

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

БР.АКП - 09.00.00.000 ПЗ

Група АКП-22-1

Артем Дячук

2026

Міністерство освіти і науки України
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Факультет автоматизації та енергетики
Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Дячук Артем Олександрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК ____

681.5

(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Розроблення системи оптимального керування процесом помелу цементних

(назва роботи)

КОМПОНЕНТІВ

Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(назва освітньої програми)

151 - Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(шифр і назва спеціальності)

Робота містить результати власних досліджень, використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Нормоконтроль

доцент

(посада)

(підпис)

(дата)

О.В.Кучмистенко

(ініціали та прізвище)

Здобувач освітнього ступеня

АКП-22-1

(шифр групи)

(підпис)

(дата)

А.О.Дячук

(ініціали та прізвище)

Рецензент

доцент

(посада)

(підпис)

(дата)

Л.І.Фешанич

(ініціали та прізвище)

Науковий керівник

доцент

(посада)

(підпис)

(дата)

Р.Б.Скрип'юк

(ініціали та прізвище)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

доцент

(посада)

(підпис)

(дата)

А.І.Лагойда

(ініціали та прізвище)

Івано-Франківськ - 2026

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Освітній рівень перший (бакалаврський)

Спеціальність 151 - Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри **АКІТ.**

_____/Лагойда А.І./

«____» _____ 2026 р

З А В Д А Н Н Я

НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

Дячуку Артему Олександровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення системи оптимального керування процесом помелу цементних компонентів

керівник роботи Скрип'юк Ростислав Богданович, к.т.н., доцент

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

затверджені наказом закладу вищої освіти від « 29 » квітня 20 26 року № 192/7

2. Строк подання студентом роботи 13.06.2025 року

3. Вихідні дані до роботи: звіт з переддипломної практики, наукові публікації, технічна документація та перелік літературних джерел з матеріалами опису технологічного процесу відповідної установки.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) аналіз загальних відомостей про помел цементу; сформульовані критерії керування об'єктом; розроблена імітаційна модель для отримання кращих показників та підвищення енергоефективності в процесі аспірації цементу та рівнем завантаження млина, побудована система керування процесом помелу.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Лист 1 - Структурна схема регулятора - БР.АКП-09.00.00.001;

Лист 2 - Схема моделювання процесу помелу - БР.АКП-09.00.00.002;

Лист 3 - Схема моделювання процесу аспірації - БР.АКП-09.00.00.003;

Лист 4 - Функціональна схема Мікрол МІК-52 - БР.АКП-09.00.00.004;

Лист 5 - Схема моделювання завантаження млина - БР.АКП-09.00.00.005;

Лист 6 - Схема моделювання взаємодії ПЛК та млина - БР.АКП-09.00.00.006.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 06.11.2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз завдання кафедри, складання ТЗ, розгляд підбір та аналіз літератури.	16.02.2026 р.	
2	Розгляд загальних технологічних питань.	02.03.2026 р.	
3	Опанувати засоби оптимізації та моделювання, розробку критерія керування.	23.03.2026 р.	
4	Розроблення пояснювальної записки.	20.04.2026 р.	
5	Розробка імітаційної моделі в Середовищі MATLAB.	11.05.2026 р.	
6	Побудова системи керування процесом помелу.	01.06.2026 р.	
7	Технічне оформлення проекту, здавання проекту керівнику.	14.06.2026 р.	

Студент _____
(підпис)

А.О. Дячук
(ініціали та прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

Р.Б. Скрип'юк
(ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Бакалаврська робота містить: 74 сторінки друкованого тексту, 34 рисунки, 1 таблиця, 8 джерел посилань та 3 додатки.

Тема: Розроблення системи оптимального керування процесом помелу цементних компонентів.

Об'єкт дослідження: процес помелу компонентів цементу як об'єкт автоматичного керування.

Мета роботи: підвищення ефективності процесу помелу компонентів цементу шляхом визначення та оптимізації параметрів системи автоматичного керування.

Методи дослідження: математичне та імітаційне моделювання, методи теорії автоматичного керування, аналіз динамічних характеристик об'єкта, комп'ютерне моделювання в середовищі MATLAB.

У роботі досліджено технологічний процес помелу компонентів цементу та особливості його автоматизації. Проведено аналіз факторів, які впливають на якість готової продукції та енергоефективність виробництва. Розглянуто існуючі підходи до керування процесом помелу, визначено основні канали регулювання та сформовано критерії оцінювання якості функціонування системи керування.

Здійснено ідентифікацію параметрів об'єкта керування та виконано математичне моделювання процесу помелу компонентів цементу. На основі отриманих результатів розроблено імітаційну модель у середовищі MATLAB, за допомогою якої проведено дослідження динамічних характеристик системи та оцінено ефективність різних режимів керування.

Розроблено структуру системи автоматичного керування процесом помелу, виконано аналіз роботи регуляторів та визначено оптимальні параметри їх налаштування. Отримані результати дозволяють підвищити стабільність технологічного процесу, покращити якість готового продукту та знизити питомі витрати енергії.

Ключові слова: процес помелу цементу, автоматичне керування, математичне моделювання, імітаційне моделювання, MATLAB, оптимізація параметрів, система керування, кульовий млин, енергоефективність.

ABSTRACT

The bachelor's thesis consists of 74 pages of printed text, 34 figures, 1 table, 8 references, and 3 appendices.

Topic: Development of an Optimal Control System for the Grinding Process of Cement Components.

Object of research: the grinding process of cement components as an object of automatic control.

Project goal: to improve the efficiency of the cement component grinding process by determining and optimizing the parameters of the automatic control system.

Research methods: mathematical and simulation modeling, methods of automatic control theory, analysis of dynamic characteristics of the controlled object, and computer simulation in the MATLAB environment.

The thesis investigates the technological process of cement component grinding and the features of its automation. An analysis of the factors affecting product quality and energy efficiency of production has been carried out. Existing approaches to controlling the grinding process have been considered, the main control channels have been identified, and criteria for evaluating the performance of the control system have been developed.

The parameters of the controlled object were identified, and a mathematical model of the cement grinding process was developed. Based on the obtained results, a simulation model was created in the MATLAB environment, which was used to study the dynamic characteristics of the system and evaluate the effectiveness of different control modes.

The structure of the automatic control system for the grinding process was developed, the operation of controllers was analyzed, and their optimal tuning parameters were determined. The obtained results make it possible to improve the stability of the technological process, enhance the quality of the final product, and reduce specific energy consumption.

Keywords: cement grinding process, automatic control, mathematical modeling, simulation modeling, MATLAB, parameter optimization, control system, ball mill, energy efficiency.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ.....	7
ВСТУП	8
1. ФУНКЦІОНАЛЬНІ ЗАВДАННЯ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ВИРОБНИЦТВА ЦЕМЕНТУ	10
1.1 Фактори зниження енергоємності процесу	10
1.2 Аналіз параметрів якості цементу	15
1.3 Розгляд каналів керування	19
Висновки до розділу	24
2. ФОРМУВАННЯ КРИТЕРІЇВ КЕРУВАННЯ ОБ'ЄКТОМ.....	25
2.1 Завдання керування.....	25
2.2 Ідентифікація параметрів об'єкту керування	31
Висновки до розділу	39
3. РОЗРОБКА ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ ОБ'ЄКТУ	40
3.1 Моделювання керування рівнем завантаження млина.....	42
3.2 Моделювання керування аспірацією.....	52
Висновки до розділу	58
4. ПОБУДОВА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ПОМЕЛУ	59
Висновки до розділу	68
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	69
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА.....	70
ДОДАТКИ	

					БР.АКП-09.00.00.000 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Розроблення системи оптимального керування процесом помелу цементних компонентів	Літ.	Арк.	Акрушів
Розроб.		Дячук А.О.					6	74
Перевір.		Скрип'юк Р.Б.						
Реценз.		Фешанич Л.І.						
Н. Контр.		Кучмистенко О.В.						
Затверд.		Лагойда А.І.				АКП-22-1 ІФНТУНГ		

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

ККД - Коефіцієнт корисної дії

ПЧ - Перетворювач частоти

КМ - Кульовий млин

МК - Мікроконтролер

ПЛК - Програмований логічний контролер

ПК - Персональний комп'ютер

АД - Асинхронний двигун

БО - Блок обробки

БП - Блок корекції

ОК - Об'єкт керування

ПЗ - Програмне забезпечення

					БР.АКП-09.00.00.000 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Цементна промисловість є однією з найважливіших складових будівельної галузі та відіграє значну роль у розвитку сучасної економіки. Зростання обсягів будівництва житлових, промислових і транспортних об'єктів спричиняє постійне збільшення попиту на цемент, що, своєю чергою, вимагає підвищення продуктивності та ефективності цементних підприємств. Одним із ключових напрямів удосконалення виробництва є впровадження сучасних засобів автоматизації технологічних процесів, які забезпечують стабільну якість продукції

Особливе місце у технологічному циклі виробництва цементу займає процес помелу компонентів. Від якості його виконання залежать фізико-механічні властивості готового продукту, рівень енерговитрат та загальна продуктивність обладнання. Водночас процес помелу характеризується значною інерційністю, впливом численних збурюючих факторів і складністю забезпечення оптимального режиму роботи. Це обумовлює необхідність застосування ефективних систем автоматичного керування, здатних підтримувати необхідні технологічні параметри та забезпечувати економічно вигідне функціонування виробництва.

Незважаючи на постійне вдосконалення обладнання цементної промисловості, проблема зниження енергоємності процесу помелу залишається актуальною. Значна частина електроенергії, що споживається підприємством, припадає саме на роботу помольного обладнання. Тому підвищення ефективності систем керування даним процесом є важливим завданням як з технічної, так і з економічної точки зору.

Актуальність роботи полягає у необхідності підвищення ефективності процесу помелу компонентів цементу шляхом оптимізації параметрів системи керування та застосування сучасних методів математичного й імітаційного моделювання.

Об'єктом дослідження є процес помелу компонентів цементу.

Предметом дослідження є система керування процесом помелу компонентів цементу та параметри її функціонування.

					БР.АКП-09.00.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Метою роботи є визначення оптимальних параметрів керування процесом помелу компонентів цементу за критеріями якості перехідного процесу та ефективності функціонування системи автоматичного керування. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз технологічного процесу помелу компонентів цементу та особливостей його автоматизації;
- дослідити основні фактори, які впливають на якість готової продукції та енергоефективність процесу;
- сформулювати критерії оцінювання якості керування об'єктом;
- виконати ідентифікацію параметрів процесу помелу як об'єкта керування;
- розробити імітаційну модель технологічного процесу в MATLAB;
- дослідити роботу системи керування та визначити оптимальні параметри її налаштування;
- розробити структуру системи керування процесом помелу компонентів цементу.

Практичне значення одержаних результатів полягає у можливості підвищення якості продукції та зменшення енергетичних витрат за рахунок вибору оптимальних режимів функціонування системи керування процесом помелу. Під час виконання роботи використовувалися методи математичного аналізу, теорії автоматичного керування, ідентифікації об'єктів, а також засоби комп'ютерного моделювання в середовищі MATLAB.

					БР.АКП-09.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 ФУНКЦІОНАЛЬНІ ЗАВДАННЯ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ВИРОБНИЦТВА ЦЕМЕНТУ

1.1 Фактори зниження енергоємності процесу

Виробництво цементу є складним технологічним процесом, який включає два основні етапи: отримання клінкеру та його подальше подрібнення до необхідної дисперсності з додаванням гіпсу та інших мінеральних добавок. Саме якість виконання цих операцій значною мірою визначає властивості готового продукту та ефективність виробництва загалом.

Сучасні тенденції розвитку цементної промисловості орієнтовані на підвищення продуктивності підприємств, покращення якості продукції та зменшення енергетичних витрат. Проте, незважаючи на впровадження нових технологій і модернізацію обладнання, загальний рівень споживання енергії в галузі продовжує зростати. Це пояснюється збільшенням виробничих потужностей, підвищенням вимог до якості цементу та необхідністю дотримання сучасних екологічних стандартів.

Розподіл енергетичних витрат між основними технологічними операціями цементного виробництва наведений на рисунку 1.1.



Рисунок 1.1 – Структура споживання енергії устаткуванням цементного виробництва

Значна частина енергії витрачається на випал клінкеру, який є одним із ключових етапів виробництва. Для реалізації цього процесу використовуються обортові печі, що працюють у складних температурних режимах. Частка енергії, яка витрачається на випал, становить близько чверті загального енергоспоживання підприємства.

Ще більшими є витрати енергії, пов'язані з фінішним помелом цементу. За результатами досліджень встановлено, що на цей процес припадає близько 40 % усіх енергетичних витрат під час виробництва однієї тонни цементу. Основна частина енергії використовується електроприводами млинів, однак суттєві втрати також виникають унаслідок тертя між частинками матеріалу та мелючими тілами. Рівень цих витрат значною мірою залежить від ступеня попереднього подрібнення сировини.

Властивості вихідної сировини мають істотний вплив на енергоефективність процесу. Матеріали, що використовуються для виробництва цементу, можуть відрізнятися твердістю, вологістю, хімічним складом та іншими характеристиками. Навіть сировина, отримана з одного родовища, часто має неоднорідну структуру. Саме тому для забезпечення стабільної якості готової продукції необхідно коригувати режими роботи обладнання залежно від властивостей конкретної сировини.

Виконання таких коригувань пов'язане з додатковими енергетичними витратами, оскільки кожен режим функціонування технологічної лінії характеризується власним рівнем споживання енергії. Найбільше це стосується процесів подрібнення та змішування компонентів цементної суміші. З урахуванням особливостей сировини та виробничих умов у цементній промисловості використовуються три основні способи виробництва цементу: мокрий, сухий та комбінований.

Мокрий спосіб передбачає подрібнення сировини у водному середовищі з утворенням шламу, вологість якого може становити від 30 до 50 %. При використанні сухого способу сировинна суміш попередньо висушується або

					БР.АКП-09.00.00.000 ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

висушується безпосередньо під час подрібнення, у результаті чого утворюється дрібнодисперсний порошок, готовий до подальшого випалу.

Комбінований спосіб поєднує елементи обох технологій. У цьому випадку шлам після мокрого подрібнення піддається зневодненню до необхідного рівня вологості або ж використовується сухий спосіб із подальшим гранулюванням матеріалу перед випалом.

Подальший розвиток цементної промисловості показав, що найбільш перспективним напрямком є використання технологій, орієнтованих на скорочення енергетичних витрат. З цієї точки зору мокрий спосіб виробництва поступово втрачає актуальність, оскільки значна кількість теплової енергії витрачається на випаровування води зі шламу. Саме тому більшість сучасних підприємств віддають перевагу сухому способу виробництва цементу.

При застосуванні сухого способу для переробки сировини з високою твердістю необхідно виконувати її попереднє дроблення. Чим меншими є розміри частинок перед помелом, тим менше енергії витрачається на їх подальше подрібнення. Для ефективної роботи помольного обладнання вологість матеріалу повинна бути мінімальною, тому перед подачею в млин сировину висушують.

У більшості випадків процес сушіння поєднується з процесом помелу. Остаточне подрібнення та перемішування компонентів цементної суміші здійснюється в кульових трубних млинах, де матеріал доводиться до необхідного гранулометричного складу.

Після завершення подрібнення виконується коригування складу суміші та її гомогенізація. Для цього використовуються спеціальні силоси, в яких за допомогою стисненого повітря забезпечується рівномірний розподіл компонентів. Підготовлена сировинна суміш надалі надходить до теплообмінників, де відбувається її попередній нагрів. Завершальним етапом є випал у печах, що обертаються, під час якого утворюються гранули клінкеру.

Прагнення знизити витрати палива сприяло розвитку технологій обробки сировини з підвищеною вологістю.

					БР.АКП-09.00.00.000 ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Однак використання традиційних кульових млинів для таких матеріалів виявилося недостатньо ефективним. У зв'язку з цим були впроваджені млини самоподрібнення типу «Аерофол», які дозволяють виконувати попередню обробку матеріалу перед його подачею до кульового млина. Після цього здійснюється остаточне подрібнення та досушування суміші до необхідних параметрів.

Однією з головних переваг сухого способу виробництва є можливість значного скорочення витрат палива. За оцінками фахівців, використання сучасних печей дозволяє майже вдвічі зменшити витрати енергоресурсів, скоротити собівартість продукції приблизно на 10 % та знизити капітальні витрати на будівництво виробничих комплексів.

Разом із тим сухий спосіб має і певні недоліки. Його використання вимагає більш складної технологічної схеми, збільшення кількості обладнання та підвищених вимог до систем пиловловлювання й охорони навколишнього середовища. Крім того, обслуговування таких виробництв потребує додаткових трудових ресурсів.

Суттєвим обмеженням сухої технології є вологість вихідної сировини. Якщо її значення перевищує 20–25 %, витрати енергії на сушіння можуть стати економічно не вигідними. У таких випадках доцільним є використання комбінованого способу виробництва цементу.

Комбінована технологія передбачає застосування прес-фільтрів для зневоднення шламу, отриманого під час мокрого способу підготовки сировини. Такий підхід дозволяє зменшити витрати теплоти на випалювання та скоротити споживання палива приблизно на 30 %. Одночасно капітальні витрати можуть бути знижені майже на 10 %, хоча витрати електроенергії при цьому дещо зростають.

Інший варіант комбінованої технології базується на сухому способі виробництва з подальшим гранулюванням сировинної суміші. Для формування гранул до матеріалу додають певну кількість води, після чого він надходить на випалювання у спеціальні печі. Такий підхід забезпечує стабільність технологічного процесу, покращує теплообмін та сприяє підвищенню якості

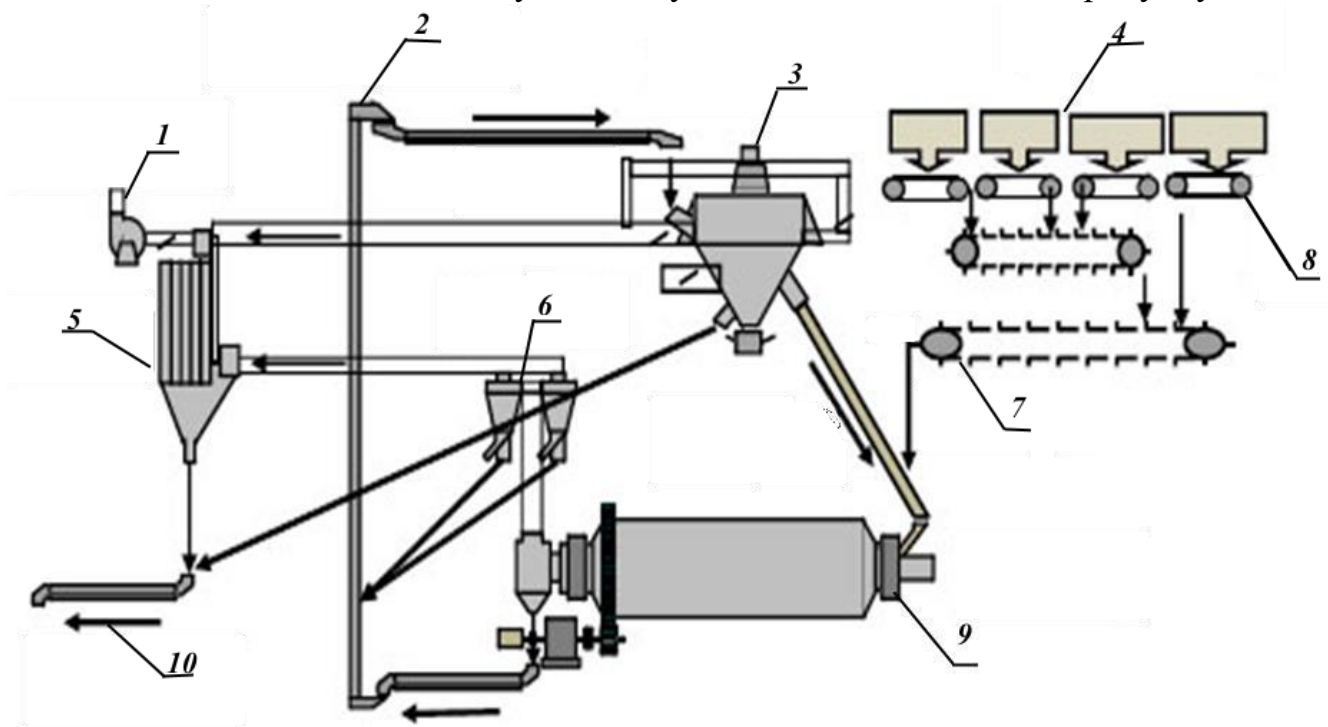
					БР.АКП-09.00.00.000 ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

готової продукції.

Попри переваги традиційних технологій, високий рівень енерговитрат під час помелу цементних компонентів стимулював пошук більш ефективних рішень. Одним із таких рішень стало використання замкнутого циклу подрібнення, який забезпечує підвищення продуктивності обладнання та покращення якості готового продукту.

Для підвищення ефективності процесу подрібнення та зменшення питомих витрат енергії в цементній промисловості широкого поширення набули системи помелу із замкнутим циклом. Завдяки використанню такої технології вдається не лише підвищити продуктивність обладнання, але й забезпечити стабільні показники якості готового продукту.

Технологічна схема помелу із замкнутим циклом наведена на рисунку 1.2.



1 – система вентиляторів; 2 – рециркуляційний елеватор; 3 – сепаратор; 4 – силоси живлення; 5 – фільтр; 6 – циклони; 7 – живильник млина; 8 – вагові дозатори; 9 – кульовий млин; 10 – готовий продукт.

Рисунок 1.2 – Технологічна схема помелу із використанням замкнутого циклу

У запропонованій схемі процес подрібнення здійснюється в кульовому млині, до якого через систему дозування безперервно подається сировина. Надходження матеріалу забезпечується із силосів живлення за допомогою живильників та вагових дозаторів, що дозволяє підтримувати необхідну продуктивність установки та стабільність технологічного процесу.

Особливістю даної схеми є наявність рециркуляційного контуру. Після виходу з млина подрібнений матеріал транспортується рециркуляційним елеватором до сепаратора, де відбувається класифікація частинок за розмірами. Частинки, які відповідають встановленим вимогам до гранулометричного складу, спрямовуються до готової продукції, а недостатньо подрібнений матеріал повертається до млина для повторної обробки.

Використання сепаратора дозволяє постійно контролювати якість помелу та забезпечувати отримання продукції із заданими характеристиками. Крім того, відсутність необхідності повторного подрібнення вже готових дрібних частинок сприяє суттєвому зниженню енергетичних витрат.

Порівняно з відкритими схемами подрібнення, замкнений цикл забезпечує більш раціональне використання енергії. За рахунок своєчасного відокремлення готового продукту та повернення лише крупних фракцій на повторний помел вдається скоротити споживання електроенергії приблизно на 30 %. Додатковою перевагою є зменшення ймовірності надмірного подрібнення матеріалу, що позитивно впливає на якість цементу та продуктивність обладнання.

Вибір конкретної технологічної схеми виробництва цементу визначається фізико-хімічними властивостями сировини, вимогами до якості готової продукції та економічними показниками виробництва. При цьому основним критерієм залишається забезпечення необхідних характеристик цементу за мінімальних витрат енергетичних і матеріальних ресурсів.

1.2 Аналіз параметрів якості цементу

Одним із головних показників якості цементу є міцність виробів, виготовлених на його основі. Саме цей параметр визначає експлуатаційні

					БР.АКП-09.00.00.000 ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

характеристики будівельних конструкцій та довговічність їх використання. На формування міцності суттєво впливає гранулометричний склад цементу, який безпосередньо залежить від якості процесу помелу.

Ступінь подрібнення компонентів визначає величину активної поверхні частинок, що бере участь у процесах гідратації. Чим більшою є питома поверхня цементу, тим інтенсивніше відбуваються фізико-хімічні процеси під час взаємодії з водою. Водночас надмірне подрібнення також є небажаним, оскільки призводить до зростання енергетичних витрат та може негативно впливати на окремі характеристики готової продукції.

Процес гідратації цементу розпочинається з поверхні частинок і поступово поширюється вглиб матеріалу. Тому розміри зерен мають безпосередній вплив на швидкість перебігу реакцій та формування міцності. Найдрібніші частинки забезпечують швидке наростання початкової міцності, тоді як фракції середнього розміру суттєво впливають на кінцеві міцнісні характеристики цементу.

У зв'язку з цим одним із найважливіших завдань системи керування процесом помелу є забезпечення необхідного гранулометричного складу готового продукту. Саме параметри тонкості помелу виступають основними критеріями оцінювання ефективності роботи помольного обладнання та систем автоматичного керування.

Для контролю якості цементу застосовуються різні методи визначення розміру частинок та питомої поверхні. Одним із найбільш поширених є метод Блейна, який базується на оцінюванні питомої поверхні матеріалу. Цей метод тривалий час використовувався як основний показник якості помелу цементу.

Однак застосування методу Блейна для автоматизованого керування має певні обмеження. До них належать складність автоматизації вимірювань, недостатня оперативність отримання результатів та відносно низька відтворюваність показників. Через це використання лише даного методу не забезпечує ефективного поточного контролю технологічного процесу.

Сучасний розвиток вимірювальної техніки дозволив впровадити більш досконалі засоби аналізу гранулометричного складу цементу. Одним із таких

					БР.АКП-09.00.00.000 ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

засобів є метод лазерної гранулометрії, який забезпечує високу точність вимірювання та можливість оперативного отримання результатів безпосередньо під час виробничого процесу.

Для визначення розподілу частинок за розмірами широко використовуються лазерні гранулометри типу Mastersizer 2000, які забезпечують автоматичний аналіз параметрів цементного порошку та формування детальної інформації про його гранулометричний склад.



Рисунок 1.3 – Лазерний гранулометр Mastersizer 2000

Лазерний гранулометр Mastersizer 2000 призначений для визначення гранулометричного складу сипких матеріалів і широко використовується на підприємствах цементної промисловості. Однією з його основних переваг є можливість інтеграції в технологічний процес та отримання результатів вимірювання з високою точністю.

Принцип роботи приладу ґрунтується на методі лазерної дифракції. Під час проходження лазерного променя через потік частинок відбувається його розсіювання. Кут розсіювання залежить від розміру частинок: чим меншими є частинки, тим більшим буде кут відхилення променя. Отримана інформація реєструється системою фотодетекторів і надходить до обчислювального модуля для подальшої обробки.

					БР.АКП-09.00.00.000 ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

На основі результатів вимірювань програмне забезпечення автоматично визначає розподіл частинок за розмірами та формує відповідні графічні залежності.

Діапазон вимірювання сучасних лазерних гранулометрів дозволяє контролювати частинки розміром від часток мікрметра до декількох міліметрів, що повністю задовольняє вимоги цементного виробництва.

Отримана інформація використовується для аналізу якості помелу та подальшого коригування режимів роботи технологічного обладнання. Зокрема, результати вимірювань можуть застосовуватися для зміни продуктивності млина, регулювання циркуляційного навантаження або оптимізації роботи сепараційного обладнання.

Незважаючи на високу ефективність лабораторних приладів, для реалізації безперервного автоматичного керування необхідне отримання даних безпосередньо під час технологічного процесу. З цією метою використовуються промислові лазерні гранулометри, що встановлюються безпосередньо в потоці матеріалу.

Одним із таких пристроїв є система Insitac Dry, яка забезпечує безперервний контроль гранулометричного складу цементу без зупинки виробництва.

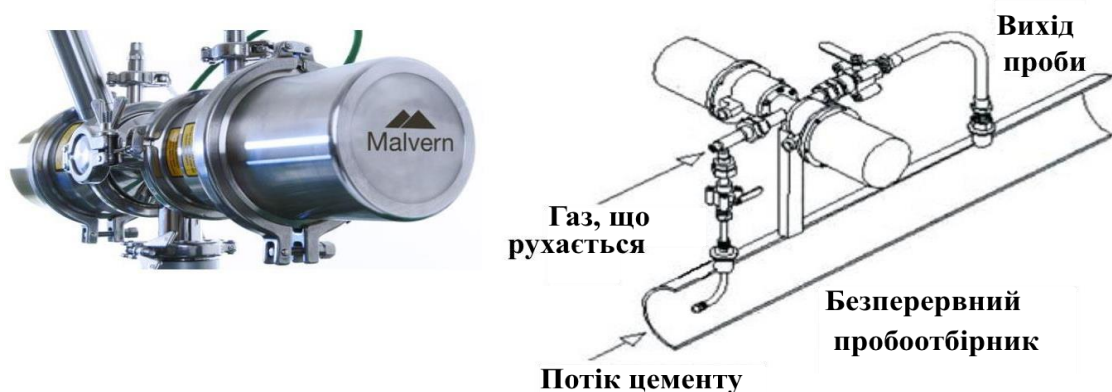


Рисунок 1.4 – Лазерний гранулометр Insitac Dry та його розміщення у технологічному потоці

На відміну від лабораторних засобів контролю, система Insitac Dry дозволяє виконувати вимірювання безпосередньо під час роботи виробничої лінії. Це

					БР.АКП-09.00.00.000 ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

забезпечує оперативне отримання інформації про якість продукту та створює умови для реалізації замкнутих систем автоматичного керування.

Важливою перевагою даного обладнання є висока швидкість оновлення даних. Інформація про гранулометричний склад надходить через короткі проміжки часу, що дозволяє своєчасно виявляти відхилення від заданих параметрів та оперативно вносити корективи в режими роботи обладнання.

Таким чином, використання сучасних лазерних гранулометрів значно розширює можливості автоматизації процесу помелу цементу. Отримання достовірної та оперативної інформації про гранулометричний склад продукту дозволяє підвищити точність керування, покращити якість готової продукції та забезпечити більш ефективне використання енергетичних ресурсів підприємства.

1.3 Аналіз каналів керування

Одним із головних напрямів удосконалення сучасного цементного виробництва є підвищення тонкості помелу готового продукту. Саме гранулометричний склад цементу значною мірою визначає швидкість перебігу процесів гідратації та впливає на міцнісні характеристики будівельних матеріалів. Разом із тим збільшення ступеня подрібнення супроводжується зростанням енергетичних витрат і зниженням продуктивності помольного обладнання.

Сучасні дослідження в галузі виробництва цементу спрямовані не лише на вдосконалення конструкцій млинів та допоміжного обладнання, але й на розроблення ефективних систем автоматичного керування. Використання сучасних алгоритмів регулювання дозволяє забезпечити оптимальне співвідношення між якістю продукції та витратами енергії на її виробництво.

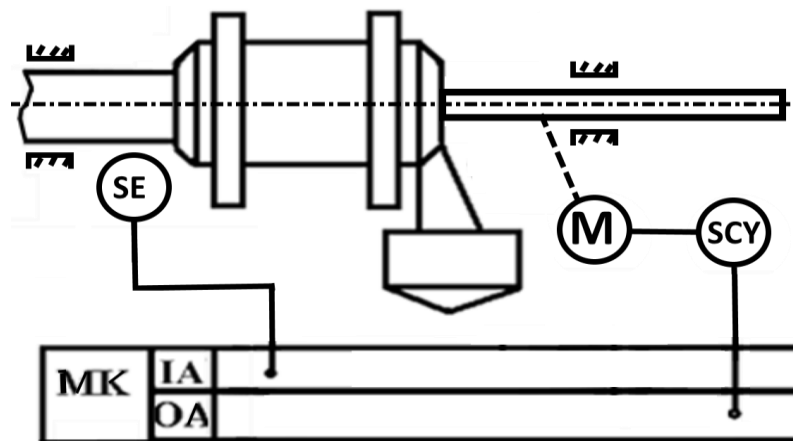
Підвищення техніко-економічних показників процесу значною мірою залежить від стабільності режимів роботи технологічного обладнання. Одним із важливих завдань автоматизації є компенсація впливу збурень, які виникають внаслідок зміни характеристик сировини, коливань навантаження або відхилень параметрів технологічного процесу.

Якість готового цементу безпосередньо залежить від рівня завантаження

					БР.АКП-09.00.00.000 ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

кульового млина. При надмірному завантаженні знижується ефективність подрібнення матеріалу, а при недостатньому завантаженні погіршується використання виробничих потужностей. У кожному випадку спостерігається погіршення якості готового продукту та збільшення питомих витрат енергії.

Для забезпечення стабільності процесу першочергове значення має підтримання постійної швидкості обертання млина. Зміна швидкості обертання призводить до зміни режиму руху мелючих тіл і, відповідно, до зміни ефективності подрібнення матеріалу. Саме тому одним із основних контурів автоматичного керування є система регулювання швидкості обертання млина.



SE – Давач швидкості; SCY – Частотний перетворювач;
MK – мікроконтролерний регулятор; М – електродвигун.

Рисунок 1.5 – Функціональна схема керування швидкістю обертання млина

У даній системі сигнал від давача швидкості надходить до регулятора, який формує керуючий вплив на частотний перетворювач. Останній змінює параметри живлення електродвигуна та забезпечує підтримання заданої швидкості обертання млина незалежно від зміни навантаження.

Необхідність використання такого контуру пояснюється тим, що під час роботи обладнання виникають значні коливання навантаження, пов'язані зі зміною властивостей сировини та нерівномірністю її подачі. Автоматичне регулювання дозволяє зменшити вплив цих факторів і забезпечити стабільний режим роботи технологічного обладнання.

Ще одним важливим каналом керування є система дозування сировини, що надходить до млина. Точність подачі матеріалу безпосередньо впливає на ступінь завантаження обладнання та якість процесу помелу. Для реалізації такого керування найчастіше використовуються вагові дозатори та стрічкові конвеєри з автоматичним регулюванням швидкості руху.

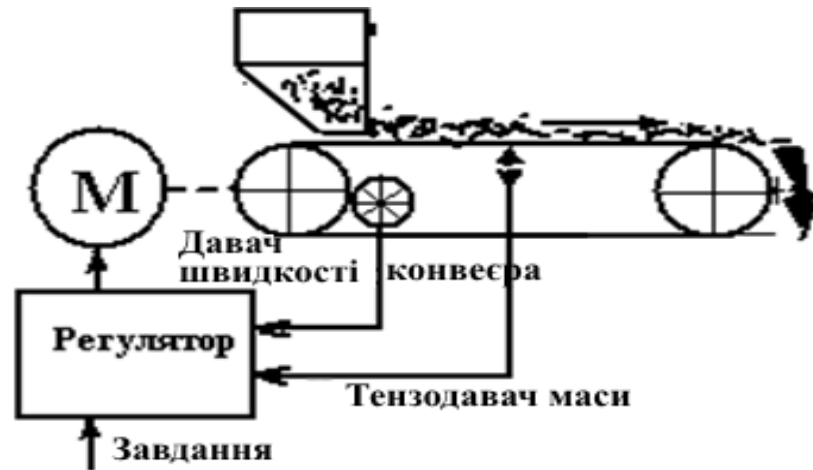


Рисунок 1.6 – Функціональна схема автоматичного дозування сировини

Стабільність роботи помольного обладнання значною мірою залежить не лише від точності дозування сировини, але й від ефективності процесу аспірації. Під час подрібнення утворюється велика кількість дрібнодисперсних частинок, які необхідно своєчасно видаляти із робочої зони млина. Накопичення таких частинок погіршує умови подрібнення та призводить до зниження продуктивності обладнання.

Система аспірації виконує декілька важливих функцій. Вона забезпечує видалення пилу із технологічного процесу, покращує умови праці персоналу та сприяє підвищенню ефективності помелу. Завдяки відведенню дрібних фракцій зменшується ймовірність їх повторного подрібнення, що позитивно впливає на якість готового продукту та дозволяє скоротити енергетичні витрати.

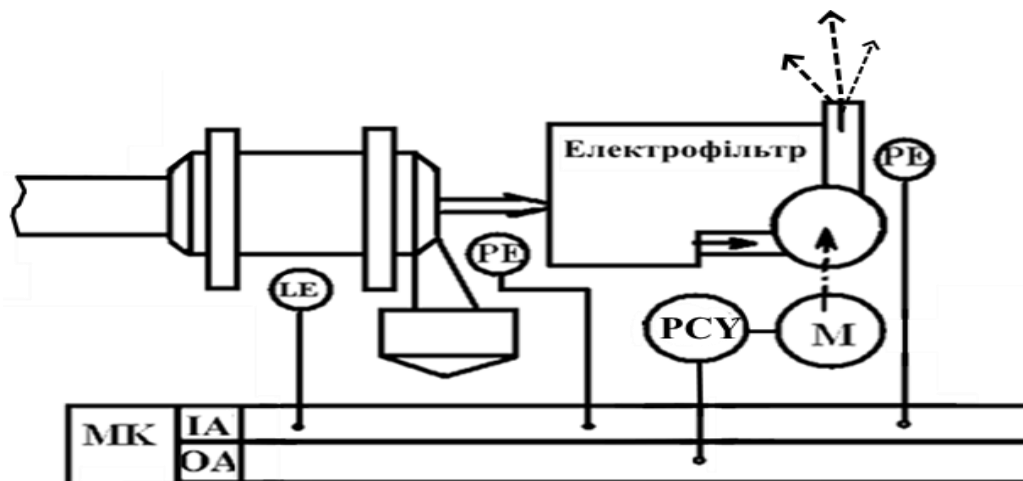


Рисунок 1.7 – Функціональна схема процесу аспірації

Інтенсивність аспірації безпосередньо впливає на гранулометричний склад цементу. Недостатній повітряний потік сприяє накопиченню дрібних частинок у млині, тоді як надмірна аспірація може призводити до винесення недостатньо подрібненого матеріалу. Саме тому параметри аспіраційної системи потребують постійного контролю та регулювання.

Одним із ключових показників ефективності роботи системи керування є якість готової продукції. Для оцінювання цього параметра використовуються дані про гранулометричний склад цементу, які надходять від вимірювальних пристроїв. Отримана інформація дозволяє своєчасно виявляти відхилення від заданих характеристик та коригувати режими роботи обладнання.

Ефективне функціонування системи автоматичного керування можливе лише за умови комплексного врахування всіх основних факторів, що впливають на процес помелу. До таких факторів належать швидкість обертання млина, витрати сировини, ступінь завантаження обладнання, параметри аспірації та характеристики готового продукту.

Застосування сучасних засобів автоматизації дозволяє об'єднати окремі контури регулювання в єдину багатоконтурну систему керування. Така система забезпечує узгоджену роботу всіх елементів технологічного комплексу та дозволяє підтримувати оптимальні режими функціонування обладнання.

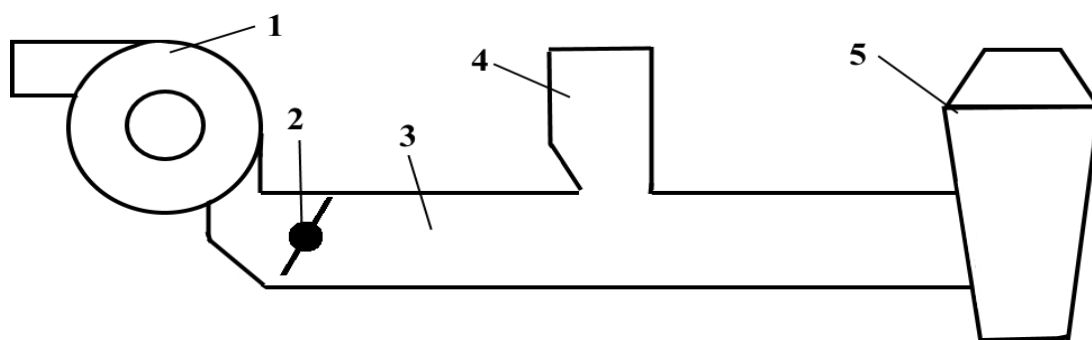
Комплексний підхід до керування процесом помелу дає можливість підвищити продуктивність млина, покращити якість цементу та зменшити питомі витрати енергії. Крім того, автоматизація технологічного процесу сприяє зниженню впливу людського фактора та підвищенню надійності роботи виробничого обладнання.

Таким чином, аналіз основних каналів керування показує, що найбільший вплив на якість процесу помелу мають контури регулювання швидкості обертання млина, дозування сировини та аспірації. Саме ці параметри доцільно використовувати як основні керуючі впливи під час побудови системи автоматичного керування процесом помелу цементних компонентів.

Існуючі локальні системи автоматизації забезпечують підтримання окремих параметрів процесу помелу в заданих межах, проте їх функціональних можливостей недостатньо для реалізації оптимального керування технологічним процесом у цілому. У зв'язку з цим для досягнення максимальної продуктивності помольного обладнання за умови забезпечення необхідного гранулометричного складу готової продукції виникає потреба у розробленні комплексної системи керування, здатної реалізувати сформовані критерії оптимізації.

Схема аспіраційного процесу, яка враховує взаємозв'язок між основними параметрами технологічного процесу, наведена на рисунку 1.8. До її складу входять нагнітальний агрегат, живильник, аспіраційний тракт, сепаратор та регулююча засувка. За допомогою засувки здійснюється зміна витрат повітря, що надходить до аспіраційної системи, забезпечуючи необхідні умови для ефективного функціонування процесу помелу.

					БР.АКП-09.00.00.000 ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



1 – нагнітальний агрегат; 2 – засувка; 3 – тракт аспірації;

4 – живильник; 5 – сепаратор

Рисунок 1.8 – Схема процесу аспірації

Висновки до розділу

У першому розділі було проаналізовано технологічні особливості процесу виробництва цементу та визначено основні фактори, що впливають на його енергоефективність. Встановлено, що найбільші енергетичні витрати припадають на процес помелу цементних компонентів, що обумовлює необхідність його оптимізації. Проведено аналіз параметрів якості цементу, серед яких ключове значення має гранулометричний склад готового продукту. Розглянуто сучасні засоби контролю якості, зокрема лазерні гранулометри, які забезпечують оперативне отримання інформації про характеристики матеріалу. Також досліджено основні канали керування процесом помелу та обґрунтовано доцільність створення комплексної системи автоматичного керування.

2 ФОРМУВАННЯ КРИТЕРІЇВ КЕРУВАННЯ ОБ'ЄКТОМ

2.1 Завдання керування

Для розв'язання задач оптимізації процесу помелу цементних компонентів необхідно детально проаналізувати особливості функціонування технологічного об'єкта та визначити допустимі межі зміни параметрів обладнання, які впливають на характеристики процесу й якість готової продукції. Однією з основних проблем процесу помелу є його низька енергетична ефективність. Відомо, що коефіцієнт корисної дії помольного обладнання зазвичай не перевищує 2–5 %, тому підвищення ефективності використання енергетичних ресурсів залишається одним із найважливіших завдань автоматичного керування.

Суттєвий вплив на ефективність процесу має нестабільність енергоспоживання обладнання, яка значною мірою зумовлена зміною фізико-механічних характеристик сировини, що надходить на подрібнення. Коливання вологості, твердості та гранулометричного складу вихідного матеріалу призводять до зміни навантаження на помольне обладнання та погіршення стабільності технологічного процесу.

Розроблення ефективної системи керування ускладнюється складним характером процесу помелу. Це пов'язано з наявністю нелінійних взаємозв'язків між основними технологічними параметрами, що знижує точність математичних моделей і ускладнює прогнозування поведінки об'єкта. Додаткові труднощі виникають через наявність часових затримок між керуючими впливами та реакцією технологічного процесу, а також через різні сталі часу окремих його складових. На якість регулювання негативно впливають також неконтрольовані зовнішні та внутрішні збурення. До таких факторів належать зміни властивостей сировини, коливання навантаження обладнання та похибки вимірювальних засобів.

Обмежена точність і надійність давачів призводить до зниження достовірності інформації про поточний стан об'єкта, що, своєю чергою, ускладнює реалізацію високоефективного автоматичного керування процесом помелу.

					БР.АКП-09.00.00.000 ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Перелічені фактори суттєво ускладнюють реалізацію безпосередньої оптимізації процесу помелу та підвищення його енергетичної ефективності. Основна проблема полягає в тому, що зміна фізико-механічних властивостей вихідної сировини, зокрема її гранулометричного складу, вологості та твердості, призводить до зміни оптимальних режимів роботи обладнання. У результаті змінюється ступінь заповнення млина матеріалом, що безпосередньо впливає на ефективність процесу подрібнення.

Відхилення рівня завантаження від оптимального значення негативно позначається на роботі помольного обладнання. Як недостатнє, так і надмірне заповнення млина спричиняє зростання витрат електроенергії та зниження продуктивності технологічного процесу. Саме тому контроль рівня завантаження є одним із ключових завдань системи автоматичного керування.

Додаткові труднощі під час реалізації оптимального керування виникають через відсутність універсального та достатньо точного способу безпосереднього визначення ступеня заповнення млина. Це ускладнює отримання достовірної інформації про поточний стан об'єкта та вибір оптимальних керуючих впливів.

У промисловій практиці для оцінювання рівня завантаження часто використовують непрямі методи вимірювання, одним із яких є аналіз потужності, що споживається електроприводом млина. Передбачається, що між навантаженням обладнання та споживаною потужністю існує певна залежність, яка може бути використана для оцінювання режиму роботи установки.

Однак результати практичних досліджень свідчать про неоднозначність такого підходу. На початковому етапі збільшення кількості матеріалу в млині супроводжується зростанням споживаної потужності. Проте після досягнення певного рівня завантаження подальше збільшення кількості матеріалу може призводити до зменшення енергоспоживання. Такий характер залежності ускладнює однозначне визначення фактичного ступеня заповнення млина лише за показниками потужності електропривода.

					БР.АКП-09.00.00.000 ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Одним із альтернативних способів контролю завантаження є використання спеціалізованих акустичних систем. Прикладом такого обладнання є промисловий прилад ВАЗМ-1, робота якого базується на аналізі звукових сигналів, що виникають під час процесу помелу. Зміна характеру акустичних коливань дозволяє оцінювати режим роботи млина та визначати рівень його завантаження з більшою достовірністю порівняно з окремими непрямыми методами контролю.

Для реалізації акустичного контролю завантаження млина використовуються спеціалізовані перетворювачі, відомі як «електронне вухо». Такий датчик встановлюється поблизу корпусу млина та реєструє акустичні сигнали, що виникають під час взаємодії матеріалу з мелючими тілами. Додатково для оцінювання режиму роботи обладнання можуть застосовуватися вібродатчики, зокрема акселерометри, які монтуються на опорах або цапфах млина та забезпечують контроль вібраційних характеристик установки.

Використання сучасних мікропроцесорних засобів обробки сигналів дозволяє суттєво підвищити точність віброакустичного аналізу та покращити достовірність визначення ступеня завантаження млина. Завдяки цьому з'являється можливість застосування системи ВАЗМ-1 для автоматичного регулювання процесу подрібнення та підтримання оптимального режиму роботи обладнання.

Стабілізація рівня завантаження млина позитивно впливає на якість готового продукту та сприяє зменшенню енергетичних витрат. Підтримання оптимальної кількості матеріалу в зоні подрібнення забезпечує більш стабільний гранулометричний склад цементу, підвищує продуктивність обладнання та сприяє покращенню енергетичної ефективності технологічного процесу.

Виконавчим механізмом контуру регулювання завантаження виступає система дозування сировинних компонентів. Формування керуючих впливів здійснюється на основі інформації про поточний стан млина, яка надходить від акустичного перетворювача. Залежно від отриманих даних змінюється продуктивність живильників, що дозволяє підтримувати оптимальний рівень завантаження та забезпечувати максимальну продуктивність помольного обладнання.

					БР.АКП-09.00.00.000 ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Поряд із завданням підвищення енергоефективності важливим критерієм керування є забезпечення необхідного гранулометричного складу готового цементу. Якість помелу безпосередньо залежить від режимів роботи обладнання та параметрів функціонування замкнутого циклу подрібнення із застосуванням сепаратора.

За відсутності ефективної аспірації продуктивність помольного комплексу знижується. Це пояснюється накопиченням і налипанням дрібнодисперсних частинок матеріалу на внутрішніх поверхнях млина та його футеровці. У результаті погіршуються умови взаємодії мелючих тіл із матеріалом, зменшується інтенсивність ударного впливу та знижується ефективність процесу подрібнення.

Подача аспіраційного повітря через сепаратор сприяє зменшенню негативного впливу налипання частинок та покращує умови класифікації матеріалу. Разом із тим надмірна інтенсивність повітряного потоку може викликати передчасне винесення частинок із сепаратора, що негативно впливає на якість готового продукту.

Для підтримання оптимальних параметрів аспіраційного процесу використовуються регулювальні засувки, за допомогою яких змінюються витрати повітря та величина розрідження в системі. Керування положенням засувки дозволяє підтримувати необхідні технологічні параметри відповідно до режиму роботи обладнання.

Оптимальні значення витрат повітря визначаються технологічними вимогами процесу помелу та повинні забезпечувати ефективну роботу млина й сепаратора. Одним із критеріїв налаштування є співвідношення між витратами повітря та продуктивністю за цементом. Крім того, важливим показником виступає приведена швидкість повітряного потоку, рекомендоване значення якої для більшості помольних систем знаходиться в межах від 1 до 2 м/с.

Застосування частотного регулювання електропривода вентилятора аспіраційної системи замість традиційних механічних засувки дозволяє суттєво підвищити енергоефективність технологічного процесу. Найбільший ефект

					БР.АКП-09.00.00.000 ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

досягається під час роботи на знижених швидкостях повітряного потоку, коли використання частотного перетворювача забезпечує значно менші втрати енергії порівняно з механічними методами регулювання.

Додатковими перевагами частотного керування є підвищення точності підтримання заданих параметрів, зменшення динамічних навантажень на обладнання та збільшення терміну його експлуатації. Завдяки плавній зміні швидкості обертання вентилятора покращується якість регулювання та підвищується надійність функціонування аспіраційної системи в цілому.

Отже, одним із ключових контурів автоматичного керування процесом помелу є контур регулювання аспірації. Його робота базується на аналізі показників гранулометричного складу готового продукту, які використовуються для формування керуючих впливів на електропривод вентилятора аспіраційної системи.

Переміщення цементного матеріалу в аспіраційному тракті відбувається під дією різниці тисків між початковою та кінцевою ділянками системи. Саме перепад тиску створює необхідний повітряний потік, який забезпечує транспортування частинок матеріалу через технологічне обладнання.

Ефективність транспортування визначається співвідношенням між швидкістю повітряного потоку та швидкістю осідання частинок. Для забезпечення стабільного переміщення матеріалу швидкість потоку повинна перевищувати швидкість осадження частинок цементу. У протилежному випадку можливе накопичення матеріалу в повітропроводах та погіршення роботи аспіраційної системи.

Кількість транспортованого продукту залежить не лише від параметрів повітряного потоку, але й від фізичних характеристик матеріалу. Важливий вплив мають концентрація частинок у потоці, їх розміри та густина аеросуміші. Зміна зазначених параметрів впливає на продуктивність системи транспортування та ефективність роботи сепараційного обладнання, що необхідно враховувати під час побудови системи автоматичного керування процесом помелу цементних компонентів.

					БР.АКП-09.00.00.000 ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Динаміка потоку, що керується за допомогою напорного агрегату, визначається його енергетичними параметрами, тобто потужністю:

$$N_a = Q_a P_d. \quad (2.1)$$

де Q_a – витрати напірного агрегату;

P_d – тиск аспірації.

Ефективність роботи аспіраційного тракту характеризується енергоємністю. Цей показник можна оцінити відношенням:

$$E = \frac{E_c}{Q_m}. \quad (2.2)$$

де E – енергоємність системи аспірації;

E_c – енергія, що споживається системою;

Q_m – витрати на транспортування суміші.

Із залежності впливає основне завдання енергоефективного керування процесом аспірації. Зміна витрат повітряно-матеріальної суміші призводить до зміни аеродинамічного опору аспіраційного тракту, що вимагає відповідного коригування параметрів розрідження в системі. Саме перепад тиску забезпечує виникнення рушійної сили, необхідної для транспортування частинок цементу через аспіраційний тракт.

Керування величиною перепаду тиску дозволяє адаптувати режим роботи аспіраційної системи до поточних витрат матеріалу та характеристик продукту. Такий підхід забезпечує підтримання необхідного гранулометричного складу цементу та одночасно сприяє зменшенню енергетичних витрат. Завдяки оптимізації параметрів розрідження виключається необхідність використання надлишкової потужності вентиляційного обладнання для транспортування частинок матеріалу, що підвищує загальну ефективність процесу помелу.

					БР.АКП-09.00.00.000 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Функціональна схема, що реалізує канал керування аспіраційним трактом, зображена на рисунку нижче:

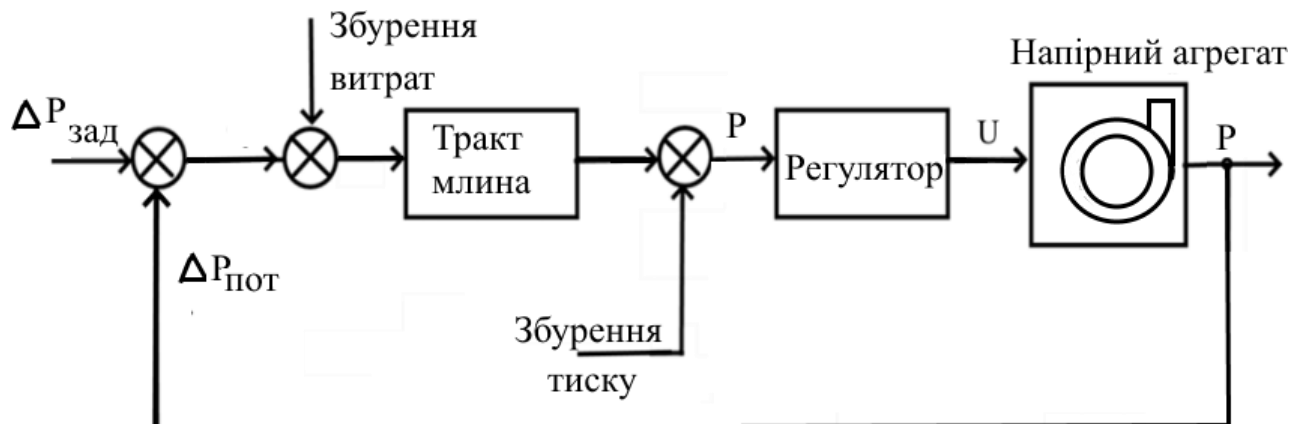


Рисунок 2.1 - Функціональна схема тракту аспірації

До складу системи входять регулятор, напірний агрегат та аспіраційний тракт. Під час функціонування системи виникають збурення, пов'язані зі зміною гранулометричного складу продукту та коливаннями тиску, які обумовлені зміною аеродинамічного опору тракту. Компенсація впливу цих збурень покладається на систему регулювання напірного агрегату, яка повинна забезпечувати стабільність параметрів технологічного процесу.

Основним регульованим параметром аспіраційного тракту є його навантаження. Система керування повинна підтримувати цей показник на максимально допустимому рівні, забезпечуючи ефективне транспортування матеріалу та стабільність роботи обладнання навіть за умови зміни зовнішніх впливів і технологічних режимів.

2.2 Ідентифікація параметрів об'єкту керування

2.2.1 Тракт аспірації

Відомі математичні моделі процесу помелу базуються переважно на рівняннях матеріального та енергетичного балансів. Основною метою такого моделювання є прогнозування гранулометричного складу готового продукту з урахуванням параметрів технологічного обладнання та режимів його роботи. Крім прогнозування характеристик продукції, моделювання дозволяє оцінювати

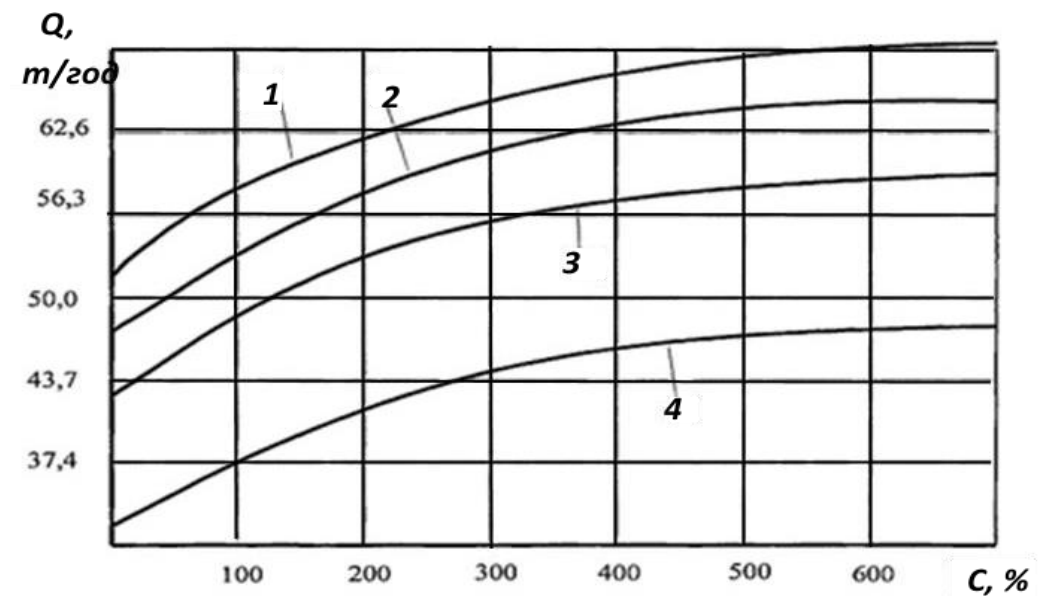
					БР.АКП-09.00.00.000 ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

можливості підвищення продуктивності обладнання та зниження питомих витрат енергії.

Незалежно від поставленої мети дослідження, побудова адекватної математичної моделі потребує визначення її параметрів та конструктивних характеристик. У більшості випадків такі параметри встановлюються на основі спеціально проведених експериментальних досліджень та подальшої обробки отриманих результатів.

Одним із поширених методів оцінювання ефективності процесу помелу є визначення питомої поверхні отриманого продукту за методом Блейна. У цьому випадку продуктивність помольного комплексу оцінюється за швидкістю утворення нової поверхні частинок матеріалу. Такий підхід дозволяє враховувати не лише кількість виробленого продукту, а й якість його подрібнення.

На рисунку 2.2 наведено залежність продуктивності кульового млина від величини циркуляційного навантаження для різних значень коефіцієнта заповнення млина мелючими тілами.



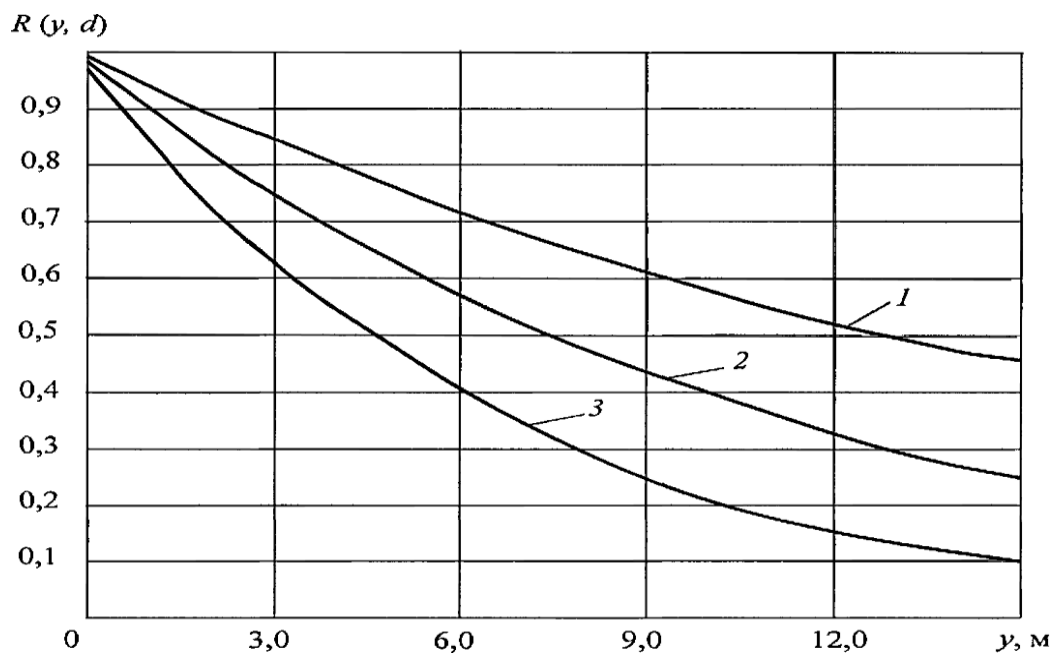
1 – $\mu = 0,33$; 2 – $\mu = 0,3$; 3 – $\mu = 0,25$; 4 – $\mu = 0,2$.

Рисунок 2.2 – Залежність продуктивності млина від циркуляційного навантаження при різних значеннях коефіцієнта заповнення

Аналіз наведених залежностей показує, що зі збільшенням циркуляційного навантаження продуктивність млина зростає, однак після досягнення певного значення цей приріст поступово зменшується. Найвищі показники продуктивності спостерігаються при максимальному допустимому завантаженні млина мелючими тілами, що відповідає коефіцієнту заповнення $\mu = 0,33$.

Для оцінювання впливу параметрів другого контуру керування на процес помелу використовується статистична обробка експериментальних даних. Отримані результати дозволяють аналізувати закономірності формування гранулометричного складу продукту та прогнозувати його зміну залежно від режимів роботи технологічного обладнання.

На рисунку 2.3 наведено приклад розподілу частинок різного розміру вздовж робочої довжини млина.



1 – $d = 20$ мкм; 2 – $d = 40$ мкм; 3 – $d = 80$ мкм.

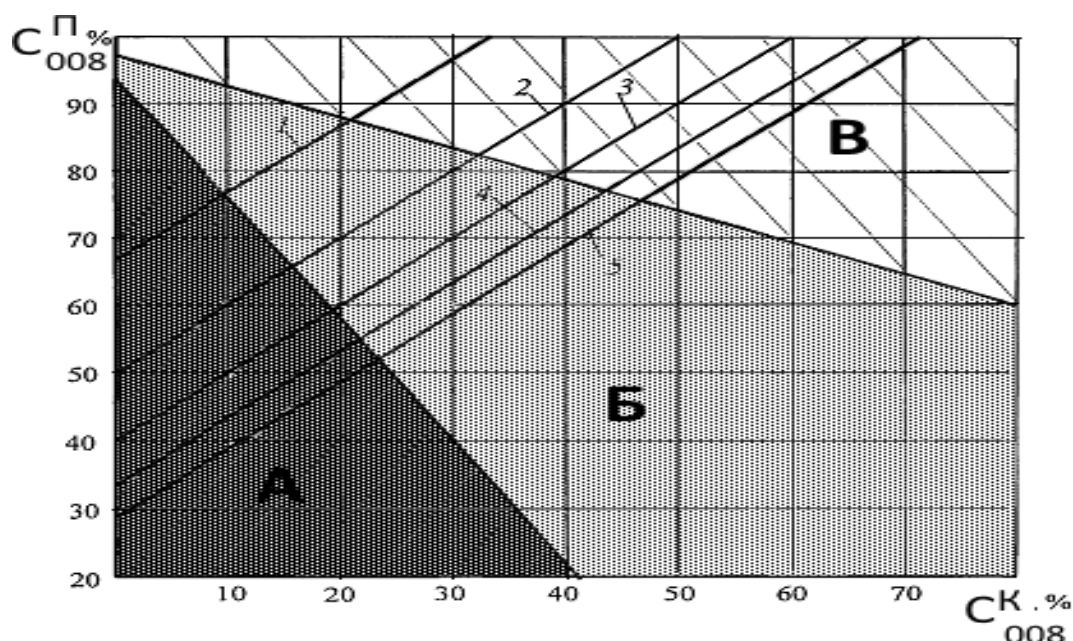
Рисунок 2.3 – Зміна дисперсного складу продукту вздовж довжини млина

Представлені залежності свідчать про поступове зменшення концентрації частинок великих фракцій у напрямку руху матеріалу через млин. Одночасно збільшується частка дрібнодисперсного продукту, що є наслідком безперервного

процесу подрібнення. Отримані результати підтверджують доцільність використання математичних моделей для прогнозування характеристик готової продукції та подальшої оптимізації режимів роботи системи керування.

Із розподілу $R(y, d)$ складових продукту за розмірами d витікає, що по мірі збільшення відстані y від точки вводу сировини у млин, кількість крупних частинок ($d = 80 \text{ мкм}$) зменшується більше, ніж дрібних. Як видно з графіків, вміст фракцій у готовому продукті відображується нелінійною функцією розподілу від розміру.

Для налаштувань регулятора гранулометричного складу продукту використовується характеристика відносного вмісту твердої фази. Цей вміст описується концентрацією зважених часток, кг/м^3 . Тонина помелу оцінюється з допомогою сита із сіткою № 008, клітинки якого мають діаметр $0,08 \text{ мм}$. Залежність початкової тонини $C_{008}^{\text{Поч}}$ від кінцевої $C_{008}^{\text{Кін}}$, що представлена на рисунку 2.4, показує вплив циркуляційного навантаження на зв'язок між розмірами частинок матеріалу на вході і виході кульового млина. Із залежності видно, при зростанні циркуляційного навантаження крупність продукту збільшується. При цьому зростання розміру спостерігається як на вході, так і на виході млина.



1 – 50 %; 2 – 100 %; 3 – 150 %; 4 – 200 %; 5 – 250 %.

Рисунок 2.4 – Залежність показників якості цементу від величини циркуляційного навантаження

Практична оцінка впливу параметрів млина та аспіраційної системи на ефективність процесу подрібнення здійснюється шляхом аналізу областей функціонування, представлених на рисунку 2.4. Робоче поле умовно поділяється на три характерні зони, кожна з яких відповідає певним режимам експлуатації обладнання.

Для області А характерна знижена ефективність процесу помелу. У цьому режимі значна кількість дрібних частинок поглинає енергію ударної взаємодії мелючих тіл, що призводить до зменшення інтенсивності подрібнення матеріалу. Для підвищення продуктивності системи в таких умовах необхідно збільшувати показник тонкості помелу шляхом оптимізації режиму роботи аспіраційної системи.

Область В відповідає найбільш поширеним режимам експлуатації обладнання замкнутого циклу подрібнення. У цьому діапазоні забезпечується стабільна робота технологічного комплексу та досягаються прийнятні показники продуктивності й якості готового продукту.

Найвища ефективність процесу досягається в області С. Робота в цьому режимі вимагає узгодженого налаштування параметрів регуляторів та стабілізації процесу видалення дрібнодисперсних фракцій матеріалу. Досягнення оптимального режиму аспірації дозволяє забезпечити максимальну продуктивність обладнання при дотриманні заданих вимог до гранулометричного складу цементу.

Таким чином, одним із ключових завдань системи автоматичного керування є узгодження режиму завантаження кульового млина з параметрами аспіраційного тракту. Реалізація такого підходу створює передумови для підвищення продуктивності процесу помелу, покращення якості продукції та зниження питомих витрат енергії.

					БР.АКП-09.00.00.000 ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.2.2 Канал керуванням рівнем завантаження млина

Для каналу керування рівнем завантаження млина співвідношення вхід / вихід буде мати вигляд:

$$\frac{dL}{dT} = Q_1 - Q_2. \quad (2.3)$$

де L – рівень завантаження в млина;

Q_1 – вхідна витрата сировини, яка характеризує потік сировини, що надходить до млина;

Q_2 – вихідна витрата продукту, що характеризує продуктивність мелення.

Якщо параметри процесу мелення мають сталий характер, то залежність вихідної витрати продукту мелення Q_2 оцінюється статичною функцією від рівня завантаження млина L :

$$Q_2 = f(L). \quad (2.4)$$

Відповідно до описання процесу мелення (розділ 1), ця функція має нелінійний екстремальний характер. Згаданий екстремум спостерігається при безперервному меленні продукту. Вихідний потік Q_2 на початку процесу мелення, по мірі завантаження млина сировиною зростає, а подальше завантаження млина призводить до зменшення вихідного потоку.

Дійсно, при умові відсутності завантаження млина ($L = 0$), вихідний потік $Q_2 = 0$. При зростанні L вихідний потік Q_2 , що характеризує продуктивність процесу мелення, буде зростати. Надмірне завантаження млина призводить до того, що процес подрібнення майже зупиняється, відповідно, значно зменшуються витрати потоку Q_2 млина.

Функція (2.3) має сенс тільки для врівноважених режимів. Для перехідних режимів, які супроводжують процеси регулювання, функція витрат Q_2 нелінійно залежить від рівня завантаження млина L .

Можливості стійкого регулювання процесом помелу залежать від того, як швидко величина Q_2 зможе повернутися до рівноважного стану, у разі виведення її з цього стану в результаті дії збурень процесу.

					БР.АКП-09.00.00.000 ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для оцінки перехідних режимів отримаємо передатну функцію об'єкту в результаті лінеаризації рівняння (2.3). Умовою лінеаризації функції завантаження є невеликі відхилення Q_2 (10%) від номінального режиму. Тоді лінеаризація здійснюється шляхом опису динаміки процесу у відхиленнях змінних від усталеного режиму.

Якщо номінальний режим мелення проходить при значенні завантаження млина L_0 , якому відповідають витрати входу Q_{10} та виходу Q_{20} , то відхилення від номінального режиму можна записати:

$$L^o = L - L_0, \quad Q_1^o = Q_1 - Q_{10}, \quad Q_2^o = Q_2 - Q_{20}. \quad (2.5)$$

Використовуючи ці позначення, співвідношення (2.3) прийме вигляд:

$$dL^o/dt = [Q_1 + Q_{10}] - [Q_2 + Q_{20}]. \quad (2.6)$$

Похідна dL^o/dt у рівнянні (2.3) нелінійно залежить від змінних L^o , Q_1^o та Q_2^o .

Запису (2.3) відповідає лінійне рівняння:

$$dL^o/dt = -L^o/T + K_1 * Q_1^o - K_2 Q_2^o. \quad (2.7)$$

У підсумку лінеаризоване диференціальне рівняння об'єкту керування має вигляд:

$$T_M \frac{dL}{dT} + L = K_1 Q_1 - K_2 Q_2. \quad (2.8)$$

Коефіцієнти рівняння знаходяться з умов функціонування об'єкту в номінальному режимі, для випадку, коли $dL^o/dt = 0$.

Операторна передатна функція, що відповідає рівнянню для керуючого і збурюючого впливів виглядає наступним чином:

$$W_{\text{ker}}(p) = \frac{L^o(p)}{Q_1^o(p)} = \frac{K_1}{T_m p + 1}, \quad (2.9)$$

$$W_{\text{zB}}(p) = \frac{L^o(p)}{Q_2^o(p)} = \frac{K_2}{T_m p + 1}. \quad (2.10)$$

					БР.АКП-09.00.00.000 ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Крім механічних процесів, що визначають динаміку процесу мелення, при побудові регулятора враховується транспортне запізнення переміщення продукту вздовж простору млина. Це запізнення з'являється тому, що матеріал, що надходить до млина, не відразу досягає виходу. Тому в передатній функції по каналу керування транспортне запізнення враховується множником $\exp(-\tau p)$, де τ - час затримки. Тоді передатна функції по каналу керування буде мати вигляд:

$$W_{\text{ker}}(p) = \frac{K_1}{T_m p + 1} * \exp(-\tau p). \quad (2.11)$$

Сталі часу передатної функції визначаються експериментально по перехідній функції об'єкту керування, яка зображена на рисунку 2.5.

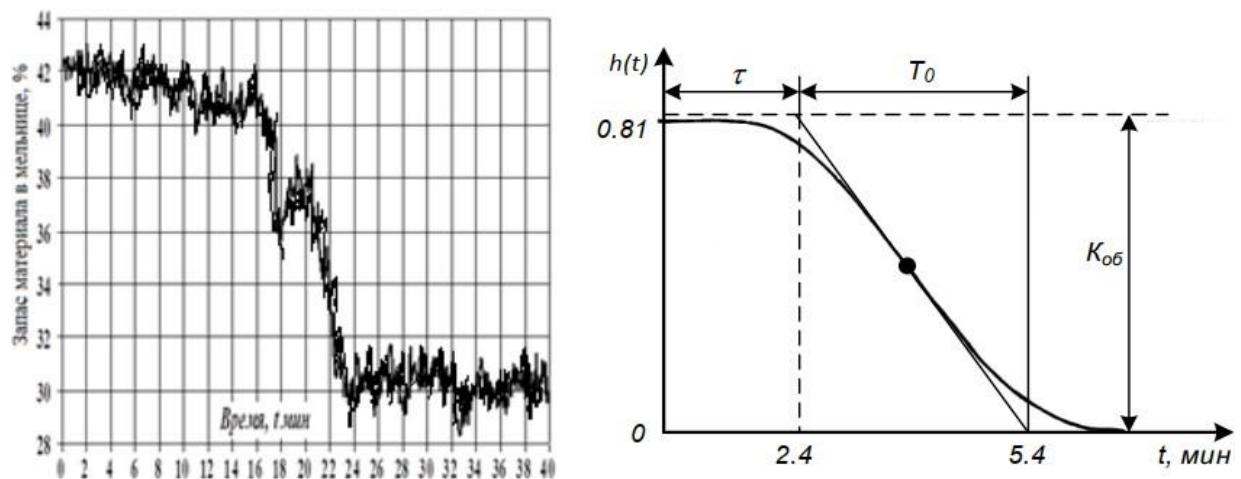


Рисунок 2.5 - Перехідна характеристика млина по каналу керування

Виконуючи графічні побудови, розраховуємо потрібні значення сталих процесу мелення:

- стала часу $T_M = 2,8 \text{ хв} = 168$.
- час запізнення $\tau = 2,4 \text{ хв} = 144$.
- коефіцієнт передачі $k = -0,81$

Таким чином передатна функції по каналу керування:

$$W_{\text{ker}}(p) = \frac{K_1}{168p + 1} * \exp(-144p). \quad (2.12)$$

Висновки до розділу

У другому розділі сформовано основні критерії керування процесом помелу цементних компонентів та визначено вимоги до системи автоматичного керування. Встановлено, що головними факторами, які впливають на ефективність процесу, є рівень завантаження млина, параметри аспірації та характеристики вихідної сировини. Проаналізовано існуючі методи контролю завантаження млина та показано переваги використання акустичних і вібраційних засобів контролю. Виконано ідентифікацію основних параметрів об'єкта керування та визначено взаємозв'язки між технологічними змінними процесу. Отримані результати створюють основу для побудови математичної моделі та подальшого синтезу ефективної системи оптимального керування.

					БР.АКП-09.00.00.000 ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3 РОЗРОБКА ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ ОБ'ЄКТУ

Відповідно до технологічної схеми процесу помелу цементу система автоматизованого керування може бути представлена у вигляді двох взаємопов'язаних підсистем: підсистеми регулювання рівня завантаження кульового млина та підсистеми керування процесом аспірації. Контроль основних параметрів процесу здійснюється за допомогою відповідних вимірювальних засобів, які забезпечують отримання інформації про поточний стан технологічного об'єкта.

Створення імітаційної моделі дає можливість формалізувати процес помелу цементу як об'єкт автоматичного керування та дослідити його поведінку за різних режимів роботи. Використання моделі дозволяє виконувати аналіз динамічних характеристик системи, здійснювати налаштування регуляторів і визначати оптимальні параметри функціонування обладнання без втручання у реальний технологічний процес.

Особливістю процесу помелу є його складність та наявність значної кількості факторів, що впливають на кінцевий результат. До основних факторів належать:

- технологічні обмеження, пов'язані з характеристиками сировини;
- наявність транспортних запізнень у тракті подачі та переробки матеріалу;
- необхідність статистичної обробки результатів вимірювань;
- нелінійний характер взаємозв'язків між параметрами технологічного процесу.

Головним завданням моделювання є встановлення залежностей між параметрами режиму роботи обладнання та показниками якості готового продукту. Для цього необхідно визначити найбільш значущі фактори впливу та оцінити їх роль у формуванні технологічних показників процесу. Такий підхід дозволяє спростити структуру моделі та забезпечити її придатність для подальшої реалізації у програмованих логічних контролерах.

					БР.АКП-09.00.00.000 ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У випадку орієнтації на техніко-економічні показники основним критерієм ефективності є досягнення максимальної продуктивності при мінімальному споживанні енергетичних ресурсів. Тому в моделі передбачено врахування показників енерговитрат та їх впливу на роботу обладнання. Якщо ж головною метою є забезпечення необхідної якості продукції, модель повинна відслідковувати зміни технологічних параметрів під дією керуючих впливів та зовнішніх збурень.

Оскільки оптимізація процесу помелу цементу передбачає одночасне досягнення високої якості продукції та підвищення енергоефективності виробництва, структура імітаційної моделі побудована на основі взаємодії двох контурів керування. Координацію їх роботи здійснює центральна керуюча система, яка формує сигнали керування для контуру аспірації та контуру регулювання рівня завантаження млина.

До складу моделі входять частотні перетворювачі, асинхронні електродвигуни, дозувальний конвеєр, відцентровий вентилятор, датчики контролю рівня завантаження та засоби оцінювання гранулометричного складу продукту. Сукупність зазначених елементів забезпечує відтворення основних закономірностей функціонування технологічного процесу та дозволяє проводити дослідження ефективності різних алгоритмів керування. Оскільки оптимізація процесу помелу цементу передбачає одночасне забезпечення необхідної якості продукції та підвищення енергоефективності виробництва, для дослідження системи було розроблено функціональну модель, представлену на рисунку 3.1.

					БР.АКП-09.00.00.000 ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

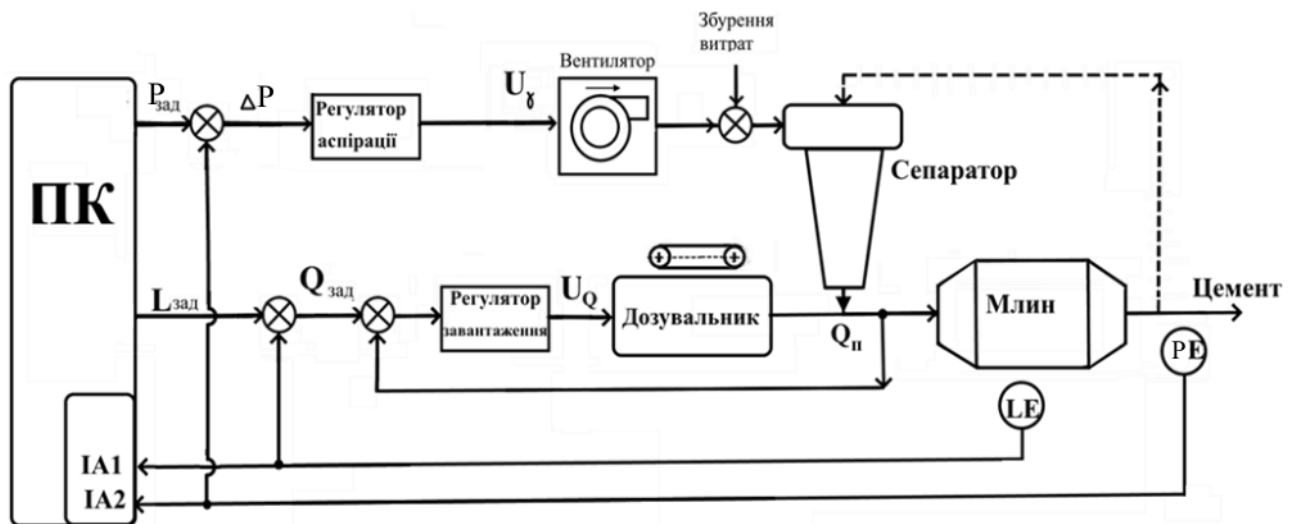


Рисунок 3.1 – Функціональна схема моделі системи

До системи входять наступні елементи: регулятори, що будуються на базі перетворювачів частоти (ПЧ) та асинхронних двигунів(АД), напірний агрегат(відцентровий вентилятор), дозуючий конвеєр, давач рівня завантаження млина та пристрій для оцінки гранулометричного складу продукту.

3.1 Моделювання керування рівнем завантаження млина

Проектування контуру автоматичного керування рівнем завантаження кульового млина ґрунтується на математичному описі його основних складових. Структура контуру регулювання, наведена на рисунку 3.1, реалізує керування витратами сировини та продуктивністю процесу подрібнення. До складу системи входять частотний перетворювач, електропривод дозувального конвеєра, давач контролю завантаження млина та обчислювальні засоби формування керуючих впливів.

Для забезпечення необхідної якості регулювання в системі використовується ПІД-регулятор. На етапі розроблення імітаційної моделі його коефіцієнт передачі приймається рівним одиниці, що дозволяє дослідити динамічні властивості об'єкта без додаткового впливу параметрів налаштування регулятора.

Центральним елементом контуру керування виступає кульовий млин, який розглядається як основний об'єкт автоматичного керування. Його динамічні

характеристики визначаються отриманою в попередньому розділі математичною моделлю. Вхідною координатою об'єкта є витрати сировини, що подається на подрібнення, а вихідною — рівень завантаження млина L. Водночас значення цього параметра залежить не лише від вхідного потоку матеріалу, а й від інтенсивності вивантаження готового продукту.

Інші складові системи, зокрема частотно-керований асинхронний електропривод та дозувальний механізм, можуть бути представлені у вигляді аперіодичних ланок першого порядку. Значення коефіцієнтів передачі та сталих часу визначаються за результатами ідентифікації об'єкта та використовуються під час побудови імітаційної моделі.

Для дослідження роботи контуру регулювання була розроблена модель у середовищі MATLAB Simulink, схема якої наведена на рисунку 3.2.

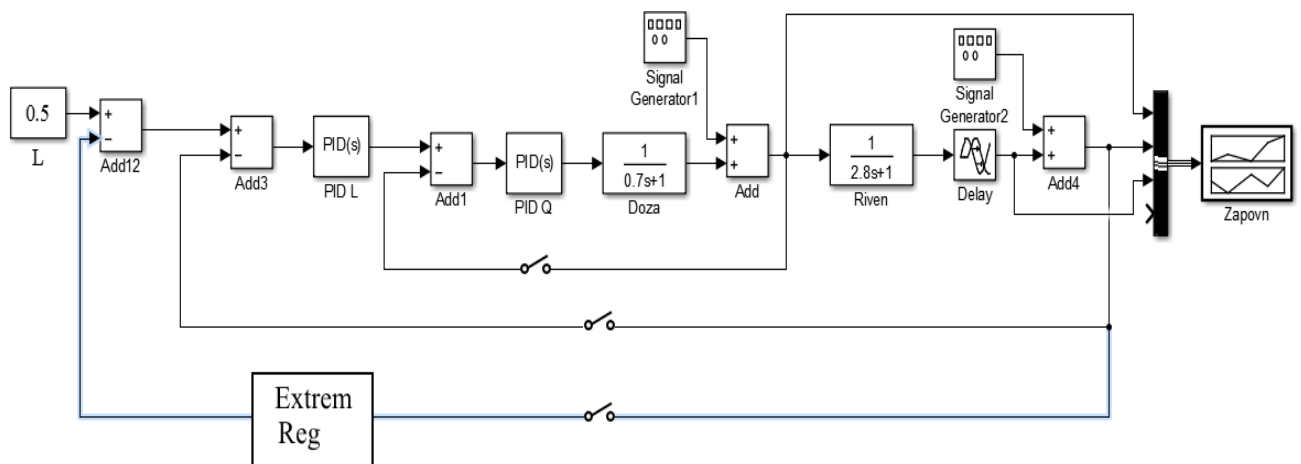


Рисунок 3.2 – Схема моделі системи в середовищі MATLAB Simulink

Особливістю розробленої моделі є можливість підтримання заданого рівня завантаження млина за умов зміни параметрів технологічного процесу та дії зовнішніх збурень. Для відтворення реальних умов експлуатації до структури моделі введені спеціальні блоки формування випадкових і детермінованих збурень, які впливають на параметри подачі сировини та характеристики об'єкта керування.

Як видно зі схеми, модель містить три взаємопов'язані контури регулювання. Перший, внутрішній контур, забезпечує стабілізацію витрат сировини, що подається до млина. Другий контур здійснює регулювання рівня завантаження

шляхом зміни продуктивності дозувального обладнання. Третій контур реалізує алгоритм оптимізації режиму роботи системи та забезпечує підтримання технологічних параметрів у зоні максимальної ефективності процесу помелу.

Для визначення параметрів регулятора необхідно отримати перехідну характеристику об'єкта керування в розімкненому контурі. У процесі моделювання приймається, що заданим значенням рівня завантаження млина є $L=40\%$.

Результати моделювання перехідного процесу наведено на рисунку 3.3.(див. додаток А1). На осцилограмах відображено зміну витрат матеріалу та рівня завантаження млина в часі після подачі керуючого впливу. Осцилограма витрат (Q) та рівня (L) розімкнутої системи керування.

Аналіз отриманих характеристик показує, що процес завантаження млина має виражені інерційні властивості. Після зміни витрат сировини рівень завантаження досягає нового усталеного значення із певним часовим запізненням, що обумовлено особливостями технологічного процесу та транспортними затримками в системі.

Налаштування регулятора доцільно розпочинати з внутрішнього контуру регулювання витрат сировини. Після замикання контуру негативного зворотного зв'язку за витратами формується нова перехідна характеристика, яка використовується для визначення параметрів ПД-регулятора.

Основними вимогами до налаштування є забезпечення мінімального часу перехідного процесу та обмеження величини перерегулювання. У даній роботі приймається, що допустиме значення перерегулювання не повинно перевищувати 20 %. Підбір параметрів регулятора виконується із застосуванням стандартних інструментів MATLAB Control System Designer. Результати автоматичного налаштування наведено на рисунку 3.4. (див. додаток А2). Як видно із панелі налаштувань, оптимальними параметрами ПД регулятора є: $P=17,5$; $I=80,5$.

Отримані параметри забезпечують необхідну швидкодію системи та задовільну якість регулювання в досліджуваному діапазоні режимів роботи.

Для перевірки ефективності налаштування проведено моделювання роботи системи з використанням отриманих параметрів регулятора.

					БР.АКП-09.00.00.000 ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Порівняння результатів моделювання для системи без регулятора та системи з налаштованим ПІД-регулятором наведено на рисунку 3.5. (див. додаток Б1). Осцилограма параметрів процесу: без регулятора (1) та з налаштованим регулятором (2).

Як видно з отриманих характеристик, використання ПІД-регулятора дозволяє суттєво покращити якість керування. Після налаштування зменшується тривалість перехідного процесу, підвищується швидкодія системи та забезпечується більш швидке досягнення заданого рівня завантаження млина. При цьому система зберігає стійкість та не демонструє надмірного перерегулювання.

Для додаткової перевірки працездатності розробленого контуру керування виконується моделювання за наявності зовнішніх збурень, які імітують зміну характеристик сировини та умов роботи технологічного обладнання. Отримані результати дозволяють оцінити здатність системи підтримувати заданий рівень завантаження млина в умовах дії випадкових збурюючих факторів.

Для перевірки працездатності системи керування було проведено моделювання в умовах дії зовнішніх збурень. Імітація збурень здійснюється за допомогою спеціального генератора сигналів типу Step, який відтворює зміни характеристик технологічного процесу під час роботи млина.

Результати дослідження наведено на рисунку 3.6. Отримані осцилограми демонструють реакцію системи на зміну параметрів процесу та дозволяють оцінити ефективність налаштованого регулятора в умовах дії збурюючих факторів.

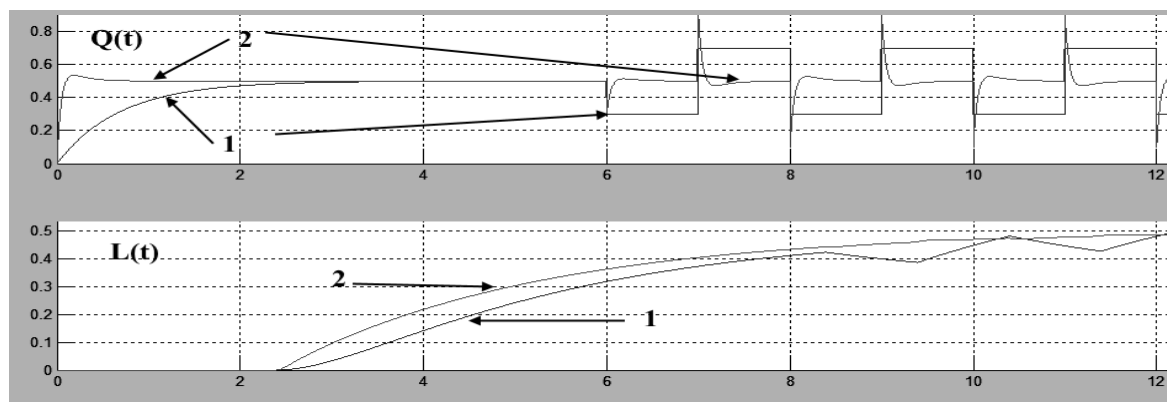


Рисунок 3.6 – Осцилограми параметрів процесу в умовах дії збурень

Аналіз отриманих результатів показує, що регулятор забезпечує підтримання заданого рівня завантаження млина навіть за наявності змін технологічних параметрів. Після виникнення збурення система повертається до усталеного режиму без втрати стійкості та зі збереженням прийнятних показників якості регулювання.

Наступним етапом дослідження є налаштування зовнішнього контуру керування рівнем завантаження млина. Після замикання другого контуру зворотного зв'язку здійснюється підбір параметрів ПД-регулятора з урахуванням динамічних властивостей об'єкта та вимог до якості перехідного процесу.

Результати налаштування наведені на рисунку 3.7. Отримані характеристики свідчать про покращення швидкодії системи, проте одночасно спостерігається поява коливальних процесів, характерних для об'єктів із суттєвою інерційністю та транспортним запізненням.

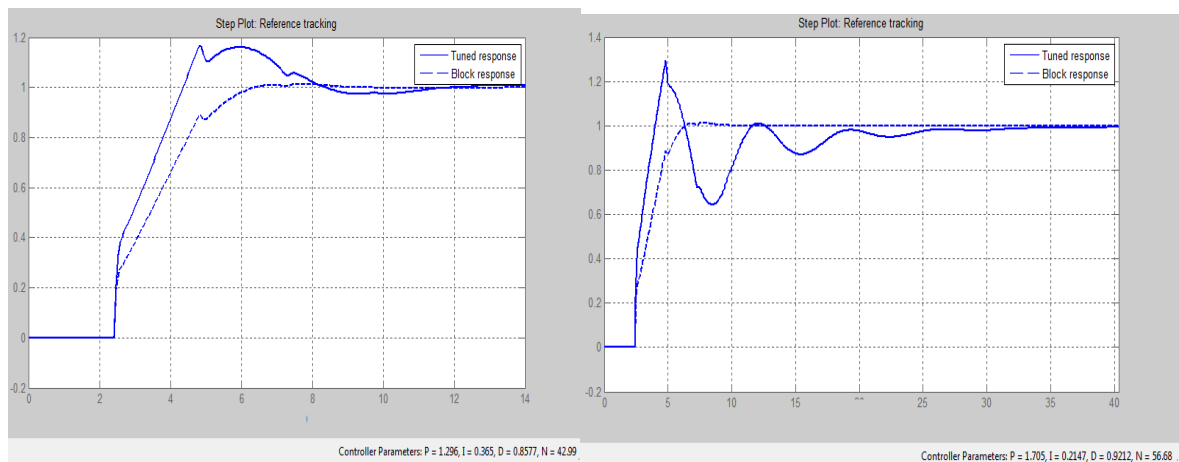
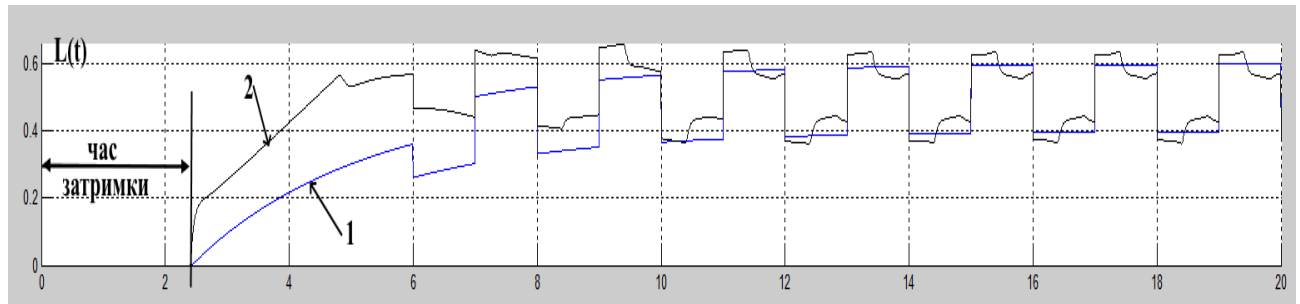


Рисунок 3.7 – Результати налаштування параметрів регулятора в MATLAB

У процесі дослідження було встановлено, що подальше збільшення коефіцієнтів регулятора призводить до зменшення запасу стійкості та може викликати виникнення нестійких режимів роботи. Тому вибір параметрів регулятора здійснюється як компроміс між швидкістю системи та її стійкістю.

					БР.АКП-09.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

Для оцінки ефективності роботи зовнішнього контуру було проведено додаткове моделювання при дії збурень. Відповідні результати наведено на рисунку 3.8.



1 – без регулятора; 2 – з налаштованим регулятором.

Рисунок 3.8 – Осцилограми процесу при дії збурень

Отримані результати показують, що використання традиційного ПД-регулятора забезпечує задовільну якість регулювання лише на окремих ділянках технологічного процесу. Для об'єктів із великими транспортними запізненнями та нелінійними характеристиками ефективність такого підходу обмежується, що обумовлює необхідність застосування більш сучасних методів керування. Одним із перспективних способів підвищення ефективності регулювання є використання екстремальних регуляторів. На відміну від класичних ПД-регуляторів, такі системи не підтримують фіксоване значення регульованої величини, а здійснюють пошук режиму роботи, що відповідає максимуму або мінімуму заданого критерію оптимальності.

У даній роботі екстремальний регулятор використовується для підтримання оптимального рівня завантаження млина, який забезпечує максимальну продуктивність процесу при мінімальних питомих витратах енергії. Основою його роботи є використання нелінійної залежності продуктивності млина від ступеня завантаження.

Передатна характеристика продуктивності може бути представлена у вигляді:

$$P(L) = 9,5 \cdot L^3 - 15,2 \cdot L^2 + 7 \cdot L + 0,001. \quad (3.1)$$

Для реалізації алгоритму екстремального керування використовується залежність продуктивності млина від рівня його завантаження. Отримана функція має виражений максимум, який відповідає оптимальному режиму роботи технологічного обладнання. Саме в цій точці досягається найвища продуктивність процесу помелу при заданих умовах експлуатації.

Графічне представлення залежності продуктивності від рівня завантаження наведено на рисунку 3.9

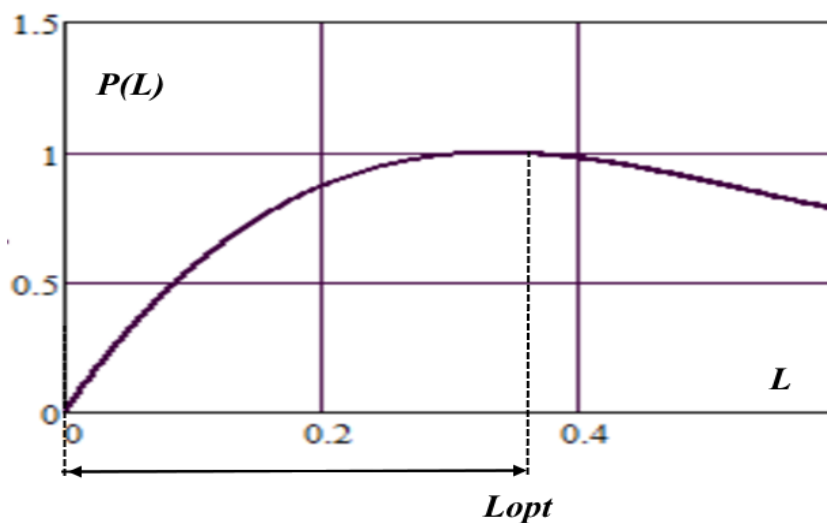


Рисунок 3.9 – Залежність продуктивності млина від рівня його завантаження

Як видно з наведеної характеристики, функція продуктивності має екстремальний характер. Для досліджуваного об'єкта максимальна продуктивність досягається при значенні завантаження млина близько 38 %. Отримана залежність сформована шляхом апроксимації експериментальних даних, отриманих під час дослідження процесу помелу цементних компонентів.

На практиці існує декілька способів реалізації екстремальних систем керування. Найбільш поширеними є методи, засновані на аналізі похідної цільової функції, покрокових алгоритмах пошуку оптимуму, методах фіксації екстремуму та використанні періодичних пошукових сигналів.

У даній роботі розглядається схема екстремального регулятора, яка базується на використанні похідної функції продуктивності. Структурна схема такого регулятора наведена на рисунку 3.10.

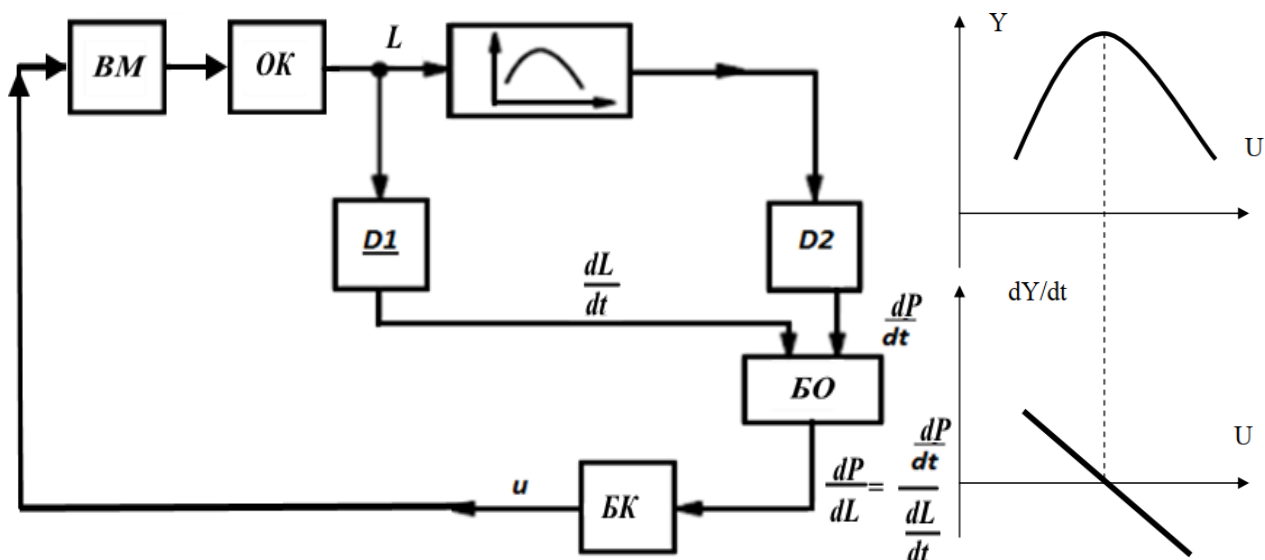


Рисунок 3.10 – Структурна схема екстремального регулятора та принцип визначення точки оптимуму

Принцип роботи системи ґрунтується на властивостях функції продуктивності в околі точки максимуму. Відомо, що при досягненні екстремуму значення похідної функції дорівнює нулю. Таким чином, умова досягнення оптимального режиму може бути записана у вигляді:

$$\frac{dP}{dL} = 0 \quad (3.2)$$

де:

P — продуктивність процесу помелу;

L — рівень завантаження кульового млина.

Для визначення напрямку пошуку оптимального режиму використовуються значення похідних вхідного та вихідного параметрів системи. Відповідні сигнали надходять до блока обробки інформації, де формується керуючий вплив для виконавчого механізму системи дозування.

У процесі функціонування регулятор безперервно аналізує зміну продуктивності та коригує рівень завантаження млина таким чином, щоб підтримувати робочу точку системи поблизу області максимальної ефективності.

Такий підхід дозволяє автоматично компенсувати вплив зміни властивостей сировини та інших зовнішніх факторів.

На відміну від традиційних систем автоматичного регулювання, екстремальний регулятор не підтримує жорстко задане значення параметра. Його основним завданням є забезпечення роботи об'єкта в області оптимуму. При відсутності зовнішніх збурень система перебуває у стані рівноваги, а виникнення збурень ініціює процес повторного пошуку оптимальної точки.

Важливою особливістю розглянутої структури є використання позитивного зворотного зв'язку в контурі корекції. На відміну від класичних систем автоматичного керування, де переважно застосовується негативний зворотний зв'язок, екстремальне керування потребує спеціального налаштування коефіцієнтів підсилення для забезпечення стійкої роботи системи в області максимуму продуктивності.

Значення коефіцієнтів корекції вибираються таким чином, щоб забезпечити стійкість процесу пошуку оптимуму та виключити виникнення автоколивань. За правильного налаштування система автоматично підтримує режим максимальної продуктивності та забезпечує ефективне використання енергетичних ресурсів технологічного комплексу.

З урахуванням особливостей процесу помелу та результатів попереднього аналізу було розроблено імітаційну модель системи екстремального керування. Побудована структура дозволяє автоматично підтримувати оптимальний режим роботи млина шляхом безперервного пошуку точки максимальної продуктивності. Схема реалізації моделі в середовищі MATLAB Simulink наведена на рисунку 3.11.

					БР.АКП-09.00.00.000 ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

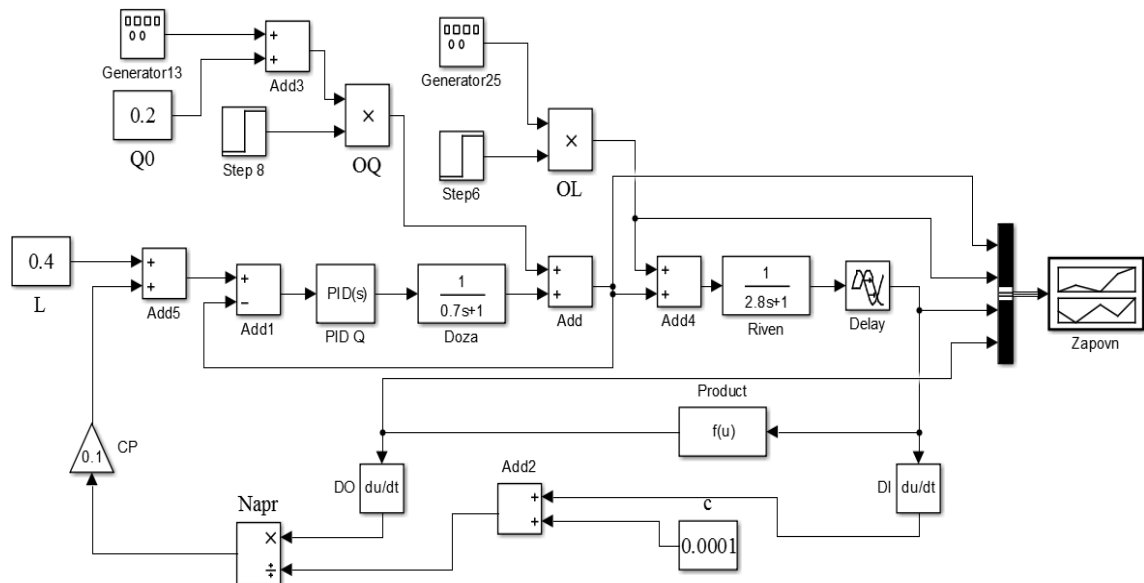


Рисунок 3.11 – Схема моделювання системи керування процесом помелу

Випробування регулятора із використанням імітаційного моделювання, дало змогу відмовитись від зовнішнього контуру регулятора по завантаженню млина, який використовувався в схемі моделі. Таке рішення прийнято внаслідок більш ефективної роботи (зменшення рівня вихідних збурень) екстремального регулятора та погіршення стійкості регулювання процесу при наявності в загального контуру PID-регулятора завантаження.

Осцилограми, що підтверджують якість регулювання продуктивності млина та мінімізації збурень параметрів процесу, показані на рисунку 3.12. (див. додаток Б2). В процесі виходу процесу на номінальний режим по утриманню заданого рівня завантаження млина (40%) оцінюється рівень його продуктивності. Ця продуктивність, навіть при вивантаженні продукту (зміна величини витрат Q) та зміні рівня завантаження при надходженні сировини на помел (зміна рівня L) утримується на максимальному значенні:

- $Q(t)$ – зміни витрат сировини в умовах дії збурень;
- $\Delta Q(t)$ – збурення витрат сировини;
- $L(t)$ – зміни рівня завантаження млина в умовах дії збурень;
- $P(t)$ – зміни продуктивності при завантаженні млина.

3.2 Моделювання керування аспірацією

Якість роботи аспіраційної системи безпосередньо залежить від співвідношення між швидкістю осідання частинок матеріалу та швидкістю їх транспортування повітряним потоком. Тому основним завданням системи керування аспірацією є підтримання необхідного перепаду тиску в аспіраційному тракті. Під час роботи установки необхідно враховувати зміну аеродинамічного опору системи, яка виникає внаслідок коливань рівня завантаження млина та зміни характеристик сировини.

Перепад тиску в аспіраційному тракті визначає швидкість руху повітряно-пилової суміші та, відповідно, витрати потоку через систему. Витрати суміші можуть бути визначені за залежністю:

$$Q_p = 0,65 \times S \times \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}} \quad (3.3)$$

де S – переріз тракту;

ΔP – перепад тиску;

ρ – щільність повітряної суміші.

Тому завдання значення величини стабілізації тиску розраховується, виходячи із врахування взаємодії контурів системи керування.

Відповідно до функціональної схеми об'єкта керування (рисунок 2.3), основною регульованою величиною в аспіраційному контурі є перепад тиску, який забезпечує переміщення частинок матеріалу повітряним потоком. Керуючий вплив формується шляхом зміни частоти обертання електродвигуна вентилятора, від якої залежать витрати повітряної суміші в аспіраційному тракті. Контроль витрат повітря необхідний для забезпечення ефективного осадження частинок цементу в сепараторі та підтримання стабільної роботи системи.

Забезпечення необхідного режиму аспірації досягається шляхом врахування аеродинамічного опору млина та елементів фільтраційної системи. Незважаючи на те, що величина аеродинамічного опору визначається конструктивними параметрами обладнання, зокрема площею поперечного перерізу тракту (S), у

					БР.АКП-09.00.00.000 ПЗ	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

процесі експлуатації вона не є сталою величиною.

Зміна аеродинамічного опору відбувається під впливом коливань характеристик сировини, зміни продуктивності млина та перехідних процесів, що виникають під час регулювання помелу. Оскільки аеродинамічний опір безпосередньо пов'язаний із втратами тиску в системі, його доцільно оцінювати через величину перепаду тиску в аспіраційному тракті.

Саме тому в імітаційній моделі процесу аспірації, представлений на рисунку 3.13, зміна аеродинамічного опору відтворюється за допомогою генератора збурень та блоку підсумовування. Такий підхід дозволяє моделювати вплив зовнішніх факторів на роботу аспіраційної системи та оцінювати ефективність запропонованих алгоритмів автоматичного керування.

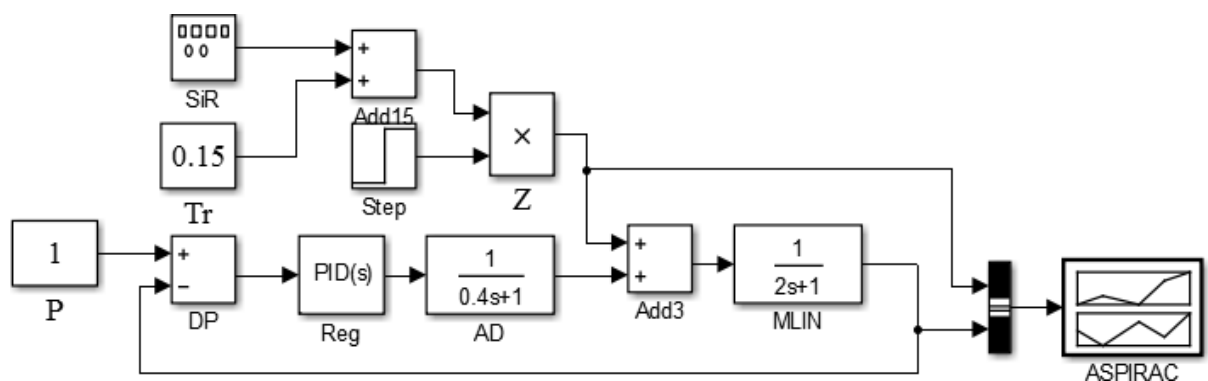


Рисунок 3.13 – Схема моделювання процесу аспірації

Окрім PID-регулятора, який забезпечує підтримання необхідного перепаду тиску, до складу імітаційної моделі входять блок електропривода вентилятора (AD) та блок аспіраційного тракту (MLIN). Зазначені елементи відтворюють динамічні властивості виконавчого механізму та процесів транспортування повітряно-пилової суміші в реальній системі.

Основною метою моделювання контуру аспірації є дослідження можливостей стабілізації перепаду тиску та зменшення його коливань за умов зміни аеродинамічного опору млина. Реалізація такого завдання дозволяє забезпечити стабільну роботу сепаратора, підтримати необхідний гранулометричний склад продукту та підвищити енергоефективність процесу помелу.

					БР.АКП-09.00.00.000 ПЗ	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Подібно до контуру керування завантаженням млина, аспіраційний канал характеризується наявністю інерційності та транспортних запізнень. Для побудови адекватної математичної моделі необхідно враховувати електромеханічні сталі часу окремих елементів системи. Значення сталої часу асинхронного електродвигуна та частотного перетворювача визначаються за технічною документацією і довідковими даними. Параметри аспіраційного тракту встановлюються на основі аналізу експериментальної перехідної характеристики, отриманої під час дослідження пілотної установки.

Для визначення динамічних властивостей каналу аспірації виконується моделювання системи з розімкненим контуром зворотного зв'язку та відсутністю зовнішніх збурень. У результаті отримується перехідна характеристика об'єкта, яка дозволяє оцінити його інерційність, величину запізнення та подальше використовується для налаштування параметрів регулятора. Отриманий графік перехідного процесу наведено на рисунку 3.14.

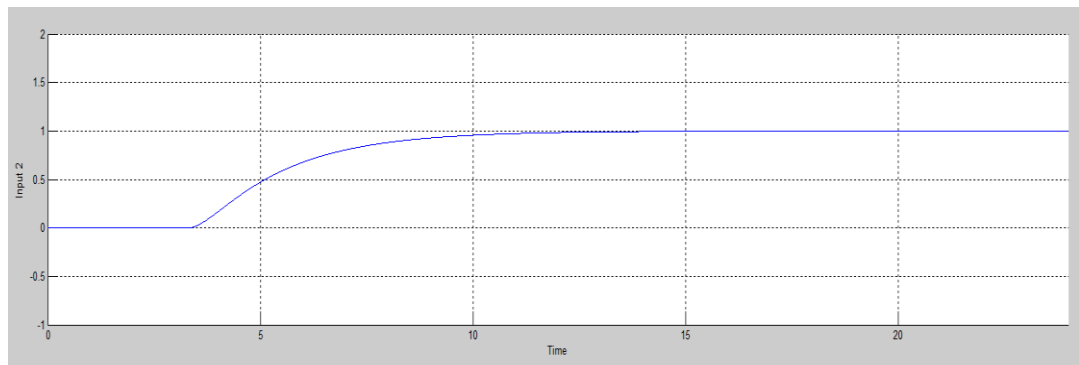


Рисунок 3.14 - Графік перехідної функції каналу аспірації

При замиканні від'ємного зворотнього зв'язку, але відсутньому PID-регуляторі, перехідна функція каналу аспірації набула коливального характеру (рисунку 3.15), що свідчить про критичний стан стійкості регулятора. При цьому також збільшився час перехідного процесу.

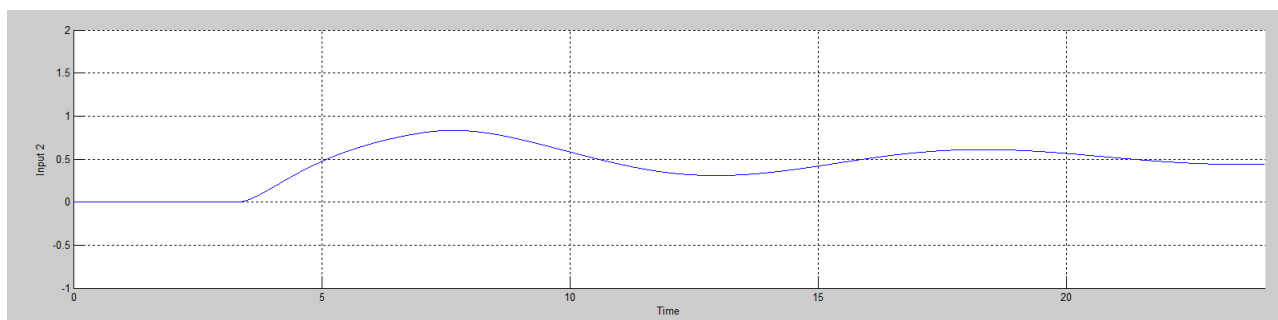


Рисунок 3.15 - Графік перехідної функції із замкненим контуром

Для налаштування PID-регулятора контуру керування аспірацією було використано стандартні засоби пакета MATLAB. У результаті отримано перехідні характеристики системи для неналаштованого та налаштованого регулятора, які наведені на рисунку 3.16, а.

Початкові параметри, запропоновані MATLAB, забезпечують стійку роботу системи, однак не повністю задовольняють вимоги щодо швидкодії процесу регулювання. Тому додатково було виконано оптимізацію перехідної характеристики за критерієм мінімального часу регулювання.

Результат оптимізованого налаштування показано на рисунку 3.16, б. Із графіка видно, що скорочення часу перехідного процесу супроводжується збільшенням величини перерегулювання. У даному випадку перерегулювання досягає приблизно 18 %, що наближається до допустимого граничного значення. Це свідчить про необхідність вибору компромісних параметрів регулятора, які забезпечують достатню швидкодію системи без втрати стійкості та без надмірних коливань тиску в аспіраційному тракті.

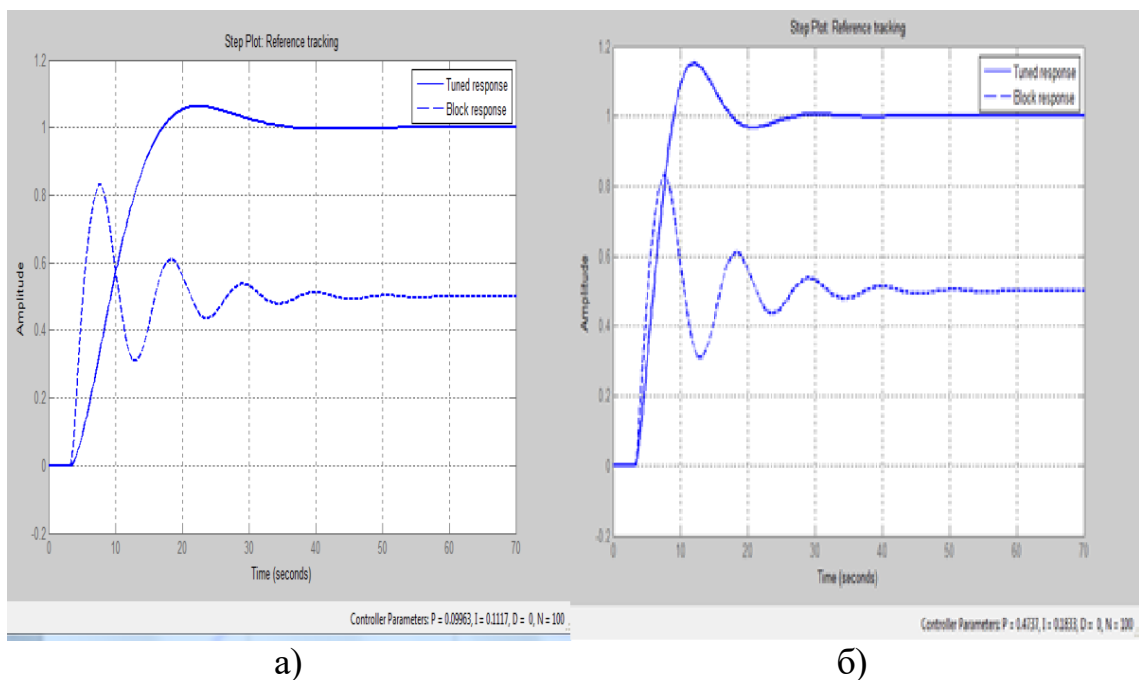


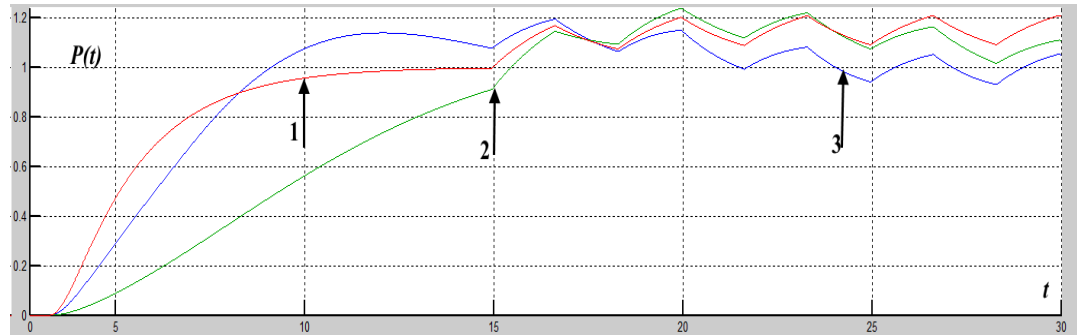
Рисунок 3.16 - Результат налаштувань параметрів PID-регулятора

Для оцінювання ефективності роботи регулятора аспіраційного тракту було проведено дослідження системи в умовах дії зовнішніх збурень. З цією метою до схеми моделювання, наведеної на рисунку 3.13, було підключено генератор збурюючих впливів, які вводяться в систему після завершення перехідного процесу та виходу об'єкта на усталений режим роботи.

Під час моделювання використовувалися параметри PID-регулятора, отримані на етапі його налаштування та оптимізації. Такий підхід дозволяє оцінити здатність системи підтримувати заданий перепад тиску в аспіраційному тракті за умов зміни аеродинамічного опору та інших зовнішніх впливів.

Результати проведених досліджень наведені на рисунку 3.17. Отримані осцилограми дають можливість проаналізувати характер зміни регульованих параметрів після появи збурень, оцінити швидкість компенсації їхнього впливу та визначити запас стійкості системи. Аналіз результатів моделювання показує, що після виникнення збурення регулятор забезпечує відновлення заданого режиму роботи за обмежений проміжок часу. При цьому коливання перепаду тиску залишаються в допустимих межах, а система зберігає стійкість протягом усього

процесу моделювання. Це свідчить про достатню ефективність обраних параметрів налаштування та можливість використання розробленого регулятора для керування процесом аспірації в умовах змінних технологічних режимів.



1 – відключений регулятор; 2 – налаштування за критеріями MatLab (рис. 3.16а);

3 – налаштування за виглядом перехідної характеристики(рис. 3.16б).

Рисунок 3.17 - Стабілізація збурень контуру регулювання аспірацією

Аналіз результатів моделювання процесу стабілізації тиску, наведених на рисунку 3.17, показує, що налаштування PID-регулятора за критеріями мінімального часу перехідного процесу та допустимого перерегулювання забезпечують кращу компенсацію зовнішніх збурень порівняно з параметрами, отриманими за методом Зіглера–Нікольса.

Разом із тим ефективність класичного PID-регулятора для даного об'єкта обмежується значною інерційністю аспіраційного тракту та великими сталими часу його елементів. Спроби підвищити швидкодію шляхом збільшення коефіцієнта підсилення призводять до зниження запасу стійкості та появи коливань у системі.

Одним із перспективних напрямів удосконалення контуру аспірації може бути використання екстремального регулятора. Проте для його впровадження необхідно провести додаткові дослідження та визначити оптимальні режими роботи системи.

Висновки до розділу

У третьому розділі розроблено імітаційну модель процесу помелу цементних компонентів у середовищі MATLAB та проведено дослідження роботи системи керування. Виконано моделювання контуру керування рівнем завантаження млина та оцінено його динамічні характеристики за різних режимів роботи. Також досліджено роботу системи аспірації та її вплив на якість помелу й енергетичні показники процесу. Результати моделювання підтвердили можливість стабілізації основних технологічних параметрів та забезпечення необхідної якості готового продукту. Отримані характеристики системи стали основою для вибору структури оптимального керування процесом помелу.

					БР.АКП-09.00.00.000 ПЗ	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4 ПОБУДОВА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ПОМЕЛУ

Для практичної реалізації системи керування процесом помелу цементних компонентів використовується SCADA-система. Такі системи автоматизації будуються на базі сучасних мікропроцесорних засобів і забезпечують необхідні можливості для збору, обробки та візуалізації технологічної інформації, а також реалізації алгоритмів автоматичного керування.

До складу системи керування входять такі підсистеми:

- підсистема керування швидкістю обертання кульового млина;
- підсистема керування ваговими дозаторами;
- підсистема керування процесом аспірації.

Для виробництв із високою продуктивністю додатково використовується верхній рівень керування, який забезпечує моніторинг технологічного обладнання, архівування даних та контроль режимів роботи виробничого комплексу.

На попередніх етапах проектування було обґрунтовано вибір технічних засобів автоматизації та програмованого логічного контролера. Для реалізації системи керування обрано програмований логічний контролер МІК-52 виробництва компанії «Мікрол». Даний контролер забезпечує необхідну кількість аналогових і дискретних входів та виходів, підтримує сучасні промислові протоколи обміну даними і може використовуватися для побудови багаторівневих систем автоматизації технологічних процесів.

					БР.АКП-09.00.00.000 ПЗ	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

На рисунку 4.1 наведено функціональну структуру контролера МІК-52, яка демонструє його архітектуру, склад модулів та можливості інтеграції із засобами польового рівня і SCADA-системою. Технічні характеристики контролера МІК-52 наведені в таблиці 4.1.

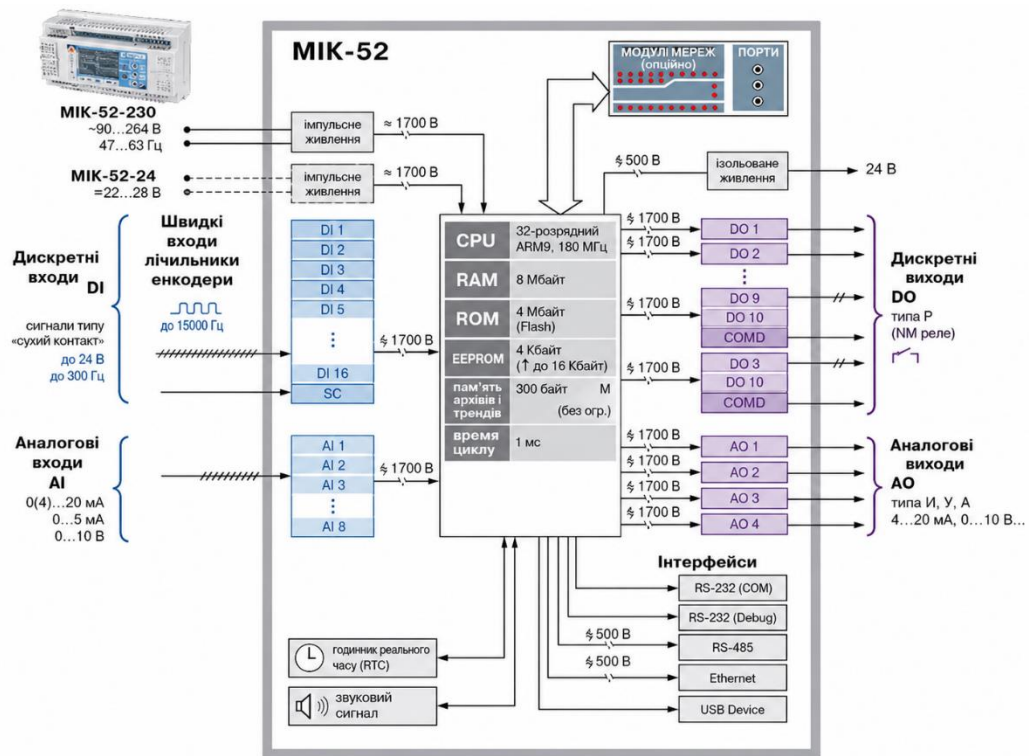


Рисунок 4.1 - Функціональна схема МІКРОЛ МІК-52

Таблиця 4.1 – Характеристики МІКРОЛ МІК-52

Параметр	Значення
Напруга живлення, В: МІК-52-24-Х-Х МІК-52-220-Х-Х	від 22 до 28 постійного струму (ном 24 В) від 90 до 264 змінного струму частотою від 47 до 63 Гц
Спож потужність, ВА, не більше	40
Цифрові (дискретні) входи	
Кількість входів з них швидкодіючих	16 4 (DI1-DI4)
Напруга живлення дискретних входів, В	24 ± 3
Максимальний вхідний струм дискретного входу	не більше 7 мА при живленні 24 В, не більше 8,5 мА при живленні 27 В
Дискретні виходи (контакти електромагнітних реле)	
Кількість релейних вихідних каналів	12
Гальванічна розв'язка	індивідуальна (для DO1-DO8), групова (DO9-DO10) і групова (DO11-DO12)
Електрична міцність ізоляції між групами дискретних виходів і групами інших ланцюгів, В	1 780
Максимальний струм, комутований контактами реле, А, не більше	3 (для змінної напруги не більше 250 В, частотою 50 Гц)
Час перемикання контактів реле зі стану «лог. 0 »в«лог. 1 »і назад, мс, не більше	50 (виходи DO1-DO12)
Аналогові виходи	
Кількість аналогових виходів	4
Тип вихідного сигналу Універсальний	від 4 до 20 мА, Розрядність ЦАП (біт) 12 від 0 до 10 В Розрядність ЦАП (біт) 10
Межа основної зведеної похибки ЦАП	$\pm 0,5\%$
Мінімальний період оновлення виходів	100 мс
Живлення аналогових виходів	зовнішнє (24 ± 3 В)
Гальванічна ізоляція аналогових виходів	індивідуальна
Електрична міцність ізоляції між групами аналогових виходів і групами інших ланцюгів, В	1 780

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

БР.АКП-09.00.00.000 ПЗ

Арк.

61

Вибір даного програмованого логічного контролера передбачає використання спеціалізованого програмного забезпечення для налаштування та організації обміну даними між контролером і первинними перетворювачами різних типів. Після запуску та конфігурування програмного комплексу на робочій станції оператора формується головне вікно системи, яке забезпечує відображення мнемосхеми технологічного процесу та контроль його основних параметрів.

Для створення схеми автоматизації необхідно задати такі параметри:

- налаштування опитування периферійних пристроїв, підключених до інтерфейсів контролера;
- тип комунікаційного адаптера, який використовується для обміну даними;
- параметри підключення польових пристроїв до інтерфейсу зв'язку.

Схема підключення пристроїв вводу-виводу до системи автоматизації наведена на рисунку 4.2.

До складу схеми, наведеної на рисунку 4.2, входять програмований логічний контролер МІК-52, операторська панель НМІ та модулі розширення вводу-виводу, що забезпечують збір, обробку та передачу технологічної інформації. Операторська панель реалізує людино-машинний інтерфейс (НМІ) та призначена для візуалізації параметрів процесу помелу на автоматизованому робочому місці оператора

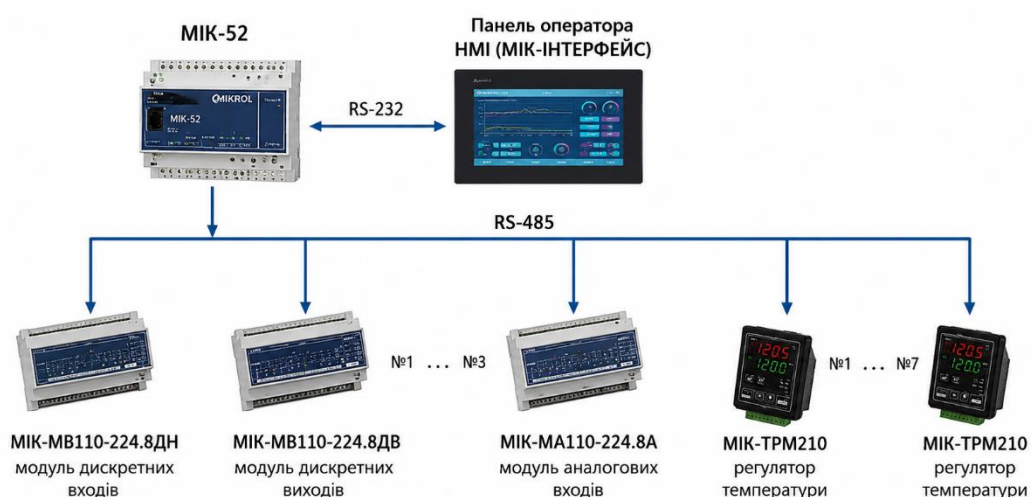


Рисунок 4.2 - Схема підключення периферійних пристроїв

На екрані операторської панелі рисунку 4.3 відображаються основні параметри технологічного процесу в режимі реального часу. До них належать рівень завантаження кульового млина, продуктивність процесу помелу, перепад тиску в аспіраційному тракті, стан виконавчих механізмів, а також значення сигналів від датчиків та регулюючих пристроїв.

Крім того, оператор має можливість контролювати режими роботи обладнання, спостерігати за зміною технологічних параметрів у часі та оперативно реагувати на виникнення аварійних або позаштатних ситуацій. Використання НМІ-панелі значно спрощує процес керування установкою та підвищує ефективність роботи системи автоматизації.

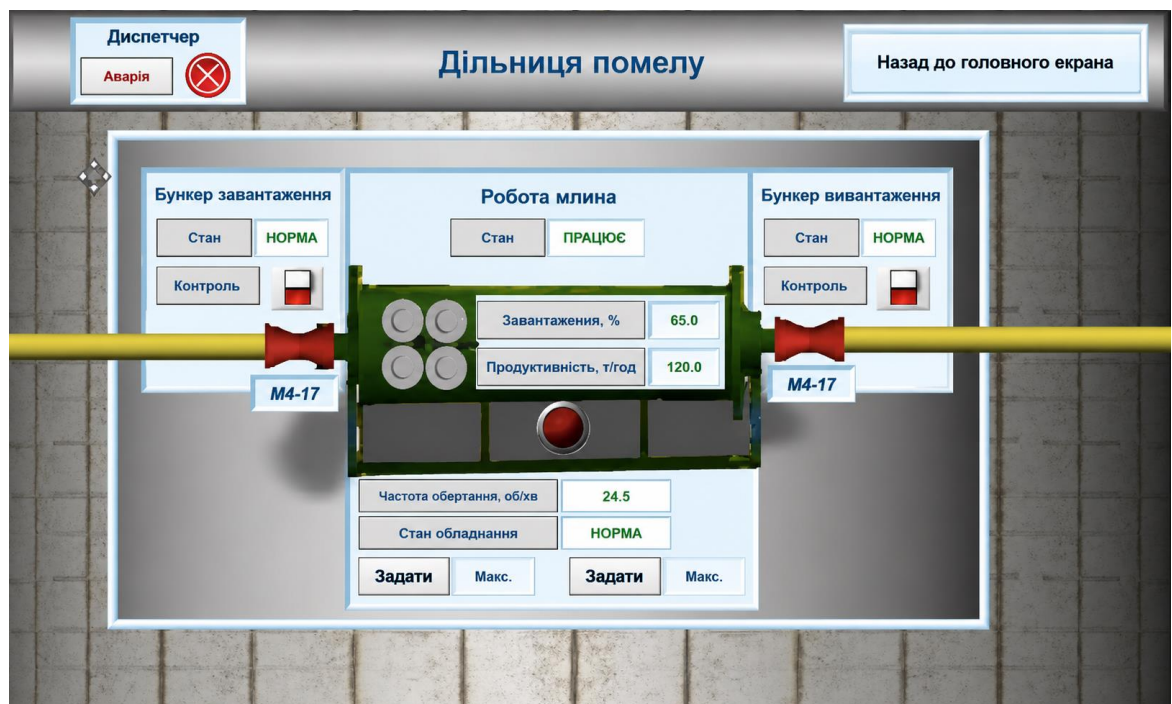


Рисунок 4.3 - Екран налаштувань млина

Ефективність керування процесом помелу цементних компонентів визначається не лише якістю регулювання швидкості обертання млина, але й точністю роботи підсистеми дозування сировини. Саме тому в структурі системи автоматизації передбачено окремий контур керування дозуванням компонентів.

У схемі, наведеній на рисунку 4.4, локальні засоби автоматизації та периферійні пристрої підключаються до програмованого логічного контролера

					БР.АКП-09.00.00.000 ПЗ	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

через інтерфейс RS-485. Використання даного інтерфейсу забезпечує надійний обмін інформацією між елементами системи та дає можливість оперативно змінювати уставки регуляторів відповідно до поточних умов технологічного процесу.

Централізоване керування процесом дозування сприяє підвищенню точності подачі компонентів, покращенню якості готової продукції та збільшенню продуктивності кульових млинів. Особливо помітний ефект досягається при роботі декількох млинів у складі єдиного виробничого комплексу, де необхідна узгоджена робота всіх технологічних вузлів.



Рисунок 4.4 - Схема керування дозуванням компонентів

Підвищення продуктивності процесів мелення в результаті оптимізації параметрів регулювання забезпечує зниження енергоспоживання, обладнання, що використовується в процесі мелення. Завдання оптимального керування полягає в формуванні значення уставок витрат для дозувальника із обмеженого простору керуючих впливів, що забезпечують якість продукту, що мелеться.

Згідно алгоритму оптимізації, приведеному на рисунку 4.5, в результаті формування вектору керування, для локальних контурів регулювання отримуються відповідні значення керуючих впливів.

					БР.АКП-09.00.00.000 ПЗ	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



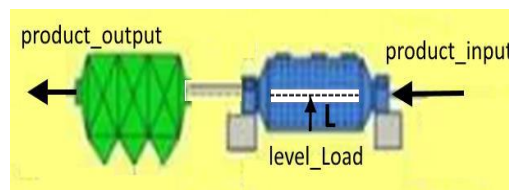
Рисунок 4.5 – Схема алгоритму керування дозуванням

Програмне забезпечення системи керування процесом помелу цементних компонентів реалізується на базі сучасного середовища розробки програм для програмованих логічних контролерів. Побудова алгоритмів керування здійснюється відповідно до вимог стандарту ІЕС 61131-3, який передбачає використання графічних та текстових мов програмування для створення систем автоматизації технологічних процесів.

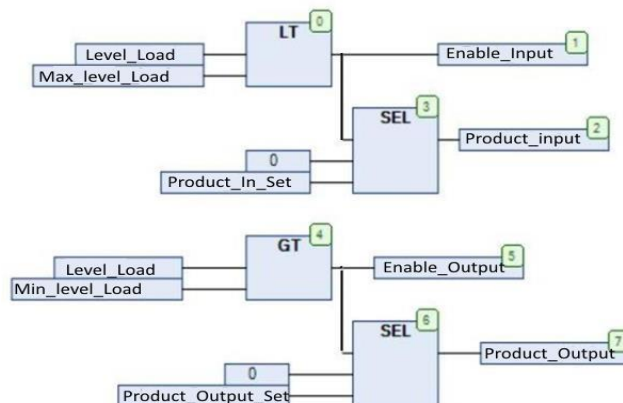
Середовище розробки забезпечує створення, налагодження та тестування програм керування, а також взаємодію з операторськими панелями та SCADA-системою. До його складу входять засоби конфігурування контролера, програмування алгоритмів роботи та модулі виконання програм у реальному часі.

Можливості імітаційного моделювання та перевірки алгоритмів керування досліджувалися за допомогою програмної моделі, наведеної на рисунку 4.6. З використанням віртуального контролера виконується керування моделлю кульового млина та аналізується реакція системи на зміну технологічних параметрів.

Вхідними параметрами моделі є витрати сировини, що надходить на помел, та інтенсивність вивантаження готового продукту. Вихідним параметром системи виступає рівень завантаження млина, який використовується для контролю та підтримання заданого режиму роботи технологічного процесу.



а) Візуальна модель



б) Схема реалізації алгоритму керування в середовищі програмування ПЛК

Рисунок 4.6 - Схема моделювання завантаження млина

При моделюванні задіяні такі змінні:

- Product_Out_Set – змінні витрати сировини та продукту;
- Max_level_Load і Min_level_Load – максимальний та мінімальний рівень

завантаження млина;

- Product_Output – витрати продукту.

В програмі використовуються оператори:

- LT, GT – двійкові оператори порівняння;
- SEL – бінарний оператор вибору;
- Enable_Output – оператори логічного типу.

Обмін даними між програмою контролера та середовищем моделювання здійснюється за допомогою OPC-сервера. Такий підхід забезпечує інтеграцію програмного середовища ПЛК із моделлю технологічного процесу, реалізованою в Matlab Simulink.

Для двостороннього обміну даними між контролером і моделлю в середовищі Matlab використовується OPC-клієнт, схема якого наведена на рисунку 4.7. Значення витрат сировини та готового продукту передаються до моделі, де розраховується рівень завантаження млина, після чого отримані результати повертаються до контролера.

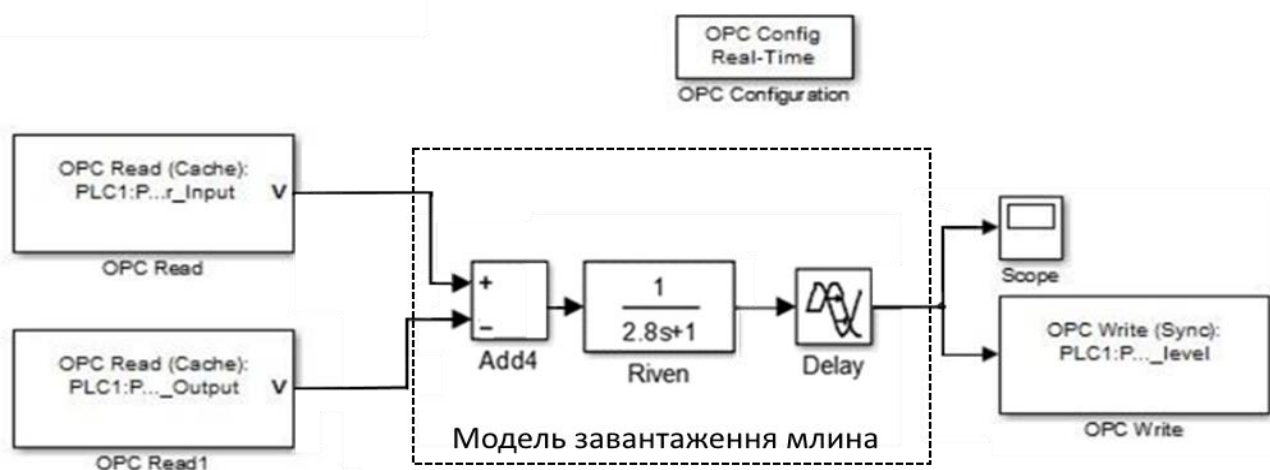


Рисунок 4.7 - Схема моделювання взаємодії віртуального ПЛК та моделі млина

За необхідності результати моделювання та робота алгоритмів керування можуть відображатися у вигляді графіків, що дає можливість оцінювати вплив різних налаштувань регуляторів на якість процесу.

Використання такої схеми взаємодії дозволяє досліджувати роботу системи керування в умовах, максимально наближених до реальних, а також виконувати пошук оптимальних параметрів технологічного процесу без втручання в роботу реального обладнання.

Висновки до розділу

У четвертому розділі розроблено структуру системи автоматичного керування процесом помелу цементних компонентів з урахуванням вимог до якості продукції та енергоефективності виробництва. Визначено склад основних технічних засобів автоматизації та принципи їх взаємодії в межах єдиної системи керування. Запропонована система забезпечує підтримання оптимального рівня завантаження млина, ефективне регулювання аспірації та стабілізацію параметрів технологічного процесу. Використання сучасних засобів автоматизації дозволяє знизити вплив збурюючих факторів і підвищити надійність роботи обладнання. Реалізація запропонованої системи сприятиме підвищенню продуктивності виробництва, покращенню якості цементу та зменшенню питомих витрат енергії.

					БР.АКП-09.00.00.000 ПЗ	Арк.
						68
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У бакалаврській роботі проведено аналіз процесу помелу цементних компонентів як об'єкта автоматичного керування та визначено основні завдання системи керування.

Встановлено, що процес помелу є енергоємним, тому основною метою дослідження стало підвищення ефективності роботи обладнання шляхом оптимізації режимів керування. На основі аналізу технологічного процесу сформовано критерії керування, які забезпечують необхідний гранулометричний склад продукту та зниження енерговитрат.

У результаті виконаних досліджень розроблено імітаційну модель процесу помелу, що включає контури керування рівнем завантаження млина та процесом аспірації. Проведене моделювання дозволило оцінити динамічні характеристики системи та ефективність застосованих алгоритмів керування.

Встановлено, що для об'єктів зі значною інерційністю більш ефективним є використання екстремального регулятора, який забезпечує підтримання оптимального рівня завантаження млина та підвищення продуктивності процесу.

Для реалізації системи автоматизації обрано програмований логічний контролер МІК-52, на базі якого розроблено структуру системи керування з використанням HMI-панелі та SCADA-системи. Результати моделювання підтвердили працездатність запропонованих рішень та можливість їх практичного впровадження для підвищення ефективності процесу помелу цементних компонентів. технологічному об'єкті. Отримані результати можуть бути використані для підвищення продуктивності обладнання, покращення якості готового продукту та зменшення енерговитрат у цементному виробництві.

					БР.АКП-09.00.00.000 ПЗ	Арк.
						69
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Alsop P. Cement plant operations handbook for dry process plants / P. Alsop. Tradeship Publications Ltd., Portsmouth, United Kingdom, 2001. – 159 p.
2. Ужеловський В.О. Екстремальне керування продуктивністю помелу вапняку у двокамерному млині / В.О. Ужеловський, О.А. Руденко // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – 2016. – № 2 (215). – С.55 –61
3. Черномордов В.А. Розробка математичної моделі млина для помелу цементного клінкеру / В.А. Черномордов, О. Г. Шутинський // Матеріали XIII Міжнародної науково-практичної конференції магістрантів та аспірантів. – 2019. – С.194.
4. М.М. Кузнецова, В.Е. Ведь, С.А. Вамболь // Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харків: ПП «Технологічний центр». – 2014. – № 2/1 (68). – С. 20 – 23
5. МІК-52. Програмований логічний контролер ПІД-регулятор : техн. Документація ТОВ «Мікрол». URL: <https://microl.ua/ua/product/programovanij-logicnij-kontroler-mik-51n> (дата звернення: 15.05.2026).
6. Енергоефективні технології в цементному помелі. Scientific.Net. URL: www.scientific.net (дата звернення: 15.05.2026).
7. Malvern Mastersizer 2000 / Oxford Materials Characterisation Service, Department of Materials, University of Oxford. – URL: Oxford Materials Characterisation Service. – (дата звернення: 15.05.2026).
8. Genç Ö. Energy-Efficient Technologies in Cement Grinding // IntechOpen. – URL: <https://scispace.com/pdf/energy-efficient-technologies-in-cement-grinding-31sl8s0020.pdf>. – (дата звернення: 15.05.2026).

					БР.АКП-09.00.00.000 ПЗ	Арк.
						70
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТКИ

Додаток А

А.1 Осцилограма процесу що відображає завантаження млина до заданого рівня

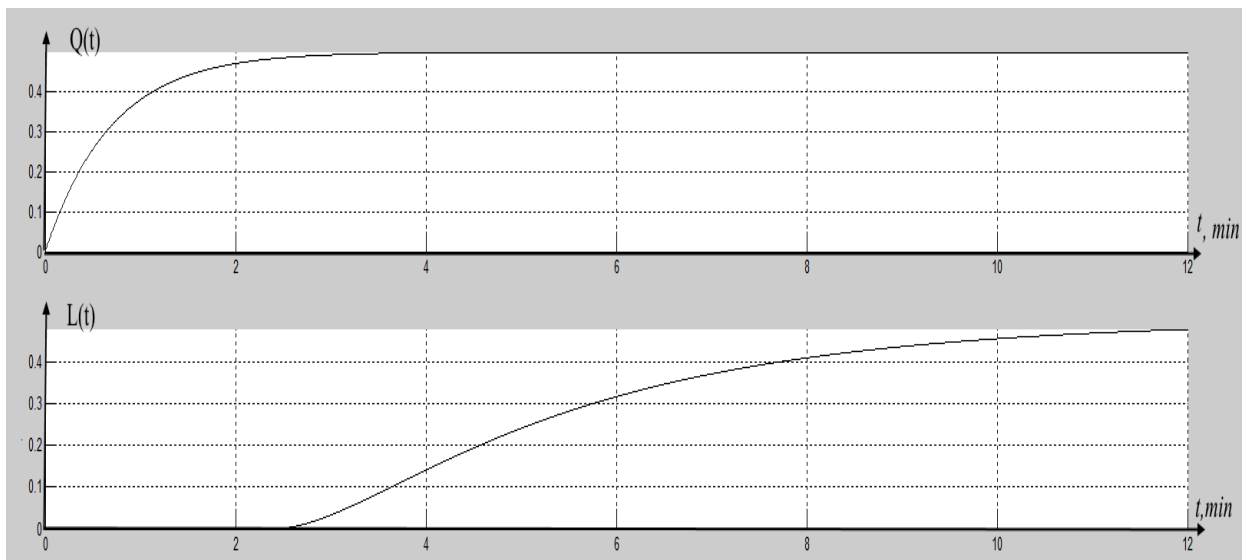


Рисунок А.1 - Осцилограма витрат (Q) та рівня (L) розімкнутої системи керування

Додаток А

А.2 Результат налаштування коефіцієнтів ПД-регулятора

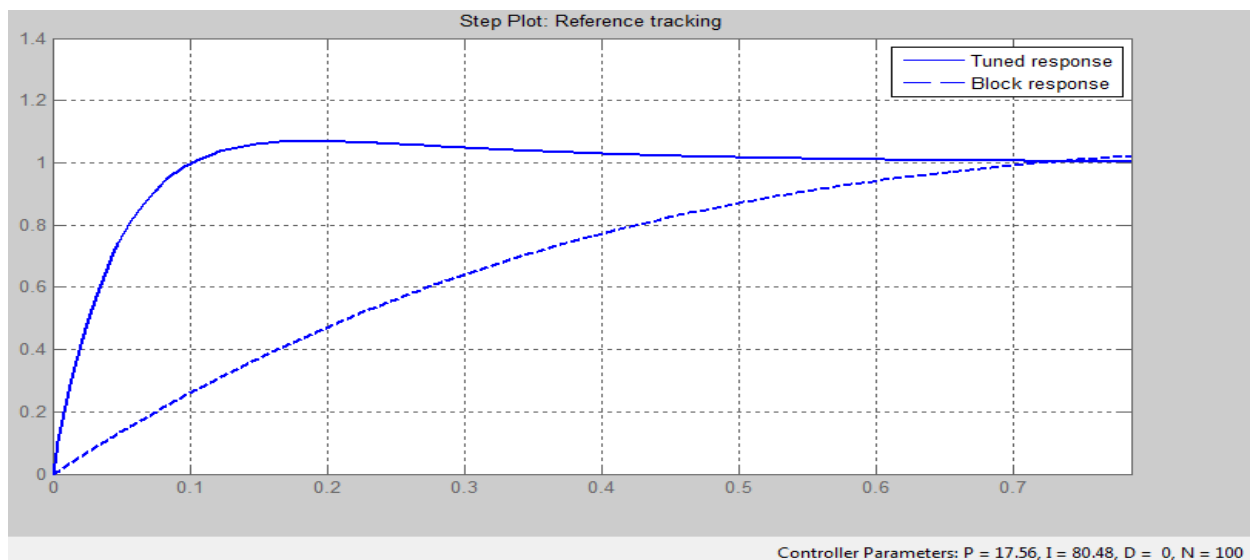


Рисунок А.2 - Панель налаштувань Matlab

Додаток Б

Б.1 Результат дії ПД-регулятора що скоротився вдвічі

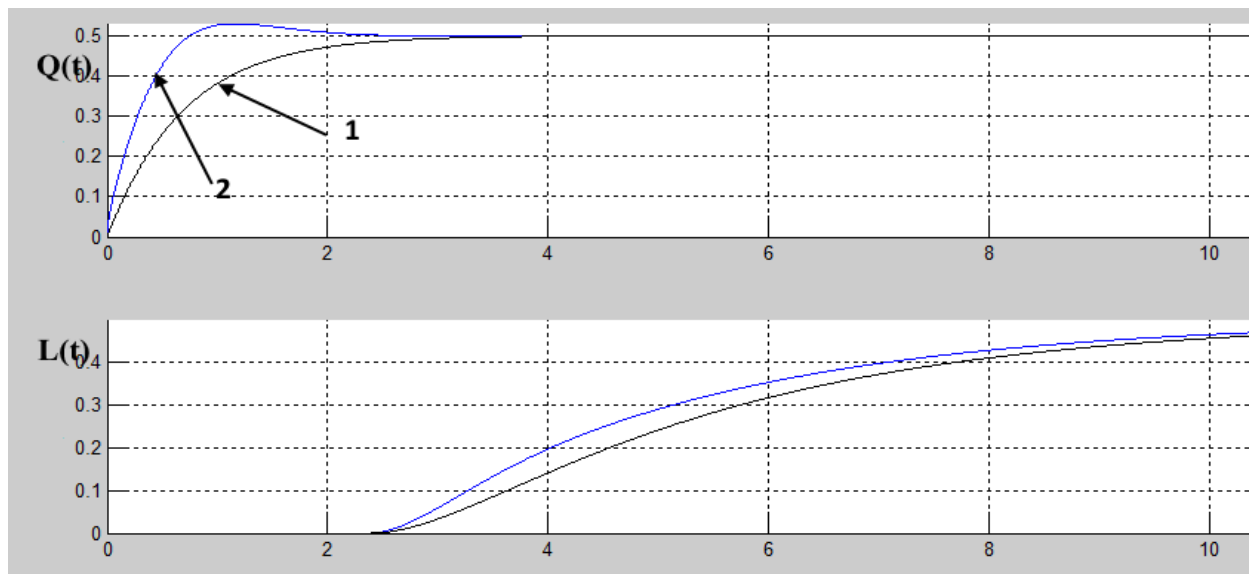


Рисунок Б.1 - Осцилограма параметрів процесу без регулятора та з налаштованим регулятором

Додаток Б

Б.2 Осцилограми що підтверджують якість регулювання продуктивності млина

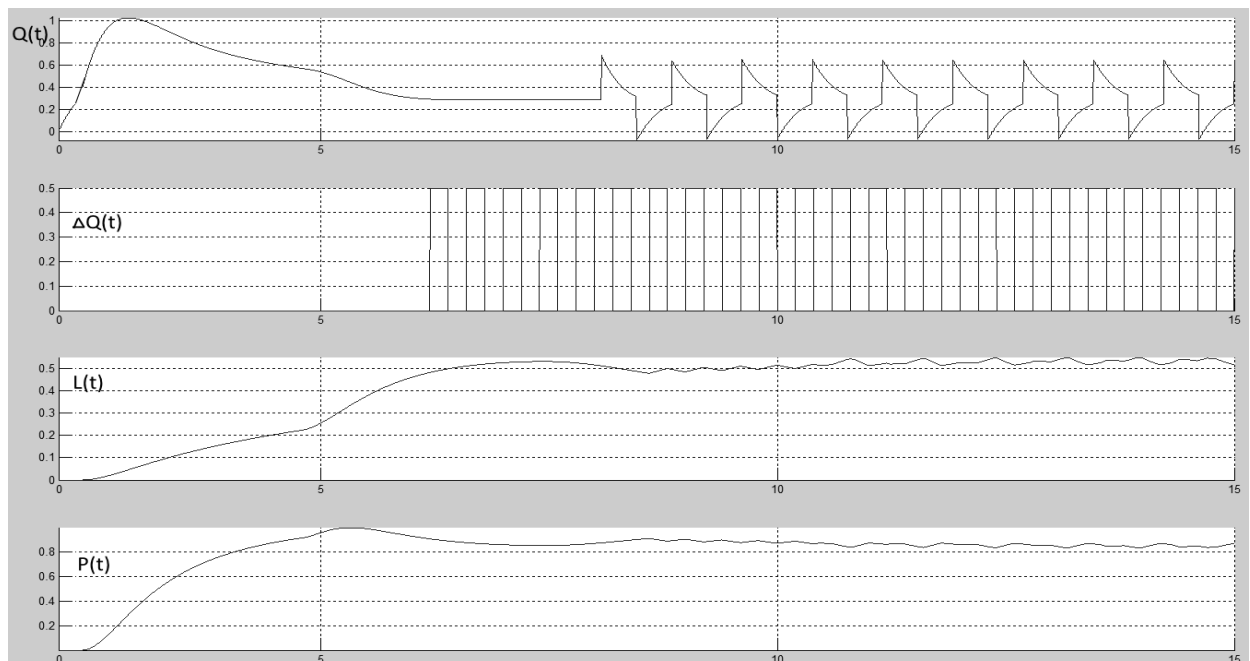


Рисунок Б.2 - Осцилограми зміни параметрів ОК у часі

Додаток В

В.1 Моделювання при розімкнутому зворотному зв'язку ОК

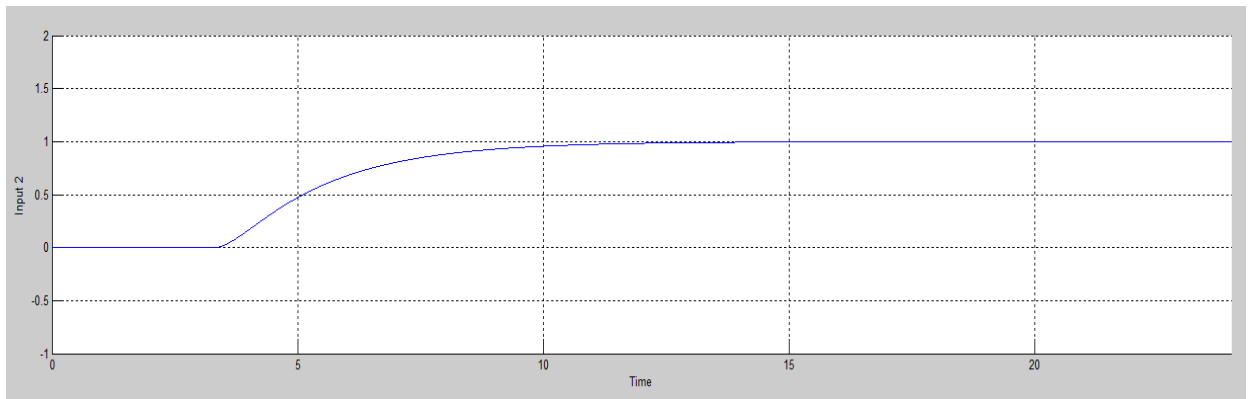


Рисунок В.1 - Графік перехідної функції каналу аспірації

Додаток В

В.2 Процес замикання від'ємного зворотнього зв'язку при відсутньому ПД-регуляторі

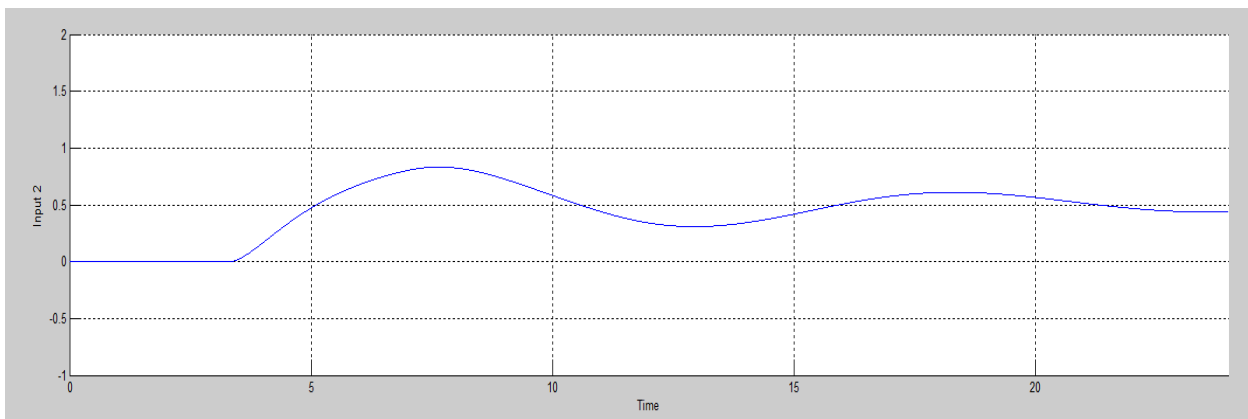


Рисунок В.2 - Графік перехідної функції із замкненим контуром

БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА

Тема кваліфікаційної роботи: «Розроблення системи оптимального керування процесом помелу цементних компонентів».

Обсяг пояснювальної записки: 74 аркуши.

Перелік креслень графічної частини:

1. Структурна схема екстремального регулятора.
2. Схема моделювання системи регулювання процесу помелу.
3. Схема моделювання процесу аспірації.
4. Функціональна схема МІКРОЛ МІК-52.
5. Схема моделювання завантаження млина.
6. Схема моделювання взаємодії віртуального ПЛК та моделі млина.

Дата закінчення проекту _____

Підпис студента-дипломника _____