K_4 - коефіцієнт вмісту твердої фази

2. Ефективність грохочення

$$E = (m_{(u)} / m_{(f)}) \times 100\%$$

2.2

де: E - ефективність грохочення (%)

$m_{(u)}$ - маса підрешетного продукту (т)

$m_{(f)}$ - маса питання (т)

3. Границя розділення

$$d_{50} = a \times (\rho_s / \rho_l)^{0.5} \times (1 - C_v)^{0.2}$$

2.3

де: d_{50} - границя розділення (мкм)

a - розмір отворів сита (мм)

ρ_s - щільність твердих частинок (т/м³)

ρ_l - щільність рідини (т/м³)

C_v - об'ємна концентрація твердої фази

4. Витрата води

$$Q_v = Q_s \times (W/R - C_v / (1 - C_v))$$

2.4

де: Q_v - витрата води (м³/год)

Q_s - продуктивність по твердій фазі (т/год)

W/R - відношення води до руди

C_v - об'ємна концентрація твердої фази

Застосовуючи це математичне забезпечення роботи мокрого грохоту в системі керування його роботою можна обраховувати з кожним циклом, при зміні технологічних параметрів мокрої класифікації, вихідні данні з грохоту.

При цьому розрахунки проводяться на основі початкових та плинних параметрів моделі, які показані в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 - Параметри моделі роботи об'єкту керування з пульпою

Параметр	Позначення	Одиниці	Діапазон значень	За замовчуванням
Продуктивність (пульпа)	Q_p	м³/год	100-800	300
Вміст твердої фази	C_v	%	15-50	35
Щільність частинок	ρ_s	т/м³	3.5-5.5	4.8
Розмір частинок у питанні	$d(f)$	мм	0.1-10	2.0
Розмір отворів сита	a	мм	0.038-2.0	0.1
Площа сита	F	м²	1.6-5.4	5.4
Відкрита площа сита	A_o	%	20-45	32
Частота вібрації	f	об/хв	1000-3000	1500

Ці розрахунки закладені в алгоритми роботи програмного та апаратного забезпечення системи керування роботою процесу класифікації на основі мокрих грохотів Derrick та апаратів автоматизації цих процесів (промислових контролерів, датчиків, виконавчих механізмів).

Розрахунок

Крок 1: Визначення базової продуктивності

Базова продуктивність грохота визначається залежно від розміру отворів сита та типу матеріалу. Для залізорудної пульпи використовується наступна таблиця:

Таблиця 2.2 – Відповідність розміру отвору базовій продуктивності

Розмір отворів, мм	Базова продуктивність q_0 , т/год/м ²
0.038-0.075	0.5-1.2
0.075-0.15	1.2-2.5
0.15-0.3	2.5-4.0
0.3-0.6	4.0-6.5
0.6-1.2	6.5-10.0
1.2-2.0	10.0-15.0

Крок 2: Розрахунок коефіцієнтів

Коефіцієнт розміру отворів (K_1):

$$K_1 = (a / 0.1)^{0.3}$$

де a - розмір отворів сита в мм

Коефіцієнт частоти вібрації (K_2):

$$K_2 = \sqrt{(f / 1500)}$$

де f - частота вібрації в об/хв

Коефіцієнт відкритої площі (K_3):

$$K_3 = A_0 / 32$$

де A_0 - відкрита площа сита в %

Коефіцієнт вмісту твердої фази (K_4):

$$K_4 = (35 / C_v)^{0.2}$$

де C_v - вміст твердої фази в %

Крок 3: Розрахунок ефективності

Ефективність грохочення залежить від співвідношення розміру отворів сита до розміру частинок у питанні:

$$E = 85 + 15 \times (a/d_f - 0.1) / 0.9$$

де E обмежується діапазоном 60-95%

Рішення при зміні параметрів

Приклад 1: Первинне грохочення залізорудної пульпи

Умови:

- Продуктивність по пульпі: 300 м³/год
- Вміст твердої фази: 35%
- Розмір отворів сита: 0.15 мм
- Необхідна ефективність: >85%

Розрахунок:

$$Q = 2.5 \times 5.4 \times 1.14 \times 1.0 \times 1.0 \times 1.0 = 15.4 \text{ т/год}$$

Продуктивність грохота складе 15.4 т/год при ефективності 87%

Приклад 2: Вторинне грохочення для фінішного продукту

Умови:

- Продуктивність по твердій фазі: 50 т/год
- Розмір отворів сита: 0.075 мм
- Вимоги до ефективності: >90%

Розрахунок:

$$\text{Необхідна площа сита: } F = 50 / (1.2 \times 0.87 \times 1.12 \times 1.0 \times 1.0) = 42.8 \text{ м}^2$$

Потрібно встановити 8 грохотів площею 5.4 м² кожен

Таким чином аналогічно

2.3 Фрагменти програми моделювання роботи мокрого грохота

Приведемо декілька фрагментів моделювання мокрого грохота. На рисунку 2.3 показаний фрагмент початку роботи моделі грохота, де вводяться вхідні параметри.

```
<h1><i class="fas fa-industry"></i> Моделювання мокрого грохота Derric</h1>
<p>Інтерактивний калькулятор для розрахунку параметрів мокрого грохочення
залізородної пульпи</p>
</div>
<div class="main-grid">
  <div class="card">
    <div class="card-header">
      <i class="fas fa-cogs"></i>
      <h2>Параметри пульпи</h2>
    </div>
    <form id="pulpForm">
      <div class="form-group">
        <label for="feedRate">Продуктивність по пульпі</label>
        <div class="input-unit">
          <input type="number" id="feedRate" value="300" min="1" max="1000" step="1"/>
          <span class="unit">м3/год</span>
        </div>
      </div>
      <div class="form-group">
        <label for="solidContent">Вміст твердої фази</label>
        <div class="input-unit">
          <input type="number" id="solidContent" value="35" min="10" max="60" step="1"/>
          <span class="unit">%</span>
        </div>
      </div>
    </form>
  </div>
</div>
```

Рисунок 2.3 Фрагмент початку роботи моделі грохота

На рисунку 2.4 показаний фрагмент результатів роботи моделі грохота, де виводяться вихідні параметри (приклад 1).

```
<h2>Результати розрахунку</h2>
</div>
<div class="results-grid">
  <div class="result-item">
    <div class="result-value" id="capacity">-</div>
  </div>
</div>
```

```

    <div class="result-label">Продуктивність, т/год</div>
  </div>
  <div class="result-item">
    <div class="result-value" id="efficiency">-</div>
    <div class="result-label">Ефективність, %</div>
  </div>
  <div class="result-item">
    <div class="result-value" id="undersizeFlow">-</div>
    <div class="result-label">Підрешетний потік, т/год</div>
  </div>
  <div class="result-item">
    <div class="result-value" id="oversizeFlow">-</div>
    <div class="result-label">Надрешетний потік, т/год</div>
  </div>
  <div class="result-item">
    <div class="result-value" id="waterConsumption">-</div>
    <div class="result-label">Витрата води, м³/год</div>
  </div>
  <div class="result-item">
    <div class="result-value" id="separationSize">-</div>
    <div class="result-label">Границя розділення, мкм</div>
  </div>

```

Рисунок 2.4 Фрагмент результатів роботи моделі грохота (приклад 1)

На рисунку 2.5 показаний фрагмент результатів роботи моделі грохота, де виводяться вихідні параметри (приклад 2).

```

    <p>Виконується розрахунок...</p>
  </div>
</div>

```

```

<div class="results" id="results" style="display: none;">
  <div class="card-header">
    <i class="fas fa-chart-bar"></i>
    <h2>Результати розрахунку</h2>
  </div>
  <div class="results-grid">
    <div class="result-item">
      <div class="result-value" id="capacity">-</div>
      <div class="result-label">Продуктивність, т/год</div>
    </div>
    <div class="result-item">
      <div class="result-value" id="efficiency">-</div>
    </div>
  </div>

```

```

    <div class="result-label">Ефективність, %</div>
  </div>
  <div class="result-item">
    <div class="result-value" id="undersizeFlow">-</div>
    <div class="result-label">Підрешетний потік, т/год</div>
  </div>
  <div class="result-item">
    <div class="result-value" id="oversizeFlow">-</div>
    <div class="result-label">Надрешетний потік, т/год</div>
  </div>
  <div class="result-item">
    <div class="result-value" id="waterConsumption">-</div>
    <div class="result-label">Витрата води, м³/год</div>
  </div>
  <div class="result-item">
    <div class="result-value" id="separationSize">-</div>
    <div class="result-label">Границя розділення, мкм</div>
  </div>
</div>
</div>

```

Рисунок 2.5 Фрагмент результатів роботи моделі грохота (приклад 2)

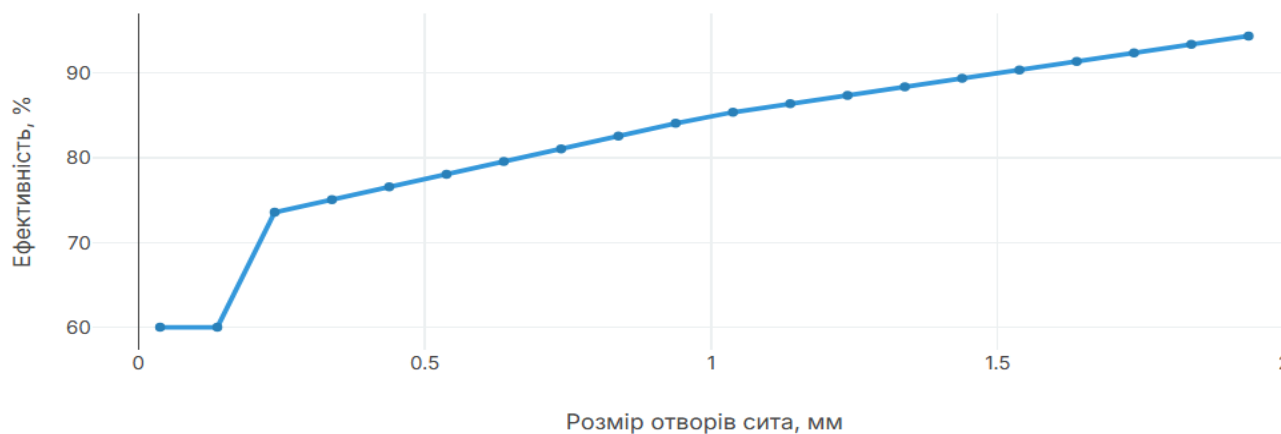


Рисунок 2.6 - Залежність ефективності від розміру отворів сита

На рис. 2.6 показана отримана залежність фрагменту результатів роботи моделі грохота (приклад 2)

Користуючись цією залежністю можна обирати тип сита деки грохота та узгоджувати її роботи з фізико – хімічними властивостями пульпи та загальної руди, що поступає на секцію збагачення. З вибором типу сита, відповідно змінюються параметри системи керування приводом грохоту.

Результати моделювання роботи грохота для прикладу 2:

Продуктивність	-13,5 т/год
Ефективність	- 60,0 %
Підрешітний потік	- 97,2 т/год
Надрешітний потік	- 64,8 т/год
Витрати води	- 408,0 м ³ /год
Границя розділення	- 76 мкм

2.4 Подача води на грохот

Автоматизоване керування процесу класифікації у більшості випадків розглядають тільки з процесами фільтрації та подрібнення, які націлені на виконання однієї наскрізної і кінцевої мети отримання якісного вихідного товарного продукту, а в нашому випадку класифікації – зневоднення - подрібнення. Особливо у випадку, коли включені в лінію такі механізми, як млини, що знаходяться у взаємному циклі, тобто коли необхідно врахування циклового навантаження.

Для покращення умов класифікації використовується багато відповідних принципів управління. Звичайний підхід до систем керування насосів, які подають пульпу в грохот, не дозволяє обрати оптимальну продуктивність насоса, яка адекватна витраті пульпи в процесі класифікації. Тому, як правило, зазвичай обирають насоси із дуже завищеною продуктивністю, це призводить до коливань рівня витрати підрешітного продукту, а це веде до погіршення якості вихідного продукту. Тому необхідна система автоматичного керування роботою клапанів подачі води в грохот.

Управління комплексом ділянки фільтрації - подрібнення виконується наступним чином окремо (дискретно) подача пульпи і води на форсунки мокрого грохота.

Стабілізація витрат пульпи ($F_T = \text{const}$) шляхом зміни витрати води в зумпф ($F_T = \text{var}$), як на вітчизняних так і закордонних РЗФ. Такі системи управління є

дискретними прості і найменш інерційні. Така система (САР 1, рис.2.7) містить датчик рівня і регулятор рівня, що впливає на регулюючий клапан трубопроводу, по якому подається вода в мокрий грохот і на млин.

Регулювання витрати води в зумпф для підтримки рівня пульпи в ньому викликає зайві коливання густини живлення грохоту. Тому доцільно застосувати систему стабілізації густини живлення грохоту зміною положення клапану і живильника вихідної руди. Застосування цих двох дій управління можна досягти бажаних результатів компенсації нестабільних фізико-механічних характеристик руди, більше в усталених режимах.

Велике значення для кінцевої якості збагачення має гранулометричний склад пульпи у підрешітному зливі грохота. Подальші принципи управління циклом класифікації – фільтрації - подрібнення засновані на використанні прямої або розрахункової інформації про кількісний і гранулометричний склад пульпи у підрешітному продукті грохота.

Стабілізація густини підрешітного продукту грохоту ($\delta_{\text{гп}} = \text{const}$) зміною витрати води в зумпф насоса ($W_z = \text{var}$). Густина пульпи, у цьому випадку, оцінюється, в певній мірі, як непрямий показник мілкої прохідної фракції зливу грохота. Цей принцип часто застосовується на вітчизняних і зарубіжних РЗФ завдяки простоті апаратної реалізації та можливості доведення складу пульпи, що надходить на технологічні апарати.

Принципи роботи датчиків щільності в автоматичних системах (САР 2, рис.2.8) на фабриках використовуються як радіоактивні густиноміри, так і вагові.

Стабілізація витрати нижнього класу пульпи грохоту ($C_{x_{\text{г}}} = \text{const}$) регулюванням витрати води в зумпф насоса грохоту ($W_{\text{г}} = \text{var}$) з використанням прямої інформації про сигнал датчика мілкої фракції.

В системі регулювання (САР 3, рис. 2.8) сигнал датчика мілкої фракції прохідної частини пульпи крізь проходження сітки зливу грохота використовує

регулятор мілкої фракції, який впливає на регулюючий клапан трубопроводу, що подає воду на форсунки репульпації грохота.

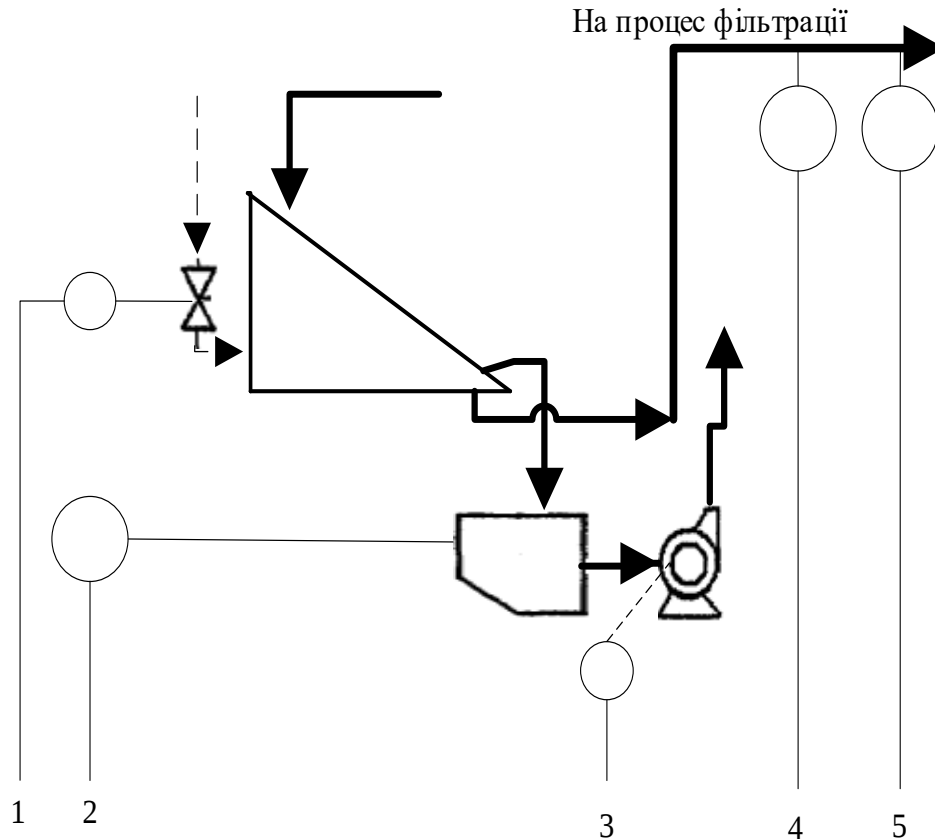


Рисунок 2.7-Схема автоматизації подачі води і пульпи у грохот

Рисунки 2.7, 2.8 - прийнято наступні позначення. 1а, 1б (не показаний) - датчики рівня; 1в, 3в - вторинні прилади; 1г, 3г, 2г - регулятори; 2а, 2б, 2в - джерело, приймач і обробка інформації густиноміра; 3а, 3б - датчик гранулометра; 1д, 2д, 3г - магнітний пускач; 1е - виконавчий механізм.

Для цієї роботи заплановано додаткове встановлення м'яких датчиків, тобто параметри не заміряються а розраховуються.

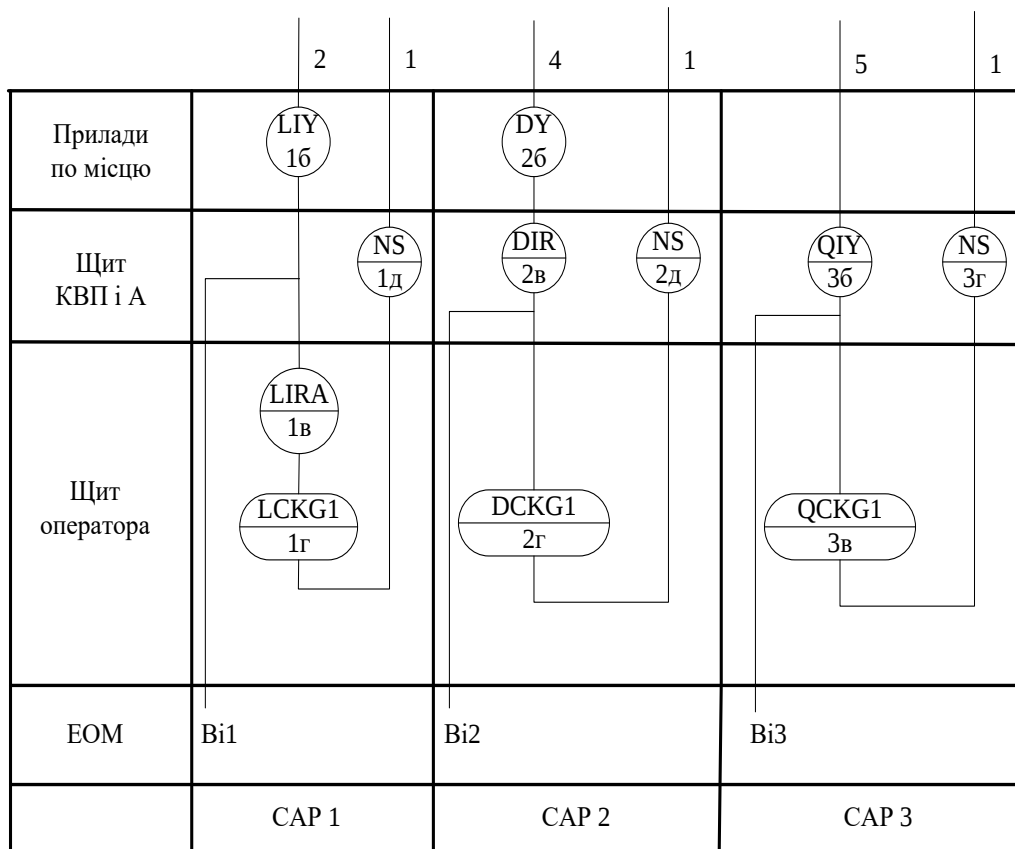


Рисунок 2.8-Схема автоматизації розділення у гідроциклоні, що реалізує принципи керування подачею технологічної води (Реалізація CAP)

В процесі автоматизації комплексу мокрого грохочення вирішуються наступні функції: контроль стану обладнання; контроль технологічних даних комплексу (параметрів пульпи, що надходить на грохот - об'ємної витрати, густини, гранулометричного складу; витрат води в грохот, рівнів пульпи в зумпфах); їх регулювання; оптимізація технологічного комплексу грохотів мокрої класифікації.

Технологічним параметром, що в основному характеризує якість процесу мокрої класифікації і використовується для контролю і регулювання процесом, служить мілка фракція гранулометричного складу пульпи.

Метою управління технологічною лінією мокрої класифікації є максимізація продукту мілкої фракції концентрату при обмеженнях на його якість і втрати з відходами.

$$Q_k \rightarrow \max; \beta_1 \leq \beta \leq \beta_2; \vartheta \leq \vartheta_{\text{доп}} \quad (2.5)$$

де Q_k – витрати технологічної лінії по мілкій фракції концентрату, β_1 і β_2 – верхній та нижній рівні вмісту заліза, $\vartheta_{\text{доп}}$ – нормований на підприємстві вміст його у хвостах.

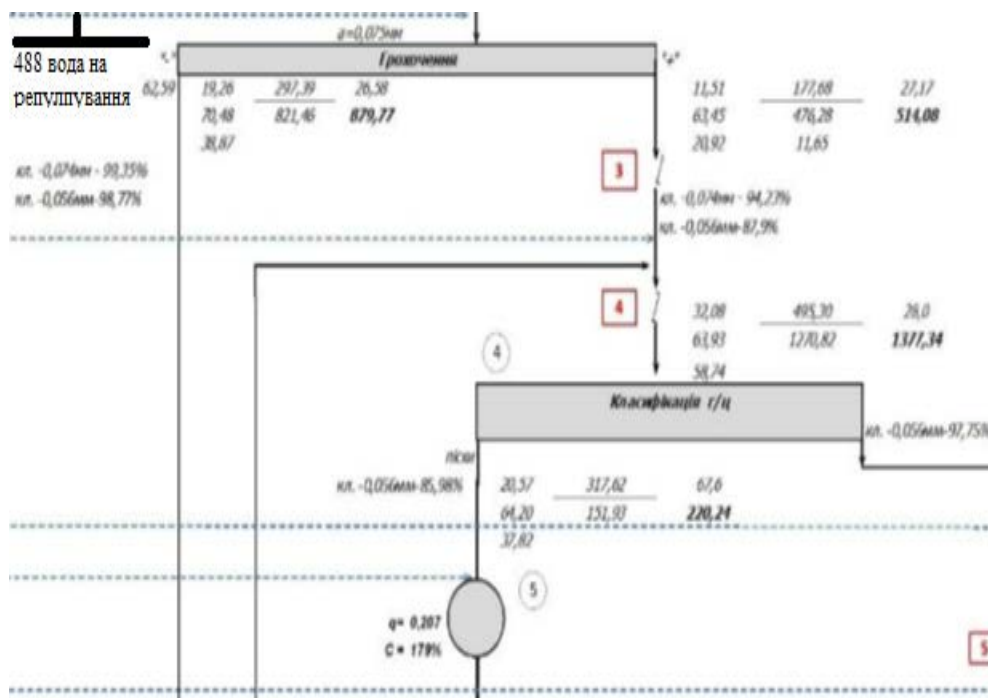


Рисунок 2.9 – Фрагмент існуючої схеми ланцюга апаратів подачі пульпи і води на грохоти

Для підтримки оптимального режиму технологічного процесу передбачений постійний контроль і випробування продуктів технологічної схеми, стану технологічного обладнання.

Для контролю роботи технологічної лінії по виробництву концентрату для окотків DRI передбачений:

- контроль витрати води для технологічних цілей в наступні вузли: вода в дешламатори, вода в технологічні зумпфи, вода в пульпо розподілювачі, вода в млини;

- постійний контроль щільності в наступних операціях: розвантаження пісків дешламаторів (датчик гідростатичного рівня з перерахунком на масову частку твердого), живлення грохотів, живлення вакуум-фільтрів «Бакор», надрешітного продукту грохотів, що надходить на секцію №18, магнітного продукту ММС, що повертається з секції №18, живлення магнітної сепарації 18 секції, зливу г / ц;

- постійний контроль обсягу пульпи: надрешітного продукту грохотів, що надходить на секцію №18; магнітного продукту ММС, що повертається з секції №18, живлення грохотів, підрешітного продукту грохотів, живлення на пульпо розподілювачі вакуум-фільтрів «Бакор»;

- постійний контроль рівня пульпи в зумпфах;
- постійний контроль тиску на вході в гідроциклони;
- постійний контроль (індикатори наявності) заліза магнетиту в потоці на зливах дешламаторів МД-12, хвостовому жолобі секції №18. Інформація виводиться в операторські відповідних відділень і в центральну операторську;
- постійний контроль заліза магнетиту (індикатори наявності) на магістральних конвеєрах ЗФ-8, ЗФ-9, що подають концентрати на склад;
- постійний контроль споживаної потужності млинами.

Для контролю якісних показників передбачається ручний і автоматичний пробо відбір продуктів з подальшою обробкою і аналізом проб в центральній лабораторії підприємства:

- контроль масової частки заліза загального в живленні грохотів, магнітному продукті ММС II прийому секції №18, із застосуванням ручного відбору;
- контроль масової частки заліза загального та заліза магнетиту із застосуванням автоматичного пробо відбору на хвостовому жолобі секції №18;
- контроль масової частки кл. - 0,056мм в живленні грохотів, зливів г / ц, підрешітному продукті грохоту із застосуванням ручного відбору проб;

- контроль масової частки заліза загального, масової частки SiO_2 , масової частки класу мінус 0,056мм, масової частки вологи, питомої поверхні в концентраті А0 після фільтрування із застосуванням ручного пробо відбору;

- контроль масової частки заліза загального, масової частки кл. - 0,056мм, масової частки вологи, питомої поверхні із застосуванням ручного пробовідбору в концентраті А2 після фільтрування.

Об'єкти контролю:

- параметри продуктів збагачення, пульпи, якості вихідної та кінцевої продукції, відвальних хвостів (хімічний склад, крупність, щільність і т.д.);

- параметри роботи технологічного обладнання (величина робочого зазору і кут нахилу магнітної системи сепараторів, рівень магніту магнітних дешламаторів, заповнення млинів тілами, щомелють, швидкісні режими, розміри насадок гідроциклонів та ін.);

- комплектність обладнання та схем;

- комплектність схем і апаратів контролю та регулювання.

Інформація по всіх вимірах і аналізах, яка використовується для оперативного контролю технології, надходить диспетчеру фабрики.

Схема ланцюга апаратів лінії виробництва концентрату для окатків DRI з використанням технології тонкого грохочення та зневоднення концентратів

Концентрат технологічних секцій №8-17 гідротранспортом надходить в відділення зневоднення концентрату з корпусу збагачення. Пульпа надходить на 5-ти струменевий пульпо розподільник, який встановлений на відм. + 10,400 в осях 33-34, далі чотири потоки мають можливість надходити на дешламатори типу МД-12 №11, 12, 21, 22, осі 32-36 і один потік в двох струменевий

Пульпо розподільник на відм. + 2,400 в осях 31-32. Штатна схема передбачає, що пульпа надходить з 5-ти струменевого пульпо розподільника на дешламатори МД-12 №11, 12.

При надходженні обсягу концентрату понад пропускної здатності дешламаторів МД-12 №11, 12, 21, 22, даний обсяг з пульпо розподільника, минаючи знешламлення, надходить в двох струменевий пульпо розподільник і далі в зумпф насосів 1-4«К», в осях 32-33.

Після дешламаторів згущений продукт надходить в пульпо розподільник на відм. +0,100, в осях 32-33 звідки двома потоками надходить в зумпф насосів 1-2«К» та 3-4«К», розділений на дві частини.

Концентрат із зумпфа насосів 1-2«К» та 3-4«К» насосами по двом окремим трубопроводам, на кожному з яких встановлена розмагнічуюча котушка, подається на два шести струменевих пульпо розподільника на відм. +12,950, в осях 40-43. Кожен пульпо розподільник живить шість грохотів тонкого грохочення, в осях 39-44.

Схема ланцюга апаратів тонкого грохочення концентрату технологічних секцій.

На грохотах Derrick 2SG48-60R-5STKStackSizer™ концентрат секцій ділиться на підрешітний і надрешітний продукти.

Надрешітний продукт грохотів є промпродуктом, який прямує в зумпф №1 звідки насосами типу 10/8MV-II-(6)-705L-100-PET перекачується в пульпо розподільник розташований на секції №18 корпусу збагачення (відм. + 2,200, осі 94-95).

Підрешітний продукт надходить в зумпф №8 звідки насосами тип 10/8MV-II-(6)-705L-100-PET подається в трьохструменевий пульпорозподільник FD, в осях 35-36, з якого основний потік прямує в магнітний дешламатор типу МД-12 №31, а два резервних потоки - в магнітні дешламатори типу МД-12 №21 і №11 для згущення та подальшого фільтрування.

Режим роботи і технологічні показники грохоту типу Derrick 2SG48-60R-5STKStackSizer™ представлені в таблиці 2.3

Таблиця 2.3 - Режим і технологічні показники роботи грохоту
Derrick 2SG48-60R-5STKStackSizer™ (після наладки)

№ п/п	Найменування основних параметрів і розмірів	Одиниці виміру
1	Кількість дек, шт.	5
2	Розмір отворів сита просіючої поверхні, мм	0,075
3	Кут нахилу деки, град	20°
4	Частота вібрації деки, Гц	40÷55
5	Щільність в вихідному живленні грохоту, г/л %	1450÷1800 43÷58
6	Масова частка кл.-0,056мм в вихідному живленні, %	94,0÷97,5
7	Масова частка Fe заг. в вихідному живленні, %	67,4-68,6
8	Масова частка SiO ₂ в вихідному живленні, %	3,8÷5,0
9	Масова частка Fe заг. в підрешітному продукті, %	69,5÷70,5
10	Масова частка SiO ₂ в підрешітному продукті, %	2,1-2,8
11	Продуктивність в вихідному живленні на деку, т/год м ³ год	7÷14 6÷8
12	Масова частка кл. -0,056 в підрешітному продукті, %	98÷99

Схема ланцюга апаратів збагачення надрешітного продукту тонкого грохочення на секції №18

Схема ланцюга апаратів збагачення надрешітного продукту тонкого грохочення на секції №18 наведена на схемі рис1.5, 1.6, 2.9.

Надрешітний продукт грохотів тонкого грохочення перекачується в пульпозподільник розташований на секції №18 корпусу збагачення (відм. +2,200,

осі 94-95). Даний пульпорозподільник призначений для роботи і в аварійному режимі, при необхідності, частина продукту спрямовується на секцію №17, щоб забезпечити безперервну роботу технології доведення концентрату. З двох струменевого пульпо розподільника промпродукт самопливом поступає в розділені зумпфи насосів №181-182 та №183-184, звідки перекачується насосами типу 10/8MV-II-(6)-750R-100-PET по двом незалежним лініям на дві встановлені батареї типу Multotec HC350-15-1/A-AJ45c/w full180 HDPE OE (відм. +9,500, в осях 95-98) з 6 гідроциклонами діаметром 350 мм (5 робочих і 1 резервний), які працюють в замкненому циклі з кульовими млинами з центральним розвантаженням типу МШЦ 3,6×5,0.

2.5 Моделювання процесів керування в MatLab

Послідовність створення моделі

1. Моделювання процесу

- Створити модель грохота як нелінійну коливальну систему
- Врахувати вплив маси пульпи, частоти вібрацій, кута нахилу

2. Розробка алгоритму керування

- Ціль: оптимізувати класифікацію частинок (наприклад, за розміром <0.5 мм)
- Метод: адаптивне керування частотою вібрацій залежно від потоку пульпи
- Контролер: реалізувати ПІД в SCL/ladder

3. Інтеграція частотного перетворювача

- Використати PROFINET або USS/MODBUS RTU для зв'язку з SINAMICS
- Налаштувати параметри: ramp-up/down, max/min frequency, fault handling

4. HMI/SCADA

- Створити екрани для:
- Вибору режиму класифікації
- Моніторингу частоти, струму, температури
- Аварійної сигналізації та журналу подій

5. Тестування в PLCSIM Advanced

- Симуляція сигналів сенсорів
- Перевірка логіки керування
- Візуалізація на HMI

Визначимо основні компоненти моделі

Таблиця 2.4 - Основні компоненти моделі

Компонент	Модель	Призначення
PLC	Siemens S7-1212	Логіка керування
Частотник	SINAMICS G120	Керування вібродвигуном
HMI	KTP700 / WinCC Unified	Візуалізація
PC	ПК з TIA Portal	Програмування, SCADA
Сенсори	IFM, Sick, Siemens	Вібрація, витрата, рівень

Побудова математичної моделі грохота для подальшої реалізації в MATLAB або TIA Portal. Оскільки ми працюємо з вібродвигуном грохота Derrick для класифікації залізорудної пульпи, модель має враховувати динаміку коливань, масу пульпи, вплив частоти та амплітуди вібрацій.

1. Фізична модель грохота

Грохот можна змодельовати як двомасову систему з пружинами та демпферами, де:

- Маса m_1 — рама грохота

- Маса m_2 — пульпа на ситі
- Пружина k — еластичність підвісу
- Демпфер c — в'язке тертя
- $F(t)$ — збурення від вібродвигуна (гармонічне або імпульсне)

2. Диференціальні рівняння руху мас

Система рівнянь другого порядку:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + c(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k(x_1 - x_2) = F(t) \\ m_2 \ddot{x}_2 + c(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k(x_2 - x_1) = 0 \end{cases}$$

Або в другому вигляді:

$$m_1 \ddot{x}_1 + c(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k(x_2 - x_1) = F(t)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 + c(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k(x_2 - x_1) = 0$$

де:

- $(x_1(t))$ — переміщення рами
- $(x_2(t))$ — переміщення пульпи
- $(F(t) = A \sin(\omega t))$ — гармонічна сила від вібродвигуна

3. Реалізація процесу в MATLAB

```
function dxdt = grohot_model(t, x)
```

```
% Параметри
```

```
m1 = 100; % кг
```

```
m2 = 50; % кг
```

```
k = 1000; % Н/м
```

```
c = 50; % Н·с/м
```

```
A = 500; % Амплітуда збурення
```

```
omega = 2*pi*30; % Частота вібрацій (30 Гц)
```

```

% Стан:  $x = [x1; x2; v1; v2]$ 
x1 = x(1); x2 = x(2);
v1 = x(3); v2 = x(4);

% Збурення
F = A * sin(omega * t);

% Рівняння
dx1dt = v1;
dx2dt = v2;

dv1dt = (F - c*(v1 - v2) - k*(x1 - x2)) / m1;
dv2dt = (-c*(v2 - v1) - k*(x2 - x1)) / m2;

dxdt = [dx1dt; dx2dt; dv1dt; dv2dt];
end

% Симуляція
tspan = [0 1];
x0 = [0; 0; 0; 0];
[t, x] = ode45(@grohot_model, tspan, x0);

% Візуалізація
plot(t, x(:,1), t, x(:,2))
legend('Рама грохота', 'Пульпа')
xlabel('Час (с)'), ylabel('Переміщення (м)')
title('Коливання грохота Derrick')

```

4. Наступні кроки

- Додати нелінійності (наприклад, зміну маси пульпи)
- Впровадити адаптивне керування частотою через частотник
- Зв'язати модель з Simulink для інтерактивного керування
- Підготувати структуру FB/DB для реалізації в S7-1500

Реалізація моделі грохота в Simulink — це спосіб візуалізувати динаміку системи та підготувати її до інтеграції з ПЛК або НМІ.

Реалізація моделі:

1. Структура моделі мас

Модель складається з:

- Двох мас: рама грохота (m_1) і пульпа (m_2)
- Пружинно-демпферного зв'язку між ними
- Гармонічного збурення від вібродвигуна

2. Побудова в Simulink

-Крок 1: Створення моделі

1. У Simulink → Створити нову модель.
2. Додаємо блоки:
 - Integrator $\times 4$ (для x_1 , x_2 , v_1 , v_2)
 - Gain (для мас, пружини, демпфера)
 - Sum (для складання сил)
 - Sine Wave (для $F(t)$)
 - Scope (для візуалізації x_1 і x_2)

-Крок 2: Реалізація рівнянь

Рівняння для m_1 :

$$\ddot{x}_1 = \frac{F(t) - c(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - k(x_1 - x_2)}{m_1}$$

Або в іншому вигляді:

$$\ddot{x}_1 = \frac{F(t) - c(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - k(x_1 - x_2)}{m_1}$$

Як що виділити силу збудження рами:

$$m_1 \ddot{x}_1 + c(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k(x_1 - x_2) = F(t)$$

Рівняння для m_2 :

$$\ddot{x}_2 = \frac{-c(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - k(x_2 - x_1)}{m_2}$$

Або в іншому вигляді:

$$\ddot{x}_2 = \frac{-c(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - k(x_2 - x_1)}{m_2}$$

Інакше цей вираз може бути записаний так:

$$m_2 \ddot{x}_2 + c(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k(x_2 - x_1) = 0$$

- Використаємо Gain блоки для коефіцієнтів k , c , m_1 , m_2 .
- Sine Wave $\rightarrow$ Gain (амплітуда) $\rightarrow$ Sum $\rightarrow$ Gain ($1/m_1$)
- Аналогічно для другого рівняння.
- Sine Wave $\rightarrow$ Gain (амплітуда) $\rightarrow$ Sum $\rightarrow$ Gain ($1/m_2$)

-Крок 3: Візуалізація

- Підключити Scope до виходів Integrator (x_1 і x_2).
- Налаштувати Scope на подвійний графік для порівняння.

3. Налаштування параметрів

Параметри моделі показані в таблиці 2.5

Таблиця 2.5 – Параметри моделі

Параметр	Значення (приклад)
m_1	100 кг
m_2	50 кг

Параметр	Значення (приклад)
k	1000 Н/м
c	50 Н·с/м
A	500 Н, амплітуда збурень
ω	$2\pi \cdot 30$ рад/с, частота вібрації (30 Гц)

На основі цих параметрів та умов роботи грохота, що вказувалися вище, збудуємо модель роботи грохота, як двомасової системи зі збудником вібрацій – вібродвигуном рис. 2.10

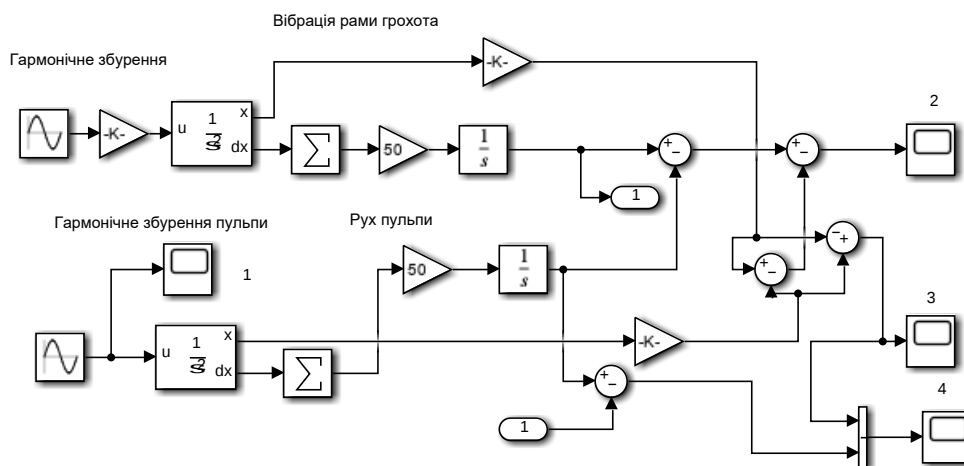


Рисунок 2.10 – Модель роботи грохота з пульпою

В моделі можна виділити декілька основних вузлів: ділянка збурення вибрана, як генератор гамонійного синусоїдального джерела вібрацій; подача пульпи теж вибрана гармонійним сигналом; рух рами грохота і пульпи – у вигляді рішення диференціальних рівнянь завдяки застосування інтеграторів другого і першого ступеня.

Наведемо декілька фрагментів з динаміки роботи грохота.

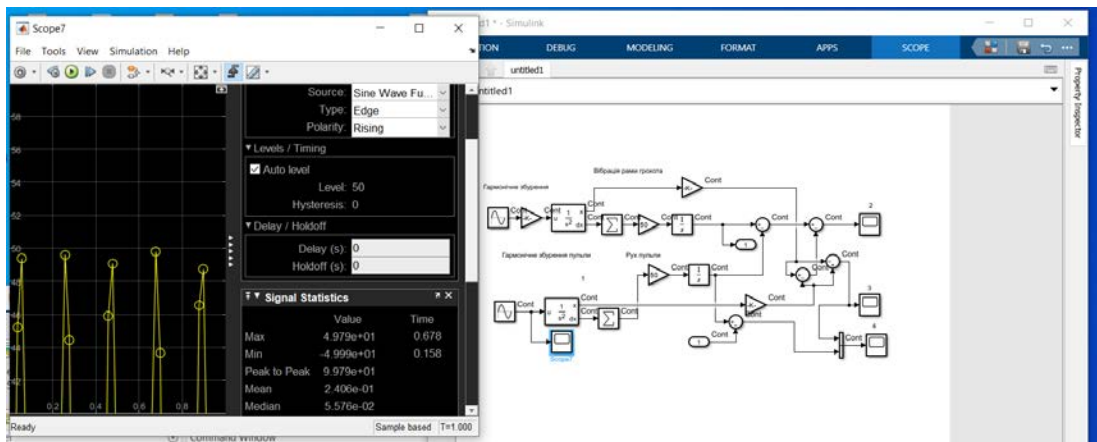


Рисунок 2.11- Параметри моделі – гармонічна складова збурення 25 Гц

На рис.2.11 наведена синусоїдальна збурююча сила вібратора 500кг, а на рис.2.12 – сила, яка діє на раму грохота

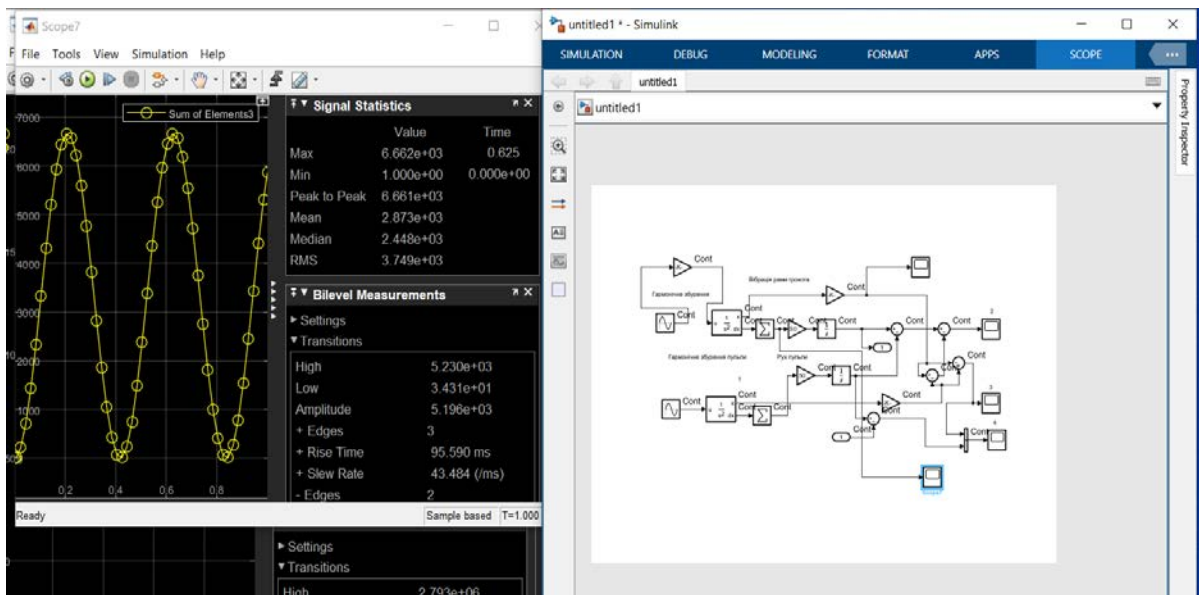


Рисунок 2.12 – Параметри моделі коливання рами грохота

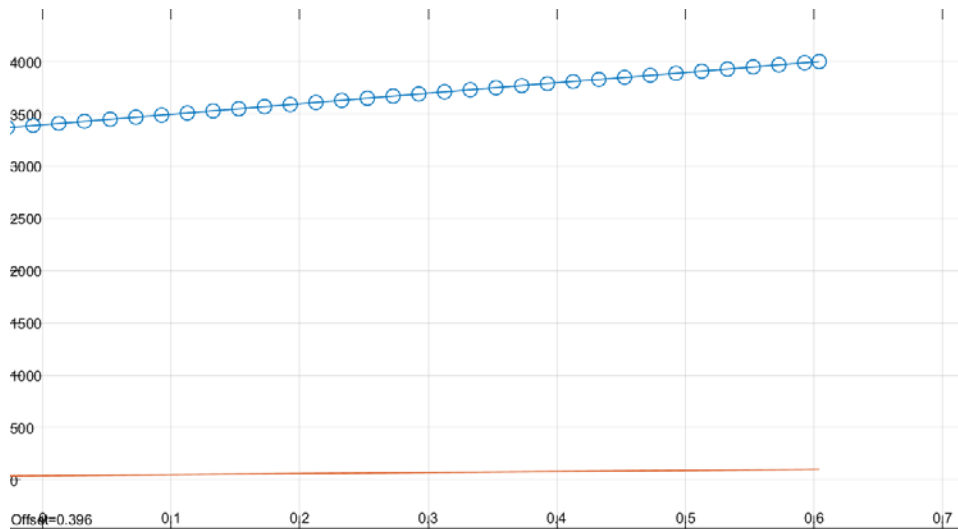


Рисунок 2.13 – Поведінка прикладених сил (верхня лінія) і висота пульпи

Збудуємо модель керування вібродвигуном

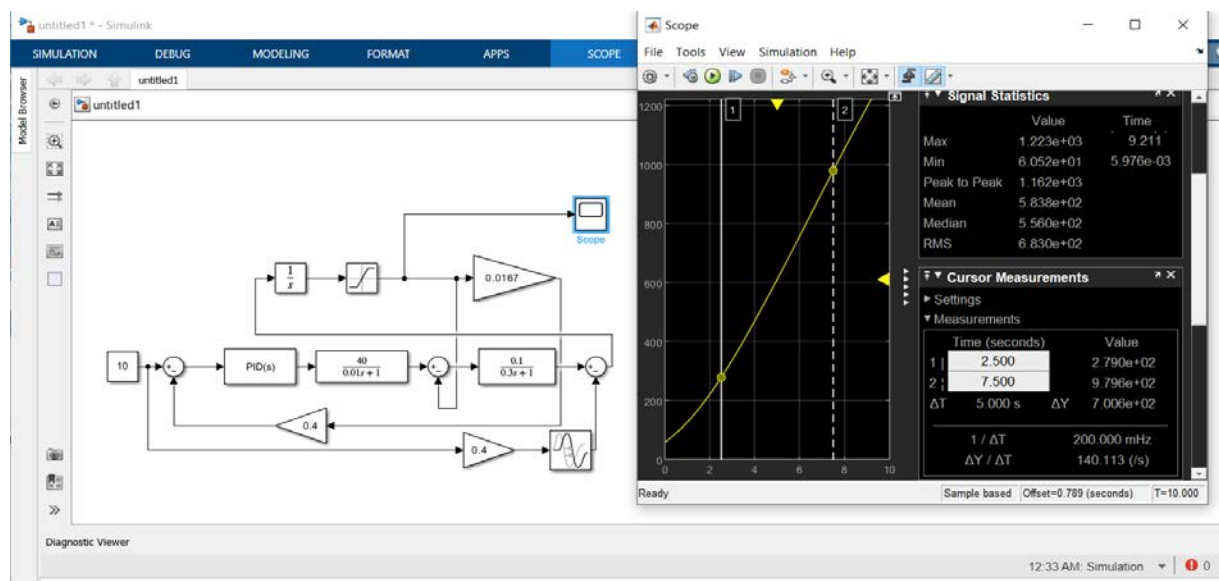


Рисунок 2.14 – Модель роботи вібродвигуна – пуск

На рис. 2.15 показаний пуск грохота і при роботі вібродвигуна здійснюється подача пульпи на грохот. Ми бачимо просадку обертів двигуна і поступовий набір їх до 1450 об/хв. При цьому привод грохоту навантажується з холостого ходу до номінальної величини, як наслідок подачі пульпи.

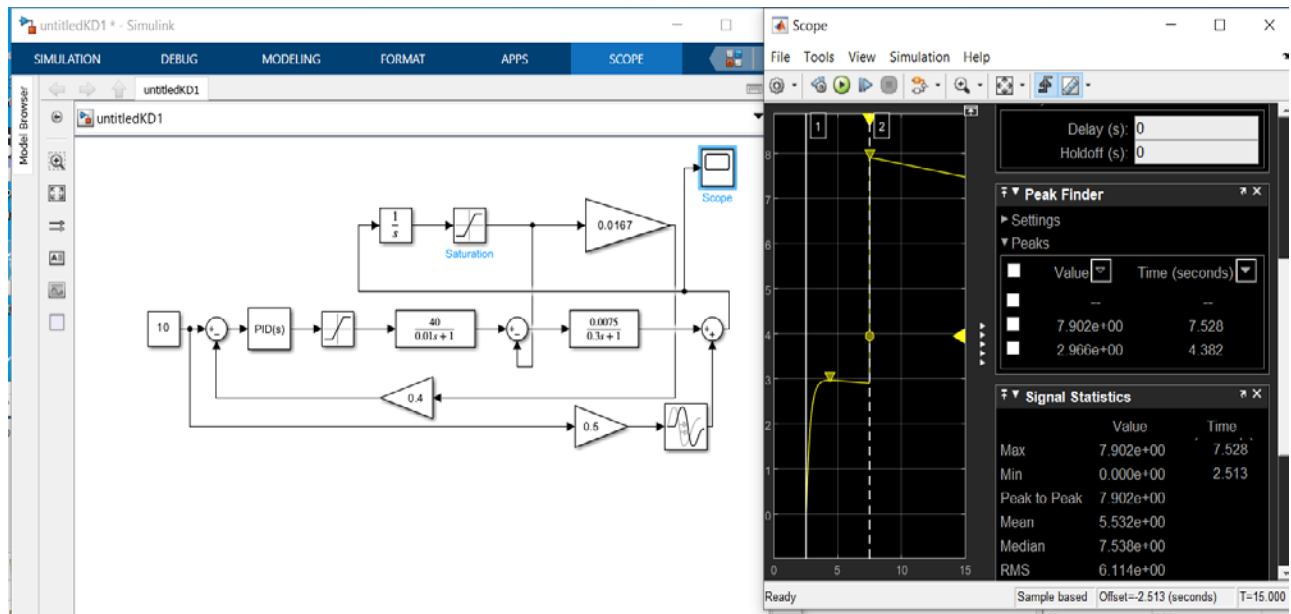


Рисунок 2.15 – Модель роботи вібродвигуна – пуск подача пульпи

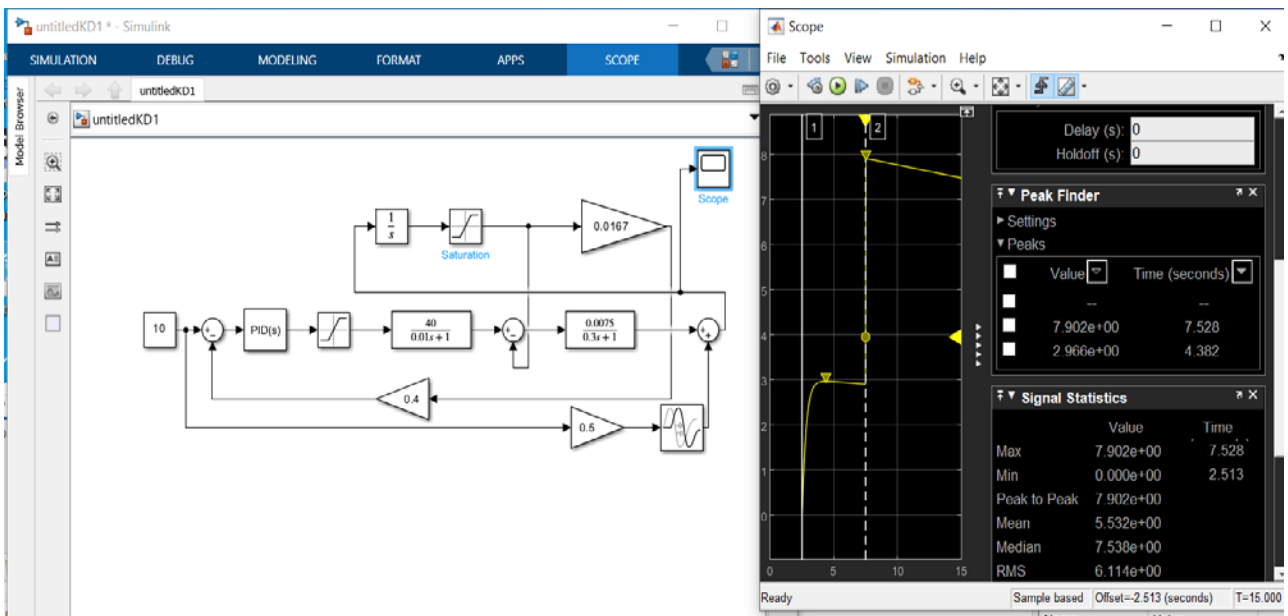


Рисунок 2.16 – Модель роботи вібродвигуна – робота на максимальній швидкості з навантаженням

Висновки за розділом

У розділі виконані дослідження:

1. Моделювання та симуляція: Використання комп'ютерного моделювання та симуляції для визначення оптимальних параметрів роботи грохотів. Це дозволяє провести численні експерименти без необхідності зупинки виробничого процесу.

2. Моделювання динамічних процесів: Використання MatLab моделювання та симуляції для визначення оптимальних параметрів роботи грохотів в перехідних режимів скрінування.

РОЗДІЛ 3

ПРОГРАМНО-ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ

3.1 Створення системи автоматичного керування ефективністю мокрого грохота Stack Sizer Derrick

Щоб реалізувати автоматичне керування ефективністю мокрого грохота Stack Sizer Derrick через регулювання швидкості двигунів на базі Siemens S7-1200, потрібно реалізувати замкнуту систему регулювання, яка буде:

- вимірювати поточну ефективність грохота (наприклад, через витрати, вологість, фракцію проходу);
- порівнювати її з цільовим значенням;
- коригувати швидкість двигунів для досягнення оптимального режиму.

Структурна схема системи керування приведена на рисунку 3.4, згідно якої зробимо вибір основного обладнання.

Кроки реалізації системи

1. Вибір датчиків і виконавчих механізмів

- Датчики витрати пульпи
- Датчики витрат води.
- Частотні перетворювачі для керування швидкістю двигунів грохота і відповідно частоту коливання рами грохота.
- Мякі датчики швидкості обертання двигунів.
- Датчики щільності пульпи.

2. Програмування S7-1200

- Використовуємо TIA Portal для програмування.
- Реалізуємо PID-регулятор у S7-1200 для керування швидкістю двигуна.
- Налаштуємо аналогові входи для зчитування даних з датчиків.

- - Налаштуємо аналогові виходи або PROFINET/Modbus зв'язок з частотним перетворювачем.

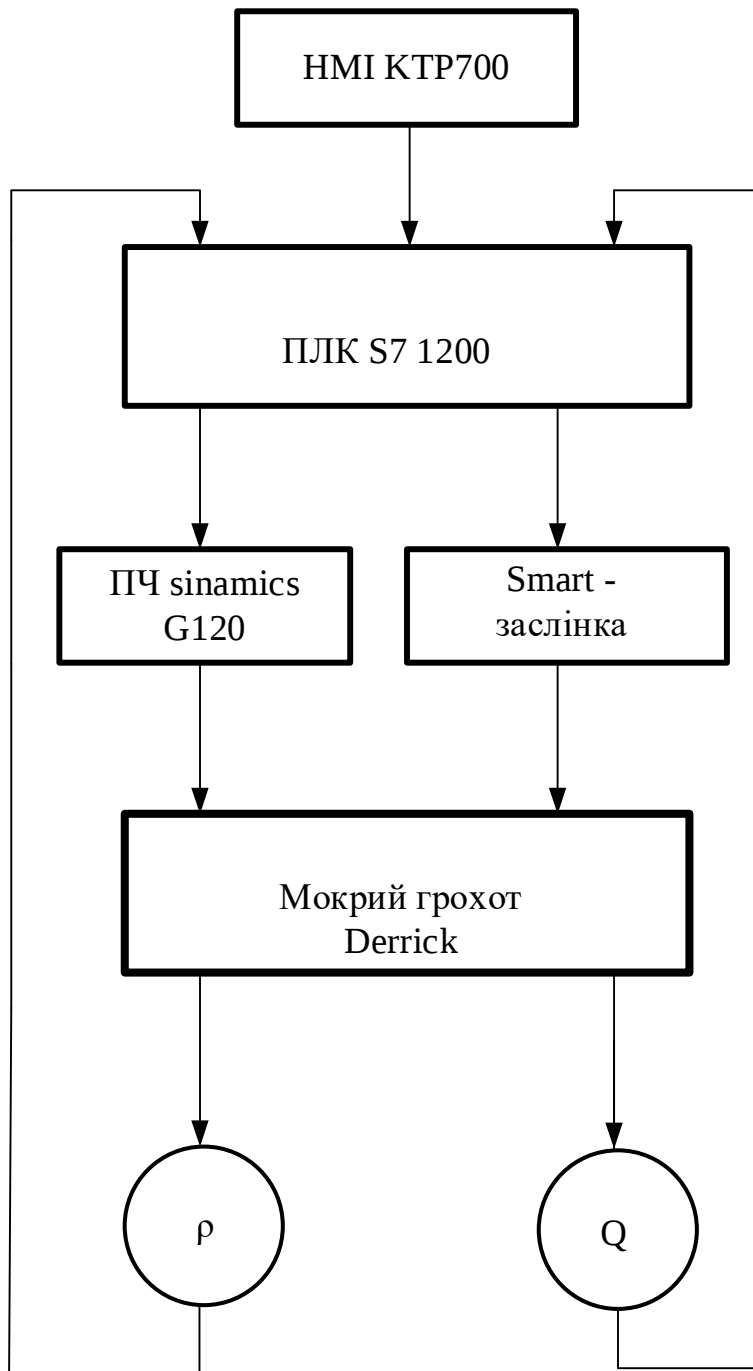


Рисунок 3.1 - Структурна схема системи керування грохотом Derrick

3. Алгоритм керування системи автоматичного керування ефективністю мокрого грохота

Алгоритм роботи системи керування грохотом наведено на рис 3.2.

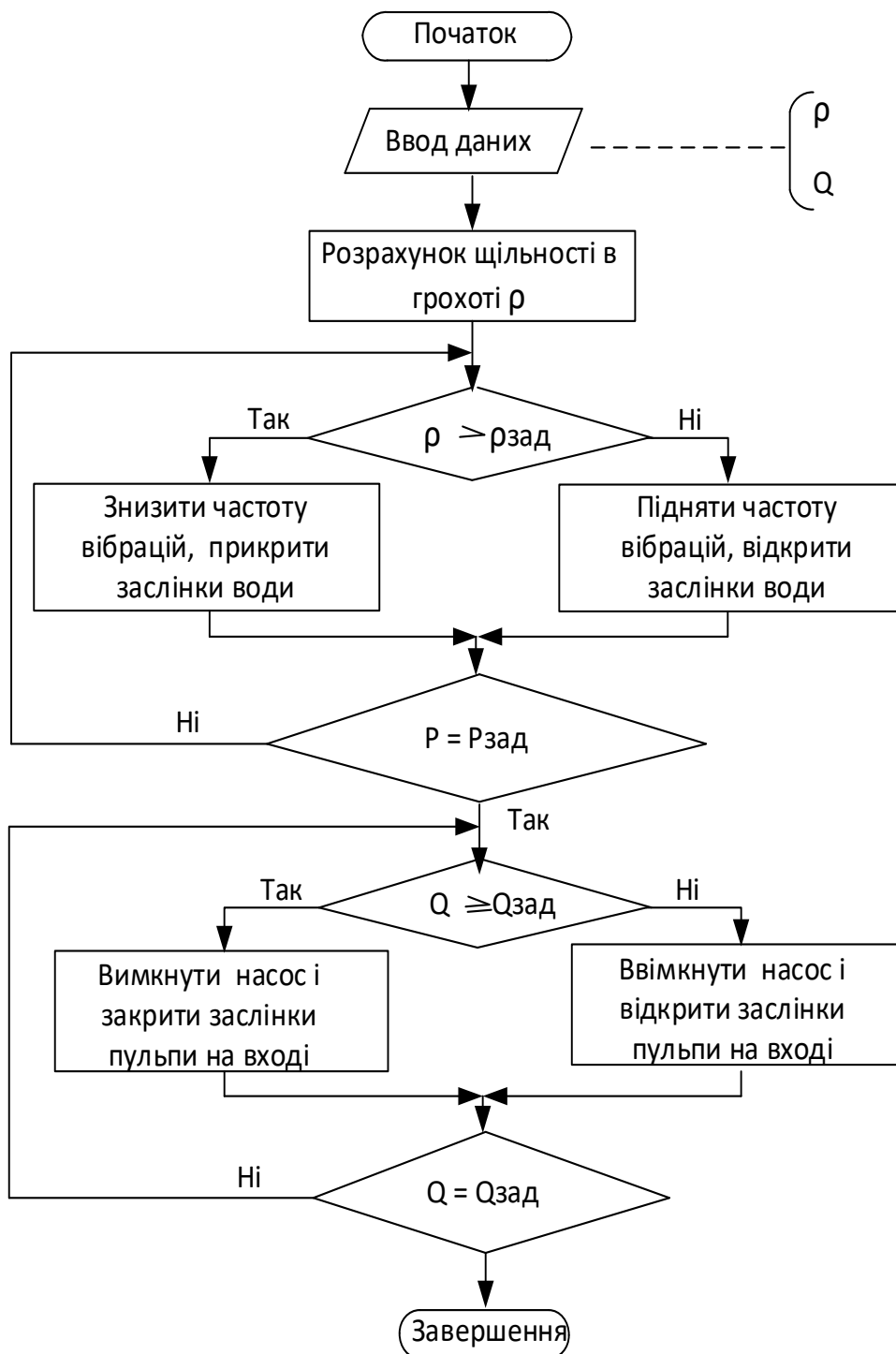


Рисунок 2.2 – Алгоритм роботи системи керування грохотом

Різниця між ідеальною та поточною щільності пульпи береться з масиву, який містить відповідність крупності руди до ідеальної щільності пульпи та записується один раз. Вибір крупності руди здійснюється кожен раз вручну.

Накопичуємо значення реальної щільності пульпи за проміжок часу 60 сек.

Якщо ефективність < цільової функції:

- збільшити швидкість двигуна (обережно, з кроком)

Якщо ефективність > цільової функції:

- зменшити швидкість двигуна
- Використовуємо фільтрацію сигналів, щоб уникнути різких коливань.
- Додаємо захист від перевантаження і аварійні зупинки.

Підсумовуючи, у алгоритмі, здійснюється зрівняння ідеальної та поточної щільності пульпи. Якщо ідеальна більше або менша, ніж поточна, витрати живильника пульпи вхідної потрібно відповідно зменшити або збільшити.

4. Оптимізація PID-регулятора

- Використовуємо автоматичне налаштування PID у TIA Portal (що доступно)
- Або налаштуємо вручну: спочатку K_p , потім T_n , потім T_v (якщо потрібно).

Для ПЧ можна використовувати або Automatic Servo Tuning, щоб оптимізувати параметри швидкісного контуру.

Додаткові можливості:

- Логування даних у CSV або базу даних для подальшого аналізу.
- HMI-панель для візуалізації ефективності та ручного керування.
- Підключення до SCADA (наприклад, WinCC) для централізованого моніторингу.

Важливі зауваження:

- Перед пуском перевіряємо механічні межі швидкості грохота.

- Використовуємо обмеження швидкості в програмі, щоб уникнути пошкоджень.

- Якщо двигуни мають високу інерцію, застосуємо попереднє керування (feedforward) [30].

3.2 Програмне забезпечення системи автоматичного керування ефективністю мокрого грохота

Нижче наведено конкретний приклад реалізації PID-регулювання швидкості двигуна мокрого грохота Stack Sizer Derrick у Siemens S7-1200 через TIA Portal з використанням STL та стандартного PID-контролера.

1. Структура проекту у TIA Portal

Апаратні налаштування

- PLC : S7-1200 (наприклад, CPU 1212C AC/DC/Rly)
- Частотний перетворювач : SINAMICS G120 (аналоговий вихід).
- Датчики :
- Аналоговий вхід: `IW64` — поточна ефективність (наприклад, % проходження фракції)
- Аналоговий вихід: `QW64` — команда швидкості на G120 (0–10 В або 4–20 мА)

2. Додавання PID-контролера у TIA Portal

1. У TIA Portal → Project tree → Program blocks → Add new block → PID Control → PID_Compact

2. Назвемо блок, наприклад: `MyPID`

3. Відкриємо PID_Compact → Configuration → налаштуємо:

- Process value : `IW64` (ефективність)
- Setpoint : `MD100` (цільова ефективність, наприклад 85.0)
- Output : `QW64` (швидкість двигуна)

- PID parameters : залишемо за замовчуванням або налаштуємо вручну

3. Приклад виклику PID-контролера у STL

```

```stl
// PID_Comract викликається в циклічному ОВ (наприклад, OB1)
// Припустимо, що PID_Comract має назву "MyPID"
// Увімкнення PID
A "AutoMode" // M0.0 - режим автоматичного керування
= "MyPID".sRet.i_Mode // 0 = Inactive, 1 = Manual, 3 = Automatic
// Встановлення цільової ефективності (Setpoint)
L 85.0
T "MyPID".sPid_Ctrl.r_Sp // MD100 можна використовувати як джерело
// Виклик PID-контролера
CALL "MyPID"
```

```

4. Варіант для перевірки ручного керування (Manual Mode)

```

```stl
A "ManualMode" // M0.1
= "MyPID".sRet.i_Mode // 1 = Manual
// Встановлення ручного вихідного значення
L 30.0 // 30% швидкості
T "MyPID".sPid_Ctrl.r_Lmn // ручна вихідна команда
```

```

5. Приклад фільтрації процесної величини (опціонально)

Якщо сигнал ефективності шумний — можна зробити простий фільтр:

```

```stl
// Фільтр першого порядку: $Y = Y + (X - Y) * K$
// X - поточне значення, Y - фільтроване, K - коефіцієнт (0.01–0.1)
L "Efficiency_Raw" // IW64 → MD200

```

DTR

L "Efficiency\_Filt" // MD204

-R

L 0.05 // K

\*R

L "Efficiency\_Filt"

+R

T "Efficiency\_Filt"

```

6. Обмеження вихідної швидкості

```stl

L "MyPID".sPid\_Ctrl.r\_Lmn

L 0.0

<R

JC SET\_MIN

L 100.0

>R

JC SET\_MAX

JU CONTINUE

SET\_MIN:

L 0.0

T "MyPID".sPid\_Ctrl.r\_Lmn

JU CONTINUE

SET\_MAX:

L 100.0

T "MyPID".sPid\_Ctrl.r\_Lmn

CONTINUE:

```

7. Структура змінних

Змінна	Призначення
`IW64`	Поточна ефективність (від датчика)
`QW64`	Вихід на G120 (швидкість)
`MD100`	Цільова ефективність (Setpoint)
`MD204`	Фільтрована ефективність
`M0.0`	Автоматичний режим
`M0.1`	Ручний режим

8. До тюнінгу PID

- Використовуємо "Pretune" у TIA Portal, якщо процес стабільний.

- Почнемо з:

- `Kp = 2.0`
- `Ti = 5.0 c`
- `Td = 0.5 c`

- Після запуску — використовуємо "Fine tune" у TIA Portal.

Генерування повний LAD/STL блок або HMI-екран для візуалізації.

Повний, готовий до вживання варіант:

1. STL-функціональний блок «FB_StackSizer_PID» – повний код для S7-1200 (TIA Portal V17+).

2. Зовнішній Data-block «DB_StackSizer_PID» – інстанс-DB, що автоматично створюється після виклику FB.

3. Готовий HMI-шаблон (WinCC Basic/Comfort/Unified) – екран «StackSizer» з усіма необхідними елементами та архівом трендів.

4. Імпортування у проєкт.

Копіюємо текст у відповідні редактори TIA Portal, копіюємо й завантажуюмо в контролер/панель.

1. FB_StackSizer_PID – повний STL-код

```

FUNCTION_BLOCK "FB_StackSizer_PID"
{ S7_Optimized_Access := 'TRUE' }
VERSION : 0.1

VAR_INPUT
    i_Efficiency_RAW    : Int;      // IW64 або інша сирі АЦП-одиниці
    r_Setpoint          : Real := 85.0; // % ефективності, яку треба тримати
    b_AutoMode          : Bool;      // TRUE = автомат, FALSE = ручн.
    b_ManualEnable      : Bool;      // дозволяє ручну подачу
    r_ManualValue       : Real;      // % швидкості у ручному режимі
    r_K_Filt            : Real := 0.05; // коеф. фільтра 1-го порядку
    r_MinSpeed          : Real := 10.0; // % мінімальна швидкість
    r_MaxSpeed          : Real := 95.0; // % максимальна швидкість
END_VAR

VAR_OUTPUT
    q_SpeedProc        : Int;      // вихід на QW64 (0-27648)
    r_EffFilt          : Real;      // фільтрована ефективність
    r_PID_Out          : Real;      // сире значення PID 0-100 %
    b_PID_Busy         : Bool;      // активність PID_Compact
    b_PID_Error        : Bool;      // помилка PID
END_VAR

VAR_IN_OUT
    myPID_Compact      : PID_Compact; // зовнішній PID_Compact
END_VAR

VAR
    r_EffFloat         : Real;
    r_Temp             : Real;
    r_Limited          : Real;
END_VAR

```

BEGIN

NETWORK

TITLE = Перетворити сирі АЦП-одиниці у % (0-27648 -> 0-100 %)

L #i_Efficiency_RAW;

DTR;

L 2.764800e+004;

/R;

L 1.000000e+002;

*R;

T #r_EffFloat;

NETWORK

TITLE = Фільтр 1-го порядку ($Y = Y + (X-Y)*K$)

L #r_EffFloat;

L #r_EffFilt;

-R;

L #r_K_Filt;

*R;

L #r_EffFilt;

+R;

T #r_EffFilt;

NETWORK

TITLE = Передати фільтровану величину в PID

L #r_EffFilt;

T #myPID_Compact.sPid_Ctrl.r_Pv;

NETWORK

TITLE = Встановити задану величину

L #r_Setpoint;

T #myPID_Compact.sPid_Ctrl.r_Sp;

NETWORK

TITLE = Вибір режиму роботи PID

```

    A   #b_AutoMode;
    JC  _AUTO;

    L   1;           // Manual
    T   #myPID_Compact.sRet.i_Mode;
    L   #r_ManualValue;
    T   #myPID_Compact.sPid_Ctrl.r_Lmn;
    JMP _CONT;

_AUTO: L   3;           // Automatic
    T   #myPID_Compact.sRet.i_Mode;
_CONT: NOP 0;

```

NETWORK

TITLE = Виклик PID_Compact

```

    CALL #myPID_Compact
    sPid_Ctrl := #myPID_Compact.sPid_Ctrl,
    sRet      := #myPID_Compact.sRet;
    // Сигнали стану
    A   #myPID_Compact.sRet.b_Busy;
    =   #b_PID_Busy;
    A   #myPID_Compact.sRet.b_Error;
    =   #b_PID_Error;

```

NETWORK

TITLE = Обмеження виходу PID

```

    L   #myPID_Compact.sPid_Ctrl.r_Lmn;
    L   #r_MinSpeed;
    <R;
    JC  _SET_MIN;

```

```

    L   #r_MaxSpeed;
    <R;
    JC   _OK;
    L   #r_MaxSpeed;
    T   #r_Limited;
    JMP  _SCALE;
_SET_MIN:
    L   #r_MinSpeed;
    T   #r_Limited;
    JMP  _SCALE;
_OK: NOP  0;
    L   #myPID_Compact.sPid_Ctrl.r_Lmn;
    T   #r_Limited;
_SCALE:
    T   #r_PID_Out;
NETWORK
TITLE = Перетворити % швидкості в 0-27648 для QW64
    L   #r_Limited;
    L   2.764800e+004;
    *R;
    RND;
    T   #q_SpeedProc;
END_FUNCTION_BLOCK

```

2. Інстанс-DB (створюється автоматично)

Після вставки FB у OB1 TIA Portal сама створить «DB_StackSizer_PID» (тип – Instance).

У властивостях PID_Compact вказано:

- Technology object → PID_Compact_1 (або інший, згенерований мастером).

- Process value → зв'язати з «DB_StackSizer_PID».r_EffFilt
- Output → зв'язати з «DB_StackSizer_PID».r_PID_Out

3. Виклик FB у OB1 (приклад)

// Системний блок OB1

```
"DB_StackSizer_PID"(           // Instance DB
    i_Efficiency_RAW  := "Efficiency_RAW", // IW64
    r_Setpoint        := "TargetEfficiency", // MD100
    b_AutoMode         := "HMI_AutoMode",   // M10.0
    b_ManualEnable     := "HMI_ManualMode", // M10.1
    r_ManualValue      := "HMI_ManSpeed",   // MD104
    r_K_Filt           := 0.05,
    r_MinSpeed         := 10.0,
    r_MaxSpeed         := 95.0,
    q_SpeedProc        := "Speed_TO_G120",  // QW64
    myPID_Compact      := "PID_Compact_1" ); // Technology object
```

4. HMI-екран «StackSizer» (WinCC Comfort/Unified)

- а) Створіть новий екран 1280×800 (або під свою панель).
- б) Імпортуємо зовнішній «DB_StackSizer_PID» у HMI-таги (drag-and-drop).
- в) Розміщуємо об'єкти:

1. Bar graph

Tag: «DB_StackSizer_PID».r_EffFilt

Range: 0-100 %, scale 10, color zones <80 red, 80-90 yellow, >90 green.

2. Bar graph

Tag: «DB_StackSizer_PID».r_PID_Out

Range: 0-100 %, label «Motor speed».

3. Numeric input (R/W)

Tag: «DB_StackSizer_PID».r_Setpoint

Label: «Target efficiency %».

4. Slider (R/W)

Tag: «HMI_ManSpeed» (MD104) 0-100 %, visibility: only when Manual = true.

5. Switch «Auto / Manual»

Tag: «HMI_AutoMode» (M10.0) – invisible text, Manual = 0, Auto = 1.

6. Button «PID Pretune»

Event: Press → Set «PID_Compact_1».sRet.b_Pretune := 1.

7. Alarm view (system) – виводить «b_PID_Error».

8. Trend control

Curves:

- «EffFilt» (white)
- «Setpoint» (yellow)
- «Speed» (cyan)

Time range: 10 min, 1 s sampling.

Data source: «Data log_StackSizer» (circular, 10 000 записів).

5. Імпортувати у TIA Portal

1. Створим новий проєкт → додаємо CPU 1212C (або свою).

2. Додаємо Technology object «PID_Compact» (мастером, Output type – Analog).

3. У «Program blocks» → Insert new FB → назвіть «FB_StackSizer_PID» → виберіть мову STL → замініть тіло текстом із п.1.

4. Перетягуємо FB у OB1 – система створить інстанс - DB.

5. Додаємо HMI-панель (KTP700, TP900, Unified...) → у «HMI tags» імпортуємо PLC-теги (drag DB_StackSizer_PID).

6. Створюємо новий екран → розмістіть елементи з п.4.

7. Налаштуємо аналоговий вихід QW64 на 0-10 В → підключіть G120.

8. Завантажуємо PLC та HMI – система готова до роботи.

Завантаживши ці файли ми отримуємо повністю працюючу систему автоматичного керування ефективністю мокрого грохота Stack Sizer Derrick на базі S7-1200.

3.3 Вибір та обґрунтування апаратного забезпечення

Вибір перетворювача частоти

Виберемо один з перетворювачів частоти, які рекомендує фірма Derrick компанії Siemens G120 C.



Рисунок 3.3 - Загальний вигляд ПЧ Sinamics G120C

Найекономічніше рішення для важких загальнопромислових завдань середнього сегменту, орієнтованих на важкі використання.

Має вбудовані функції безпеки (STO).

Оснащений інтерфейсом з протоколом Ethernet, інтегрований з TIA - порталом. Має зручний екран і керуючий простий алгоритм налаштування.

В схемі рис.3.5 показано живлення двигунів D1, D2 вібрації сит грохота таким чиним, щоб вони працювали синхронно, тобто вони підключені до одного перетворювача частоти і сфазовані. Регулювання частоти в автоматичному режимі здійснюється контролером, що на рис.3.5 показаний, як ВР1, але можливе регулювання і в ручному режимі потенціометром R1.

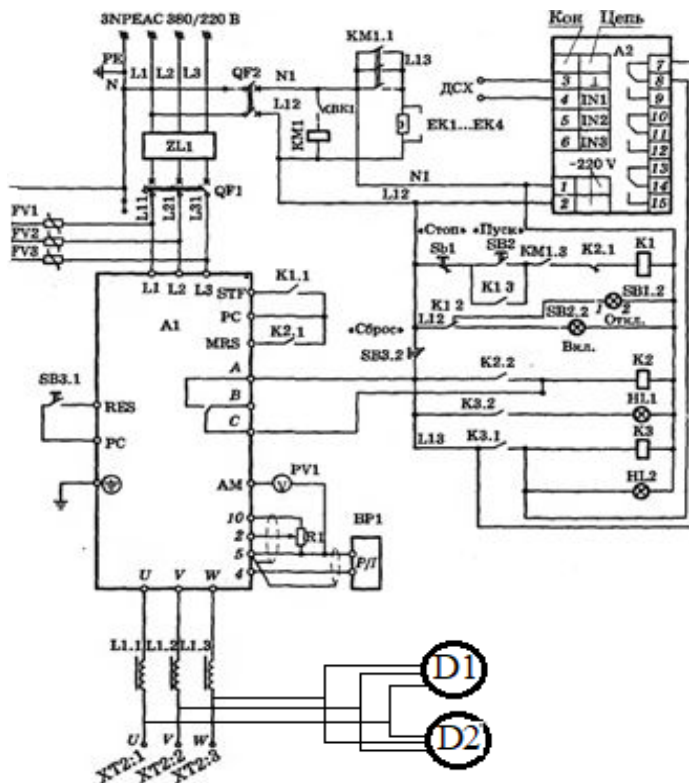


Рисунок 3.4 - Схема електрична принципова підключення вібродвигунів грохота

Для перевірки роботи перетворювача є ще ручний режим дискретного керування, за допомогою релевної схеми на основі K1, K2, K3. В схемі є захист від перенапруги на базі розрядників EK1- EK4. Двигуни захищені індуктивними пристроями від гармонічних складових струму з перетворювача частоти. Контроль стану перетворювача частоти здійснюється перекидними контактами ABC. Контрольні точки - контакти для зручності замірів виводяться на клемники XT2.

Контролер

Вибираєм сучасний контролер Siemens S 7 1200 з процесором S 7 1212.

На самому процесорному модулі є дуже мало сигналів входів/ виходів, тому до процесорного модуля треба додати сигнальний модуль входів/ виходів дискретних сигналів.

Також на процесорному модулі замало аналогових входів та виходів, тому треба додати ще окремий модуль обробки аналогових сигналів.

Для роботи системи в АСУ рудозбагачувальної фабрики комбінату, ця локальна система повина бути оснащена комунікаційним модулем



Рисунок 3.5 – Комплект модулів ПЛК для керування грохотом

Вибір щільноміру

У щільномірів [32] є властивість застосування для вимірювання агресивних або в'язких рідин, пульп в трубопроводах діаметром від 90 до 581 мм. Також можливий контроль густини у важкодоступних місцях. Установка густиноміру здійснюється на вертикальних сталевих трубопроводах з подачею пульпи знизу вгору, (рис. 3.6). Тоді виробник гарантує точність $\pm 1\%$.

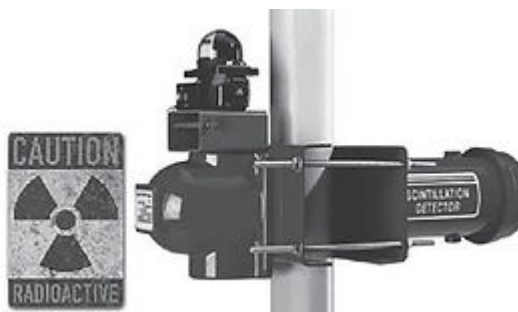


Рисунок 3.6 - Радіоізотопний щільномір, встановлений на вертикальній сталевій трубі з подачею пульпи знизу вгору

Метод вимірювання щільності – непрямий, тому вносить подвійну похибку. Точність залежить від природи середовища, що потребує індивідуального градуювання приладу. Для обслуговування приладу необхідна спеціальна лабораторія, що цілодобово охороняється.

Тому вибираємо щільномір DENCELL (рис.3.7). Він є об'ємно ваговим, проточним щільноміром.



Рисунок 3.7 - Щільномір DENCELL

Щільномір DENCELL - це електромеханічний прилад. При дотриманні норм, правил монтажу та експлуатації щільність працює надійно і досить точно. Недоліком є зношування труби пульпою.

Витратомір.

Обираємо витратоміри з інтерфейсом типу MAG 3100 і вторинний прилад



Рисунок 3.8 – Витратомір і його вторинний прилад

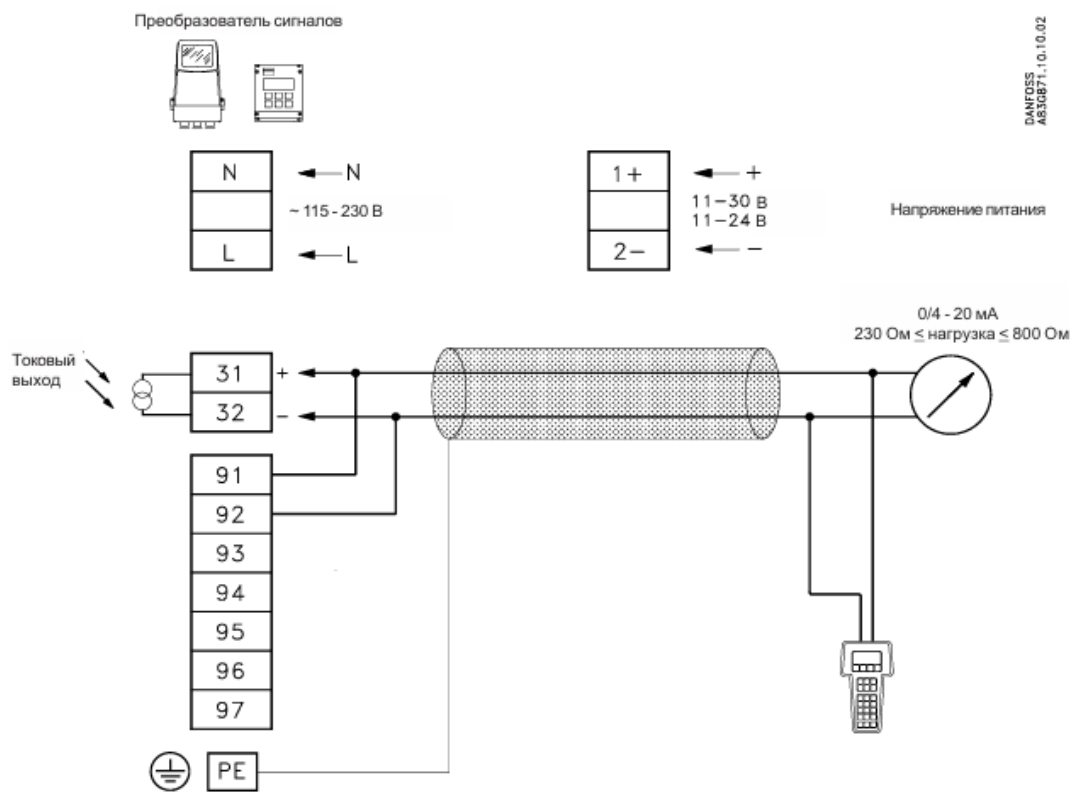


Рисунок 3.9 – Схема мережі по HART- протоколу

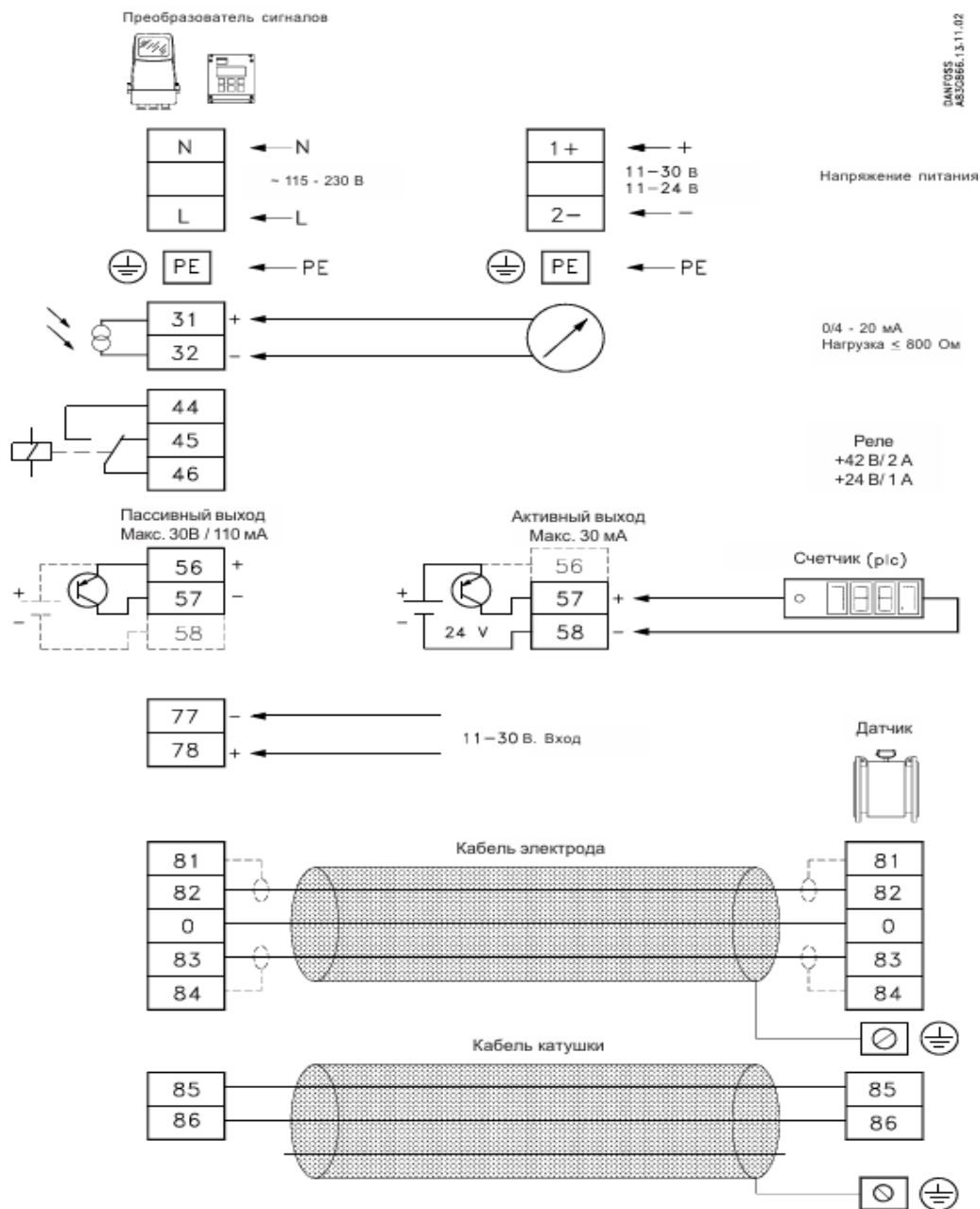


Рисунок 3.10 – Схема загальних підключень датчика

Витратомір нам треба для пульпи і для води, вони відрізняються, при замовленні своїм заказаним номером.

Висновки за розділом

З представленим обладнанням зроблені і можна зробити у подальшому такі дослідження:

3. Аналіз вібраційних характеристик: Використання датчиків вібрації для моніторингу та аналізу вібраційних характеристик сит. Це дозволяє виявити оптимальну частоту качання, яка забезпечує максимальну ефективність сепарації та мінімальний знос обладнання.

4. Автоматичне регулювання частоти: Впровадження систем автоматичного регулювання частоти качання на основі зворотного зв'язку. Такі системи можуть автоматично налаштовувати частоту качання в залежності від змінних умов роботи, забезпечуючи стабільну продуктивність.

5. Енергетичний аналіз: Проведення енергетичного аналізу роботи грохотців для визначення оптимальних параметрів частоти качання, які забезпечують мінімальне енергоспоживання при максимальній продуктивності.

ВИСНОВКИ

Регулювання частоти качання сит є критично важливим для досягнення ефективного процесу сепарації рудної пульпи:

6. Підвищення ефективності сепарації: Оптимальна частота качання забезпечує кращу відділення твердих частинок від рідини, що дозволяє отримати більш чисті концентрати та покращує якість готового продукту.

7. Запобігання засміченню: Під час роботи грохоту частинки можуть налипати на сита, що призводить до зниження продуктивності. Регулювання частоти качання допомагає уникнути засмічення та забезпечує безперебійну роботу грохоту.

8. Енергозбереження: Оптимізована частота качання дозволяє зменшити енергоспоживання, що важливо для зниження витрат на виробництво та підтримання екологічної стійкості.

9. Знос та витрати на обслуговування: Правильне регулювання частоти качання допомагає знизити знос сит та інших компонентів грохоту, що продовжує термін служби обладнання та зменшує витрати на ремонт і обслуговування.

10. Контроль гранулометричного складу продукту: Регулювання частоти качання дозволяє краще контролювати розмір частинок у кінцевому продукті, що є важливим для відповідності вимогам ринку та стандартам якості.

Таким чином, правильне регулювання частоти качання сит дозволяє підвищити ефективність виробничого процесу, знизити витрати та покращити якість кінцевого продукту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Центральний ГЗК. 2025, 10 лютого. URL:<https://web.archive.org/web/20200219055115/https://gmk.center/ua/manufacturer/centralnij-gzk/>
2. Корпорація Деррік. Каталог. 2025, 20 лютого. URL: <https://derrick.com/>
3. Advances in screening technology in the mining sector. AT mineral processing. AT 07-08/2019. https://www.atminerals.com/en/artikel/at_Advances_in_screening_technology_in_the_mining_sector-3405001.html
4. Bondarenko. A. Modeling of interaction of inclined surfaces of a hydraulic classifier with a flow of solid particles. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 2018, № 4, P. 13–20.
5. Білецький В. С., Олійник Т. А., Смирнов В. О., Скляр Л. В. Основи техніки та технології збагачення корисних копалин. Київ : Ліра-К, 2020, 278 с.
6. Грохот модульний ULS2010.42W. 2025, 10 лютого. URL: <https://kroosh.com/produkty/groxota-klassifikatoryi-dlya-mokrogo-groxocheniya/modulnyie-groxoty/uls2010.42w>
7. Бондаренко А.О. Моделювання взаємодії проточних поверхонь гідравлічного класифікатора з потоком пульпи / Збірник матеріалів міжнародної науково-практичної конференції XVIII міжнародної науково-технічної конференції «Потураївські читання». Дніпро, 24 січня 2020. 5 с.
8. Lyashenko, V.I., Dyatchin, V.Z., & Franchuk, V.P. (2018). Improvement of vibrating feeders-screens for mining and metallurgical industry. Izvestiya. Ferrous Metallurgy, 61(6), 470-477. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2018-6-470-477>
9. Chubyk R. V., Yaroshenko L. V. Method of stabilization of technologically optimal parameters of the vibration field of adaptive vibration technological machines. Vibrations in engineering and technology, 2008, № 2(51), P. 57–60.
10. Хмара Л. А. Дробильно-сортувальні заводи і устаткування. Полтава: ПолтНТУ, 2009, С.209.

11. Степаненко С. П., Котов Б. І., Грушецький С. М., Рудь А. В. Математичне моделювання руху зернового матеріалу на поверхні віброживильника за умов введення його в аспіраційний канал сепаратора. *Vibrations in engineering and technology*, 2021, № 2 (101), С. 46–55.
12. Замрій М. А. Степаненко С. П., Котов Б. І., Рудь А. В. Теоретичні дослідження процесу руху зернового матеріалу на поверхні ступінчастого віброживильника. *Vibrations engineering and technology*, 2022, № 2 (105), С.25–32.
13. Патент № 106274 С2 В07В 1/40 (2006.01) В07В 1/46 (2006.01). Вібраційний грохот / В. П. Франчук, В. О. Федосін, В. Ф. Куниця. № 201212439; заяв. 30.10.2012; опубл. 10.02.2014, Бюл. № 3.
14. Смирнов В. О., Білецький В. С. Проектування збагачувальних фабрик навчальний посібник. Донецьк: Східний видавничий дім, 2002. С. 296.
15. Feliks, J., Tomach, P., Foszcz, D., Gawenda, T., Olejnik, T. Research on the New Drive of a Laboratory Screen with Rectilinear Vibrations in Transient States. *Energies*. 2021. № 14(24), 8444. URL: <https://doi.org/10.3390/en14248444>
16. Xin Zhang, Lei Jia. Synchronization of Dual Induction Motor MultiFrequency Control Based on Fixed Speed Ratio. *Machines* 2024, 12 (97). URL: <https://doi.org/10.3390/machines12020097>.
17. Siemens. Digital Industries Software. 2025, 22 січень. URL: [https://www.sw.siemens.com/en-US/digital-transformation/sony-head-mounted display/](https://www.sw.siemens.com/en-US/digital-transformation/sony-head-mounted-display/)
18. Булгаков В. Теоретична механіка. Київ: Центр навчальної літератури, 2017, С.604.
19. Василенко М. В., Алексейчук О. М. Теорія коливань і стійкості руху : Підручник.К.: Вища шк., 2004.С 525.
20. Мороз В., Паранчук Я.С. Алгоритмізація та програмування. Пакет MathCAD. Львів: Львівська політехніка., 2012, С. 312
21. Папушин Ю. Л., Білецький В. С. Основи автоматизації гірничого виробництва (курс лекцій). Донецьк: Східний видавничий дім, 2007, С.168

22. Parovik, R. (2020). Mathematical Modeling of Linear Fractional Oscillators. *Mathematics*, 8(11), 1879. <https://doi.org/10.3390/math8111879>
23. Doerk, O., Fricke, W., Weissenborn, C. (2003) Comparison of different calculation methods for structural stresses at welded joints. *International Journal of Fatigue*, 5 (25), P.359-369
24. Jae-Myung Lee , Jung-Kwan Seo , Myung-Hyun Kim , Sang Beom Shin, Myung-Soo Han , June-Soo Park , Mahen Mahendran (2010) Comparison of hot spot stress evaluation methods for welded structures. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering* 2(4),P.200-210
25. Бутко, М.П., Бутко, І. М., Дітковська, М.Ю., Мурашко та ін. Системний підхід і моделювання в наукових дослідженнях. Київ: Центр учбової літератури, 2024.С.360.
26. Габрієлла Бірта, Юрій Бургу. Методологія і організація наукових досліджень. Київ: Центр учбової літератури, 2023, С.142.
27. Барковський, В.В., Барковська, Н.В. Теорія ймовірності та математична статистика. Навчальний посібник. Київ: Центр учбової літератури.2021 С. 220.
28. Unity Asset Store .URL: <https://assetstore.unity.com/3d>. 2025, 2 січня
29. Drive Optimization Guide Entry-ID: 60593549, V2.1, 05/2019
30. Siemens Drive Optimization Guide (PDF) (<https://publikacje.siemens-info.com/pdf/677/Drive%20optimalization%20guide.pdf>)
31. SinamicsG120_G120CURL:<https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:77730a6e-3ad4-4067-a8ea-f7e0d3541a97/version:1586551251/sinamcis-g120-g120c--2b-options-webinar-31-03-2020.pdf>
32. Products / Berthold Technologies, 2018. URL: <https://www.berthold.com/en/pc/products> (дата звернення: 19.02.2025).
33. Про затвердження Положення про проведення практики студентів вищих навчальних закладів України Міносвіти; Наказ, Форма типового документа від 08.04.1993 No 93. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/z0035-93>.

34. Методичні рекомендації про складання програм практики студентів вищих навчальних закладів України / укладачі: О. Є. Пантелеймонов, Л. М. Кохановський. Міністерство освіти України, 1995. 12 с.

35. Тронь В. В., Маринич І. А. Методичні вказівки до виконання магістерської кваліфікаційної роботи для студентів спеціальності 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка". Кривий Ріг: Видавничий центр КНУ, 2022. 50 с.

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

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

38. ДСТУ 3582:2013. Бібліографічний опис. Скорочення слів і словосполучень в українській мові. Загальні вимоги та правила. Київ, ДП «УкрННЦ», 2013. 23 с. (Інформація та документація).

39. 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).