

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра "Автоматизації виробничих процесів"

"Допущено до захисту"

Зав.кафедрою АВП

к.т.н., доцент

_____ Дідик О.К.

" _____ " _____ 2025р.

ВИПУСКНА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти

на тему

"Система автоматичного керування конусною дробаркою"

"Automatic control system for cone crusher"

Виконав: здобувач вищої освіти

IV курсу, групи АК-22мб

ОПП «Автоматизація та

комп'ютерно-інтегровані технології»

спеціальність 151 «Автоматизація та

комп'ютерно-інтегровані технології»

_____ Андрій ВІРЧЕНКО

" _____ " _____ 2025р.

Керівник роботи

професор, д-р техн.наук

_____ Анатолій Мацуї

" _____ " _____ 2025р.

Рецензент _____

ЗМІСТ

| | |
|---|---|
| ВСТУП..... | 1 |
| Призначення та область застосування системи керування..... | |
| 1.1. Характеристика і конструкція дробарки..... | |
| 1.2. Процес зменшення крупності руди у дробарці..... | |
| | |
| 2 Огляд існуючих рішень та обґрунтування прийнятого принципу побудови виробу..... | |
| 2.1 Системи автоматизованого керування дробарками..... | |
| 2.2 Розробка вимог до САК дробаркою..... | |
| 3 Опис та обґрунтування обраних проектних рішень та конструкцій..... | |
| 3.1 Математичний опис процесу дроблення..... | |
| 3.2 Розробка структурної схеми системи керування..... | |
| 3.3 Вибір засобів технічного забезпечення..... | |
| 3.4 Розробка алгоритмів керування..... | |
| 4 Візуалізація процесу керування..... | |
| 4.1 Програмне забезпечення для розробки САК розміром розвантажувальної щілини..... | |
| 4.2 Розробка підсистеми візуалізації..... | |
| Висновки..... | |
| Література..... | |

ВСТУП

Процес подрібнення сировини на збагачувальних фабриках слугує стартовим етапом перед наступними операціями з її обробки. У структурі технологічного процесу дробарка виконує подвійну роль: вона не лише подрібнює сировину, а й частково переміщує її далі по лінії. Потужність дробарного обладнання безпосередньо впливає на його здатність здійснювати транспортування. Проте між параметрами продуктивності та коефіцієнтом подрібнення існує певна суперечність: збільшення ширини щілини в зоні розвантаження з метою підвищення пропускної здатності знижує ступінь подрібнення.

На ефективність роботи дробарок суттєво впливають фізико-механічні властивості вихідної маси – такі як розмір частинок, вміст вологи, міцність та інші характеристики. Саме тому при виборі обладнання для дроблення на рудозбагачувальних комбінатах доцільно закладати запас за потужністю. А під час налаштування режимів роботи дробильних установок на реальних об'єктах необхідно орієнтуватися на максимально складні умови експлуатації.

Згідно з науковими оцінками та виробничими звітами, коефіцієнт корисного використання дробарного устаткування в умовах гірничодобувної промисловості, як правило, становить лише 50–60%, що свідчить про значний потенціал для підвищення його ефективності через оптимізацію налаштувань і технічне вдосконалення.

Підвищення результативності дробильного процесу можливе шляхом впровадження сучасних методів автоматизації та оптимізації, із урахуванням проектних технологічних резервів. Як свідчить практика, типовий для більшості конусних дробарок принцип руйнування за рахунок стискання – з енергетичної точки зору, один із найменш ефективних. Однак це твердження актуальне лише для ситуацій, коли один фрагмент матеріалу стискається між жорсткими металевими поверхнями.

Водночас, останні дослідження та виробничий досвід доводять, що продуктивність обладнання істотно зростає при щільному заповненні зони

подрібнення сировиною. У таких умовах шматки породи дробляться не лише під дією металу, а й за рахунок взаємодії між собою, що дозволяє значно підвищити вихід корисного продукту.

Система автоматичного керування (САК), побудована на концепції постійного рівня завантаження, передбачає стабільну подачу сировини у дробильну камеру. У такому разі для оптимізації технологічного процесу доцільно застосовувати адаптивне керування на основі аналізу питомої потужності двигуна або контролю положення розвантажувальної щілини. Щоб прийняти обґрунтоване рішення щодо вибору способу керування, необхідно дослідити наявні підходи до управління завантаженням дробарок та оцінити їх ефективність у промислових умовах.

З метою підвищення загальної ефективності подрібнення, з урахуванням кращих практик як вітчизняного, так і зарубіжного виробництва, важливо забезпечити обладнання сучасними електронними системами керування. Це досягається завдяки використанню обчислювальних засобів – зокрема, мікроконтролерів, які сьогодні вирізняються високою функціональністю при невисокій вартості.

Досвід впровадження автоматизованих систем керування технологічними процесами (АСКТП) на підприємствах гірничо-збагачувальної галузі в Україні підтверджує ефективність застосування таких технічних рішень. У світовій практиці вже існують моделі дробарок, які оснащені вбудованими функціями автоматичного регулювання розміру щілини, захистом від перевантажень та механізмами запобігання потраплянню неприпустимо великих фрагментів у завантажувальний отвір.

У зв'язку з цим інтеграція систем автоматичного контролю у вже діючі дробарки не тільки покращує якість подрібнення, а й сприяє зменшенню експлуатаційних витрат, підвищенню надійності обладнання та продовженню строку його служби.

1 Призначення та область застосування системи керування

1.1 Характеристика і конструкція дробарки

Конусна дробарка – це машина безперервної дії, призначена для подрібнення матеріалу й здатна функціонувати під завалом. Вона забезпечує можливість прямого завантаження гірської сировини безпосередньо з думпкарів або за допомогою конвеєрної системи. Найчастіше такі дробарки використовуються в гірничо-збагачувальній промисловості для обробки руд, зокрема магнетитових та залізистих кварцитів. Подрібнення в ній здійснюється завдяки круговому обертанню робочого органу – ексцентрично розташованого конуса, що виконує маятниковий рух. Саме це дозволяє ефективно розщеплювати та стирати породу.

Основною метою подрібнення є досягнення необхідного розміру фракцій, відповідно до технічних вимог подальшої переробки. Сировина, що надходить у дробильну зону, зазвичай має різні показники міцності та неоднорідний гранулометричний склад. Автоматизована система управління дробаркою слідкує за стабільністю розміру отриманого матеріалу, коригуючи ширину розвантажувальної щілини. Це дозволяє не лише зберігати необхідну якість продукту, а й досягати максимальної продуктивності агрегату при повному завантаженні робочої камери.

Конусні дробарки належать до категорії ефективного обладнання, що активно застосовується для подрібнення гірських порід різного типу на всіх етапах дроблення – від первинного до фінішного. Вони класифікуються за функціональним призначенням на агрегати крупного (ККД), середнього (КСД) і дрібного (КМД) дроблення. Виробники в Україні налагодили серійний випуск моделей ККД з розмірами приймального отвору 500, 900, 1200 та 1500 мм. У свою чергу, модифікації КСД і КМД відрізняються між собою діаметром основи рухомого конуса: для КСД це 600 і 900 мм, а для КМД – 1200, 1750 і 2200 мм (приклад зображено на рис.1.1). Таке обладнання є невіддільною

частиною процесу механічної переробки корисних копалин і використовується на підприємствах гірничо-видобувної промисловості.

Ведуться розробки нових моделей конусних дробарок з робочими діаметрами конуса 2500 і 3000 мм. Обладнання типу КСД здатне переробляти фрагменти гірської маси розміром від 60 до 300 мм. Залежно від налаштувань щільності на виході, яка може коливатись у межах 12–60 мм, ці установки забезпечують продуктивність у діапазоні від 12 до 580 кубічних метрів за годину.

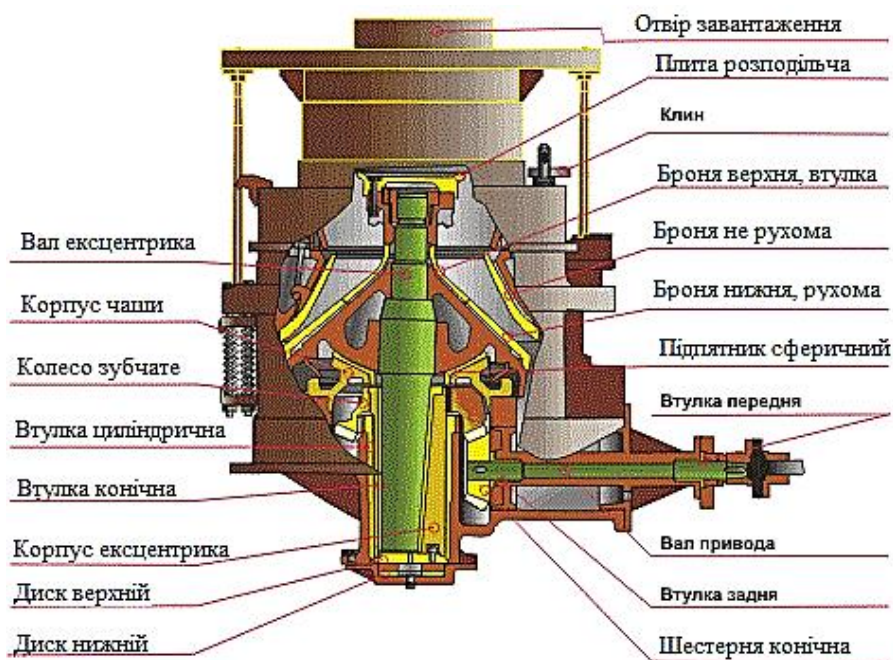


Рисунок 1.1 - Конструкція конусної дробарки середнього дроблення (КСД2200Т)

Конусні дробарки типу КМД призначені для переробки матеріалів із розміром частинок від 35 до 100 мм. Після подрібнення на виході отримують фракції розміром від 3 до 15 мм. Їхня продуктивність може коливатись у межах від 12 до 220 м³ на годину. Основні технічні параметри моделей КСД і КМД подано у табл.1.1 [1].

У конусних дробарках подрібнення відбувається в спеціальній камері, що має форму конуса. Вона формується двома конічними елементами: зовнішній залишається стаціонарним, а внутрішній здійснює коливальні рухи. Саме завдяки цим рухам і виникає процес дроблення твердих матеріалів.

Кінематичні побудови конусних дробарок зображено на рисунках 1.2.а (тип ККД) та 1.2.б (типи КСД і КМД) [9]. Конус, який виконує подрібнення, жорстко зафіксований на валу 3. Нижня частина цього вала встановлюється в ексцентрикову втулку 4 таким чином, що його вісь розміщується під певним кутом до осі обертання дробарки – цей кут має назву кут прецесії. У конструкції дробарок типу ККД верхня частина вала з'єднана з траверсою 1 за допомогою шарнірного вузла.

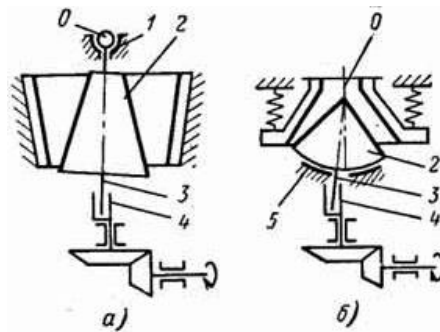


Рисунок 1.2 - Кінематичні схеми конусних дробарок

Конусні дробарки типів КСД і КМД мають рухомий конус, що спирається на сферичний підп'ятник (поз. 5). Особливістю конструкції є відсутність кріплення верхньої частини вала, у зв'язку з чим такі моделі класифікують як дробарки з консольним валом. Обертальний рух ексцентриковій втулці передається за допомогою приводного механізму.

У дробарках ККД точка гойдання розташована у верхній частині – в місці підвісу. У випадку дробарок із консольною конструкцією вала центр гойдання також міститься у верхній частині й збігається з точкою перетину осі обладнання та вала.

Під час роботи дробарки вал обертається таким чином, що його вісь формує конічну поверхню, вершина якої розташована в точці 0. Поверхні рухомого конуса почергово наближаються до стаціонарного конуса й знову віддаляються від нього. Це створює ефект перекочування рухомого елемента по нерухомому, між якими розміщений шар матеріалу. У результаті відбувається постійне подрібнення породи або сировини. Такий механізм дії загалом подібний до принципу роботи щоквої дробарки, однак з ключовою

відмінністю – у конусній дробарці дроблення не припиняється ні на мить. У будь-який момент якась частина поверхні рухомого конуса контактує з нерухомим, спричиняючи роздавлювання матеріалу, тоді як на протилежному боці ці елементи розходяться. Це забезпечує рівномірний і безперервний процес подрібнення.

Реальний рух рухомого конуса є значно складнішим, ніж здається на перший погляд. Під час холостої роботи дробарки тертя між ексцентриковою втулкою і валом може перевищувати сили тертя, що виникають у місці з'єднання вала з точкою підвісу (як для ККД), або ж між рухомим конусом і сферичною опорою (у випадку моделей КСД та КМД). У такій ситуації конус починає обертатися навколо власної осі у тому ж напрямі, що й ексцентрикова втулка, через переважання відповідного моменту тертя.

Таблиця 1.1 - Характеристики типових конусних дробарок

| Показник | КСД-600ГР | КСД-900ГР | КСД-1200Т | КСД-1200ГР | КСД-1750ГР | КСД-2200Т | КСД-2200ГР |
|---|-----------|-----------|-----------|------------|------------|-----------|------------|
| Продуктивність, м3/ч | 19-32 | 38-62 | 30-85 | 70-105 | 160-300 | 120-340 | 340-580 |
| Діаметр основи рухомого конуса, мм | 600 | 900 | 1200 | 1200 | 1750 | 2200 | 2200 |
| Найбільший розмір завантажуваного матеріалу, мм | 75 | 115 | 100 | 150 | 215 | 250 | 300 |
| Розмір вихідної щілини, мм | 12-25 | 15-50 | 8-25 | 20-50 | 25-60 | 10-30 | 30-60 |
| Довжина паралельної зони, мм | 50 | 70 | 150 | 110 | 150 | 250 | 150 |
| Частота обертання ексцентричної втулки, об/с | 5,8 | 5,4 | 4,3 | 4,3 | 4,1 | 3,7 | 3,7 |
| Потужність електродвигуна, кВт | 28 | 55 | 75 | 75 | 160 | 200-250 | 200-250 |
| Маса(без електрообладнання та масла), т | 3,6 | 9,6 | 24,8 | 24,8 | 47,0 | 80,5 | 80,0 |

Залежно від співвідношення сил тертя в з'єднаннях кінематичних елементів, кількість обертів конуса 1 може варіюватися в межах від нуля до величини, що дорівнює числу обертів ексцентрикової втулки. Небажане самостійне обертання рухомого конуса навколо власної осі спричиняє додаткові коливальні навантаження під час подачі сировини в зону подрібнення. З цієї причини у деяких моделях конусних дробарок конструктивно передбачено спеціальні гальмівні механізми, які запобігають обертанню конуса під час роботи агрегату.

Під час процесу дроблення матеріалу тертя між його частинками та поверхнею конусів стає значно більшим, ніж у раніше розглянутих з'єднаннях. Це спричиняє обертання рухомого конуса навколо своєї осі в сторону, протилежну до напрямку обертання ексцентрикової втулки. Щоб зрозуміти розподіл діючих сил, розглядають горизонтальний переріз камери дроблення конусної дробарки (рис. 1.3). Через нахил осі рухомого конуса на певний кут α у з'єднанні вал – ексцентрикова втулка виникає сила тертя, що впливає на характер руху елементів механізму.

$$F_1 = f_1 \cdot G \cdot g \cdot \operatorname{tg}(\alpha) \quad (1.1)$$

де f_1 - коефіцієнт тертя поверхонь втулки і вала; G - маса вузла рухомого конуса; g - прискорення вільного падіння.

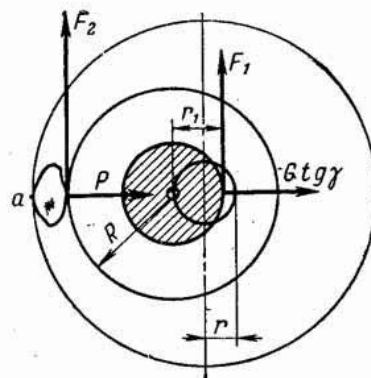


Рисунок 1.3 - Схема дії сил в довільному перерізі конусної дробарки

Конусна дробарка характеризується такими параметрами[12]:

1. Ширина вхідного отвору, мм
2. Ширина розвантажувальної щілини на відкритій стороні, мм

3. Розмір максимального шматка (по 5% залишку на квадратній комірці), мм
4. Продуктивність, м³/ч
5. Потужність головного приводу, кВт
6. Напруга струму, що підводиться, В
7. Маса без комплектуючих виробів та деталей, т
8. Діапазон регулювання ширини розвантажувальної щілини, мм
9. Частота обертання приводного валу, хв⁻¹
10. Частота коливань конусу, що дробить, хв⁻¹

1.2 Процес зменшення крупності руди у дробарці

Руду з вагонів на залізничній колії вивантажують за допомогою роторних вагоноперекидачів у приймальний бункер дробарки грубого дроблення (наприклад, моделі ККД 1500/300). Цей агрегат забезпечує перетворення нерівномірного потоку матеріалу в більш стабільний. Після первинного подрібнення руда з розміром частинок до 300 мм надходить стрічковим конвеєром 1 (рис. 1.4) у накопичувальний бункер 2, розташований на ділянці середнього та дрібного дроблення. Цей бункер виконує аналогічну функцію – стабілізує подачу сировини.

Уся лінія складається з восьми технологічних потоків. Кожен із них включає в себе дробарку нормальноконусного типу 4 (НКД), далі – вузол проміжного грохочення 6, що розділяє матеріал за розмірами, після чого руда потрапляє в короткокonusну дробарку 7 (ККД) для остаточного подрібнення.

Руда, що надходить із бункера другого ступеня середнього дроблення, подається пластинчастим живильником у дробильну установку середнього типу. Далі вона транспортується похилим конвеєром до вібраційного грохоту, де здійснюється подальше розділення. Матеріал, який залишається на верхній частині сита, спрямовується до дробарки дрібного дроблення, тоді як фракція, що проходить крізь сито, транспортується збірним конвеєром до бункера збагачувальної фабрики для подальшої обробки.

На збагачувальних фабриках дробильні дільниці здійснюють обробку руди, розміри якої можуть сягати до 1300 мм. Після подрібнення матеріал надходить до подальших технологічних процесів уже з розміром частинок у межах 25 мм і менше.

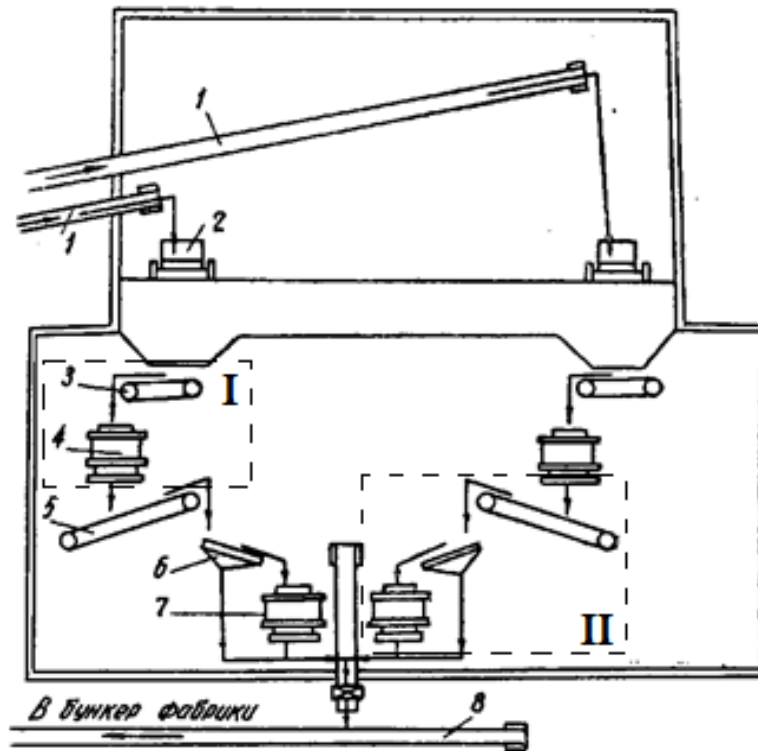


Рисунок 1.4 - Схема технологічного процесу двухстадійного подрібнення

У зв'язку з технічними обмеженнями більшості сучасних дробарок, змінювати розмір розвантажувальної щілини в реальному часі практично неможливо. Тому автоматизація керування процесом найчастіше зосереджена на підтриманні сталого навантаження на обладнання.

Досягти автоматичного контролю за продуктивністю дробарки можна через стабілізацію подачі рудної маси, рівня її завантаження, а також параметрів енергоспоживання – таких як сила струму, споживана потужність електродвигуна та питома енергоємність процесу дроблення.

На рис. 1.5 наведено два варіанти схем автоматизації конусної дробарки [2]. Схеми переробки мають між собою різницю лише в тому, що в першому варіанті (схема «а») додатково передбачене грохочення на третьому етапі.

У цій схемі також реалізовано функцію автоматичного регулювання навантаження на дробарку. Для цього використовується сигнал про зміну споживаної електродвигуном потужності як індикатор відхилення від заданих умов роботи.

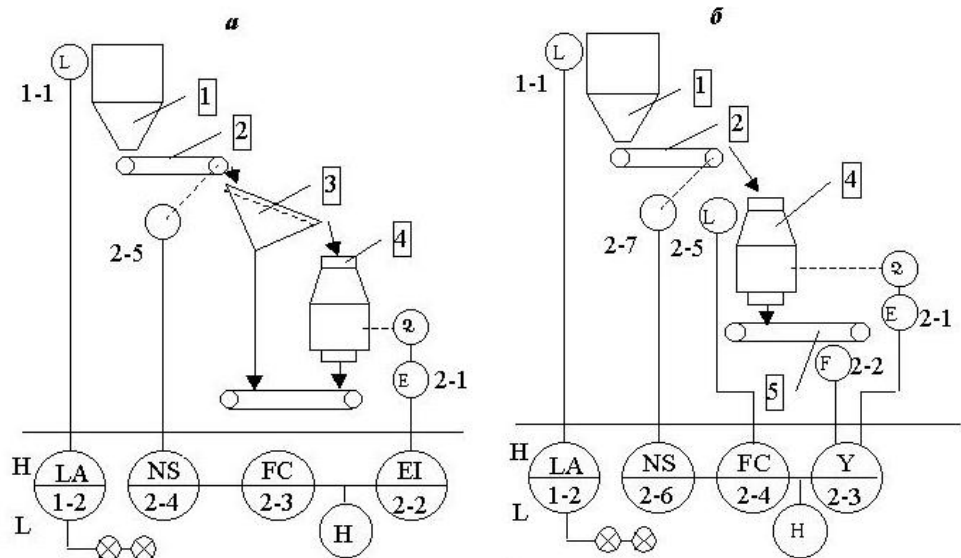


Рисунок 1.5 - Схеми автоматизації процесу дроблення руди : а – за споживаною потужністю; б – за питомими витратами

1 – бункер; 2 – пластинчастий живильник; 3 – грохот; 4 – конусна дробарка; 5 – конвеєр.

До складу системи входить початковий перетворювач енергоспоживання (2-1), стандартний комплект елементів системи автоматичного регулювання: вторинний вимірювальний прилад, регулятор із вбудованим задатчиком, а також станція керування. У ролі приводу пластинчастого живильника використовується асинхронний двигун (2-5), керований через тиристорний модуль, що забезпечує можливість безперервного регулювання продуктивності подачі матеріалу.

Головним недоліком цієї автоматизованої системи є те, що рівень енергоспоживання двигуна змінюється залежно від фізичних характеристик руди, зокрема її твердості, розміру часток та вологості. Оскільки система автоматичного регулювання налаштована переважно на переробку сировини із

середніми параметрами, існує ризик перевантаження вхідної камери дробарки у разі надходження легшеоброблюваної – м'якшої або дрібнішої – руди.

Варто зазначити, що присутність грохота між дробаркою – як об'єктом регулювання – та живильником, який виконує роль регулювального органу, істотно ускладнює функціонування системи автоматичного регулювання. Це пов'язано з тим, що в технологічний процес додається транспортне запізнення, що негативно впливає на оперативність і точність регулювання.

У схемі автоматизації, зображеній на рис.1.5, б, усунуто раніше виявлені недоліки. У цій конфігурації роль вхідного сигналу виконує відхилення питомої витрати електроенергії. Для отримання сигналу, що відповідає значенню питомої енерговитрати, у функціональному блоці (2-3) здійснюється операція ділення сигналу, який надходить від перетворювача потужності (2-1), на дані з системи зважування (2-2). У разі надмірного накопичення матеріалу в дробарці, що може бути спричинено, зокрема, зменшенням міцності сировини, сигнал з датчика рівня (2-5) передається на регулятор (2-4). Це унеможливорює подальше зростання навантаження на дробарне обладнання.

У кожній із запропонованих систем автоматизації реалізовано контрольні функції для відстеження мінімального та максимального рівнів у завантажувальних бункерах із сировиною (підсистема 1).

У виробничій практиці зазвичай вдаються до реалізації підходу, який полягає в підтриманні стабільного руху сировини та необхідного її запасу для операцій крупного, середнього й дрібного дроблення. Це досягається завдяки ефективному регулюванню роботи потоково-транспортної інфраструктури (ПТС) у межах відповідних цехів. Злагоджене функціонування ПТС дозволяє утримувати рівномірний потік рудної маси в межах технологічного ланцюга, що охоплює такі елементи, як завантажувальні ємності, транспортерні стрічки, грохоти, дробильні установки, живильні пристрої та пункти перевантаження.

Автоматизувати процес наповнення бункерів можливо шляхом застосування спеціалізованих систем керування, серед яких – обладнання для автоматичного контролю за завантаженням. Такі пристрої поєднують модулі дистанційної передачі сигналів із засобами автоматизації, розробленими та

виготовленими на Луганському підприємстві «Вуглеприлад». Ці системи забезпечують керування переміщенням завантажувального обладнання над бункером у трьох режимах: автоматичному, ручному на місці та дистанційному. Робота апаратури базується на логічних схемах, зокрема із використанням безконтактних електронних компонентів типу «Оператор».

Таким чином, можна зробити висновок, що через технічні обмеження більшості сучасних дробарок, які не дозволяють швидко змінювати ширину розвантажувальної щілини, автоматизоване управління процесом здебільшого спрямоване на підтримку сталого рівня навантаження на обладнання. Підвищення продуктивності дробарки можливе також завдяки впровадженню ефективної системи моніторингу та оперативного коригування параметрів щілини в зоні вивантаження матеріалу [3].

Загальна степінь дроблення

$$S_{\text{заг}} = \frac{D_{\text{max}}}{d_{\text{max}}}, \quad (1.2)$$

де D_{max} - максимальна крупність шматків вихідної руди, мм; d_{max} - максимальна крупність шматків продукту дроблення, мм. Визначення ступеня дроблення в окремих стадіях

$$S_{\text{заг}} = S_j \cdot S_{j+1} \cdot \dots \cdot S_n, \quad (1.3)$$

де S_j – степінь дроблення першої стадії; S_{j+1} , S_n – степені дроблення подальших стадій (в основному застосовуються двох і трьох стадійні схеми типів (рис. 1.6–1.9). Орієнтовні значення максимальної крупності матеріалів після різних етапів дроблення (за результатами гранулометричного аналізу) визначаються за допомогою звітних матеріалів досліджень або довідкової інформації. Під час розробки ефективної технологічної схеми дроблення важливо визначити оптимальну кількість стадій подрібнення, а також доцільність використання операцій попереднього чи контрольного грохочення на певних етапах. Кількість необхідних стадій залежить від фракції початкової сировини та бажаної кінцевої крупності. Побудова математичної моделі дробильного

процесу та грохочення передбачає обчислення параметрів схеми та розрахунок продуктивності всього комплексу. Для цього слід враховувати заплановану добову продуктивність дробильного відділення, а також параметри подрібненого матеріалу

$$D_n = \frac{D_{max}}{S_n}, \quad (1.4)$$

де D_{max} – крупність продукту, що надходить на n стадію дроблення.

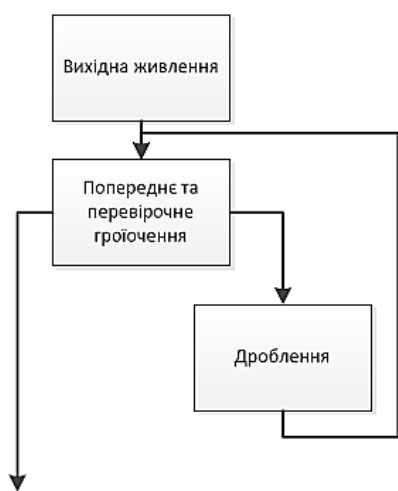


Рисунок 1.6

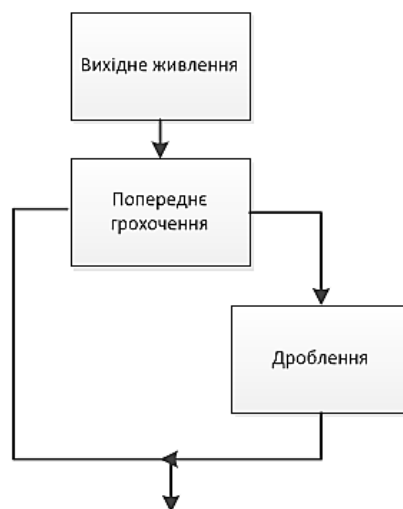


Рисунок 1.7

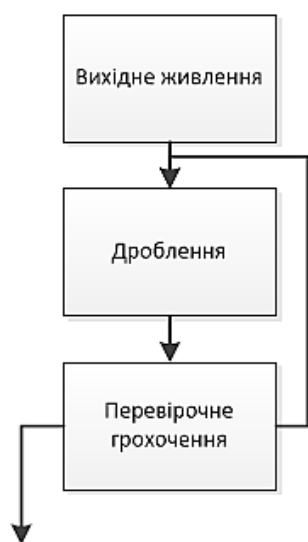


Рисунок 1.8



Рисунок 1.9

2 Огляд існуючих рішень та обґрунтування прийнятого принципу побудови виробу

2.1. Системи автоматизованого керування дробарками

У процесі еволюції автоматизованих дробильно-подрібнювальних комплексів і всієї гірничовидобувної галузі було створено низку технологічних рішень для керування процесами, зокрема методів подачі матеріалу до дробарок. Ці підходи постійно вдосконалюються з метою підвищення надійності, продуктивності та загальної ефективності функціонування обладнання.

Серед таких розробок варто виокремити системи контролю й оптимізації завантаження дробильних агрегатів, які були запропоновані та реалізовані провідними фахівцями галузі. Зокрема, значний внесок у цю сферу зробили Трушин А. А., Глазов Ю. П. і Іванов Ю. Б., які запропонували систему стабілізації подачі матеріалу (рис. 2.1) [4].

До її складу належать такі компоненти: пристрій контролю потужності (1), яка витрачається на роботу приводу дробарки; керований електропривод (2) живильника руди; вимірювач об'єму подачі руди (3); регулюючий механізм (4) подачі матеріалу; пристрій (5) стабілізації потужності; два завданих значення (6, 7) потужності; три вузли зіставлення сигналів (8, 9, 10); логічний компонент типу "І" (11); електромагнітні реле (12, 13); контакти реле (16, 17), які здійснюють замикаючу функцію; модулі завдання мінімальної продуктивності (18), гранично низької споживаної потужності (19) та максимально допустимої швидкості живильника (20); блок (21), що формує керуючий сигнал для зміни швидкості обертання живильного механізму; сенсор (22), який фіксує поточну швидкість його роботи.

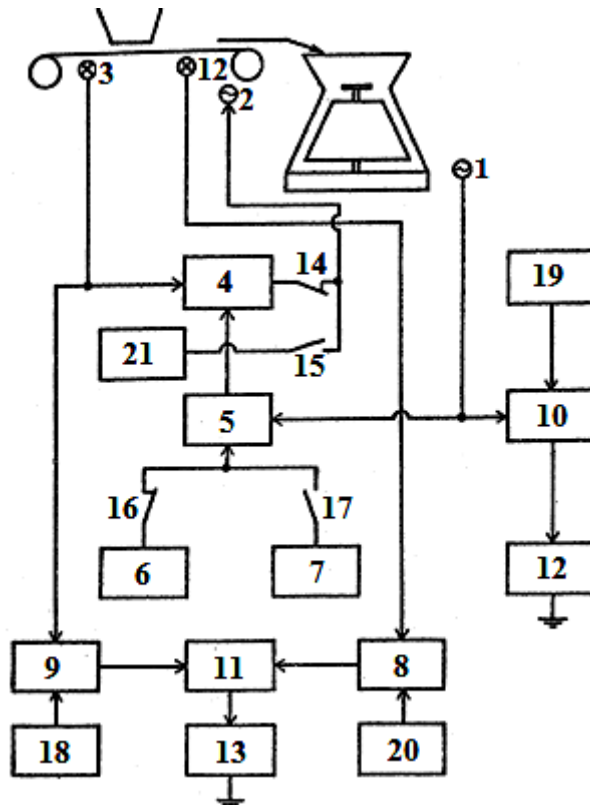


Рисунок 2.1 - Система автоматичного управління завантаження дробарки, розроблена Трушиним А. А., Глазовим Ю. П. та Івановим Ю. Б.

За умови штатного функціонування системи регулювання, яка контролює продуктивність дробарного обладнання, формується команда на стабілізацію, що забезпечує роботу установки в межах заданого діапазону продуктивності. У разі аварійного блокування потоку з бункера живлення подача руди на живильник припиняється, що спричиняє різке зниження продуктивності всієї секції, аж до повної зупинки. Проте в такій ситуації система автоматичного регулювання продовжує підвищувати командний сигнал, орієнтуючись на відновлення необхідного рівня продуктивності, внаслідок чого збільшується швидкість обертання живильника.

У ситуації, коли фактична продуктивність опиняється нижчою за встановлене мінімальне значення, а керуючий сигнал досягає або перевищує максимально дозволений рівень, блоки контролю (8 і 9) синхронно подають сигнали на логічний елемент «І». У результаті формується імпульс, що активує реле (13). Розімкнений контакт (14) при цьому від'єднує вихід регулятора (4), тоді як замкнений контакт (16) передає команду з блоку (21) на привід (2),

ініціюючи подачу найменшої допустимої кількості сировини. У разі самостійного усунення порушення, знову починає надходити руда, і швидкість роботи живильника автоматично збільшується. Це відбувається через повернення реле (13) у початковий стан, після чого система стабілізації продовжує працювати у звичному режимі.

У розробленій системі автоматичного подавання матеріалу до дробарки, створеної за участі ВНІнеруд, ВНІСтройДорМаш та інституту ВажПромАвтоматика (рис. 2.2) [9], контроль за змінними параметрами, такими як об'єм подачі та висота завантаження, здійснюється за допомогою електротензометричних вагових транспортерів (поз. 1) та фотоелектричного датчика рівня (поз. 2).

Система автоматичного керування складається з двох незалежних контурів – контролю рівня та регулювання продуктивності (3,4), які через проміжний вузол (5) впливають на струм підмагнічування однофазних силових магнітних підсилювачів (6). Вихідна випрямлена напруга цих підсилювачів надходить на обмотку якоря електродвигуна, що приводить у дію дробарку. У разі перевищення встановлених граничних значень контрольованими параметрами під час роботи в автоматичному режимі, на вузол (5) надсилається сигнал, внаслідок чого живильник починає знижувати продуктивність. Це триває доти, доки сигнал не зникне, тобто параметри не повернуться в допустимі межі.

Коли рівень заповнення не перевищує нижню межу (близько 60% від повної висоти камери дроблення), система переходить на управління виключно за показниками продуктивності. При досягненні критичного рівня завантаження (приблизно 90% висоти дробильної камери) регулятор автоматично зупиняє подачу матеріалу живильником. У випадку зниження заповнення нижче порогового значення, система орієнтується виключно на показники продуктивності.

Серед основних недоліків конструкції – використання релейного принципу керування. Такий тип регулювання зумовлює часті цикли увімкнення й вимкнення обладнання, що спричиняє прискорене зношення електроапаратури, редуктора та пластинчастого живильного механізму.

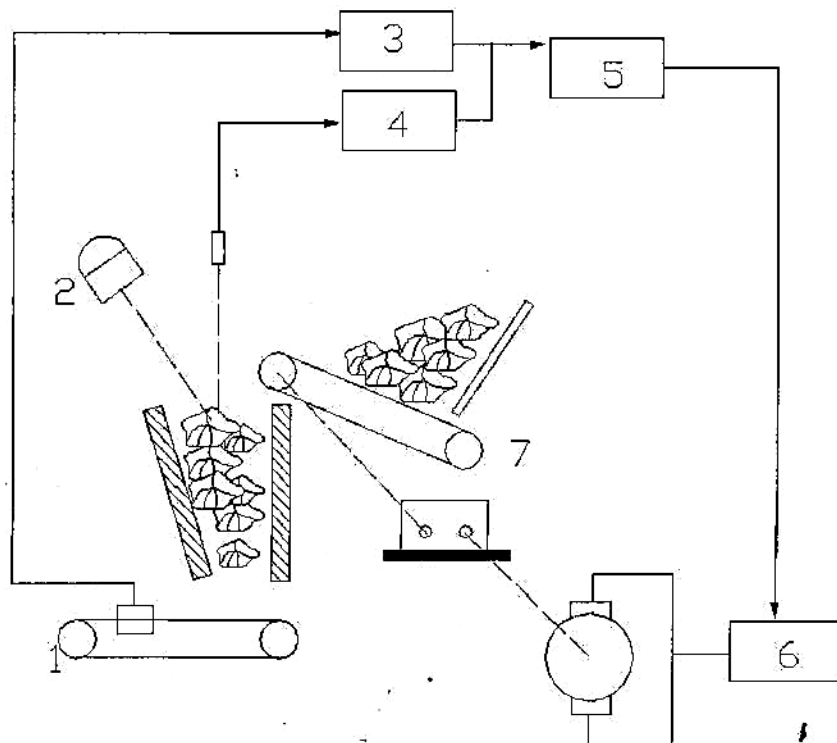


Рисунок 2.2 – Система управління завантаженням дробарки, створеної ВНІнеруд, ВНІСтройДорМаш та інститутом Важпромавтоматика

Цикли скорочення крупності матеріалу

Технологічні цілі процесів подрібнення твердих матеріалів можуть охоплювати такі напрямки:

- 1) відкриття корисних компонентів у мінеральній сировині перед проведенням її збагачення, зокрема методом флотації при переробці руд, що містять метали;
- 2) розширення площі поверхні, яка може вступати в хімічні реакції, наприклад, під час термічної обробки суміші вапняку з кварцом в умовах обертання печі;
- 3) отримання частинок гірських порід або мінералів, що відповідають певним параметрам крупності або мають задану площу поверхні для подальшого використання.

Зменшення розміру вихідного матеріалу зазвичай здійснюється поетапно – через кілька послідовних стадій (рис. 2.3). Між етапами дроблення часто встановлюють спеціалізоване збагачувальне обладнання. Це дозволяє уникнути

надмірного подрібнення цінних компонентів та своєчасно вилучати пусту породу після її вивільнення з руди.

Уникнення надмірного подрібнення є надзвичайно важливим, оскільки ступінь ефективності процесів збагачення безпосередньо залежить від розміру частинок (рис. 2.3). Виведення з технологічного циклу фрагментів максимально допустимої крупності дає змогу знизити загальні витрати на дроблення. Схема, наведена на рис. 2.2, демонструє можливість вилучення більших частинок методом флотації, що дозволяє направляти на подальше подрібнення лише ті зерна, які ще не повністю звільнені та мають низьку швидкість фільтрації. Це суттєво скорочує явище повторного подрібнення. Доменні печі в рамках процесу функціонують автономно одна від одної. На рис. 2.4 показано спрощену схему дроблення, яка ілюструє технологічний процес обробки залізної руди.

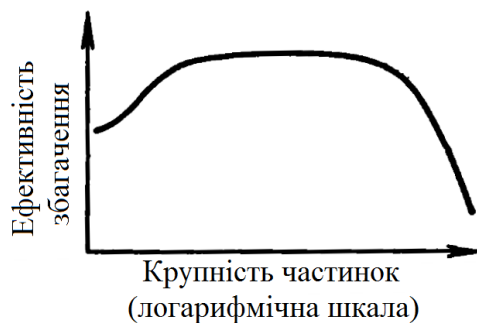


Рисунок 2.3 – Залежність ефективності процесу збагачення від крупності частинок

Продуктивність дробарки залежить від обсягу сировини, яку подає живильник, або від її фактичної пропускної можливості.

На рис. 2.4 зображено функціональну схему автоматизованого управління подачею матеріалу на каскад середнього та дрібного дроблення. Цю систему створили фахівці кафедри автоматизації виробничих процесів спільно зі спеціалістами цеху контрольно-вимірювальних приладів та автоматики Соколовсько-Сарбайського гірничо-збагачувального комбінату. Наразі зазначене рішення успішно експлуатується на дванадцяти каскадах дільниці дроблення ДОФ-3 ССГЗК.

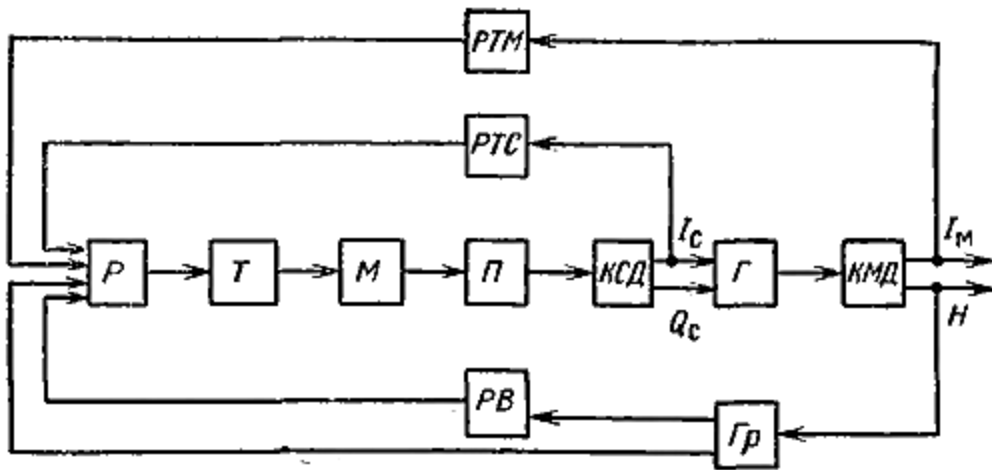


Рисунок 2.4 - Функціональна схема автоматичної системи керування пускачем каскаду дробарок середнього і дрібного дроблення

Продуктивність дробарки залежить від обсягу сировини, яку подає живильник, або від максимальної кількості матеріалу, що здатна пройти через дробарку за певний час.

На рисунку 1.15 зображено функціональну схему автоматизованої системи керування подачею матеріалу в живильник каскаду середнього та дрібного дроблення. Цю систему спільно створили фахівці кафедри автоматизації виробничих процесів і спеціалісти контрольно-вимірального цеху Соколовсько-Сарбайського гірничо-збагачувального комбінату. Наразі вона успішно працює на 12 каскадах дроблення середнього та дрібного типу дробильно-збагачувальної фабрики №3 цього підприємства.

1. У випадку, коли матеріал, що подається на дроблення, характеризується високою твердістю, а живильник працює з продуктивністю, меншою за максимальну пропускну здатність дробарки, система забезпечує стабільне навантаження на двигуни, що відповідає номінальному струму.

2. Якщо оброблюваний матеріал має невелику міцність, а струмове навантаження середньої та дрібної дробарки не досягає номінального рівня ($I_c < I_{cн}$, $I_m < I_{mн}$), відбувається регулювання подачі матеріалу залежно від його рівня у дробарці. Це дозволяє підтримувати її продуктивність на рівні максимальної пропускну здатності.

Метод визначення заповнення бункера дробарки, заснований на віброакустичному аналізі, був розроблений В.М. Назаренком, О.І. Савицьким, І.В. Саяпіним, О.І. Шенедеровим та Ю.Г. Бобухом [5]. Цей підхід дозволяє здійснювати контроль за рівнем матеріалу в бункері безперервно та безконтактно, використовуючи коливальні сигнали, що виникають у процесі роботи обладнання.

2.2 Розробка вимог до САК дробаркою

Після аналізу, проведеного в попередньому пункті, було виявлено достатню кількість наявних технічних рішень, що дозволяють здійснювати регулювання процесу дроблення в камері КД. Це стало підставою для ухвалення рішення щодо створення системи автоматичного контролю (САК), основною функцією якої стане регулювання ширини розвантажувального зазору. Такий підхід сприятиме підвищенню загальної ефективності роботи технологічного комплексу.

У межах теорії автоматизованого управління виробничими процесами використовуються різні підходи до оцінки ефективності впроваджуваних систем. Серед основних показників можна виокремити наступні:

1. Рівень продуктивності системи

Під рівнем продуктивності мається на увазі кількість операцій або одиниць роботи, яку обладнання здатне реалізувати за конкретний відрізок часу. Це дозволяє оцінити ефективність функціонування технічного комплексу.

2. Собівартість використання системи

Собівартість формується на основі економічних параметрів, що враховують вартість придбання обладнання, а також витрати, пов'язані з його обслуговуванням, модернізацією та ремонтом у процесі експлуатації.

3. Рівень якості кінцевого продукту, отриманого за допомогою системи

Показники якості залежать від сукупності технічних, функціональних і експлуатаційних характеристик виробу, які дозволяють йому відповідати встановленим вимогам споживачів та нормативам галузі.

Основні технічні критерії до системи

До технічних вимог належать показники надійності, безпеки, сумісності з іншими елементами виробничого процесу, а також здатність до адаптації й автоматизації в умовах змін навантаження або технологій. Розроблювана САК повинна забезпечити:

- Роботу системи в режимі «Оперативне регулювання»;
- Роботу системи в режимі «Регулювання при зупинці»;
- Оптимальну якість вихідного матеріалу за доступними питомими витратами;
- Своєчасне і достовірне передачу даних з датчиків на ПЛК;
- Регулювання розміром розвантажувальної щілини;
- Захист виконавчого механізму регулювання розміром розвантажувальної щілини від струмів короткого замикання;
- Індикацію температурних параметрів системи;
- Індикацію даних з датчиків встановлених на конвеєрних вагах;
- Індикацію інформації про поточний розмір розвантажувальної щілини;
- Індикацію про аварійну зупинку;
- Керування пуском дробарки з ПЛК;
- Керування зупинкою дробарки з ПЛК;
- Керування розміром розвантажувальної щілини з ПЛК;
- Захист електродвигуна приводного валу дробарки від струмів короткого замикання;
- Аварійну зупинку електродвигуна дробарки;
- Зупинку електродвигуна дробарки при перегріванні підшипників;
- Зупинку електродвигуна дробарки при забиванні камери дроблення.

Технічні вимоги до устаткування:

Конусна дробарка повинна відповідати таким вимогам:

Продуктивність не менше - 20 т/г;

Розмір вихідної щілини - 10-25мм;

Найбільший розмір завантажуваного матеріалу - 75мм;

Потужність електродвигуна не більше - 90 кВт.

Грохот повинен відповідати таким вимогам:

Кількість сит - не менше 2;

Розмір сита - 5-25мм;

Максимальний розмір сировини не менше - 75мм;

Продуктивність - 5-30 т/г;

Потужність - 5-8 кВт;

Конвеєра повинні відповідати таким вимогам:

Ширина стрічки – не менше 400мм;

Довжина конвеєру – 10-20м;

Продуктивність – 30-150 т/г;

Потужність – 2-8 кВт.

3 Опис та обґрунтування обраних проектних рішень та конструкцій

3.1 Математичний опис процесу дроблення

Ключовим параметром, що характеризує ефективність функціонування дробарки, виступає розподіл частинок за розмірами у подрібненому матеріалі (d_{cp} або частковий вихід фракцій y_i). Зміни у цьому розподілі суттєво впливають на подальші стадії подрібнення [6]. До числа основних керованих параметрів також зараховують продуктивність агрегату ($Q_{вих}$) та споживання активної потужності електроприводу (N).

Параметри, що визначають вхід у процес дроблення, включають: продуктивність подачі сировини Q_{ex} , фракційний склад поданого матеріалу d_{ex} , міцність гірської породи та ширину щілини на виході h . Із цих параметрів керуючими впливами виступають Q_{ex} та h , тоді як інші змінні вважаються зовнішніми збуреннями. Найбільш дієвим засобом керування дробленням вважається налаштування розміру розвантажувальної щілини. Це стало можливим завдяки використанню конусних дробарок, у яких положення конуса можна регулювати за допомогою гідравлічного приводу. У зв'язку з цим дробарні машини такого типу доцільно розглядати як керовані об'єкти зі змінними динамічними властивостями. Як показник результативності дробильного процесу часто обирають величину E , яка відображає ефективність енергетичних витрат або ступінь подрібнення

$$E = k_0 Q_{вих} \sum_{i=1}^n k_i Y_i \quad (3.1)$$

де k_0 - коефіцієнт пропорційності; Y_i - відносний вихід контрольованих фракцій дробленого матеріалу; K_i - коефіцієнт попиту різних фракцій в процесі подрібнення; n - кількість контрольованих фракцій. Під час дроблення щебеню коефіцієнт k_i набуває значення, яке відповідає фактичній вартості реалізації фракційної продукції – ціни $Ц_i$. Відтак, регулювання дробильного процесу розглядається як задача досягнення необхідної якості отриманого матеріалу, що визначається заданим показником результативності E .

У спеціалізованих джерелах описуються функції мети для процесу дроблення, характерні для окремих типів дробарок. Вони були сформульовані на основі аналізу даних, отриманих у ході запланованих промислових випробувань. Зокрема, для дробарки типу КСД-2200 було побудовано математичну модель, яка відображає процес оптимізації дроблення в умовах статичної рівноваги

$$E = -0.965 + 0.567h - 0.231 * 10^{-1}h^2 + 0.243 * 10^{-2}\sigma - 0.282 * 10^{-4}h\sigma - 0.71 * 10^{-6}\sigma^2 \quad (3.2)$$

Наразі у промисловості використовують кілька методів автоматизованого керування роботою дробарок, які базуються на підтримці стабільності певних технологічних параметрів. До таких параметрів належать: об'єм подачі руди, споживання активної потужності електроприводом дробарного обладнання та ступінь заповнення камери дроблення. У всіх згаданих випадках контроль якості дроблення здійснюється опосередковано – через непрямі показники.

Зокрема, метод стабілізації за витратою рудної маси не враховує варіацій у міцності або розмірах поданої сировини, що призводить до недосконалого регулювання процесу. Наприклад, при надходженні надто твердої руди дробарка може працювати на межі перевантаження, тоді як при подачі м'якшого матеріалу навпаки – працюватиме з недостатньою ефективністю через недовантаження.

Більш надійними вважаються системи, які орієнтуються на споживання енергії та ступінь заповнення дробарки, оскільки ці параметри відображають як кількість, так і якість матеріалу, що надходить на переробку. Вони відображають зміну крупності та фізичних характеристик сировини, тим самим забезпечуючи більш точне управління.

Окрім того, активно ведуться розробки автоматичних систем регулювання гранулометричного складу подрібненої продукції для досягнення стабільних характеристик кінцевого продукту.

Що стосується моделювання, конусні дробарки за каналом середньої крупності ($d_{cp}-h$) можуть бути представлені як аперіодичні динамічні системи

першого порядку з наявністю запізнення, що підтверджується дослідними даними [1]

$$T' = 0.25yD^2 \frac{m}{k_1} = \frac{M}{Q_{\text{вих}}} \quad (3.3)$$

а запізнювання визначається як час транспортування матеріалу від розвантаження до місця установки датчика. Тут y - насипна маса матеріалу; D - діаметр нижньої основи конуса, що дробить; m - число хитань конуса, необхідних для повного розвантаження камери дробарки; $k_1 = \frac{\Delta Q_{\text{вих}}}{\Delta d_{\text{ср}}}$ - коефіцієнт чутливості по каналу $Q_{\text{вих}}-d_{\text{ср}}$.

Виходячи з поділу загального обсягу матеріалу на дві частини – ефективну та попередню зони – та використовуючи для кожної з них рівняння матеріального балансу у формі $d(M)/dt + Q_{\text{вих}} = Q_{\text{вх}}$, було виведено передавальні функції дробарки

$$W_2(p) = \frac{\Delta N(p)}{\Delta Q_{\text{вх}}} = \frac{k_N(T_1 + T_2) \left(\frac{T_1 T_2}{T_1 + T_2} p + 1 \right)}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)(T_{EM} p + 1)} \quad (3.4)$$

$$W_2(p) = \frac{\Delta Q_{\text{вих}}}{\Delta Q_{\text{вх}}} = \frac{1}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)} \quad (3.5)$$

де k_N - статичний коефіцієнт передачі за потужністю; T_{EM} - електромеханічна стала часу електроприводу дробарки; T_1 та T_2 – сталі часі попередньої та ефективної зон дроблення, причому

$$T_1 + T_2 = \frac{T_{\text{др}}}{k_{\text{с.о.}}} \quad (3.6)$$

Де, $T_{\text{др}}$ - стала часу дробарки, що має фізичний сенс аналогічний T' ; $k_{\text{с.о.}}$ - коефіцієнт самовирівнювання об'єкту.

Формули, за якими подаються передавальні функції $W_2(p)$ і $W_3(p)$, були отримані без урахування динамічних елементів типу чистого запізнення, що розташовані на вході та виході системи керування. Такі запізнення обумовлені фізичними процесами, зокрема часом, необхідним для переміщення гірничої маси з живильного пристрою до зони дроблення під дією сили тяжіння (затримка τ_1) і тривалість вільного падіння подрібненого матеріалу на стрічковий транспортер, який подає його на наступний етап обробки (затримка

τ_2). У промислових дробильних установках [1] типові значення часових затримок T_1 і T_2 становлять кілька десятих часток секунди, а їх загальна тривалість ($\tau_1 + \tau_2$) сягає кількох секунд.

На практиці зазвичай використовують спрощені варіанти передавальних функцій дробарок для наведених каналів, оскільки детальне математичне моделювання часто не відповідає можливостям реального апаратного втілення систем автоматичного регулювання. Такі узагальнені передавальні функції мають наступну форму

$$W_2' = k_p \frac{e^{-\tau_p p}}{T_p(p)+1} = k_p \frac{e^{-(\tau_1+\tau_2)p}}{(T_e p+1)^2} \quad (3.7)$$

де $k_p = k_n(T_1+T_2) = k_n T_p$ – результуючий коефіцієнт передачі за потужністю; $\tau_p = T_{EM} + \tau_1$ – результуюча кількість запізнень об'єкту; $T_e = \sqrt{T_1 T_2}$ – еквівалентна стала часу.

Конусну дробарку як систему автоматичного регулювання можна подати у вигляді аперіодичної ланки першого порядку. З огляду на наведені характеристики та нехтуючи незначним запізненням тривалістю близько десятої частки секунди, отримуємо таке рівняння

$$K_n = 4; \quad D = 2.2; \quad \gamma = 0.75; \quad m = 24.2; \quad k_1 = 15.74$$

$$T = 0.25 \gamma D^2 \frac{m}{k_1} \quad (3.8)$$

кінцева ПФ дробарки має вигляд

$$W_{kmd}(p) = \frac{k_n}{T_1 p + 1} = \frac{4}{1.395 p + 1} = \frac{20}{7 p + 5} \quad (3.9)$$

Оскільки конусна дробарка є керованим об'єктом, необхідно проаналізувати її основні властивості. Представивши передавальну функцію дробарки у вигляді суми простіших дробів, отримуємо зручнішу для подальших досліджень математичну модель. На наступному етапі проводиться аналіз перехідного процесу для моделі КСД-2200Т (рис. 3.1). Такий процес вивчається за умови подачі одиничного ступінчастого сигналу на вхід системи при нульових початкових умовах. Це дозволяє дослідити, як змінюється вихідний параметр у часі у відповідь на заданий вплив [4].

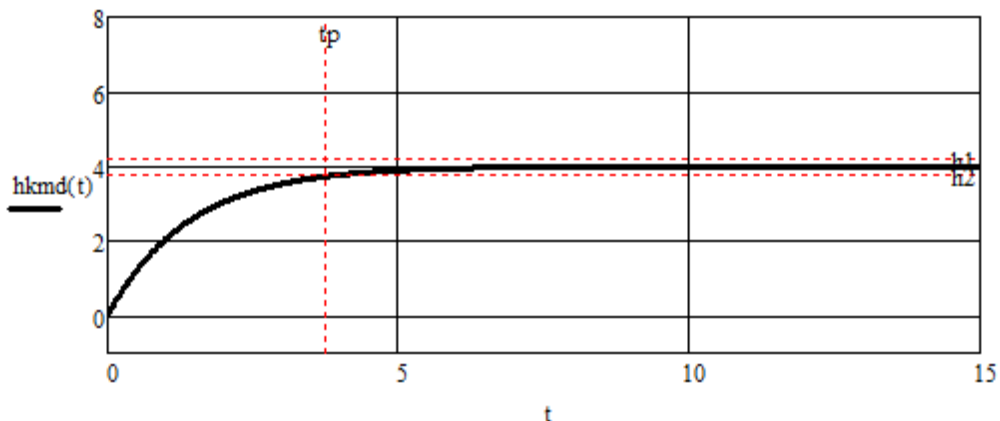


Рисунок 3.1 - Перехідний процес конусної дробарки КСД-2200Т

На основі інформації, поданої на графіку перехідного процесу, встановлено, що тривалість перехідного процесу для системи КСД-2200Т дорівнює приблизно 3,75 секунди.

Далі виконаємо аналіз реакції системи на одиничну імпульсну дію на вході, тобто розглянемо імпульсний перехідний процес, наведений на рис.3.2.

Як видно з графіка, початкове значення виходу становить 2,8571, після чого протягом приблизно 8 секунд спостерігається поступове зменшення до нульового рівня.

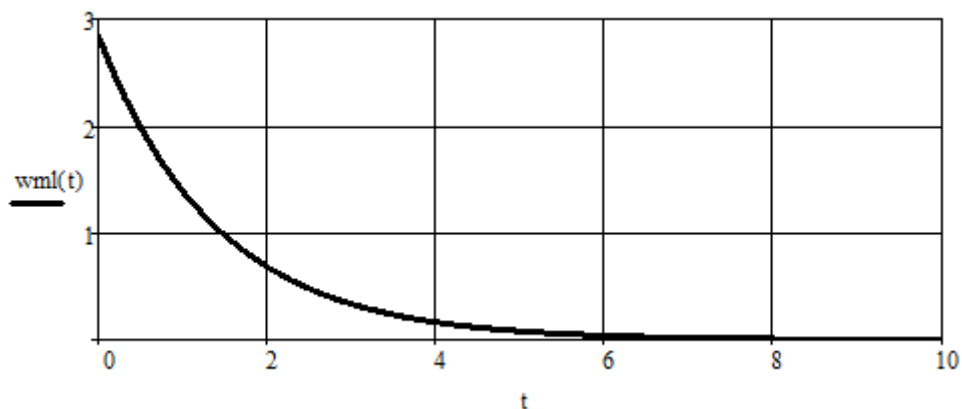


Рисунок 3.2 - Імпульсний перехідний процес КСД-2200Т

3.2 Розробка структурної схеми системи керування

Науково-дослідний інститут «Неруд» створив механізм для удосконалення вже наявних конусних дробарок із пружинною амортизацією, а також автоматизовану систему керування шириною розвантажувального отвору. Ця

система дозволяє підтримувати стабільне співвідношення між дрібною та великою фракціями матеріалу, що проходить подрібнення. Схематичне зображення роботи системи представлено на рис. 3.3. Після проходження через дробарку, матеріал транспортується стрічковим конвеєром на грохот для подальшого розділення. Контроль здійснюється на основі масового співвідношення окремих фракцій, наприклад 5–20 мм та 40–80 мм. Ваговий аналіз фракцій здійснюється за допомогою конвеєрних ваг, що передають електричні сигнали. Співвідношення визначається через обчислення відношення цих сигналів, яке інтегрується. На основі отриманого значення автоматично коригується розмір розвантажувальної щілини за участю виконавчого приводу.

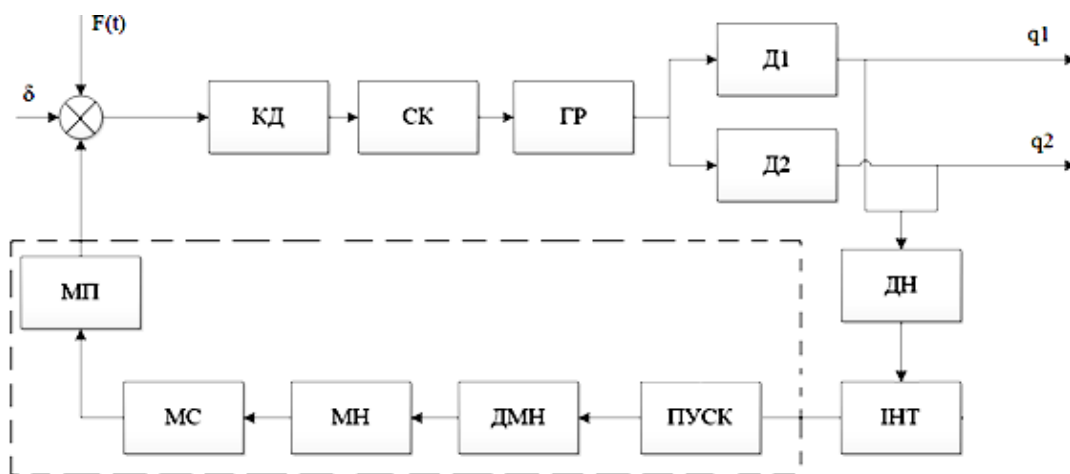


Рисунок 3.3 - Функціональна схема системи автоматичного регулювання розвантажувальної щілини конусної дробарки

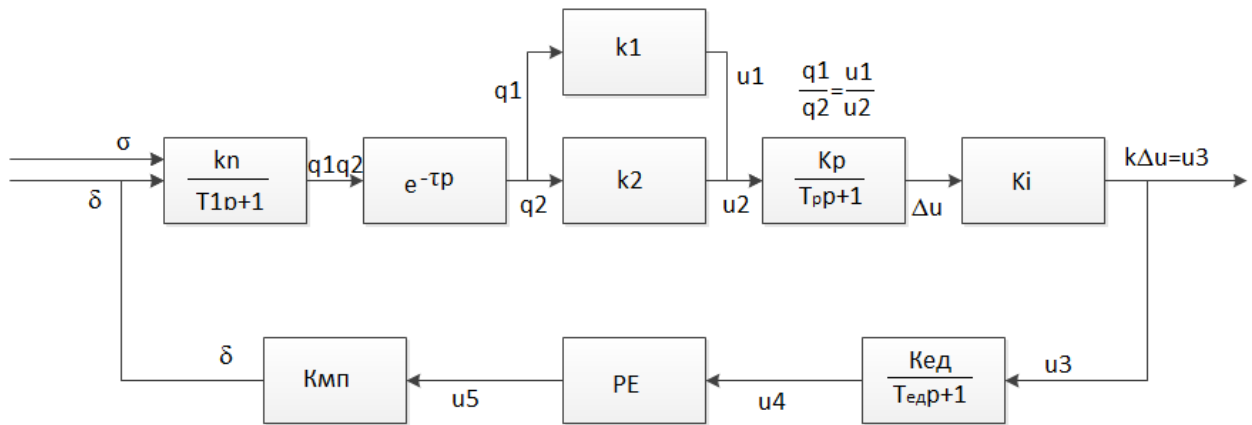


Рисунок 3.4 - Структурна схема автоматичного регулювання розміру розвантажувальної щілини конусної дробарки:

Пояснення до рис. 3.3: КД – конусна дробарка; СК – стрічковий конвеєр; ГР – грохот вібраційний; Д1, Д2 – датчики маси фракції відповідно 5-20мм та 40-80мм; ДН – дільник напруги; ІНТ – інтегратор; ПУСК – пускач; ДМН – двигун масло насосу; МН – масло насос; МС – механізм «стоп»; МП – механізм повороту.

Початковим параметром елемента системи виступає ширина розвантажувального зазору дробарки – δ , а вихідною характеристикою є співвідношення розмірів частинок після дроблення q_1 до q_2 (рис. 3.4) [10]. На зміну цього співвідношення впливають збурення $F(t)$, які виникають внаслідок варіацій у міцності, розмірах та інших фізико-механічних характеристиках оброблюваних гірських матеріалів.

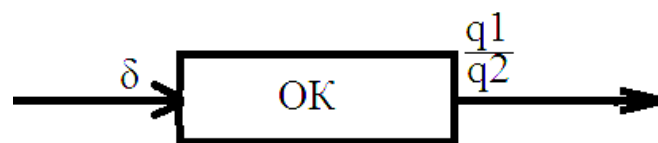


Рисунок 3.5 - Загальна структурна схема контролю розвантажувальної щілини

Грохот виконує поділ подрібненої сировини на дві регульовані за розміром фракції. У поєднанні з конвеєрною стрічкою він утворює систему, що характеризується властивістю чистого транспортного запізнення

$$W_{гр}(p) = e^{-p\tau} \quad (3.10)$$

де τ – час транспортного запізнення. Зазвичай цей показник знаходиться в межах 30-70сек. Для ДФ-1 ПАТ «ПівнГЗК» [2] даний показник складає 60с, виходячи з цього маємо

$$W_{гр}(p) = e^{-60p} \quad (3.11)$$

Якщо до структури системи автоматичного керування входить ланка із запізненням, то рівняння, що описує її динаміку, набуває трансцендентного характеру, а не залишається звичайним алгебраїчним. Оскільки аналітичне дослідження таких рівнянь викликає значні труднощі, на практиці часто застосовують спрощені підходи. Зокрема, трансцендентні вирази замінюють наближеними моделями, наприклад, шляхом розкладу в ряд Паде або еквівалентного представлення запізнення через каскад з'єднаних між собою інерційних елементів першого порядку [4]

$$W(p) = e^{-\tau p} = \frac{1}{\left(\frac{\tau}{n} + 1\right)^n} \quad (3.12)$$

При чому чим більше n , тим більш точніша така апроксимація [4]. Виконавши апроксимацію за наведеним методом маємо такий вигляд ПФ

$$W_{гр}(p) = \frac{1}{\left(\frac{60}{3} + 1\right)^3} = \frac{1}{8000p^3 + 1200p^2 + 60p + 1} \quad (3.13)$$

Операція ділення двох фізичних величин реалізується за допомогою потенціометричного пристрою, зібраного за схемою логометра. До основних елементів такого пристрою належать електронна вимірювальна система, підсилювач сигналу, механічний редуктор та зворотний зв'язок. Ці складові можна умовно моделювати як пропорційні компоненти. Двофазний асинхронний електродвигун у цьому випадку виконує функцію інтегральної ланки. Завдяки використанню жорсткого негативного зворотного зв'язку, який охоплює інтегруючу частину системи, весь потенціометричний блок можна описати як аперіодичну ланку системи автоматичного регулювання

$$W_n(p) = \frac{k_n}{T_n p + 1} = \frac{16}{0.2p + 1} \quad (3.14)$$

де T_n - стала часу потенціометру, прийнято вважати визначеною в діапазоні 0,2..0,4с.

Після проходження через електронний підсилювач, сигнал надходить до інтегрувального електродвигуна. Його динамічну поведінку можна описати за допомогою передавальної функції такого вигляду

$$W_{ед}(p) = \frac{k_{ед}}{T_{ед}p+1} = \frac{0,06}{15p+1} \quad (3.15)$$

де стала часу $T_{ед}$ - прийнята 15с.

Після завершення процесу інтегрування відбувається активація електродвигуна, що приводить у дію виконавчий механізм.

Перетворення положення вихідної осі командного пристрою типу КЕП-12У у сигнали на вмикання або вимикання електродвигуна реалізується за допомогою контактної системи, реле з електромагнітним керуванням і пускового пристрою. Усі ці компоненти можна умовно вважати релейною ланкою.

У ролі виконавчого пристрою в системі використовується асинхронний двигун з короткозамкненим ротором, з'єднаний із редуктором, який за допомогою черв'ячної передачі обертає регулююче кільце дробарки. Це кільце зсуває зовнішній конус, тим самим формуючи необхідну ширину розвантажувальної щілини.

Виконавчий механізм можна моделювати як пропорційну ланку, де вихідним параметром виступає величина зміни щілини дробарного вузла. Щоб змінити розмір розвантажувального проміжку на 1 мм, електродвигун має працювати протягом 3,3 секунди.

Сучасні промислові мікроконтролери мають достатню функціональність, аби дозволити заміну КЕП-12У на інший пристрій, який відповідатиме поставленим завданням і технічним вимогам. Детальніше це питання буде розкрито у наступних розділах.

Передавальна функція розімкнутої системи має наступний вигляд

$$W_{пр}(p) = W_{кд}(p)W_{гр}(p)W_{д}(p)W_{п}(p)W_{інт}(p) \quad (3.16)$$

$$W_{\text{зз}}(p) = W_{\text{ед}}(p)W_{\text{мп}}(p) \quad (3.17)$$

$$W_{\text{роз}}(p) = \frac{W_{\text{пр}}(p)}{1 + W_{\text{пр}}(p)W_{\text{зз}}(p)} \quad (3.18)$$

При чому: $W_{\text{д}}(p)=0.12$ - добуток коефіцієнтів підсилення датчиків маси фракції 5-20мм(0.3) та 40-80мм(0.4) відповідно; $W_{\text{інт}}(p)=1.2$ - інтегратор; $W_{\text{мп}}(p)=0.12$ - виконуючий механізм.

Після визначення всіх параметрів системи стає можливим виконати обчислення перехідного процесу, а також фазових, амплітудних і частотних характеристик.

Перед налаштуванням регулятора слід спершу проаналізувати роботу системи без його використання, оцінивши її динамічні властивості на основі реакції на одиничний імпульс та перехідної функції

$$W_{\text{роз}}(p) := \frac{W_{\text{пр}}(p)}{1 + W_{\text{пр}}(p) \cdot W_{\text{обр}}(p)} \quad (3.19)$$

$$\frac{W_{\text{пр}}(p)}{1 + W_{\text{пр}}(p) \cdot W_{\text{обр}}(p)} \Bigg|_{\substack{\text{float,2} \\ \text{collect}}} \rightarrow \frac{6.9e42 \cdot p + 4.6e41}{3.8e42 \cdot p + 1.1e44 \cdot p^2 + 1.5e45 \cdot p^3 + 8.1e45 \cdot p^4 + 9.9e45 \cdot p^5 + 1.7e45 \cdot p^6 + 5.3e40}$$

Рисунок 3.6 – Загальна передавальна функція системи без регулятора

$$h(t) := \frac{W_{\text{роз}}(p)}{p} \Bigg|_{\substack{\text{invlaplace,p} \\ \text{float,2}}} \rightarrow -0.0000016 \cdot e^{-5.0 \cdot t} + 0.0045 \cdot e^{-0.72 \cdot t} + -6.9 \cdot e^{-0.034 \cdot t} \cdot \cos(0.019 \cdot t)$$

Рисунок 3.7 – Характеристичне рівняння системи без регулятора

Тривалість перехідного процесу становить 105 секунд, при цьому система поступово досягає стабільного рівня 8,6420. Характер процесу – аперіодичний, тобто без коливань, що підтверджується даними на рис. 3.8.

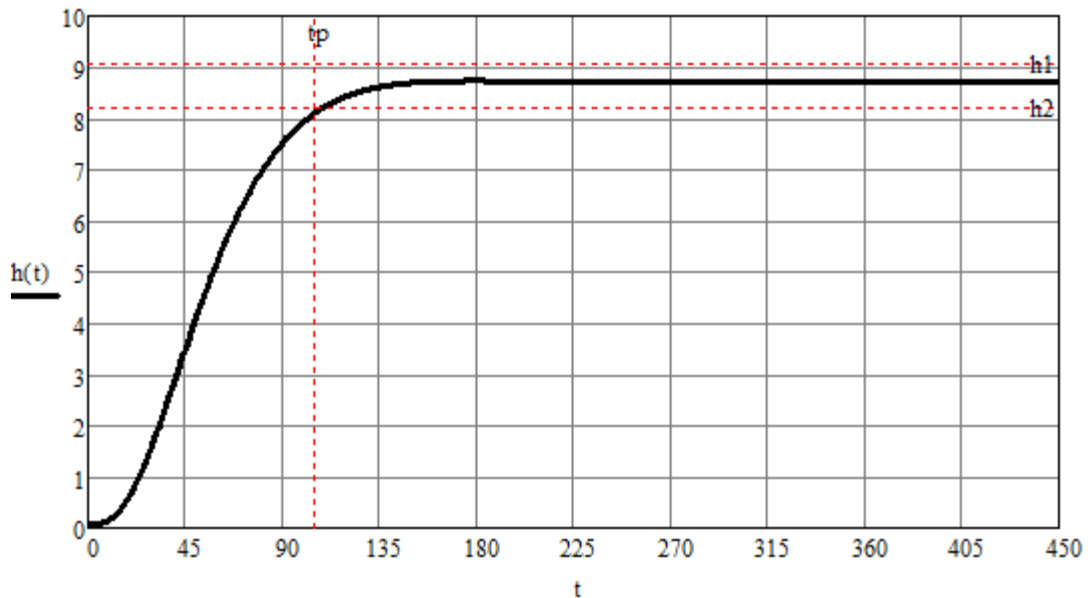


Рисунок 3.8 - Графік перехідного процесу системи без регулятора

Оцінюючи якість роботи системи, важливо брати до уваги також перерегулювання – характеристику, що відображає ступінь коливань, які виникають під час перехідного режиму. Саме цей параметр дозволяє зрозуміти, наскільки стабільно система реагує на зміни вхідних сигналів.

Перерегулювання системи знаходиться за формулою:

$$\sigma = \frac{y_{\max}(t) - y_{yc}}{y_{yc}} 100\% = \frac{\Delta y}{y_{yc}} 100\% \quad (3.20)$$

Розрахуємо перерегулювання для системи без регулятора:

$$\sigma = \frac{8.7309 - 8.6420}{8.6420} 100\% = 1.029\% \quad (3.21)$$

На основі графіка імпульсної перехідної характеристики (рис. 3.9) для системи без застосування регулятора видно, що у проміжок часу від 0 до 41,25 секунди спостерігається підвищення вихідного сигналу до максимального значення 0,12467, після чого він поступово зменшується до нульового рівня.

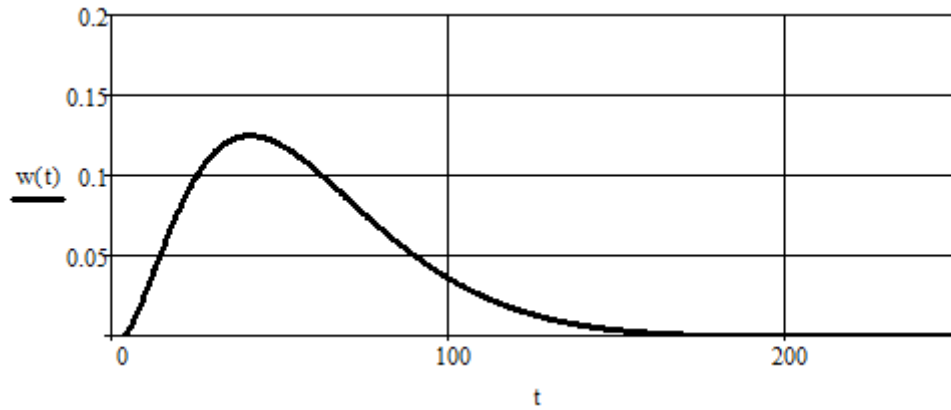


Рисунок 3.9 - Графік імпульсної перехідної характеристики системи без регулятора

З метою покращення точності та забезпечення стабільнішого перехідного процесу до структури системи було додано регулятор типу ПІД. Цей регулятор об'єднує в собі три компоненти: пропорційну, інтегральну та диференціальну складові. Завдяки їхній взаємодії досягається оптимізація динамічних характеристик системи. Передавальна функція ПІД-регулятора має вигляд

$$W_{\text{регулятора}} = K_{\text{рег}} * \frac{T_{\text{диф}} * p}{T_{\text{інт}} * p} \quad (3.22)$$

Структурна схема з ПІД подана на рис.3.10.

З включенням ПІД регулятора у систему ПФ змінилась і має вигляд

$$W_{\text{пр}}(p) = W_{\text{під}}(p)W_{\text{кд}}(p)W_{\text{грк}}(p)W_{\text{д}}(p)W_{\text{п}}(p)W_{\text{інт}}(p) \quad (3.23)$$

$$W_{\text{зз}}(p) = W_{\text{ед}}(p)W_{\text{мп}}(p) \quad (3.24)$$

$$W_{\text{роз}}(p) = \frac{W_{\text{пр}}(p)}{1 + W_{\text{пр}}(p)W_{\text{зз}}(p)} \quad (3.25)$$

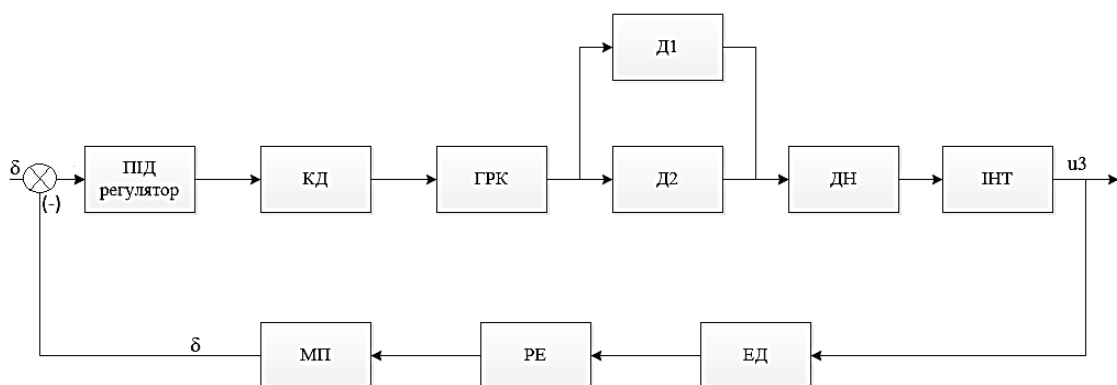


Рисунок 3.10 - Структурна схема системи з ПІД регулятором

$$W_{pid}(p) := K_{pid} \cdot \frac{(T_{dif} \cdot p + 1)}{(T_{int} \cdot p + 1)}$$

$$W(p) := \frac{W_{pid}(p) \cdot W_d(p) \cdot W_{gr}(p) \cdot W_{1d}(p) \cdot W_{2d}(p) \cdot W_p(p) \cdot W_i(p)}{1 + W_{pid}(p) \cdot W_d(p) \cdot W_{gr}(p) \cdot W_{1d}(p) \cdot W_{2d}(p) \cdot W_p(p) \cdot W_i(p) \cdot W_{ed}(p) \cdot W_{mp}(p)}$$

Рисунок 3.11 – Формула регулятора та знаходження загальної передавальної функції системи з регулятором

У результаті подання одиничного ступінчастого сигналу формується перехідний режим (рис. 3.12), тривалість якого становить 53,75 секунди, після чого система досягає сталого рівня, що дорівнює одиниці.

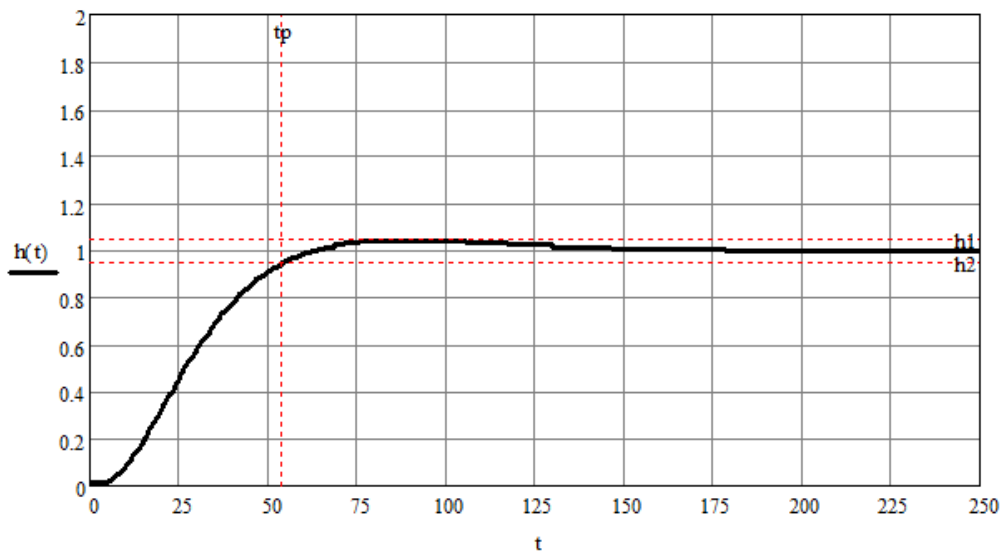


Рисунок 3.12 - Графік перехідного процесу системи з ПІД регулятором

Перерегулювання для системи з регулятором складає

$$\sigma = \frac{1.0424 - 1}{1} 100\% = 4.24\% \quad (3.26)$$

Подавши одиничну імпульсну дію можна побачити як зростає та спадає функція системи (рис. 3.13).

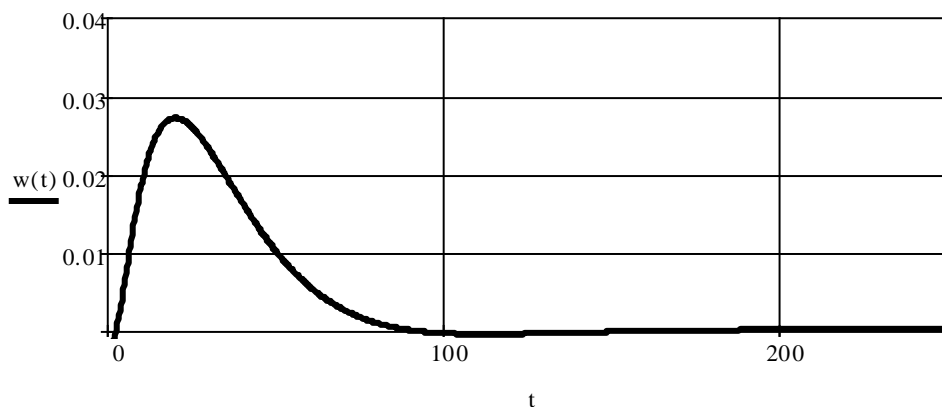


Рисунок 3.13 - Імпульсна характеристика системи з ПД регулятором.

Розглянемо властивості системи в частотній області. Частотні характеристики відображають реакцію системи на встановлені гармонічні збурення. Змінюючи значення частоти вхідного впливу та фіксуючи параметри вихідного сигналу – зокрема амплітуду та зсув фази – можна побудувати частотну характеристику досліджуваної системи. Крива, що демонструє залежність співвідношення амплітуд вхідного та вихідного сигналів від частоти, має назву амплітудно-частотна характеристика [4].

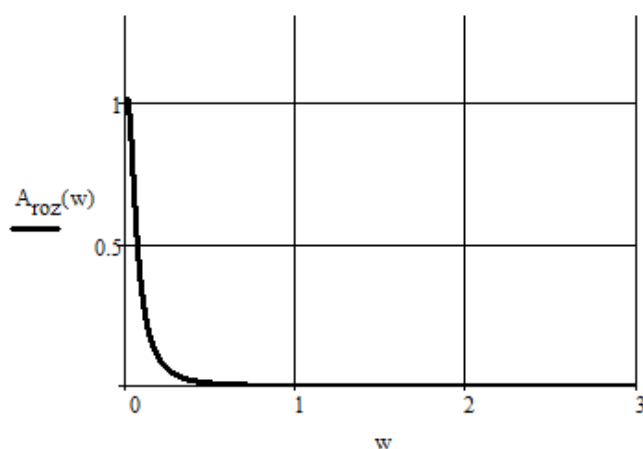


Рисунок 3.14 - АЧХ системи з регулятором

Фазово-частотна характеристика – це співвідношення, яке описує, як змінюється фаза вихідного сигналу відносно вхідного залежно від частоти. Інакше кажучи, вона показує, наскільки зміщується фаза сигналу на виході у порівнянні з фазою на вході при зміні частотного діапазону.

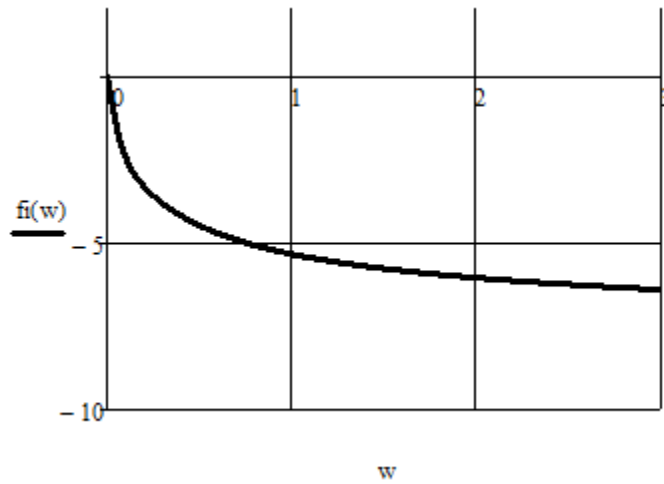


Рисунок 3.15 - ФЧХ системи з регулятором

Амплітудно-фазова частотна характеристика (АФЧХ) включає в себе дві окремі складові – амплітудну та фазову характеристики, які разом описують реакцію системи на гармонічний вплив. Для кожного значення частоти будується радіус-вектор, довжина якого відповідає амплітуді сигналу, а його орієнтація – величині фазового зсуву між сигналами на вході та виході. У підсумку формується крива в полярній системі координат, відома під назвою годограф. Годограф – це траєкторія, що описується кінцем вектора, коли змінюється частота.

За формою годографа можна також зробити висновки про динамічну стійкість системи автоматичного регулювання. Один із поширених способів оцінки – метод Найквіста. Його суть полягає в тому, що якщо відкрита система є стійкою, то для збереження цієї стійкості після замикання контуру необхідно, щоб графік частотної характеристики при змінній частоті від нуля до нескінченності не охоплював точку $(-1; j0)$ на комплексній площині. У випадках, коли аналіз проводиться вже для замкненого контуру, зробити обґрунтовані висновки щодо стійкості за критерієм Найквіста неможливо [4].

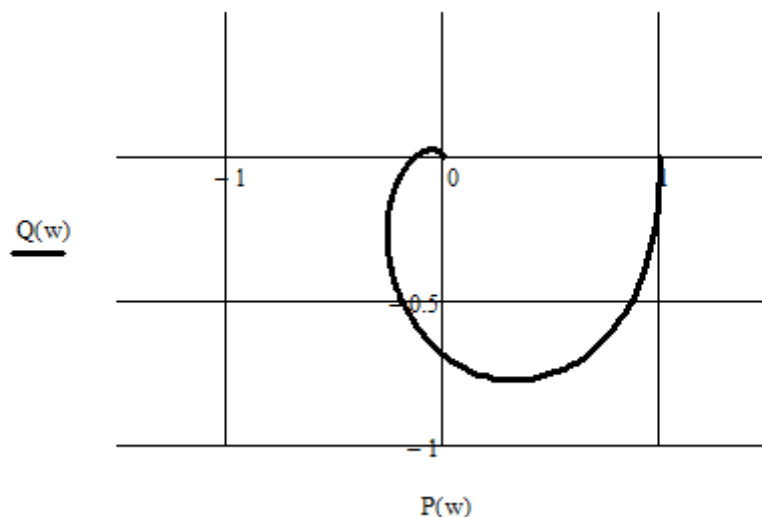


Рисунок 3.16 - АФХ системи з ПД регулятором.

Після аналізу механізму керування розмірами розвантажувальної щілини було встановлено передатні функції для кожного з компонентів системи. Проведено розрахунок перехідних та імпульсних характеристик, що відображають зміну динамічного стану об'єктів у часовому проміжку. Після побудови структурної моделі без урахування регулятора, визначили загальну передатну функцію. Аналіз динаміки показав наявність перерегулювання, що свідчить про необхідність інтегрування регулятора в систему. У результаті вибору ПД-регулятора, який забезпечує високу точність і поєднує переваги пропорційного, інтегрального та диференціального підходів, вдалося значно покращити якість перехідного процесу: тривалість його скоротилася майже на половину, а рівень перерегулювання становив лише 4,24%. Крім того, було проведено аналіз частотних характеристик, що дозволило оцінити фазовий зсув та амплітудні співвідношення між вхідними та вихідними сигналами залежно від частоти.

3.3 Вибір засобів технічного забезпечення

Ключовим чинником при виборі грохоту виступає розмір отворів сита, який має знаходитися в діапазоні від 5 до 30 мм. Підбір відповідної моделі буде здійснюватися з асортименту, що пропонується виробником МК «Шибан».

Таблиця 3.1 – Характеристики грохотів МК «Шибан»

| | | | | |
|----------------------------------|-----------|---------|-----------|-----------|
| Модель | 2YA1237 | 3YA1237 | 2YA1548 | 3YA1548 |
| Робоча площа, мм | 1200×3700 | | 1500×4800 | 1800×4800 |
| Кількість сит, шт. | 2 | 3 | 2 | 3 |
| Розмір сита, мм | 3-30 | | 5-50 | |
| Максимальний розмір сировини, мм | 200 | | 400 | |
| Продуктивність, т/г | 7.5-80 | | 50-208 | |
| Потужність, кВт | 5.5 | 7.5 | 15 | 15 |
| Площа сита, м ² | 4.44 | | 7.2 | |

Нашим вибором є вібраційний грохот МК «Шибан» модель 3YA1237.

Порівняно з аналогічною моделлю 2YA1237, вибраний грохот має покращену комплектацію – встановлено три сита замість двох, при цьому рівень продуктивності залишається незмінним (у межах 7,5–80 тонн за годину). Це свідчить про більш ефективну роботу обладнання. За інформацією виробника, серед переваг даного грохоту можна виокремити такі характеристики:

1. Низька вартість експлуатації;
2. Пристрій натягу та регулювання ситової поверхні;
3. Висока ефективність грохочення;
4. Простота монтажу, експлуатації, обслуговування;
5. Надійність та довговічність.

Розглянемо обладнання типу стрічкових конвеєрів. Для здійснення вибору використано технічні характеристики моделей, виготовлених компанією МК «Шибан».

Таблиця 3.2 – Характеристики конвеєрів МК «Шибан»

| Ширина стрічки, мм | Довжина конвеєру, м | Потужність, кВт | Швидкість руху стрічки, м/с | Продуктивність, т/г |
|--------------------|---------------------|-----------------|-----------------------------|---------------------|
| 400 | 12-20 | 2.2 | 0.8-2.0 | 40-80 |
| 500 | 12-30 | 4 | | 78-191 |
| 650 | 12-20 | 5.5 | | 131-323 |

Виходячи з продуктивності обраного грохоту, можна застосувати будь-який із запропонованих стрічкових конвеєрів. З метою зменшення витрат доцільно зупинитися на другому варіанті, ширина стрічки якого складає 500 мм.

Наступним етапом є підбір системи зважування матеріалів на конвеєрі. Провідним виробником у цій сфері вважається компанія Schenck, яка спеціалізується на створенні високоточних ваг для промислового використання.

Облік потоків сипучих і твердих матеріалів у режимі реального часу вимагає від обладнання гнучкості та точності. Системи зважування Schenck Process відповідають цим критеріям і успішно використовуються в багатьох виробничих напрямках – від гірничої справи й транспортування сировини до харчової та хімічної галузей.

Це обладнання підходить для різноманітних завдань, серед яких: контроль витрати матеріалу, облік при логістичних операціях, формування звітів про надходження та відвантаження, сигнальне сповіщення при заповненні, точне дозування на завантажувальних вузлах, керування обсягом подачі, а також зважування для комерційного обліку. Вагові системи Schenck Process гарантують високу точність до 0,25%, що дозволяє досягти ефективного виробничого та облікового контролю.

Таблиця 3.3 – Характеристики конвеєрних ваг Schenck Process

| Модель | Одне роликів ВЕМ | Одне роликів ВЕР | Одне роликів ВЕР |
|---------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Досяжна точність, % | ±1 | ±0.5 | ±0.5 |
| Максимальна продуктивність, т/г | 4000 | 6000 | 15000 |
| Для стрічок шириною, мм | 400-1400 | 400-1400 | 1600-2000 |

З огляду на характеристики вибраного конвеєра, приймається рішення встановити одні ваги роликівого типу марки ВЕМ.

Завдяки стрімкому розвитку електронно-обчислювальної техніки та мікропроцесорних систем стало значно простіше визначатися з підбором засобів для автоматичного вимірювання та контролю параметрів. Натомість застосування традиційних елементів, як-от інтеграторів, релейних схем або механічних систем зупинки, доцільніше впроваджувати програмовані логічні контролери (ПЛК), які забезпечують вищу надійність і гнучкість у керуванні. У якості ПЛК обрано модель Modicon Premium (серія TSX 57), що випускається компанією Schneider Electric – одним із провідних виробників у сфері промислової автоматизації.

Перевагами такого ПЛК є:

1. Передове обладнання для будь-якої галузі
2. Більша гнучкість і відкритість ...
3. Модифікація Premium відзначається винятковою ефективністю: вона значно зменшує тривалість робочих циклів і усуває потребу в додатковому налаштуванні програм. Такий результат досягається за рахунок розширеного збору виробничої й аналітичної інформації, вільного обміну даними між системами та централізованого доступу до єдиної платформи програмування.

Завдяки впровадженню сучасних процесорів серії Premium у контролери Unity, більше не виникає потреби турбуватись щодо технічних обмежень або браку потужності.

1. 5 мов МЕК: LD, ST, FBD, SFC, IL.
2. Потужні центральні процесори, здатні виконувати інструкції із затримкою всього 37 наносекунд та мають до 7 МБ пам'яті для зберігання програмного коду.
3. Передова система, що підтримує одночасне виконання кількох процесів на високому рівні стабільності.
4. Компактне апаратне рішення із модулями, які підтримують велику кількість каналів, дозволяє розгорнути до 16 стійок у реальному часі без використання повторювачів.

5. Розширений вибір функціональних модулів для різноманітних завдань: від забезпечення безпеки та обробки рефлекторних сигналів до управління рухом, зважування, підрахунків і збереження даних.
6. Сучасні високопродуктивні процесори нового покоління, розроблені для складних обчислювальних задач.
7. Повна підтримка Ethernet-протоколів TCP/IP, включаючи функції веб-серверу, глобального обміну даними, електронної пошти, прямого підключення до баз даних, синхронізації за мережевим часом тощо.
8. Велика кількість вбудованих комунікаційних роз'ємів: USB, Ethernet з підтримкою веб-доступу, CANopen або FIP-майстер, а також послідовне з'єднання за протоколом Modbus.
9. Найширший асортимент комунікаційних інтерфейсів на ринку, серед яких AS-Interface, INTERBUS, PROFIBUS DP та Modbus Plus.

Створення й конфігурування застосунків для програмованих логічних контролерів серії Premium виконується за допомогою середовищ розробки PL7 Micro, Junior, Pro або Unity. Ці інструменти забезпечують можливість організувати програму у вигляді модулів з чітким функціональним розподілом. Незважаючи на багатозадачність самих ПЛК, інженер-проектувальник може сформувати ієрархічну структуру у форматі дерева, що забезпечує зручну побудову систем автоматичного керування. На кожному з рівнів такої структури можна додавати окремі частини коду, написані мовою ladder-діаграм, структурованим текстом, макрокроками, елементами Grafset або таблицями візуалізації (анімаційними таблицями).

Базова комплектація містить набір інструментів, призначених для налаштування різних типів додатків – як дискретних, так і аналогових входів та виходів, модулів підрахунку імпульсів, систем управління рухом, інтерфейсів «людина-машина», засобів комунікації й пристроїв зважування. Перехід до екранів параметрів функціональних модулів здійснюється безпосередньо з меню конфігурації входів/виходів – достатньо лише обрати потрібний пункт,

відповідальний за той чи інший модуль. У таких вікнах можна задати ключові технічні параметри відповідної функції або системи.

1. Значення фільтру дискретного введення/виведення.
2. Діапазон напруги чи струму для аналогових входів/виходів.
3. Порогові значення для рахункових каналів.
4. Траєкторію осей для контролю положення.
5. Зміна калібровки при зважуванні.

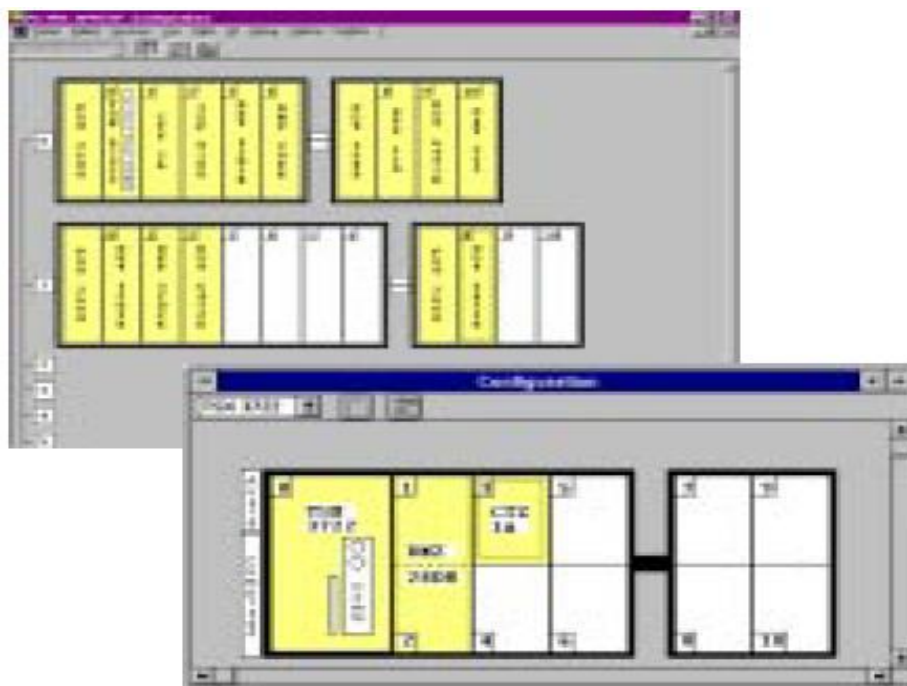


Рисунок 3.17 - Конфігурація апаратного забезпечення в PL7

Для моніторингу параметрів та забезпечення зручної адаптації персоналу до систем автоматичного регулювання обрано інтерфейс виробництва Schneider Electric. Підбір компактного промислового комп'ютера не становить критичної складності, особливо в умовах, коли вже заздалегідь визначено модель ПЛК, до якої він підключатиметься. З урахуванням цього було зупинено вибір на пристрої Schneider Electric MPCKT12NAX00N.

З метою вдосконалення роботи системи автоматичного регулювання передбачається впровадження моніторингу температури ексцентрикового механізму, вала, мастила на вході та в резервуарі. Для здійснення температурного контролю прийнято рішення використати терморезистор.

Терморезистор – це вид напівпровідникового резистора, чия електрична провідність змінюється в залежності від температури матеріалу, з якого він виготовлений [8].

Серед терморезистивних елементів, що мають позитивний температурний коефіцієнт, найбільший інтерес викликають пристрої, створені на базі твердих розчинів з барій-титанатом (BaTiO_3). Ці вироби, відомі як позистори, відзначаються різким зростанням електричного опору при підвищенні температури. Окрему групу становлять терморезистори з помірним позитивним температурним коефіцієнтом (у межах 0,5–0,7% на Кельвін), виготовлені на основі кремнію з переважно електронним типом провідності. У них опір змінюється з температурою майже лінійно, що робить їх придатними для використання в системах стабілізації температури електронних схем, зокрема на транзисторній основі. Для моделювання поведінки такого типу термісторів обрана ефективна математична модель.

Термістор NTC 10R(25°C) :

1. Напруга=2800К
2. Крок зміни температури=6mW/°C
3. Робочий термічний діапазон=-55~125°C;
4. Радіус=2.5mm
- 5.

3.4 Розробка алгоритмів керування

Спочатку розглянемо алгоритм ввімкнення тракту дроблення (рис. 3.18).

Потім розглянемо алгоритм вимкнення тракту дроблення (рис. 3.19).

На рис. 3.20 представлено алгоритмічну блок-схему процесу регулювання розміру щілини для розвантаження в дробарці типу КСД1650.



Рисунок 3.18 - Блок-схема алгоритму пуск тракту дроблення



Рисунок 3.19 - Блок-схема алгоритму вимкнення тракту дроблення

Алгоритми регулювання ширини розвантажувальної щілини у дробарках КСД1650 та Simmons CSB75 відрізняються через специфіку конструкцій та функціональні особливості кожної моделі. У випадку з КСД1650 для зміни щілини необхідна повна зупинка роботи дробарного тракту, що викликає затримки в процесі. Натомість у дробарках типу «Шибан» із гідромасляним насосом це регулювання можна здійснювати без зупинки обладнання – безпосередньо під час подрібнення породи в робочій камері. Така особливість значно підвищує продуктивність і знижує час простою.



Рисунок 3.20 - Блок-схема алгоритму зміни розміру розвантажувальної щілини для КСД1650

На рис.3.21 представлено алгоритмічну блок-схему процесу регулювання ширини розвантажувальної щілини для дробарки Simmons CSB75.



Рисунок 3.21 - Блок-схема алгоритму зміни розміру розвантажувальної щілини для Simmons CSB75

4 Візуалізація процесу керування

4.1 Програмне забезпечення для розробки САК розміром розвантажувальної щілини

У сфері автоматизації та керування існує широкий вибір програмного забезпечення, яке розробляється як незалежними виробниками, так і самими компаніями, що випускають програмовані логічні контролери (ПЛК). Компанія Schneider Electric також має власне програмне забезпечення, спеціально створене для роботи з її апаратними рішеннями. Воно дозволяє повною мірою використовувати функціонал ПЛК. Оскільки до складу системи автоматичного керування входить обладнання цього бренду, зокрема контролери та інтерфейси, вибір програмного продукту був цілком очевидним.

ПЗ для програмування ПЛК – Unity XL Pro 7.0

Unity Pro надає наступні мови програмування для створення програми користувача

1. Функціональна блок-схема FBD
2. Мова сходових діаграм (LD)
3. Список інструкцій IL
4. Структурований текст ST
5. Мова SFC

Ці мови програмування можна комбінувати в межах одного проєкту – вони сумісні між собою та відповідають стандарту IEC 61131-3. Для зручності створення та структурування програмного забезпечення використовуються бібліотеки функціональних блоків. До розширених бібліотек Unity Pro входить широкий спектр блоків – від найпростіших логічних (булевих) до інструментів для роботи з рядковими змінними, масивами та елементами, призначеними для реалізації складних алгоритмів керування.

Побудова програмного коду можлива на основі:

1. Керуючою задачі (MAST)
2. Швидкі задачі (FAST)

3. Від однієї до чотирьох допоміжних завдань (AUX)
4. Секцій, яким відповідає одна з певних завдань
5. Секцій для обробки подій, керованих часом (Timerx)
6. Секцій для обробки апаратно керованих подій (EVTx)
7. Секцій підпрограм (SR)

Schneider Electric розробила програмне забезпечення Vijeo Designer 6.0, яке застосовується для створення інтерфейсів користувача, налаштування сенсорних екранів і роботи з компактними персональними комп'ютерами. Цей інструмент надає широкі можливості для візуалізації процесів та інтеграції з різноманітними пристроями автоматизації.

Програмне забезпечення Vijeo Designer є кросплатформеним інструментом, який використовується для розробки інтерфейсів взаємодії між оператором і машиною в автоматизованих системах керування. Цей застосунок дозволяє проєктувати НМІ-рішення для різноманітних пристроїв, сумісних із промисловим обладнанням:

- a) Нові графічні сенсорні термінали Magelis XBT G і XBT GT;
- b) Бездискові (Magelis Smart iPC) і компактні (Magelis Compact iPC) індустріальні комп'ютери.

Програмне забезпечення Vijeo Designer разом із сумісними операторами панелями надає інженерам-розробникам ефективний інструмент для створення гнучких та зручних у використанні рішень завдяки інтуїтивно зрозумілим параметрам конфігурації.

Інтеграція відеопідтримки у Vijeo Designer відкриває можливість використання панелей Magelis у нестандартних галузях застосування. Це дає змогу оператору спостерігати за технологічними процесами одночасно в прямому ефірі й у відеозаписі, об'єднаних на одному інтерфейсі.

Vijeo Designer реалізує обмін даними через Ethernet TCP/IP у пристроях Magelis, забезпечуючи дистанційний доступ до системи за допомогою WEB-шлюзу. Ця технологія також забезпечує взаємодію між різними панелями операторів, передачу рецептів, збереження архівної інформації та інші функції, використовуючи інтегровані механізми захисту.

У програму інтегрований симулятор із підтримкою WYSIWYG-технології, що забезпечує тестування створеного застосунку без потреби завантаження його на фізичний пристрій типу ХВТ G / GT або панель Magelis іРС. Існують два основні варіанти запуску емуляції:

- 1) повномасштабне моделювання, що включає в себе імітацію змінних ПЛК, таких як входи, виходи, внутрішні біти та слова;
- 2) режим взаємодії з фактичним обладнанням, при якому забезпечується зв'язок з контролером і обробка реальних даних у реальному часі.

Без сумніву, найбільш ефективні програмні продукти для ПЛК та ІПК створює саме компанія-виробник цих пристроїв. Саме тому для обладнання Schneider Electric рішення щодо вибору відповідного програмного забезпечення було очевидним. Після того як визначено перелік технічних засобів і програм, необхідних для розробки алгоритмів керування САК, наступним етапом стає безпосереднє проектування системи.

4.2 Розробка підсистеми візуалізації

Розроблювана система призначена для відстеження технічних характеристик дробарки та регулювання ширини її випускного отвору. З метою забезпечення відповідності виробничим умовам, передбачено подвійний спосіб керування: з одного боку – через стаціонарну станцію, що взаємодіє з датчиками та виконує головні алгоритми зміни розміру отвору; з іншого – через сенсорний інтерфейс, що дає змогу оперативно реагувати на зміни у процесі.

Спочатку реалізуємо інтерфейс Magelis

Щоб створити змінну для взаємодії в межах локальної мережі, у вікні Navigator переходимо до розділу IO Manager, відкриваємо ModbusTCP/IP01 і додаємо новий пристрій через пункт Modbus Equipment. Далі в параметрах пристрою слід вказати IP-адресу того обладнання, з яким буде встановлено зв'язок. Для налаштування конфігурації викликаємо контекстне меню клацанням правої кнопки миші по пристрою й обираємо пункт Configuration. У відкритому вікні потрібно активувати опцію IEC61131 Syntax, після чого підтвердити зміни натисканням кнопки ОК.

У наступному кроці переходимо до розділу Variables, де в полі Data Source слід встановити значення External. Потім у полі Scan Group потрібно зазначити відповідну групу, яку ми використовуємо, а в полі Device Address вказується локальна змінна (рис. 4.1).

| | Name | Data Type | Data Source | Scan Group | Device Address | Alarm Group | Logging Group |
|----|----------------|-----------|-------------|----------------|----------------|-------------|---------------|
| 1 | _DIOPort | Structure | Internal | | | | |
| 2 | _DIOPort.DOut0 | BOOL | Internal | | | | |
| 3 | start | BOOL | External | ModbusEquip... | %M1 | Disabled | None |
| 4 | stop | BOOL | External | ModbusEquip... | %M2 | Disabled | None |
| 5 | alarm | BOOL | External | ModbusEquip... | %M3 | Disabled | None |
| 6 | mech | BOOL | External | ModbusEquip... | %M4 | Disabled | None |
| 7 | peregrev | BOOL | External | ModbusEquip... | %M5 | Disabled | None |
| 8 | zabivka | BOOL | External | ModbusEquip... | %M6 | Disabled | None |
| 9 | raschet | REAL | External | ModbusEquip... | %MW1 | Disabled | None |
| 10 | zamer | REAL | External | ModbusEquip... | %MW2 | Disabled | None |
| 11 | nstep | REAL | External | ModbusEquip... | %MW3 | Disabled | None |

Рисунок 4.1 – Перелік змінних у Vijeo Designer

Після того як було задано та визначено адреси для розміщення у TSX Premium, наступним етапом є розробка інтерфейсу.

Панель керування ПІК має містити основні елементи управління: кнопки запуску, зупинки, а також аварійного припинення роботи. Крім того, передбачено виведення індикації стану функціонування гідроагрегату, а також причин припинення дії електродвигуна дробарки – зокрема, це може бути перегрів підшипників або блокування тічки.

Окрему увагу слід приділити відображенню критично важливих даних: обчисленої та отриманої з датчиків інформації щодо ширини щілини для вивантаження матеріалу. На основі цих показників обчислюється необхідна кількість імпульсів, які потрібно подати для досягнення оптимального співвідношення обсягів матеріалу, що подаються на обидва стрічкові транспортери після просіювання.

Інтерфейс формується за допомогою раніше оголошених змінних та елементів у середовищі Vijeo Designer. Приклад реалізації наведено на рис.4.2.

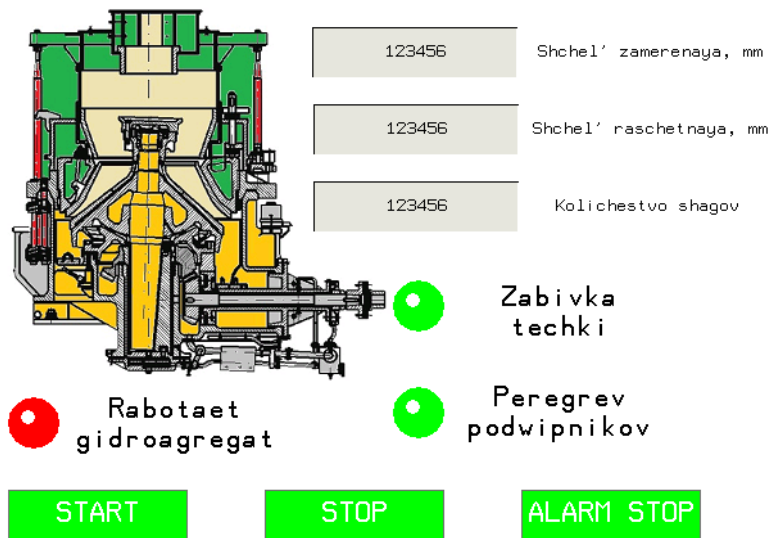


Рисунок 4.2 – Інтерфейс МРСКТ12NAX00N

У зв'язку з тим, що програма Vijeo Designer не забезпечує підтримку кириличної абетки, умовні написи на екрані були подані за допомогою транслітерації.

Після того, як встановлено перелік змінних, їх адресація у контролері, функціональне призначення та значення в межах цієї автоматизованої системи керування, наступним етапом є написання основного програмного коду та формування графічного інтерфейсу для робочої станції.

Створення програмного забезпечення у середовищі Unity XL Pro 7.0 розпочинається з підбору потрібного пристрою. Після його вибору зі списку доступних компонентів, відразу виконуємо конфігурацію взаємодії з сенсорною панеллю. Для цього необхідно переконатися в коректності стандартних параметрів підключення контролера до комп'ютера: PLC → Set address... → Communication parameters → Driver settings → вкладка «Unitel way driver» → Configuration.

У лівій області вікна Project Browser переходимо до категорії Communications – Networks, де ініціюємо створення нового профілю для підключення (див. рис. 4.3). У вікні налаштувань, що відкриється, необхідно вказати формат з'єднання та вписати його назву (рис. 4.4).

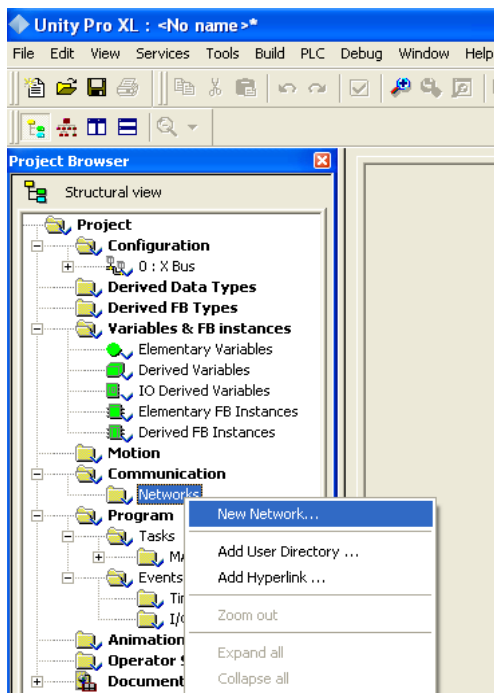


Рисунок 4.3 – Створення профілю нового підключення

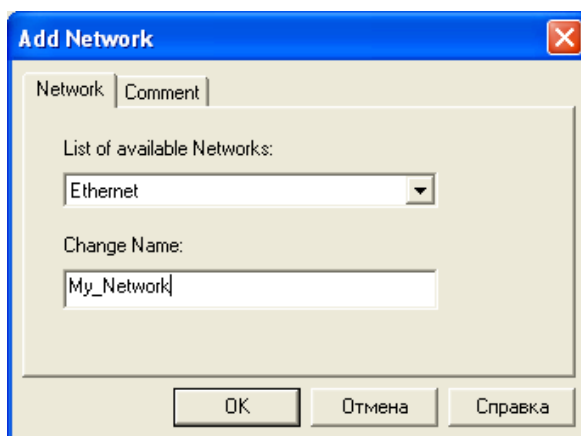


Рисунок 4.4 – Діалогове вікно при створенні нового профілю підключення

Переходимо до параметрів нового з'єднання. У розділі IP Configuration необхідно ввести індивідуальну IP-адресу та відповідну маску підмережі для контролера. Далі перевіряємо налаштування в полі Ethernet configuration – зазвичай там має бути обраний режим Ethernet II, як це продемонстровано на рис. 4.5.

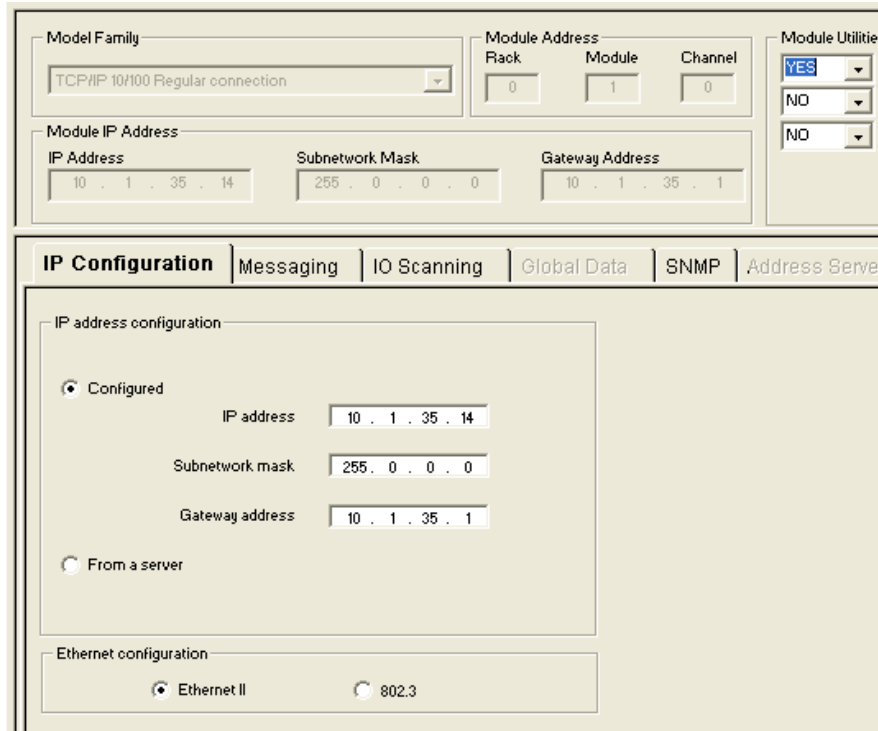


Рисунок 4.5 – Вікно налаштування підключення ПК до ПЛК

Маємо встановлений зв'язок як між інтерфейсом і TSX Premium, так і між персональним комп'ютером та TSX Premium. Наступним етапом є процес створення змінних.

Щоб задати змінні, слід перейти до розділу Elementary Variables, який розташований у лівій частині контекстного меню. У вікні, що відкривається, задаємо назву, формат даних, адресу у пам'яті та, за потреби, короткий опис кожної змінної. Приклад створених змінних, разом з параметрами, наведено на рис.4.6.

| Name | Type | Address | Value | Comment |
|----------------|------|---------|-------|--|
| alarm | BOOL | %M3 | | аварійна зупинка |
| alarm_peregrev | REAL | %M5 | 75.0 | аварійна температура підшипників |
| delay | REAL | %Mw5 | | час затримки |
| delay_1 | TIME | %Mw6 | | час затримки |
| grohot | BOOL | %M11 | | ввімкнена грохоту |
| material | REAL | %Mw4 | | кількість матеріалу |
| mech | BOOL | %M4 | | електродвигун гідроагрегату |
| nstep | REAL | %Mw3 | | кількість кроків |
| peregrev | BOOL | %M10 | | індикатор перегріву підшипників |
| peregrev1 | REAL | %Mw7 | | температура підшипників |
| q1 | REAL | %Mw8 | 50.0 | надрештний матеріал |
| q2 | REAL | %Mw9 | 100.0 | підрештний матеріал |
| raschethn | REAL | %Mw1 | | шілини розрах |
| RUN | BOOL | %M8 | | дозвол пуску |
| RUN_1 | BOOL | %M9 | | дозвол пуску |
| start | BOOL | %M1 | | пуск дробарки |
| stop | BOOL | %M2 | | зупинка дробарки |
| temp_bak | REAL | %Mw10 | 44.0 | температура масла в баку |
| temp_sliv | REAL | %Mw11 | 38.0 | температура масла на зливі |
| zabivka | BOOL | %M6 | | індикація забивки |
| zabivka1 | BOOL | %M7 | | забивання, індикація роботи гамма-реле |
| zamer | REAL | %Mw2 | | шілина поточна |

Рисунок 4.6 – Створенні змінні у середовищі Unity XL Pro 7.0

Після завершення всіх підготовчих етапів можна переходити до написання головної програми для ПЛК. Схематичне зображення процесу керування гідроагрегатом, який відповідає за зміну ширини розвантажувального отвору дробарки, представлено на рис.4.7.

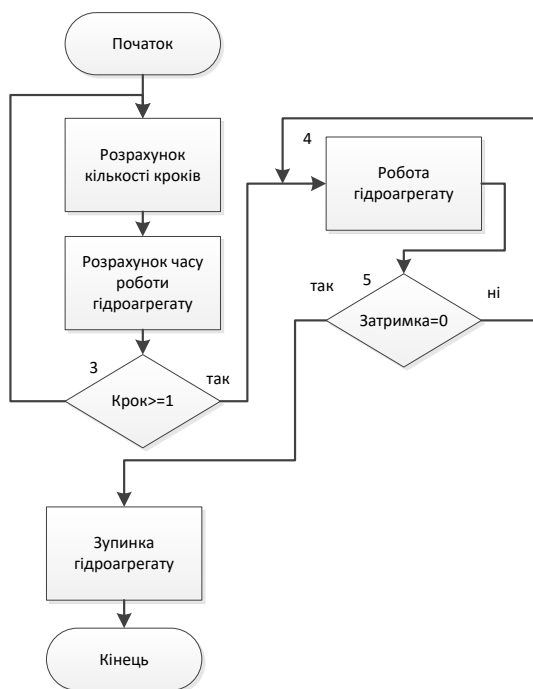


Рисунок 4.7 – Блок-схема алгоритму програми регулювання гідроагрегатом

Вигляд програми на мові LD показано на рис.4.8-4.9.

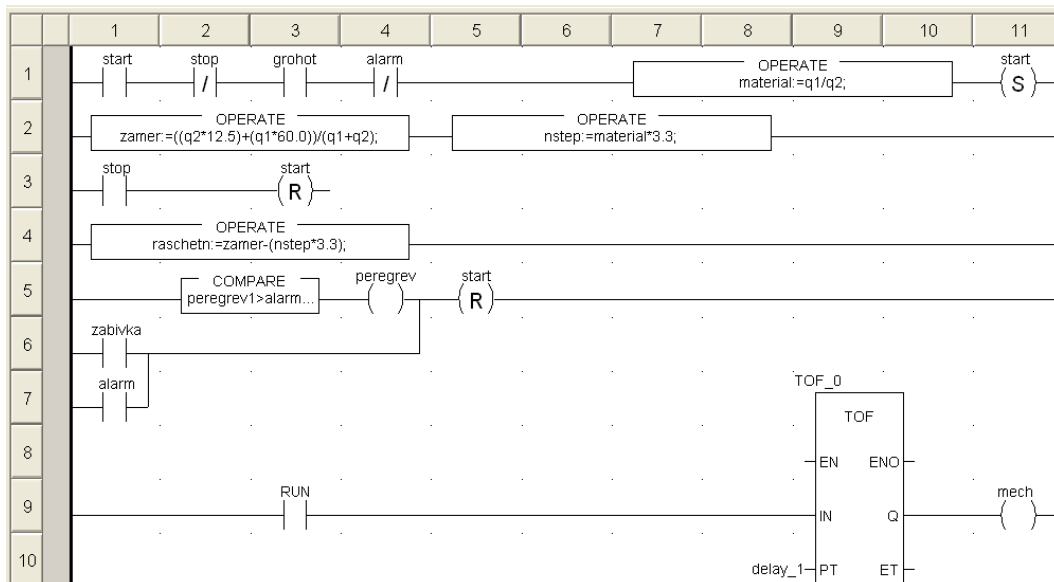


Рисунок 4.8 – Основна програма ПЛК на мові LD

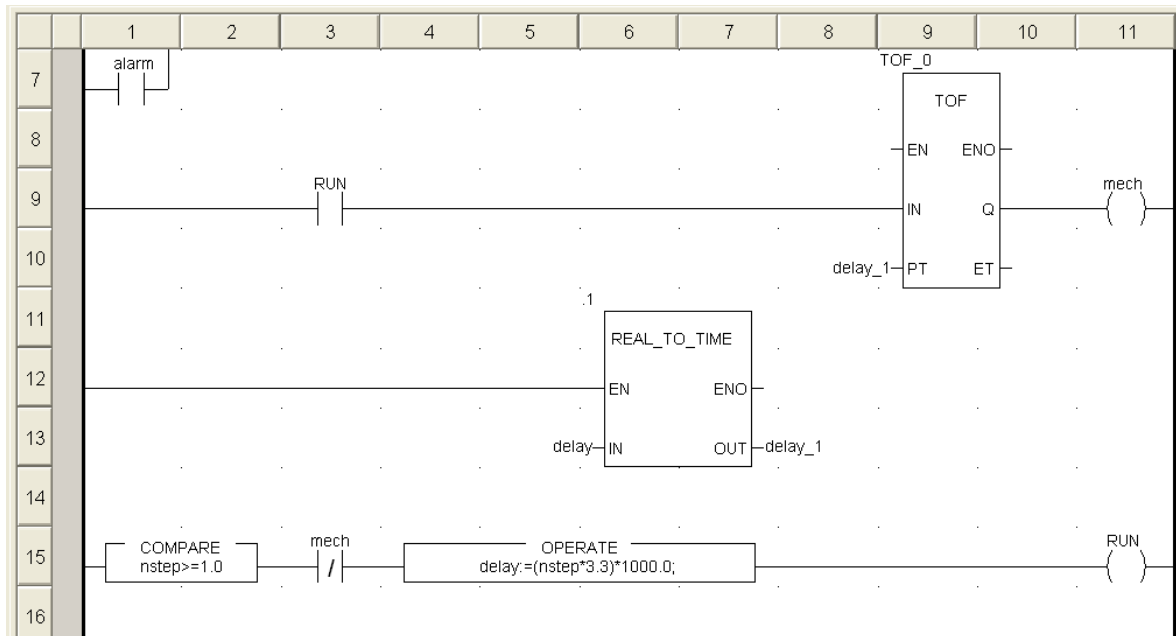


Рисунок 4.9 – Продовження основної програми ПЛК на мові LD

Після завершення розробки головної частини програми здійснюється перехід до етапу створення анімаційного інтерфейсу. На цьому екрані розміщені всі необхідні елементи, що пов'язані з основною логікою програми. Візуальне оформлення анімаційного інтерфейсу зображено на рис.4.10.

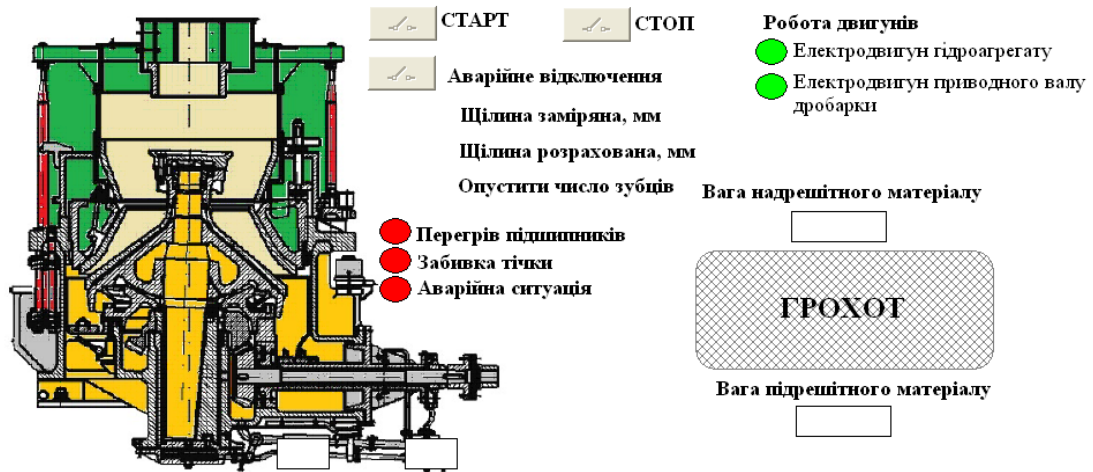


Рисунок 4.10 – Екран анімації в Unity XL Pro

4.3 Аналіз результатів роботи розробленої САК

Розроблена система автоматичного керування орієнтована на впровадження в умовах реального виробництва, де функціонує справжнє обладнання та доступні як оперативні, так і практичні дані. Оскільки в

лабораторному середовищі відтворити такі умови неможливо, тестування САК здійснюватиметься шляхом імітації процесів з використанням умовних, штучно згенерованих показників.

Під час початкової перевірки САК зафіксовано масу матеріалів: надрешітний – 174,2 кг, а підрешітний – 15,9 кг. Візуалізація функціонування системи автоматичного контролю представлена на рис. 4.11 і 4.12 у вигляді анімації та через сенсорний інтерфейс.

Під час другого етапу перевірки системи автоматичного керування (САК), з метою оцінки ефективності алгоритму регулювання режиму щільності (РЩ), були зафіксовані маси надрешітного та підрешітного матеріалів – 94,0 кг та 75,7 кг відповідно. На графіках, наведених на рисунках 4.13 та 4.14, відображено результати функціонування САК. Із представлених даних можна зробити висновок, що в момент досягнення необхідних параметрів для запуску гідроагрегату система успішно сигналізує про активацію електродвигуна. Це свідчить про те, що реле, відповідальне за вмикання електропривода, виконує свої функції належним чином.



Рисунок 4.11 – Результат роботи САК на екрані анімації станції

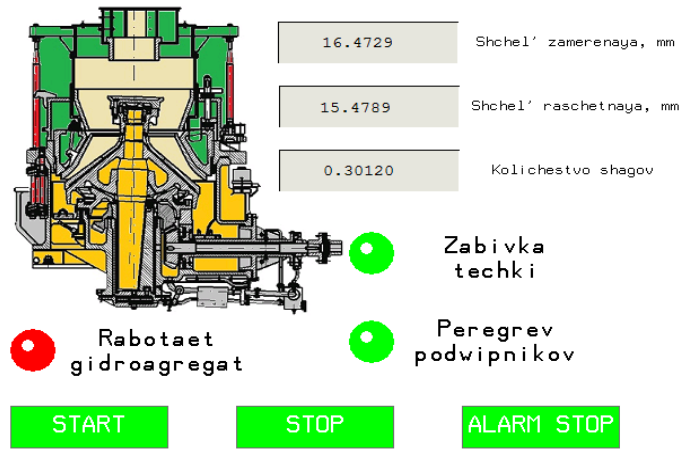


Рисунок 4.12 – Результат роботи САК на сенсорній панелі

ВИСНОВКИ

З метою підвищення ефективності виробничих процесів і забезпечення виходу підприємства на міжнародний ринок, а також для збереження конкурентних позицій, наявні інженерні рішення потребують оновлення – як у частині технічного оснащення, так і в управлінських механізмах.

Одним із напрямів модернізації, що сприяє зростанню якості продукції та її конкурентоспроможності, є впровадження автоматизованої системи регулювання, розглянутої в даній кваліфікаційній роботі. У межах дослідження було проаналізовано наявні інженерні підходи, а також проведено синтез нової системи з подальшим дослідженням її параметрів для покращення кінцевого результату виробництва.

Запропоноване програмне забезпечення дозволяє полегшити обробку сигналів із сенсорних пристроїв та сприяє швидкій адаптації персоналу до нової системи керування. Крім того, передбачена можливість інтеграції створеної системи в середовище SCADA, що відкриває додаткові перспективи у сфері прогнозного аналізу та виявлення несправностей.

Література