

Міністерство освіти і науки України
Львівський національний університет ветеринарної медицини та
біотехнологій ім. С.З.Гжицького
Факультет механіки, енергетики та інформаційних технологій
Кафедра інформаційних технологій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

першого бакалаврського рівня на тему:

**«АВТОМАТИЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ СУХОГО
ПОМЕЛУ ЦЕМЕНТНОГО КЛІНКЕРУ»**

Виконав: студент групи Акт-41
спеціальності 151 «Автоматизація та
комп'ютерно-інтегровані технології»

Новик Д.І.

Керівник роботи:

Запорожцев С.Ю.

ЛЬВІВ-2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Освітній ступінь «Бакалавр» за спеціальністю –
151 – „Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології”

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Завідувач кафедри _____
д.т.н., проф. А.М. Тригуба
“___” _____ 202_ р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу студенту
Новику Денису Івановичу

1. Тема роботи

«Автоматизація технологічного процесу сухого помелу цементного клінкеру»

Керівник роботи: Запорожцев Сергій Юрійович, к.т.н., доцент.

затверджена наказом по університету від “25” лютого 2025 р., № 123/кс.

2. Строк подання студентом роботи: 10.06.2025 р.

3. Початкові дані до роботи:

Технологічні вимоги та обмеження при розробці автоматики для процесу сухого помелу цементного клінкеру в кульових млинах; ДСТи, СНіПи; документація основних виробників ПЛК.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки:

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ

1.1 Аналіз предметної області

1.2 Фізико-механічні основи процесу подрібнення цементного клінкеру

1.3 Теоретичні основи роботи подрібнювального обладнання

2 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ЯК ОБ’ЄКТА КЕРУВАННЯ

2.1 Структура та функціональні блоки лінії сухого помелу

2.2 Основні параметри процесу та їх вплив на якість помелу

2.3 Динамічні властивості процесу та особливості керування

2.4 Засоби вимірювання та технічні засоби автоматизації

3 РОЗРАХУНКИ ТА ВИБІР ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ

3.1 Ідентифікація об’єкта автоматизації

3.2 Моделювання та вибір параметрів регулятора

3.3 Оптимізація параметрів налаштувань П-регулятора

3.4 Аналіз стабільності та якості системи управління

3.5 Вибір технічних засобів реалізації системи

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

5 ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

ВИСНОВКИ

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): Аналіз предметної області. Ідентифікація об'єкта автоматизації. Моделювання об'єкта автоматизації. Побудова моделі САР. Визначення параметрів САР. Оптимізація параметрів регулятора. Моделювання системи. Дослідження стійкості САР з регулятором. Вибір технічних засобів. Висновки.

6. Консультанти з розділів:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1, 2, 3, 5	Запорожцев С.Ю., доцент кафедри інформаційних технологій		
4	Городецький І.М., доцент кафедри управління проектами та безпеки виробництва		

7. Дата видачі завдання ____ 202__ р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Написання першого розділу та означення головних завдань роботи	25.02 - 21.03.25	
2	Виконання другого розділу та формування початкових даних	22.03 - 11.04.25	
3.	Виконання третього розділу та узагальнення отриманих результатів роботи	12.04 - 11.05.25	
4.	Написання розділу: «Охорона праці»	12.05 - 17.05.25	
5.	Вартісне оцінення ефективності пропозицій роботи	18.05 - 23.05.25	
6.	Завершення роботи в цілому	24.05 - 10.06.25	

Студент

(підпис) Новик Д.І.

Керівник роботи

(підпис) Запорожцев С.Ю.

РЕФЕРАТ

УДК 681.51 : 666.94.052

Автоматизація технологічного процесу сухого помелу цементного клінкеру.
Новик Д.І. Кафедра ІТ – Дубляни, ЛНУВМБ ім.С.З. Гжицького, 2025.
Кваліфікаційна робота: 64 с. текст. част., 30 рис., 12 арк. ілюстраційного матеріалу, 15 джерел.

Об'єкт дослідження – управління процесом сухого помелу цементного клінкеру.

Мета роботи – підвищення ефективності технологічного процесу сухого помелу цементного клінкеру завдяки системі автоматизації.

Проведено аналіз предметної області та з'ясовано технологію помелу цементу з клінкеру та розглянуті основні типи млинів. На основі даних з відкритих джерел зроблена ідентифікація складного об'єкта та визначена модель, яка найбільш відповідає наявним даним. Крім того, проведено попереднє моделювання системи автоматичного регулювання, яке виявило необхідність застосування П-регулятора. Проведено визначення параметрів П-регулятора, досліджена поведінка системи з регулятором та її стійкість. Отримані результати свідчать, що характеристики системи задовільняють наявним вимогам. Запропоновані технічні засоби автоматизації, завдяки яким може бути побудована реальна система автоматичного регулювання. Розроблені міри по охороні праці та навколишнього середовища, а також здійснений розрахунок економічної ефективності системи.

Ключові слова: цементний клінкер, технологічний процес сухого помелу, кульовий млин, автоматизована система управління, мікроконтролер.

Keywords: cement clinker, dry grinding process, ball mill, automated control system, microcontroller.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ	8
1.1 Аналіз предметної області	8
1.2 Фізико-механічні основи процесу подрібнення цементного клінкеру	12
1.3 Теоретичні основи роботи подрібнювального обладнання	15
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ЯК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ	21
2.1 Структура та функціональні блоки лінії сухого помелу	21
2.2 Основні параметри процесу та їх вплив на якість помелу	24
2.3 Динамічні властивості процесу та особливості керування	27
2.4 Засоби вимірювання та технічні засоби автоматизації	31
РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНКИ ТА ВИБІР ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ	36
3.1 Ідентифікація об'єкта автоматизації.....	36
3.2 Моделювання та вибір параметрів регулятора	43
3.3 Оптимізація параметрів налаштувань П-регулятора	47
3.4 Аналіз стабільності та якості системи управління	49
3.5 Вибір технічних засобів реалізації системи	52
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА	56
РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ	59
ВИСНОВКИ	62
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	63

ВСТУП

В сучасних умовах стрімкого розвитку будівельної галузі особливого значення набуває підвищення ефективності виробництва основних будівельних матеріалів, серед яких цемент залишається незамінним компонентом. Виробництво цементу включає низку складних технічних процесів, серед яких процес сухого помелу цементного клінкеру посідає ключове місце. Саме на цьому етапі формується якість кінцевого продукту, а також закладаються енергетичні витрати, які значною мірою впливають на собівартість виробництва. Висока енергоємність процесу, інерційність об'єкта керування, складність забезпечення стабільності якості помелу та динамічний характер вхідних і вихідних параметрів роблять помел цементного клінкеру особливо чутливим до впровадження засобів автоматизації.

В умовах жорсткої конкуренції на ринку та постійного зростання вимог до якості цементу, виробничі підприємства змушені шукати способи оптимізації технологічних процесів, підвищення стабільності роботи устаткування та зменшення втрат на всіх етапах виробництва. Традиційні методи керування в таких умовах виявляються недостатньо ефективними, оскільки не забезпечують оперативного реагування на зміни технологічних параметрів і не дозволяють гнучко адаптуватися до варіацій сировини чи навантаження. Тому актуальним є впровадження автоматизованих систем керування, які здатні не лише підтримувати стабільний технологічний режим, але й адаптуватися до зовнішніх впливів та внутрішніх змін у процесі.

Особливої уваги потребує етап тонкого подрібнення, який реалізується за допомогою кульових млинів, вальцевих агрегатів або комбінованих систем. Усі ці установки мають складну динаміку, характеризуються запізнюванням реакції на керуючі дії, нелінійними зв'язками між вхідними і вихідними змінними, а також суттєвими коливаннями навантаження. Успішне керування таким процесом вимагає глибокого розуміння об'єкта, чіткого математичного опису

його поведінки та застосування сучасних підходів до автоматичного регулювання, включаючи цифрову ідентифікацію моделей, адаптивні та інтелектуальні системи.

Крім технологічних та економічних міркувань, актуальність теми зумовлена також необхідністю підвищення екологічної безпеки виробництва. Оптимізоване керування процесом помелу дозволяє знизити викиди пилу, уникнути перевантаження фільтраційних систем та зменшити загальний екологічний слід підприємства. Своєчасне реагування на зміну параметрів процесу та автоматичне регулювання потужності обладнання забезпечують більш стабільну роботу всієї технологічної лінії, що відповідає сучасним вимогам до сталого виробництва.

З огляду на вищевикладене, автоматизація процесу сухого помелу цементного клінкеру є не лише технічно доцільною, але й стратегічно важливою для розвитку галузі. Розробка ефективної системи автоматичного керування, що базується на реальних даних, дозволяє значно покращити якість продукту, зменшити енергоспоживання та підвищити надійність і безперервність виробництва. В цьому контексті актуальність дослідження обраної теми є беззаперечною, а її практичне значення — надзвичайно високим.

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ

1.1 Аналіз предметної області

Цемент є одним із найважливіших матеріалів у сучасному будівництві, що визначає не лише технічні можливості споруд, а й темпи розвитку інфраструктури та економіки загалом. Його універсальність, міцність, стійкість до зовнішніх впливів і здатність до модифікації роблять його незамінним у таких сферах, як зведення житлових і промислових будівель, дорожнє будівництво, виробництво залізобетонних конструкцій і навіть гідротехнічних споруд. У масштабах глобальної економіки цементна промисловість посідає одне з провідних місць за обсягами виробництва, кількістю задіяного обладнання та рівнем енергоспоживання. Саме тому ефективність кожного технологічного етапу має не лише локальне, а й системне значення.

Процес виробництва цементу охоплює послідовну зміну кількох технологічних стадій, кожна з яких формує фізико-хімічні властивості майбутнього матеріалу. [1-3] Після видобування сировини (переважно вапняку та глини), здійснюється її подрібнення та змішування в строго заданих пропорціях. Наступним етапом є сушіння та випал у печі, що відбувається при температурах понад 1400°C , внаслідок чого формується цементний клінкер — твердий гранульований матеріал, який виступає основою для майбутнього цементу (рис.1.1). Застосовувані температури спричиняють складні фазові перетворення, в результаті чого утворюються силікати та алюмінати кальцію — головні носії міцності.

Однак остаточні властивості цементу визначаються не на стадії випалу, а на заключному етапі — під час помелу клінкеру. Саме тут забезпечується тонкодисперсний стан матеріалу, від якого залежить швидкість гідратації, рівномірність структури та показники міцності вже після затвердіння цементу. У

більшості сучасних виробництв перевага віддається сухому способу помелу, що дозволяє зменшити витрати енергії, уникнути труднощів, пов'язаних із зволоженням матеріалу, та забезпечити більш стабільні умови подрібнення.



Рисунок 1.1 - Цементний клінкер

Суть процесу сухого помелу полягає в подрібненні твердої речовини без попереднього її зволоження, на відміну від мокрого помелу, де матеріал подається у вигляді суспензії. Для цементного клінкеру це означає, що кожна гранула має бути подрібнена до розмірів кількох десятків мікронів без допомоги води чи іншого рідкого носія. У процесі помелу зазвичай додається гіпс у строго дозованих кількостях — не для подрібнення, а для регулювання тверднення цементу. Крім того, у деяких випадках додають мінеральні або активні добавки, які дозволяють варіювати властивості готового продукту залежно від цільового призначення.

Тонкість помелу має критичне значення. Надто великі частинки не братимуть участі в реакції гідратації або будуть гідратувати надто повільно, що негативно позначиться на міцності. Водночас надмірно дрібний помел призводить до підвищеного тепловиділення та зайвих витрат енергії, а також ускладнює транспортування і зберігання цементу. Саме тому точність контролю помелу є однією з найскладніших і найвідповідальніших задач у всьому виробничому ланцюгу.

Сухий помел цементного клінкеру реалізується за допомогою спеціалізованих подрібнювальних агрегатів, основним з яких є кульовий млин. Це обладнання працює за принципом ударно-стирання, коли великі металеві кулі, що обертаються разом із барабаном, подрібнюють гранули клінкеру внаслідок багаторазових зіткнень і тертя. [4-5] На перший погляд конструкція кульового млина є простою, однак від взаємодії його внутрішніх компонентів залежить ефективність усього процесу. Параметри заповнення барабана, швидкість його обертання, ступінь завантаження подрібнюваного матеріалу, а також вологість і температура всередині — усе це суттєво впливає на якість помелу.

Кульові млини можуть працювати у відкритому або закритому циклі. У першому випадку матеріал подається на вхід, а після проходження через млин вивантажується без повторної обробки. Такий підхід застосовується рідше, адже не дає можливості ефективно регулювати ступінь помелу. У закритому циклі млин працює разом із класифікатором або сепаратором, який повертає недостатньо подрібнені частинки на повторне подрібнення, тоді як готовий цемент виводиться з системи. Це дозволяє досягти стабільнішого зернового складу готової продукції й зменшити перевитрати енергії.

Сучасні системи сухого помелу нерідко використовують вертикальні валкові млини, які реалізують подрібнення за рахунок стискання матеріалу між валками та столом, що обертається. Такий принцип дозволяє зменшити втрати енергії, знизити зношування та підвищити гнучкість керування процесом. Проте їхня експлуатація потребує точного дотримання режимів тиску, температури та подачі, що висуває високі вимоги до технічного обслуговування та контролю.

Окрему увагу слід приділити теплообміну під час помелу. У процесі подрібнення виділяється значна кількість тепла внаслідок тертя, ударів і взаємодії з навколишнім середовищем. Якщо температура в млині перевищує допустимі значення (зазвичай це $\approx 100\text{--}120\text{ }^{\circ}\text{C}$), це може призвести до передчасного зневоднення гіпсу й погіршення якості цементу. Крім того, перегрів небажаний і з точки зору зношування обладнання. Тому в багатьох

системах передбачено примусове охолодження повітряного потоку, що проходить через млин, або зволоження сировини перед подачею на помел у межах допустимих норм.

Поряд із температурою важливими технологічними параметрами є швидкість подачі клінкеру, розподіл гранул за розмірами, вміст домішок, а також співвідношення між клінкером, гіпсом і мінеральними добавками. Навіть незначні зміни цих величин можуть вплинути на кінцеві властивості цементу — такі як початок тужавіння, кінцева міцність, водопоглинання й довговічність. У зв'язку з цим процес сухого помелу вимагає постійного дотримання технологічної дисципліни, а будь-які порушення мають бути оперативно виявлені та компенсовані ще до того, як продукція потрапить до споживача.

Окрім млина, важливими елементами системи є транспортери, живильники, фільтри, бункери накопичення та дозатори. Вони забезпечують безперервність процесу та дозволяють дотримуватись заданого ритму виробництва. Стан їхньої експлуатації, час простоїв, зношення рухомих частин — усе це прямо впливає на якість кінцевого продукту. Саме на етапі помелу формується не лише фізичний, а й хімічний склад цементу, тому технологія повинна бути максимально стабільною й контрольованою.

Енергоефективність процесу сухого помелу — одне з ключових питань у сучасному цементному виробництві. Помел клінкеру є найбільш енерговитратним етапом, на який може припадати до 30–40% усіх витрат електроенергії у виробничому циклі. Це пояснюється не лише високим механічним навантаженням, а й термічними втратами, зумовленими тертям, вібраціями та нераціональним використанням теплоносіїв. Через це промисловість змушена постійно шукати способи зниження питомих витрат енергії, не погіршуючи при цьому якість продукції.

Серед найбільш поширених шляхів підвищення енергоефективності — використання млинів з оптимізованою формою футеровки та зменшенням мертвої зони в барабані, впровадження сепараторів з високою точністю класифікації, застосування енергозберігаючих приводів з частотним

регулюванням та попереднє подрібнення сировини. Іншим напрямом є впровадження систем теплової утилізації — наприклад, повторне використання гарячого повітря з печі або з зони охолодження клінкеру. Проте досягнення реального ефекту можливе лише за умови чітко налаштованих режимів роботи кожного вузла, що вимагає глибокого розуміння фізичних процесів у системі.

Сьогоднішній розвиток технології спрямований на досягнення більшої стабільності процесу помелу, зменшення залежності від людського фактору та мінімізацію коливань параметрів, що призводять до нестабільності якості цементу. До перспективних рішень відносяться інтелектуальні системи підбору режимів роботи млина на основі даних з реального часу, адаптивні технології регулювання подачі матеріалу, а також підвищення точності дозування добавок. Частина цих рішень виходить за межі традиційного уявлення про механічну обробку матеріалу, перетворюючи процес помелу на гнучку систему, чутливу до змін зовнішніх умов і вимог до кінцевого продукту.

Відтак, технологічна основа сухого помелу цементного клінкеру — це складна, багатофакторна система, що потребує високого ступеня узгодженості всіх її елементів. Її стабільна й ефективна робота є запорукою якості кінцевої продукції та економічної доцільності виробництва в цілому.

1.2 Фізико-механічні основи процесу подрібнення цементного клінкеру

Цементний клінкер є основною сировиною для виробництва портландцементу, і його фізико-механічні характеристики мають вирішальне значення для ефективності процесу подрібнення. Здебільшого клінкер являє собою зцементовану масу, яка утворюється внаслідок високотемпературної обробки сировинної шихти, до складу якої входять вапняк, глина, кремнезем, залізовмісні та інші коригувальні добавки. Після випалу при температурі 1350–1450 °C формується продукт, що складається з твердих, щільних зерен різної форми й розміру.

Мінералогічний склад клінкеру включає кілька основних фаз: аліт (трикальцієвий силікат, C_3S), беліт (декальцієвий силікат, C_2S), алюмінат (трікальцієвий алюмінат, C_3A) та ферит (тетракальцієвий алюмінатферит, C_4AF). Ці фази мають різну твердість, щільність, термічну стабільність та реакційну здатність. Найтвердішим компонентом є аліт, що забезпечує високу міцність цементу на ранніх строках тужавіння, тоді як беліт, менш твердий, активізується пізніше. Саме твердість і внутрішня структура цих мінералів значною мірою визначають опір клінкеру до подрібнення.

З мікроструктурної точки зору, клінкер має зернисту будову з неоднорідним розподілом фаз, мікротріщинами, порожнинами та міжзерновими зв'язками. Внутрішні напруження, які виникають під час охолодження після випалу, часто спричиняють мікротріщини, що знижує загальний механічний опір зерна і полегшує його руйнування. Саме наявність мікродофектів і слабких міжфазових зон робить можливим реалізацію процесу помелу з відносно невеликими затратами енергії.

Механізм руйнування цементного клінкеру в процесі подрібнення є складним і включає елементи крихкого зламу, стирання, розшарування та ударної дії. Основні деформаційні процеси відбуваються на міжфазових межах, де спостерігається порушення кристалічної решітки та концентруються напруження. Під дією зовнішніх сил зерна руйнуються, як правило, по траєкторіях, де сконцентровані тріщини або пори. Роль відіграє й форма зерен: більш округлі мають меншу кількість гострих кутів, де накопичуються локальні напруження, а отже — складніше піддаються роздрібненню.

Процес подрібнення супроводжується інтенсивною генерацією тепла, що викликає локальне підвищення температури до 70–90 °C і спричиняє тимчасове зниження твердості деяких фаз, зокрема, C_3A . Цей ефект, хоч і короточасний, додатково впливає на зміну механізму руйнування, зрушуючи його в бік більшої частки стирання.

Різні фізико-механічні властивості окремих фаз у складі клінкеру також визначають вибір відповідного обладнання для помелу. Наприклад, на

початковому етапі доцільне застосування ударної дії (ударно-кулькові або валкові млини) для подолання загального опору зерна, тоді як на пізніх стадіях ефективніше працюють стиральні й диспергувальні сили, реалізовані в сепараторах і класифікаторах. Відтак технологічна схема має забезпечити поступову зміну механізмів руйнування залежно від ступеня подрібнення.

Вибір технологічної схеми подрібнення цементного клінкеру багато в чому визначається співвідношенням різних видів сил, які діють на матеріал, а також необхідністю отримати кінцевий продукт із заданими фізико-хімічними характеристиками. Для оптимізації процесу зазвичай застосовують комбіновані схеми, що поєднують елементи ударного, кулькового та вальцювого подрібнення, а також класифікації. Це дозволяє зменшити надмірне подрібнення, яке веде до появи надто дрібних частинок, що негативно впливають на властивості цементу і збільшують енергоспоживання.

Особливе значення має роль поверхневої енергії та адгезійних властивостей частинок. Зі збільшенням питомої поверхні дрібних частинок підвищується їх здатність до агломерації, що утруднює подальше подрібнення і створює проблему засмічення сепараторів. Тому регулювання умов, що впливають на взаємодію частинок — таких як вологість, температура та наявність хімічних добавок — є необхідним елементом технології.

Практичний аспект полягає в тому, що вибір обладнання і налаштування режимів роботи повинні враховувати не тільки характеристики клінкеру, але і специфіку сировинної шихти, вимоги до кінцевого продукту, а також екологічні та енергетичні обмеження. Наприклад, застосування млинів із високоефективними системами сепарації дозволяє повернути в процес більшу частину недоизмельченого матеріалу, підвищуючи загальну продуктивність установки та стабільність параметрів цементу.

Загалом, фізико-механічна основа процесу подрібнення — це фундамент, який дає змогу обґрунтовано підходити до вибору технологічних рішень, а також до подальшої автоматизації системи керування, що забезпечить оптимальне функціонування устаткування і якість продукції.

1.3 Теоретичні основи роботи подрібнювального обладнання

Розглянемо суть процесу подрібнення, основні типи устаткування та їх роботу на рівні фізичних принципів і конструктивних особливостей.

Подрібнення — це складний фізико-механічний процес, у результаті якого великі фрагменти матеріалу розбиваються на дрібні частинки, що має суттєве значення для подальшої обробки і використання сировини в різних галузях промисловості. [6-7] З технологічної точки зору, ефективність подрібнення визначається здатністю обладнання розвивати достатню механічну енергію, що передається матеріалу, а також раціонально використовувати цю енергію для руйнування структури.

Основним механізмом подрібнення є концентрація механічних напружень у локальних ділянках матеріалу, що веде до формування тріщин і подальшого їх розповсюдження. При цьому в залежності від виду прикладених сил і швидкості деформації відбувається крихкий чи пластичний злам. Для більшості мінеральних матеріалів, таких як цементний клінкер, характерний крихкий тип руйнування, що супроводжується утворенням гострих уламків.

Технологічне обладнання для подрібнення проектується з урахуванням можливості реалізації різних типів механічної дії на матеріал. Загалом у промисловості застосовують млини, в яких основними видами впливу є удар, стиск, тертя та розтяг. Кожен з цих видів дії забезпечує специфічний режим руйнування матеріалу, а поєднання їх дозволяє досягати бажаного ступеня подрібнення з мінімальними енергетичними втратами.

Ударне подрібнення реалізується в млинах, де матеріал піддається діям швидко рухомих елементів — молотків, шарів або роликів. Удар викликає миттєве локальне перевищення міцності, що призводить до розколювання зерен. Висока швидкість елементів обробки забезпечує інтенсивність подрібнення, проте цей спосіб часто супроводжується утворенням значної кількості пилу і дрібнодисперсних фракцій, які іноді небажані.

Стискове подрібнення базується на зусиллях, що створюються між двома або більше твердами поверхнями, які зближуються і механічно роздавлюють матеріал. Прикладом є валкові або клинові дробарки. Цей спосіб ефективний для руйнування твердих і крихких матеріалів із відносно низькою вологістю. Стиск викликає розвиток внутрішніх напружень і формування тріщин у напрямку стиснення.

Тертя супроводжує процес у тих установках, де відбувається ковзання і переміщення частинок по поверхні елементів млина. Важливою характеристикою тертя є залежність сили від матеріалу поверхні і частинок, а також від швидкості переміщення. Тертя у поєднанні зі стиском і ударом дає комплексний механізм руйнування, що підвищує якість помелу.

Розтягуючі напруження, хоча і менш поширені в традиційних млинах, можуть виникати у випадках складних динамічних режимів, наприклад, при ковзанні зерен або в зоні міжфазових розривів. Цей тип деформації сприяє подальшому поширенню тріщин і розпаду частинок.

Конструктивно, подрібнювальне обладнання складається з корпусу, робочих органів, системи подачі і вивантаження матеріалу, а також механізмів приводу. Робочі органи виконують безпосередню роботу по руйнуванню матеріалу і можуть мати вигляд молотків, кульок, валків, роликів, пластин або барабанів із шорсткою поверхнею. Матеріал подається в робочу камеру, де піддається механічній обробці, після чого вивантажується через сита, класифікатори або сепаратори.

Важливою характеристикою будь-якого млина є його продуктивність і енергетична ефективність. Теоретично, максимальна ефективність подрібнення досягається при оптимальному співвідношенні між силою дії і часом перебування матеріалу в робочій зоні. Занадто швидке проходження матеріалу призводить до неповного руйнування, тоді як надмірно тривале перебування збільшує витрати енергії і знос обладнання.

Оцінка ефективності роботи млина часто базується на показниках питомої енерговитрати, ступеня подрібнення (визначається співвідношенням середніх

розмірів частинок на вході і виході) та розподілу розмірів готового продукту. Теоретичні моделі, зокрема моделі роздрібнення, враховують величину механічних напружень, розподіл їх у об'ємі матеріалу, а також кінетику утворення і росту тріщин.

Одним із найпоширеніших типів подрібнювальних машин у цементній промисловості є кульковий млин (рис.1.2). Його робочим органом є сталеві кульки, які обертаються разом із обертовим барабаном. Матеріал подається всередину барабана і подрібнюється в результаті ударів і тертя між кульками та самим матеріалом.

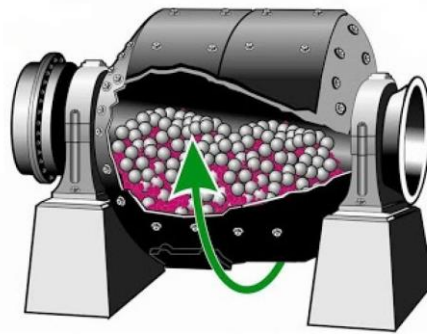


Рисунок 1.2 - Кульковий млин

Кульковий млин забезпечує відносно рівномірний розподіл розмірів частинок на виході і дозволяє регулювати ступінь подрібнення за допомогою зміни швидкості обертання, розміру і маси кульок, а також часу перебування матеріалу в млині. Конструктивно він відносно простий, але має досить високі енергетичні витрати, що пов'язано з інерційністю руху кульок і тертям.

Трубчастий млин (рис.1.3), за своєю конструкцією, схожий на кульковий, однак його особливість полягає в подовженій формі барабана і системі класифікації, що дозволяє розділяти матеріал за ступенем подрібнення безпосередньо всередині установки. Зазвичай трубчасті млини оснащені внутрішніми сепараторами, які повертають у робочу зону надмірно крупні частинки і виводять з процесу дрібні. Це підвищує ефективність використання енергії і якість кінцевого продукту. Трубчасті млини підходять для роботи з

великими обсягами матеріалу і забезпечують стабільність технологічного процесу.



Рисунок 1.3 - Трубчастий млин

Валкові млини (рис.1.4) використовують принцип стискового подрібнення між двома або більше валками, які обертаються із різними швидкостями. Вони ефективні для матеріалів з підвищеною твердістю і низькою вологістю. Завдяки тому, що матеріал не піддається сильному ударному навантаженню, у продукті менше пилу і наддрібних фракцій. Валкові млини мають складну конструкцію валків і систем регулювання зазору, що дозволяє точно контролювати ступінь подрібнення. Однак через специфіку механізму вони менш гнучкі у порівнянні з кульковими або трубчастими.



Рисунок 1.4 - Валковий млин

Крім основних типів, існують також спеціалізовані млини — наприклад, роторні, вальцові, ударні і високошвидкісні. Роторні млини реалізують подрібнення за рахунок високошвидкісного обертання ротора з розміщеними на ньому молотками чи ножами. Цей вид обладнання використовується там, де потрібне інтенсивне ударне подрібнення з можливістю регулювання фракції на виході.

Вальцові млини, що мають більше одного валка, застосовуються для отримання особливо тонких фракцій з мінімальним енергоспоживанням, але їхня конструкція більш складна і чутлива до режимів експлуатації.

Важливим аспектом є те, що вибір конкретного типу млина залежить не тільки від фізичних характеристик оброблюваного матеріалу, а й від технологічних вимог до кінцевого продукту, таких як розмір і форма частинок, вологість, хімічний склад, а також економічних факторів, включаючи енергоефективність і вартість обслуговування.

Узагальнюючи, всі типи млинів мають свої переваги і обмеження, і часто у виробничих процесах застосовують комбіновані схеми, які дозволяють максимально ефективно реалізувати потенціал кожного з типів обладнання для досягнення заданих параметрів помелу.

Варто зазначити, що ефективність подрібнення значною мірою залежить від режиму роботи обладнання. Основними параметрами, що впливають на якість помелу, є швидкість обертання барабана або ротора, розмір і склад подрібнювального матеріалу, час перебування в млині, а також кількість і тип подрібнювального середовища — кульок, кілець, молотків тощо. Важливо враховувати, що кожен тип млина має оптимальні режими роботи, при яких досягається максимальна продуктивність і мінімальні енергетичні витрати.

Енергоспоживання є одним із ключових факторів, що визначають вибір млина в промислових масштабах. Відомо, що помел цементного клінкеру — енергоємний процес, що може складати значну частину загальних витрат підприємства. Тому підвищення енергоефективності обладнання, зниження втрат енергії на тертя, удар і шум є актуальними завданнями для конструкторів і

технологів. Сучасні технології дозволяють оптимізувати роботу млинів шляхом точного регулювання параметрів, використання високоякісних матеріалів для подрібнювального середовища і вдосконалення конструкції.

Ще одним важливим аспектом є зношування робочих органів млина. Постійне механічне навантаження, абразивна дія матеріалу і високі температури призводять до поступового руйнування кульок, валків, молотків і внутрішніх деталей барабана. Це впливає на стабільність процесу помелу, підвищує ймовірність аварійних ситуацій і збільшує експлуатаційні витрати. Тому технічне обслуговування, своєчасна заміна зношених елементів і застосування зносостійких матеріалів є невід'ємною частиною експлуатації млинів.

Отже, теоретичні основи роботи подрібнювального обладнання базуються на розумінні механізмів передачі енергії від рухомих елементів до матеріалу, особливостей конструкції та режимів роботи конкретного типу млина. Глибоке знання цих аспектів є необхідною умовою для ефективного проектування, вибору та автоматизації обладнання в технологічному процесі сухого помелу цементного клінкеру.

РОЗДІЛ 2

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ЯК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

2.1 Структура та функціональні блоки лінії сухого помелу

Технологічна лінія сухого помелу цементного клінкеру є складною системою, побудованою на поетапному перетворенні сировини на кінцевий продукт шляхом механічного подрібнення та класифікації матеріалу. [8] Основною метою побудови такої лінії є забезпечення безперервного, контрольованого й енергетично ефективного процесу помелу з гарантованим досягненням необхідної дисперсності частинок.

Побудова помельної лінії передбачає узгоджену роботу ряду функціональних вузлів, кожен з яких виконує чітко визначену роль у процесі обробки сировини. Система починається з етапу подачі клінкеру з зон зберігання або бункерів, де здійснюється дозування матеріалу відповідно до заданого навантаження. Принцип подачі ґрунтується на використанні стрічкових або шнекових транспортерів, які забезпечують стабільну витрату сировини до приймального пристрою млина.

На наступному етапі відбувається власне подрібнення матеріалу. Клінкер подається в млин, де за рахунок механічної взаємодії робочих тіл і корпусу здійснюється інтенсивне руйнування частинок. Робоче середовище створює значні локальні тиски та зсуви, що приводить до диспергування твердого матеріалу. При цьому, для забезпечення стабільності помелу, часто використовується подача гарячого повітря або технологічного газу, який не тільки транспортує подрібнений матеріал, але й здійснює попереднє підсушування при необхідності.

Ключовим елементом, який дозволяє відділити готовий продукт від незмеленого залишку, є класифікатор. У типовій схемі лінії класифікація здійснюється за допомогою повітряного сепаратора або динамічного

класифікатора, що працює у зв'язці з основним млином. Класифікатор дозволяє виводити із системи лише ті частинки, які відповідають заданому діапазону розмірів, у той час як більші повертаються в млин на повторне подрібнення. Таким чином, відбувається замкнений цикл, що підвищує ефективність використання енергії й дозволяє досягти стабільних показників дисперсності на виході.

Всі вищенаведені функціональні блоки об'єднані системою транспортування, яка забезпечує рух матеріалу між вузлами. Окрім механічних конвеєрів для подачі сировини, в сучасних лініях широке застосування знаходить пневмотранспорт, що працює за рахунок потоку повітря або технологічного газу, створеного вентиляторами або компресорами. Такий тип транспортування дозволяє скоротити кількість механічних вузлів, зменшити зношування й забезпечити гнучкість в архітектурі системи.

Особливої уваги заслуговує енергетична взаємодія між блоками. Помельна лінія функціонує на основі поєднання механічної, пневматичної та теплової енергії. Млин споживає найбільшу частку електроенергії для обертання корпусу та переміщення робочих тіл, класифікатор має власний привід для обертання ротора, а транспортні системи вимагають стабільного живлення для руху матеріалу. При цьому тепло, яке генерується внаслідок подрібнення або подається ззовні, виконує роль допоміжного енергетичного фактору, що впливає на вологість продукту та швидкість його обробки.

Узгоджена робота всіх вузлів технологічної лінії помелу досягається завдяки структурованому управлінню потоками матеріалу та енергії. Матеріальний потік, що починається з подачі клінкеру, має проходити всі етапи обробки без перерв і затримок. Для цього важливо забезпечити як стабільність подачі, так і своєчасне виведення готового продукту з циклу. При збої на будь-якому з етапів відбувається порушення всього технологічного ланцюга, що призводить до зниження продуктивності й підвищення енерговитрат. З цієї причини особливу увагу в проектуванні приділяють взаємодії між млином,

класифікатором і транспортними системами, які повинні функціонувати як єдине узгоджене середовище.

Крім основного матеріального потоку, в системі існує й циркуляція повітряного потоку. Повітря або газ виконує не тільки функцію транспортування, а й бере участь у сепарації та регулюванні температурного режиму. Для цього передбачаються газоходи, фільтраційні установки, циклони та, за потреби, теплообмінники, які забезпечують потрібний розподіл енергії та запобігають накопиченню пилу в системі. Ефективність обертання газового середовища впливає на ступінь розділення частинок у класифікаторі, що, у свою чергу, визначає якість продукту.

У сучасних промислових схемах сухого помелу особливого значення набуває гнучкість архітектури лінії. Це означає можливість змінювати технологічні режими роботи окремих блоків без повного припинення функціонування лінії. Так, за необхідності, система може адаптуватися до зміни фізико-механічних властивостей клінкеру, до коливань у вологості або до змін у вимогах до якості помелу. Для цього на кожному з етапів передбачені механізми регулювання — зміна швидкості обертання, коригування витрати повітря, зміна частоти подачі. В результаті система здатна працювати в режимі часткової або повної адаптації до зовнішніх умов.

Функціональна структура такої лінії має, окрім власне технологічних вузлів, ще й допоміжні блоки, які забезпечують її безперервну та безпечну роботу. Йдеться про системи вентиляції, аспірації, протипожежного захисту, змащення та охолодження. Вони формують технічну інфраструктуру, без якої неможливо забезпечити довготривалу й ефективну експлуатацію млина та супутнього обладнання. Зокрема, система аспірації забезпечує видалення надлишкової пилоповітряної суміші, яка утворюється в процесі подрібнення, а система охолодження — підтримку прийняттого температурного режиму для підшипників, двигунів і робочих тіл.

Особливе значення має узгодженість дій між блоками не лише з погляду фізичних потоків, а й у контексті логіки керування. Всі елементи повинні бути

об'єднані в єдину інформаційно-керуючу систему, яка дозволяє не тільки керувати технологічним процесом, але й здійснювати контроль стану обладнання, фіксувати відхилення параметрів і своєчасно вживати заходів з корекції режимів. Тільки при такому підході можливо реалізувати високопродуктивну й стабільну систему помелу, здатну забезпечити випуск цементу з заданими властивостями та в необхідному обсязі.

Таким чином, структура лінії сухого помелу цементного клінкеру формує складну, енергетично та інформаційно пов'язану систему, у якій матеріальні, теплові та повітряні потоки взаємодіють у тісному технологічному та функціональному зв'язку. Її ефективна побудова є запорукою стабільності роботи всієї цементної фабрики й визначає техніко-економічну ефективність виробництва в цілому.

2.2 Основні параметри процесу та їх вплив на якість помелу

Якість помелу цементного клінкеру визначається цілим рядом параметрів, що взаємопов'язані між собою та впливають як на технічні характеристики готового продукту, так і на стабільність самого процесу. [9-10] В технології сухого помелу розрізняють керовані та некеровані параметри, які в сукупності визначають ефективність подрібнення та рівень енерговитрат. З одного боку, на процес впливають змінні, які підлягають прямому регулюванню з боку оператора або системи автоматизації. З іншого — існують параметри, що залежать від вхідної сировини або зовнішніх умов, на які виробництво не має прямого впливу, але має з ними враховуватись при налаштуванні режимів.

До керованих параметрів насамперед належать швидкість обертання млина, витрати повітря у внутрішньому контурі, подача матеріалу на вхід млина, температура в зоні подрібнення, інтенсивність сепарації та навантаження на привід млина. Саме ці параметри дозволяють забезпечити необхідний ступінь тонкості подрібнення, уникнути перегріву та надмірного зношування обладнання, а також досягти стабільної продуктивності за мінімальних

енерговитрат. Їх регулювання зазвичай здійснюється через частотні перетворювачі, заслінки, системи дозування або автоматизовані виконавчі механізми, що інтегровані в загальну систему керування.

Швидкість обертання барабану млина безпосередньо визначає кінетичну енергію руху подрібнюючих тіл та, відповідно, інтенсивність подрібнення. При недостатній швидкості не досягається необхідний рівень ударної дії, через що знижується ефективність процесу. Надмірна швидкість, своєю чергою, може призводити до втрати подрібнюючих властивостей через утворення центробіжного режиму обертання тіл, коли вони не падають, а притискаються до стінок млина. Таким чином, існує оптимальний інтервал обертів, в межах якого забезпечується максимальна ефективність з точки зору енергоспоживання та продуктивності.

Температура всередині млина та в зоні сепарації також має суттєвий вплив на якість продукту. Підвищення температури в процесі подрібнення може бути викликане як механічною енергією тертя, так і тепловими потоками ззовні. Якщо температура перевищує критичні значення, починається агломерація частинок, зменшується дисперсність і погіршується розділення у класифікаторі. Це не тільки знижує якість продукту, а й сприяє залипанню частинок у млині, що ускладнює його роботу. Контроль температури дозволяє забезпечити стабільну в'язкість повітряного потоку, який транспортує та розділяє частинки, а також запобігає термічним деформаціям механічних елементів установки.

Наступним критично важливим параметром є витрати повітря в системі, що виконує функції охолодження, транспортування та сепарації частинок. У сучасних системах сухого помелу повітряний потік не тільки забезпечує винесення продукту з млина, але й активно впливає на процес сортування частинок за розмірами у сепараторі. Зменшення інтенсивності повітряного потоку призводить до того, що дрібні частинки не потрапляють у класифікатор, повертаючись назад у млин, тим самим підвищуючи навантаження. Надмірна подача повітря, навпаки, може спричинити виліт недостатньо подрібненого матеріалу, що знижує однорідність та якість цементу. Таким чином, баланс між

подачею повітря та швидкістю руху частинок має критичне значення для забезпечення заданої тонкості помелу.

Навантаження на млин є ще одним важливим показником, що тісно пов'язаний із масою матеріалу в барабані, ефективністю роботи приводу, вмістом подрібнюючих тіл та в'язкістю повітряного середовища. Надмірне завантаження призводить до підвищеного енергоспоживання, погіршення подрібнення та нерівномірності в роботі млина. Занадто низьке навантаження, навпаки, зменшує ефективність використання обладнання. Контроль за навантаженням дозволяє визначити оптимальний режим подачі сировини та підтримувати рівномірність процесу. У більшості сучасних систем це здійснюється на основі аналізу споживаного струму приводного двигуна або сигналів з датчиків вібрації і тиску.

В контексті якісних характеристик готового продукту, ключовими є показники тонкості подрібнення, однорідності, питомої поверхні та вмісту залишку на ситі. Всі ці характеристики прямо або опосередковано залежать від узгодженості параметрів процесу. Наприклад, оптимальний режим подачі матеріалу та його змішування з подрібнюючими тілами дозволяє уникнути локальних зон з недостатнім помелом. Регулювання швидкості сепаратора забезпечує правильне розділення фракцій. Вплив температурного режиму може позначатися на гігроскопічних властивостях продукту, що у подальшому впливає на здатність цементу до твердіння.

Необхідно зазначити, що існують також некеровані параметри, такі як мінералогічний склад клінкеру, вологість сировини, знос подрібнюючих тіл і футерування млина. Вони не підлягають безпосередньому регулюванню, однак впливають на результати процесу і повинні враховуватись при виборі режимів. Наприклад, різні типи клінкеру вимагають різного часу подрібнення через відмінності у твердій фазі та структурі зерен. Надлишкова вологість викликає агломерацію, а знос тіл змінює характер ударного впливу та розподіл енергії в об'ємі млина.

Переходячи до взаємозв'язку між параметрами, слід підкреслити, що процес помелу цементного клінкеру не є лінійним — зміна одного з режимних параметрів часто призводить до складних змін в інших змінних. Наприклад, збільшення обертів барабана млина може призвести до підвищення температури, що вимагає додаткового охолодження через повітряний контур, зміни тиску та, як наслідок, — регулювання швидкості сепаратора. В цьому контексті важливим є не просто моніторинг кожного окремого параметра, а побудова системної моделі, яка дозволяє оцінити загальний стан процесу і здійснювати компенсацію взаємопов'язаних відхилень.

В результаті можна зробити висновок, що керування параметрами процесу подрібнення повинне базуватись на глибокому розумінні фізичних і технологічних взаємозв'язків. Застосування автоматизованих систем дозволяє не тільки зменшити енергоспоживання, але й забезпечити стабільну якість продукції за мінімальних втрат ресурсу обладнання. Сучасні системи регулювання повинні враховувати як прямі вимірювання основних параметрів, так і похідні індикатори стабільності процесу, що формуються на основі математичних моделей і алгоритмів контролю.

2.3 Динамічні властивості процесу та особливості керування

Процес сухого помелу цементного клінкеру є складним багатofакторним об'єктом, який характеризується значною динамічністю, інерційністю та взаємозалежністю внутрішніх параметрів. З точки зору автоматизації, його можна розглядати як об'єкт з розподіленими параметрами, в якому фізичні процеси розвиваються у просторі та часі. Цей аспект особливо важливий при розробці моделей керування, оскільки класичні підходи, засновані на зосереджених параметрах, не завжди адекватно описують поведінку таких систем.

Однією з ключових динамічних характеристик процесу є інерційність, тобто здатність системи протидіяти змінам керуючих впливів через накопичення

енергії або маси у певних підсистемах. У випадку помелу інерційність проявляється на кількох рівнях: у накопиченні маси сировини в млині, у накопиченні тепла у металевих елементах обладнання, а також у часі реакції сепаратора та вентиляційної системи на зміни в роботі приводу. Це означає, що кожна зміна, наприклад, швидкості обертання барабана або подачі сировини, не призводить до миттєвих змін у якості помелу — існує часовий зсув між дією та реакцією системи.

Інерційність часто супроводжується ефектами запізнювання, зумовленими транспортними та технологічними затримками. Наприклад, після зміни подачі клінкеру у млин, фактичний вплив на якість помелу спостерігається лише після певного проміжку часу, необхідного для проходження матеріалу через всі стадії процесу. Такий тип запізнювання називається транспортним, і його наявність значно ускладнює побудову ефективного регулятора. Крім того, є динамічні запізнення в роботі виконавчих механізмів, зокрема при зміні частоти обертання приводів або температурних режимів вентиляційних каналів.

Іншою фундаментальною особливістю системи є наявність внутрішніх і зовнішніх зворотних зв'язків. У внутрішньому контурі це може бути зв'язок між температурою в млині та вологістю продукту, що через агрегацію частинок впливає на ефективність подрібнення. У зовнішньому — зворотний зв'язок реалізується через системи контролю якості готового цементу, які формують сигнал регуляції на основі аналізу показників тонкості чи питомої поверхні. Такі зворотні зв'язки можуть бути як жорсткими — з прямим впливом на регулятор, так і м'якими — через коригування режимів оператором або в автоматизованому режимі з певним періодом дискретності.

З формальної точки зору, процес можна описати системою диференціальних або різницевих рівнянь, які враховують енергетичні, масові та теплові баланси. Для спрощеного аналізу можна використати передавальні функції типу

$$G(s) = \frac{K}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)} e^{-\tau s}$$

де K — підсилення системи, T_1 , T_2 — постійні часу, які відображають інерційність, τ — час запізнювання. Така модель дозволяє провести попередній аналіз стабільності, чутливості та вибрати тип регулятора для системи.

Для реального процесу помелу цементного клінкеру з великою кількістю взаємопов'язаних входів і виходів більш адекватними є багатоканальні моделі типу MIMO (Multiple Input — Multiple Output). У таких моделях один параметр може впливати на кілька виходів одночасно, наприклад, швидкість обертання млина змінює як ступінь подрібнення, так і температуру в системі. У цих умовах особливо актуальним стає використання методів моделювання на основі експериментальних даних — ідентифікації об'єкта.

Застосування класичних ПІД-регуляторів у системах такого типу можливе, однак вимагає попередньої лінеаризації та ретельної настройки параметрів з урахуванням інерційності й запізнень. Часто використовують каскадні системи керування, де один контур відповідає за швидке регулювання, наприклад, температури або швидкості, а другий — за підтримку якості продукції на основі інтегральних критеріїв. Також популярними є модифікації ПІД-регуляторів із компенсацією запізнень (наприклад, за алгоритмом Smith Predictor).

Водночас із розвитком обчислювальної техніки все більшого поширення набувають адаптивні та предиктивні системи керування, які здатні враховувати змінні умови процесу. Адаптивні регулятори перебудовують свої параметри в режимі реального часу залежно від поточних характеристик об'єкта, що особливо корисно при зміні складу клінкеру або в разі зношення елементів системи. Модельно-прогнозне керування (MPC) дозволяє передбачити майбутній стан системи на основі математичної моделі й оптимізувати керуючі дії з урахуванням обмежень. Такі алгоритми краще пристосовані до складних об'єктів з багатьма змінними і динамікою з запізненням.

В сучасних умовах, коли до процесу помелу цементного клінкеру ставляться підвищені вимоги щодо енергоефективності, стабільності якості та гнучкості керування, все частіше виникає потреба у виборі більш гнучких стратегій регулювання. Це пов'язано не лише зі складністю самого об'єкта, а й

із впливом зовнішніх факторів — змінами у фізико-хімічних властивостях сировини, варіативністю режимів роботи суміжного технологічного обладнання, сезонними відмінностями температури повітря та іншими впливами.

Одним із дієвих підходів є поєднання класичних регуляторів у базових контурах зі складнішими адаптивними або інтелектуальними системами на рівні координуючого керування. Наприклад, ПІД-регулятори можуть забезпечувати підтримку стабільного тиску або швидкості обертання, а надбудова у вигляді моделі або нейромережевого предиктора — коригувати їхні завдання відповідно до змін у навантаженні або показниках якості помелу. Такий підхід дозволяє розділити систему на рівні з різною часовою чутливістю: швидкодіючі контури слугують стабілізаційним ядром, а повільні — адаптаційним механізмом.

Істотну роль у побудові ефективного керування відіграє моделювання об'єкта. Проте складність помельного процесу унеможливорює створення точної аналітичної моделі, тому практично доцільніше використовувати напівемпіричні або ідентифікаційні моделі. Вони базуються на вимірних входах і виходах системи й дозволяють оцінювати коефіцієнти передавальних функцій або структур моделей ARX/ARMAX за допомогою методів найменших квадратів. Таким чином, можна отримати моделі виду

$$y(t) = \sum_{i=1}^n a_i y(t-i) + \sum_{j=1}^m b_j u(t-j) + e(t)$$

де $y(t)$ — вихід системи (наприклад, ступінь подрібнення), $u(t)$ — керуючий вплив (наприклад, швидкість обертання), а $e(t)$ — шум вимірювання. Такі моделі дозволяють не лише прогнозувати поведінку системи, але й розраховувати оптимальні значення параметрів для заданого критерію якості.

Ще одним аспектом, який не можна ігнорувати, є можливість самонавчання системи керування. У великих виробництвах, де помел здійснюється безперервно, накопичується значний масив історичних даних про режими роботи, параметри обладнання, якість продукції та енерговитрати. Це створює умови для використання технологій машинного навчання, які можуть формувати емпіричні залежності між режимними параметрами та якісними

показниками продукту. Наявність таких моделей дозволяє не тільки передбачати результати змін у режимах, а й формувати рекомендації щодо оптимізації керування, з урахуванням заданих обмежень і цільових функцій.

Узагальнюючи, процес сухого помелу цементного клінкеру як об'єкт керування має складну динамічну структуру, що характеризується інерційністю, запізнюванням і багатоканальністю. Для ефективного автоматизованого керування необхідне поєднання класичних стабілізуючих регуляторів з адаптивними або модельно-прогнозними модулями, які враховують зміни в динаміці системи та дозволяють забезпечити сталість якості за мінливих умов. Використання математичного моделювання, систем ідентифікації та методів аналізу даних відкриває нові можливості для побудови надійних і високоефективних систем керування, що відповідають вимогам сучасного виробництва.

2.4 Засоби вимірювання та технічні засоби автоматизації

В сучасному цементному виробництві, зокрема на етапі сухого помелу клінкеру, до автоматизованої системи керування висуваються вимоги не лише щодо підтримки режимних параметрів, а й щодо оперативного реагування на динамічні зміни процесу. Для цього необхідна точна та стабільна система вимірювання, яка забезпечує безперервний моніторинг ключових параметрів, та надійна інфраструктура автоматизації, здатна реалізовувати алгоритми керування в реальному часі. Основу такої системи формують сенсорні засоби збору інформації, виконавчі механізми для безпосереднього впливу на процес, а також інтелектуальні програмно-апаратні комплекси, які координують роботу обладнання.

Процес помелу цементного клінкеру супроводжується перетвореннями енергії та рухом значних обсягів маси, тому вимірювання температури, тиску, навантаження та концентрацій твердих частинок мають вирішальне значення для забезпечення якості продукції та безпеки експлуатації. Температура в зоні

помелу може суттєво впливати на гідратаційні властивості цементу, тому контроль її змін забезпечується за допомогою термопар типу К або платинових термометрів опору, встановлених у ключових точках — на вході сировини, у зоні подрібнення та на виході з циклону або сепаратора. Подібно, тиск у повітропроводах або пневмотранспортних лініях контролюється сенсорами з диференціальним або статичним вимірюванням, що дозволяє виявляти засмічення або зміни у витраті газу.

Ще одним критичним параметром є навантаження на млини, яке тісно пов'язане з рівнем заповнення барабана, кількістю завантаженої сировини та потужністю, споживаною приводом. Контроль цього показника можливий завдяки використанню тензометричних давачів або електричних вимірювань моменту на валу електродвигуна. Сучасні млини також можуть оснащуватись датчиками вібрації, що дозволяє не тільки оцінювати ефективність подрібнення, а й діагностувати зношування футеровки, підшипників або ротуючих елементів.

Важливою складовою автоматизації є контроль якості помелу. Пряме вимірювання ступеня подрібнення в потоці — складне завдання, однак з розвитком технологій з'явилися оптичні та лазерні системи, здатні аналізувати фракційний склад матеріалу на основі розсіювання або проходження світла. Такі рішення дозволяють впроваджувати зворотний зв'язок від якості без необхідності лабораторного відбору проб, що особливо цінно при безперервному виробництві. Додатково, з метою забезпечення стабільності складу суміші, застосовуються гамма- або рентгено-флуоресцентні аналізатори, здатні оперативно визначати вміст оксидів кальцію, кремнію, алюмінію та інших елементів у сировині.

Технічне керування процесом реалізується за допомогою програмованих логічних контролерів (ПЛК), які виконують роль локальних інтелектуальних вузлів. ПЛК забезпечують стійку та надійну роботу навіть в умовах запиленості, вібрацій та температурних коливань, властивих цементним цехам. Типова структура включає центральний контролер, модулі збору аналогових та дискретних сигналів, а також засоби зв'язку з вищими рівнями керування. У

реальному часі ПЛК здійснює опитування сенсорів, виконує алгоритми керування (зазвичай у вигляді ПІ або ПІД-регуляторів), формує керуючі сигнали для виконавчих механізмів — наприклад, зміни частоти обертання млина або відкривання шиберів.

Централізоване моніторингове і диспетчерське керування здійснюється за допомогою SCADA-систем, що реалізують візуалізацію, зберігання історичних даних, аварійне протоколювання та інтерфейс для оператора. Такі системи дозволяють одночасно керувати кількома технологічними ділянками, виявляти аномалії, прогнозувати несправності та аналізувати ефективність роботи агрегатів. У системах нового покоління SCADA доповнюються модулями віртуальних датчиків, які прогнозують невимірювані параметри на основі моделей і машинного навчання.

Особливу увагу в автоматизації процесу помелу слід приділяти частотним перетворювачам, які керують електроприводами млинів, вентиляторів, транспортерів. Вони забезпечують плавне регулювання швидкості обертання, захист від перевантажень і високий коефіцієнт корисної дії. Їх використання дозволяє зменшити витрати електроенергії, адаптувати роботу обладнання до змін навантаження та забезпечити точну відповідність технологічним вимогам. Частотне керування також відіграє ключову роль у стабілізації повітряного потоку, що визначає якість класифікації частинок і відбір готового продукту.

Загалом, система автоматизації сухого помелу цементного клінкеру є складним багаторівневим комплексом, що поєднує фізичні вимірювання, електромеханічні впливи та логіко-аналітичне керування. Її ефективність залежить від надійності сенсорного обладнання, правильності побудови алгоритмів у ПЛК, здатності системи SCADA до своєчасного аналізу подій, а також гнучкості виконавчих елементів. У наступному розділі буде розглянуто конкретний підбір технічних засобів автоматизації, що найкраще відповідають вимогам до керування процесом помелу.

Окрім традиційних SCADA-систем, у сучасному виробництві дедалі частіше застосовуються розподілені системи керування (DCS), які інтегрують

ПЛК, інтелектуальні сенсори й локальні вузли керування в єдину мережу з централізованим аналізом і децентралізованим виконанням. Такий підхід особливо актуальний для великих цементних комбінатів, де процес помелу є лише частиною загальної виробничої лінії, що включає сушіння, випалювання, охолодження та пакування. Застосування DCS дозволяє забезпечити повну узгодженість процесів, знизити час реакції на збої, оптимізувати витрати енергії та збільшити ефективність усієї технологічної системи.

Інтеграція систем керування із зовнішніми діагностичними платформами також набирає популярності. Наприклад, до SCADA-систем можуть підключатись модулі вібраційного моніторингу стану опор млина, аналізу споживаної електроенергії або термографічного контролю. Це дозволяє не лише виявляти потенційні несправності, а й прогнозувати терміни зношування механічних компонентів, планувати профілактичне обслуговування без зупинки виробництва. Такий підхід є основою концепції Predictive Maintenance (прогнозного обслуговування), яка витісняє традиційний регламентний підхід.

У сфері автоматизації помелу відзначається тенденція до застосування цифрових двійників — віртуальних моделей млина та прилеглих систем, які працюють паралельно з реальним об'єктом і дозволяють перевіряти нові режими, передбачати наслідки змін у параметрах та знаходити оптимальні точки керування. Цифровий двійник може базуватись на фізико-математичних моделях, зібраних даних з сенсорів, або комбінувати обидва підходи, що особливо корисно в умовах неповної інформації.

У цьому контексті вагоме місце посідають системи промислового Інтернету речей (IIoT), які об'єднують всі сенсори, приводи, контролери та аналітичні модулі у спільне цифрове середовище. За допомогою протоколів OPC UA, MQTT або Modbus TCP забезпечується прозорий обмін даними між вузлами незалежно від виробника обладнання. Це дає змогу гнучко масштабувати систему, додавати нові модулі автоматизації без втручання в основну архітектуру й оперативно адаптувати її до змін у технологічному процесі.

Завдяки ПоТ з'являється можливість виведення оперативної інформації з виробничих ліній у хмарні сервіси для віддаленого моніторингу, оптимізації та ухвалення рішень. Це особливо актуально для керівників змін, інженерів з автоматизації та сервісних служб. Поряд із цим застосування машинного навчання на основі накопичених даних дозволяє будувати моделі прогнозування енергоспоживання, зношування елементів або змін якості сировини, що покращує адаптивність автоматизованих систем.

У межах самих виконавчих механізмів активно впроваджуються приводи з вбудованими датчиками, контролем позиції, температури обмоток, самодіагностикою й навіть базовою логікою керування. Вони дозволяють частково перенести функціональність на рівень приводів, зменшуючи навантаження на ПЛК і підвищуючи надійність у випадку втрати зв'язку з центральною системою.

Важливо також зазначити, що в умовах цементного виробництва автоматизовані системи повинні відповідати підвищеним вимогам до захисту від агресивного середовища — пилу, вологи, високих температур і механічних навантажень. У зв'язку з цим компоненти автоматизації — зокрема сенсори, розподільні шафи, модулі ПЛК — зазвичай мають ступінь захисту не нижче IP65, а електричні з'єднання виконуються з урахуванням вимог до промислової електробезпеки.

Таким чином, засоби вимірювання та автоматизації в системі сухого помелу цементного клінкеру формують багаторівневу структуру з високим ступенем інтеграції. Вони забезпечують стабільну, ефективну та гнучку роботу технологічного процесу, дозволяючи оперативно реагувати на зовнішні й внутрішні збурення. Розвиток цифрових технологій, ПоТ, віртуальних моделей та машинного навчання відкриває нові горизонти для вдосконалення систем керування, перетворюючи помел з традиційного виробничого етапу на об'єкт інтелектуального оптимізованого управління, що відповідає принципам Індустрії 4.0.

РОЗДІЛ 3

РОЗРАХУНКИ ТА ВИБІР ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ

3.1 Ідентифікація об'єкта автоматизації

Під ідентифікацією динамічних об'єктів розуміють процедуру визначення структури і параметрів їх математичних моделей, які при одному і тому ж вхідному сигналі об'єкта і моделі забезпечують близькість виходу моделі до виходу об'єкта при наявності деякого критерію якості.

Візьмемо вхідні дані (вони мають приблизно по 2 тис. значень відповідно вхідного та вихідного параметрів з інтервалом дискретизації $t_s=3$ с) та завантажимо їх в робочу область MATLAB командою `loaddata`. Після виконання команди в робочій області з'явиться масив вхідних змінних u і масив вихідних параметрів y , що показано на рис.3.1.

 u	2000x1	16000	double array
 y	2000x1	16000	double array

Рисунок 3.1 - Масив вхідних даних

Обираємо з цього масиву 100 значень. Інтервал дискретизації вказуємо окремо:

```
>> ts=3
```

```
>> dan41=iddata(y(401:500),u(401:500),ts)
```

Для наочності сформованого файлу необхідно ввести в його структуру позначення вхідних і вихідних даних:

```
>> set(dan41, 'InputName', 'Тонкість клінкеру', 'OutputName', 'Охолодження клінкеру')
```

Для графічного представлення (рис.3.2) даних використовується команда:

```
>> plot(dan41)
```

Для подальшого використання даних необхідно попередньо обробити їх, щоб видалити тренд з набору даних і, якщо необхідно, відфільтрувати дані за

допомогою доступних інструментів у System Identification Toolbox. Ці операції будуть виконуватися в графічному інтерфейсі System Identification Toolbox, який запускається з командного рядка командою `ident`. Потім імпортуємо файл даних у середовище інтерфейсу за допомогою команди `data – import` (рис. 3.3).

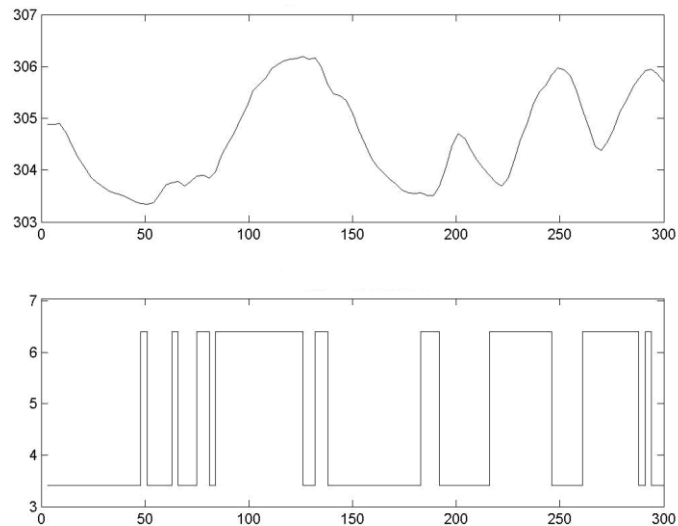


Рисунок 3.2 - Графічне представлення даних

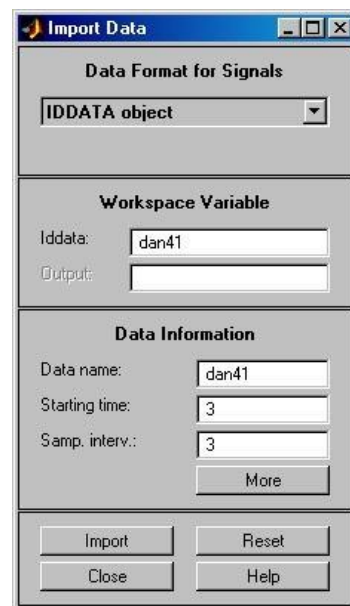


Рисунок 3.3 - Імпорт даних

Запустимо режим швидкого старту, вибравши Quick Start у випадяючому меню Operations. При виборі цього режиму виконується наступне:

- видалення тренду з експериментального набору даних.
- створення усічених наборів даних з іменами dande і dandv для побудови моделей.

Після того, як дані будуть попередньо оброблені, можна приступати до оцінки моделі.

У запропонованому списку Estimate вибираємо Parametric models, цей вибір відкриє діалогове вікно для налаштування структури моделі. Отримати параметричні моделі із запропонованого переліку (ARX, ARMAX, OE, BJ, State Space), оцінка проводиться натисканням кнопки Estimate. Є можливість змінити параметри моделі в редакторі замовлень.

Скористаємося значеннями за замовчуванням, за винятком ARX та State Space, для яких виберемо параметри кнопкою Order Selection (рис. 3.4).

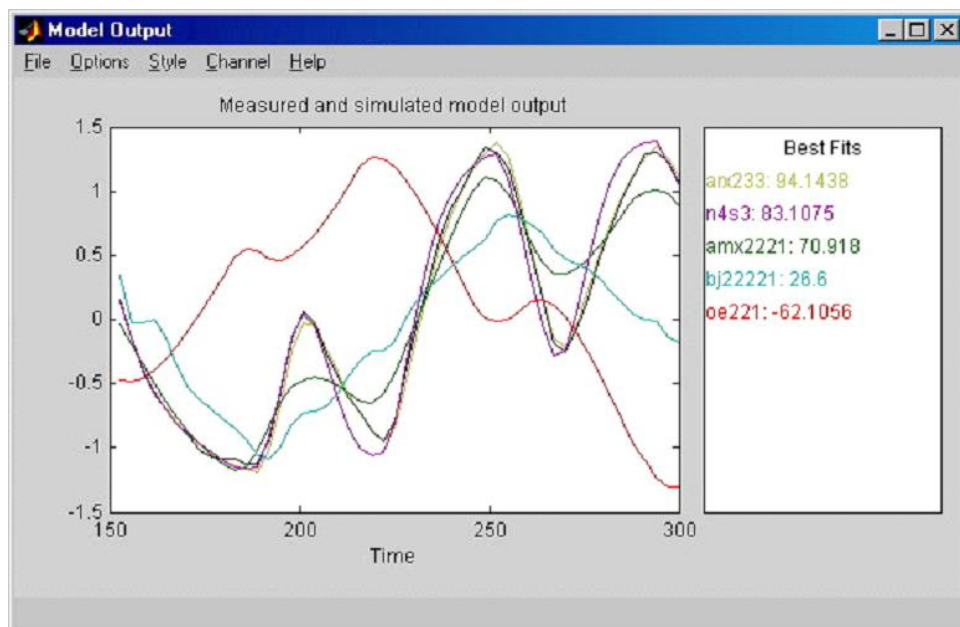


Рисунок 3.4 - Вибір моделі

Для аналізу моделей будемо використовувати System Identification Toolbox: Model output, Transient resp, Frequency resp. Візьмемо модель arx233, перетягнувши її на іконку To Workspace, і модель arx233 з'явиться в робочій області MATLAB.

Отримані моделі представлені в так званому тета-форматі і є дискретними. System Identification Toolbox має спеціальні функції для перетворення моделі з тета-формату в придатну для використання.

Перетворимо модель тета-формату багатовимірного об'єкта в вектор передавальних функцій, пов'язаних з обраним входом:

```
>> [A, B] = th2arx (arx233)
```

```
A =
```

```
1.0000 -1.2514 0.3763
```

```
B =
```

```
Columns 1 through 3
```

```
0 0 0
```

```
Columns 4 through 6
```

```
0.0600 0.0487 0.0125
```

```
>> [num,den]=th2tf(arx233)
```

```
num =
```

```
Columns 1 through 3
```

```
0 0 0
```

```
Columns 4 through 6
```

```
0.0600 0.0487 0.0125
```

```
den =
```

```
Columns 1 through 3
```

```
1.0000 -1.2514 0.3763
```

```
Columns 4 through 6
```

```
0 0 0
```

де num, den - відповідно, чисельник і знаменник дискретної передавальної функції. Отримуємо дискретну передавальну функцію:

```
>> zarx233 = tf(num, den, ts)
```

Transfer function:

$$0.05999 z^2 + 0.04869 z + 0.01253$$

$$z^5 - 1.251 z^4 + 0.3763 z^3$$

Sampling time: 3

Перетворимо дискретну модель в безперервну і представимо її у вигляді передавальної функції:

```
>> sarx233 = thd2thc (arx233)
```

Continuous-time IDPOLY model: $A(s) y(t) = B(s) u(t) + C(s) e(t)$

$$A(s) = s^3 + 12.4 s^2 + 3.955 s + 0.2669$$

$$B(s) = 0.3928 s^2 - 0.1036 s + 0.2589$$

$$C(s) = s^3 + 12.8 s^2 + 8.952 s + 2.136$$

```
>> [num1, den1] = th2tf (sarx233)
```

num1 =

Columns 1 through 3

$$0 \quad 0.3928 \quad -0.1036$$

Column 4

$$0.2589$$

den1 =

Columns 1 through 3

$$1.0000 \quad 12.3970 \quad 3.9546$$

Column 4

$$0.2669$$

```
>> sysarx233 = tf (num1, den1)
```

Transfer function:

$$0.3928 s^2 - 0.1036 s + 0.2589$$

$$s^3 + 12.4 s^2 + 3.955 s + 0.2669$$

Ці передавальні функції являють собою одну і ту ж модель, записану в різних формах і форматах.

Проаналізуємо динамічні характеристики моделі (рис. 3.5), для чого скористаємося командою `step(sysarx233)`.

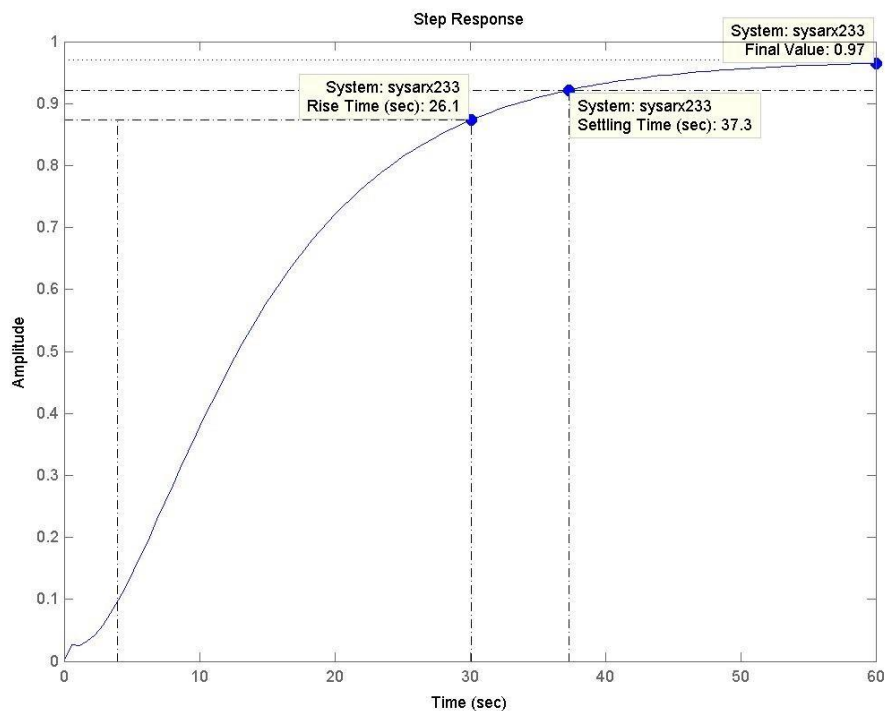


Рисунок 3.5 - Динамічні характеристики моделі

Поле графіка показує основні характеристики перехідного процесу: час наростання, час управління, стійке значення вихідної координати.

Для побудови імпульсної характеристики моделі використовується команда `impulse(sysarx233)` - рис.3.6. Визначимо частотні характеристики моделі за допомогою команди `bode(sysarx233)` - рис. 3.7.

Значення запасу стабільності також можна визначити в режимі командного рядка MATLAB за допомогою команди:

```
>> [Gm, Pm, Wcg, Wcp] = margin (sysarx233)
```

```
Gm = 34.7465
```

```
Pm = Inf
```

$$W_{cg} = 0.5964$$

$$W_{cp} = \text{NaN}$$

де G_m – запас стійкості амплітуди в натуральних значеннях на частоті W_{cg} , P_m – запас стійкості по фазі на частоті W_{cp} .

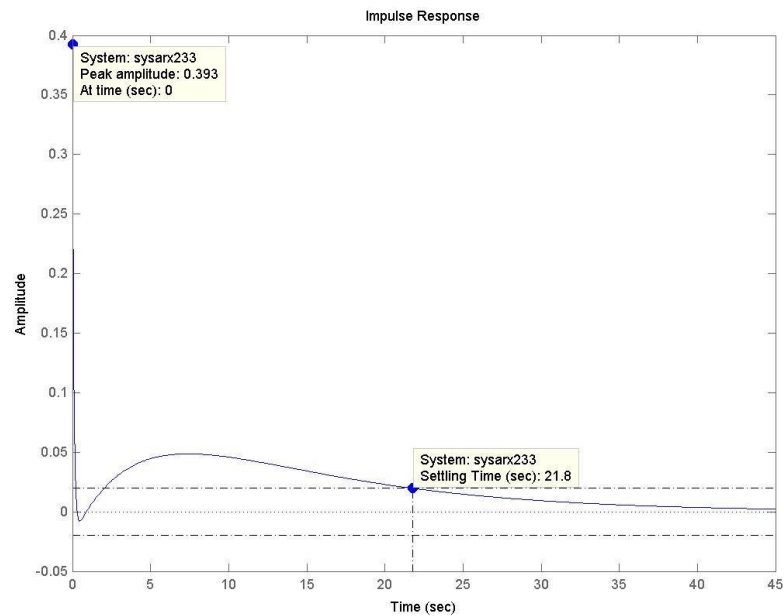


Рисунок 3.6 - Імпульсні характеристики моделі

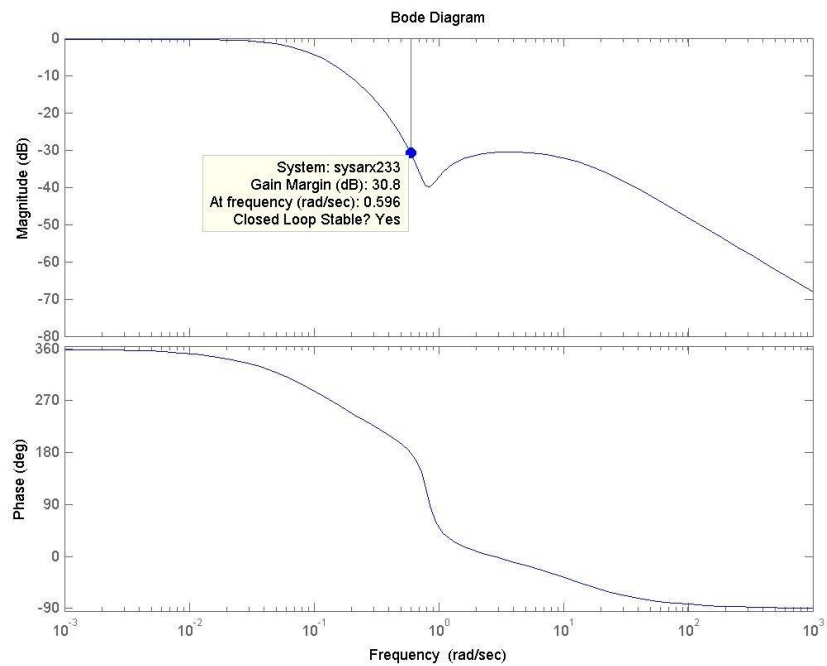


Рисунок 3.7 - Частотні характеристики моделі

Також можна подивитись годограф Найквіста `nyquist(sysarx233)` - рис.3.8.

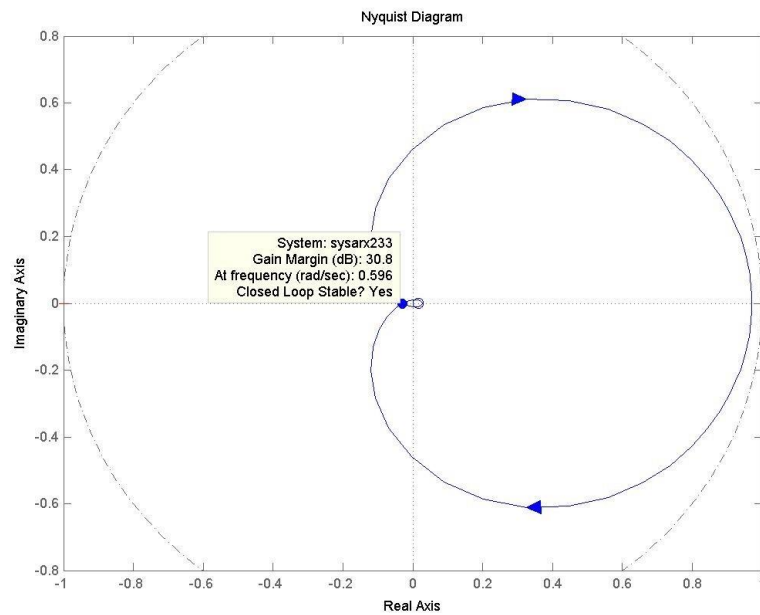


Рисунок 3.8 - Годограф Найквіста (АФЧХ)

Для визначення запасів стійкості за логарифмічною шкалою необхідно виконати наступні операції:

```
>> Gmlog=20*log10(Gm)
```

```
Gmlog = 30.8182
```

Як видно, визначення резервів стійкості останнім методом дає можливість розрахувати ці значення набагато точніше, ніж на графіках частотних характеристик. Аналіз частотних характеристик показує, що моделі `arx233` стабільні з відповідними амплітудними запасами. Запас стійкості по фазі дорівнює нескінченності. Побудуємо систему автоматичного регулювання.

3.2 Моделювання та вибір параметрів регулятора

Виходячи із заданих значень функцій передачі, побудуємо схему системи автоматичного управління подачею клінкеру в Simulink (рис.3.9). Враховуємо, що нам відомі передавальні функції ланок: датчика - $W_d = 0.4$, робочого органу - $W_{po} = 0.3 / (0.55p+1)$, виконавчого механізму $W_{im} = 10 / (0.15p+1)$.

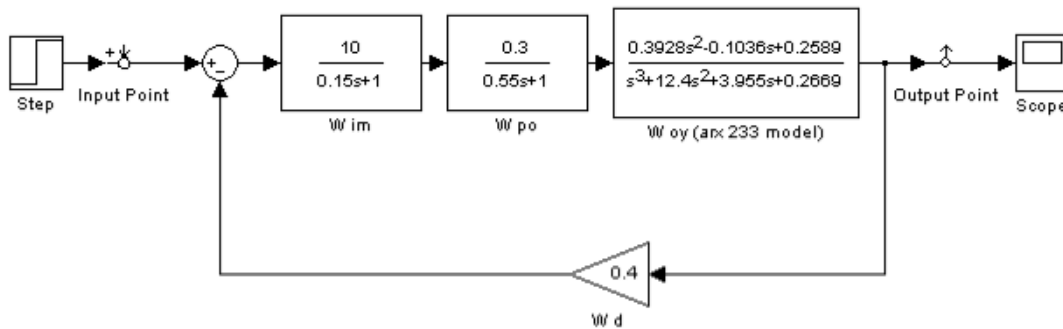


Рисунок 3.9 - Схема САР сухого помелу цементного клінкеру

За допомогою ЛТІ побудуємо перехідну характеристику САР для сухого подрібнення цементного клінкеру в трубчастому кульовому млині (рис.3.10).

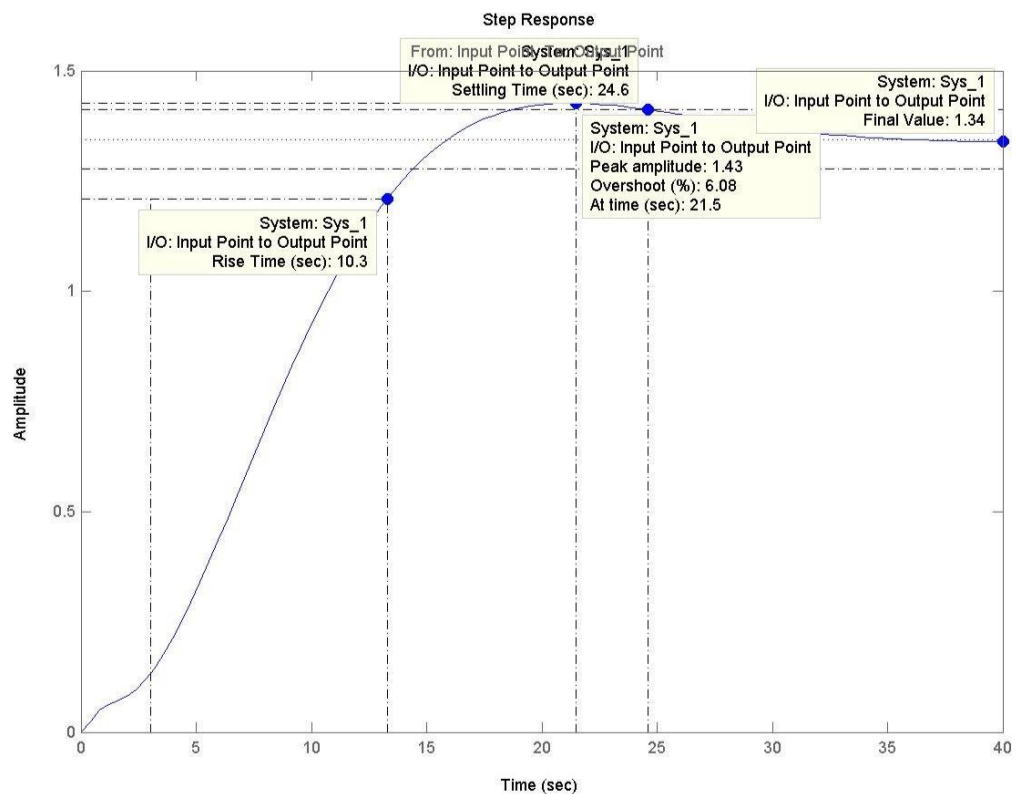


Рисунок 3.10 - Перехідна характеристика

Виходячи з виду перехідної характеристики, можна сказати, що наявні показники якості не відповідають зазначеним:

- час регулювання становить 24.6 с;
- стаціонарне значення – 1.34 ;
- час зростання – 10.3 с;

- статична похибка – 0,66.

При цьому задані показники якості та резерви стійкості наступні:

- час регулювання ≤ 50 с ;
- статична похибка $\leq 0,05$;
- перерегулювання ≤ 10 % ;
- час зростання ≤ 15 с ;
- стабільність амплітуди ≥ 10 дБ
- стабільність по фазі від 30 до 100 градусів.

Розімкнемо систему і побудуємо логарифмічну амплітудну характеристику (ЛАХ) і логарифмічну частотну характеристику (ЛФХ) Ці характеристики наведені на рис. 3.11.

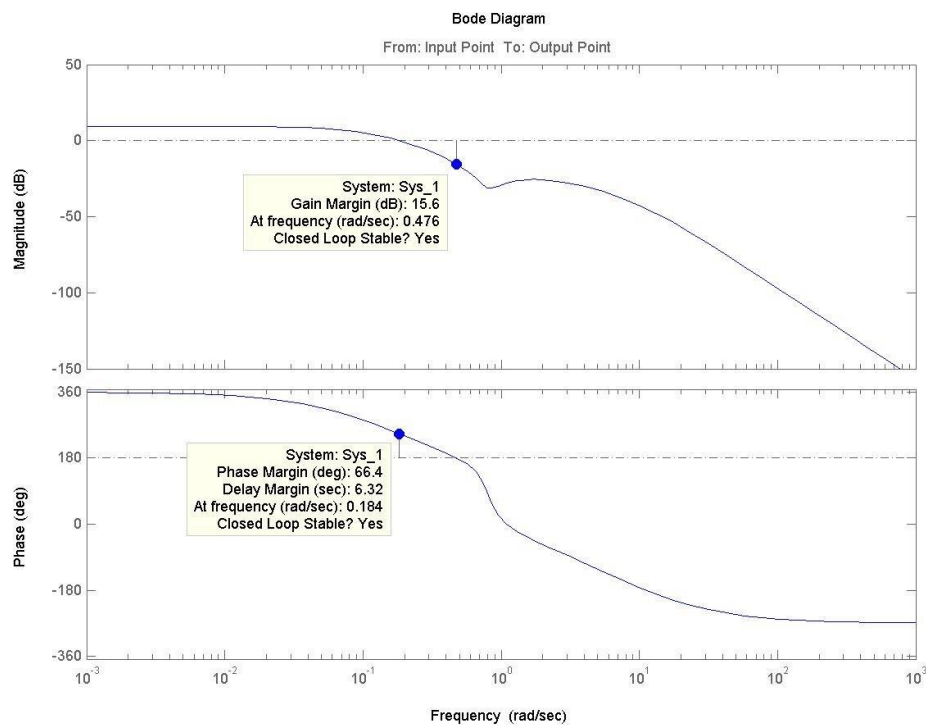


Рисунок 3.11 - Логарифмічні амплітудна та фазова характеристики САР

Також побудуємо амплітудно-фазову характеристику (АФХ) або діаграму Найквіста (рис. 3.12).

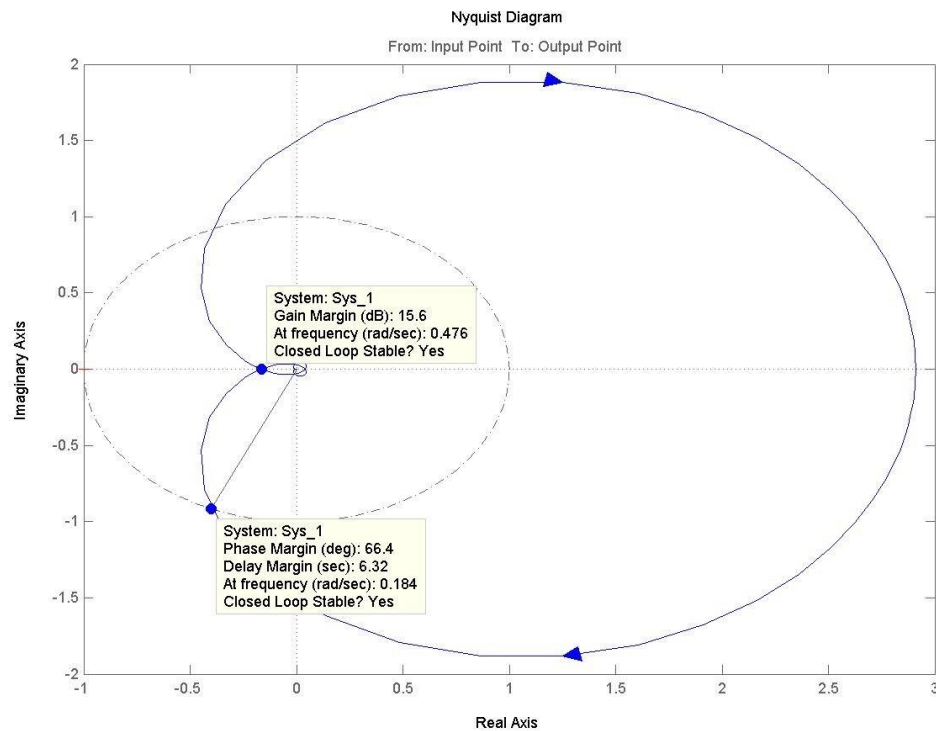


Рисунок 3.12 - Амплітудно-фазова характеристика САР

З зовнішнього вигляду перехідного процесу зрозуміло, що для забезпечення заданих показників якості і точності перехідного процесу необхідно ввести в систему лінійний регулятор. Обов'язковою умовою надійної стабільної роботи автоматизованої системи управління є правильний вибір типу регулятора і його налаштувань, що гарантує необхідну якість регулювання.

Залежно від властивостей об'єкту управління, що визначаються його передавальною функцією і параметрами, і передбачуваного типу перехідного процесу вибирається тип і установка лінійних регуляторів. Основні області застосування лінійних регуляторів визначаються з урахуванням наступних рекомендацій:

- I – регулятор зі статичним ОР – при повільній зміні збурень і малому часі затримки ($\tau/T < 0,1$);
- II – регулятор зі статичним і нестатичним ОР – при будь-якому часі інерції і затримки, що визначається співвідношенням $\tau/T < 0,1$;
- III – регулятор – при будь-якій інерції і часі затримки ОР визначається співвідношенням $\tau/T < 1$;

- ПІД-регулятори за умови $\tau/T < 1$ і малого коливання початкових процесів.

Виходячи з наведених вище рекомендацій і враховуючи, що тип перехідної характеристики нагадує аперіодичний процес, можна побачити, що дана система підходить для П-регулятора з передавальною функцією $W_{\text{reg}(p)} = K_p$. Отримуємо наступний вид САР (рис. 3.13):

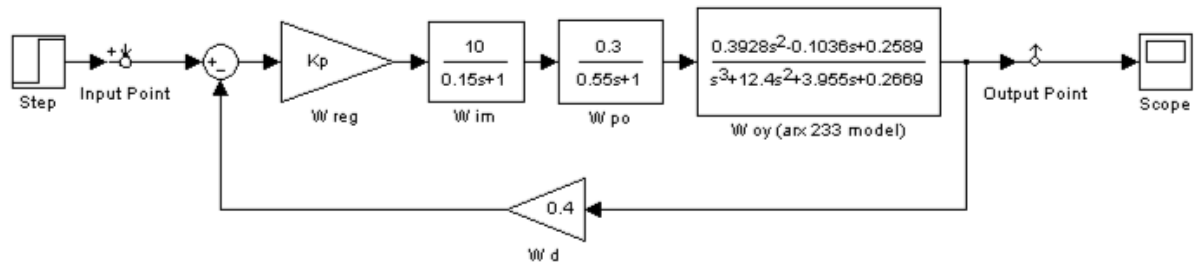


Рисунок 3.13 - Система автоматичного регулювання с П-регулятором

3.3 Оптимізація параметрів налаштувань П-регулятора

Для оптимізації параметрів регулятора вологості ми будемо використовувати пакет прикладних програм Nonlinear Control Design (NCD) Blockset для систем управління побудовою, в якому реалізований метод динамічної оптимізації (рис. 3.14). Цей інструмент являє собою набір блоків, призначених для використання з Simulink, який автоматично налаштовує параметри симульованих систем на основі визначених користувачем часових обмежень. Типова сесія в середовищі Simulink з використанням можливостей та блоків NCD Blockset складається з ряду етапів:

- початковий етап - створення моделі досліджуваної системи з будівельних блоків;
- потім вхід NCD Outport підключається до системних сигналів, які обмежені (такими сигналами можуть бути, наприклад, системні виходи, їх стандартні відхилення і т.д.);
- потім в режимі командного рядка MATLAB встановлюємо початкові значення параметрів, які потрібно оптимізувати;

- подвійним кліком по іконці NCD Outport цей блок розгортається;
- в меню блоку NCD Outport можна вказати інтервал дискретизації (один або два відсотки від тривалості процесу моделювання) і вказати назви (ідентифікатори) параметрів системи, що підлягають оптимізації;
- процес оптимізації системи ініціюється натисканням кнопки Start.

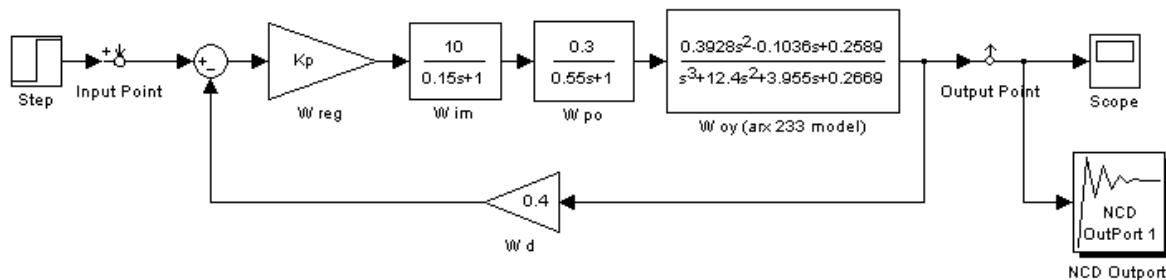


Рисунок 3.14 - Схема САР для визначення оптимальних параметрів налаштувань П-регулятора

На рис. 3.15 та 3.16 показані вигляд вікон налаштувань та NCD Outport процес оптимізації параметрів регулятора.

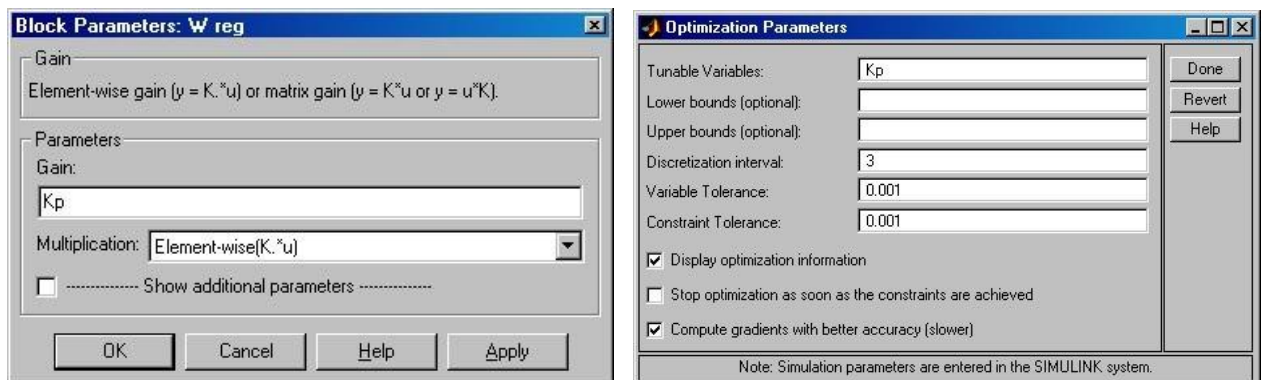


Рисунок 3.15 - Вікна налаштувань П-регулятора та NCD Outport

В кінці роботи NCD Outport у вікні команд MATLAB можна отримати оптимізовані значення коефіцієнтів П-регулятора, але переміщаючи мишкою червоні лінії (перехідні обмеження), можна отримати безліч різних значень K_p , з

яких вибирається найкраще, виходячи з пріоритетності перехідних характеристик.

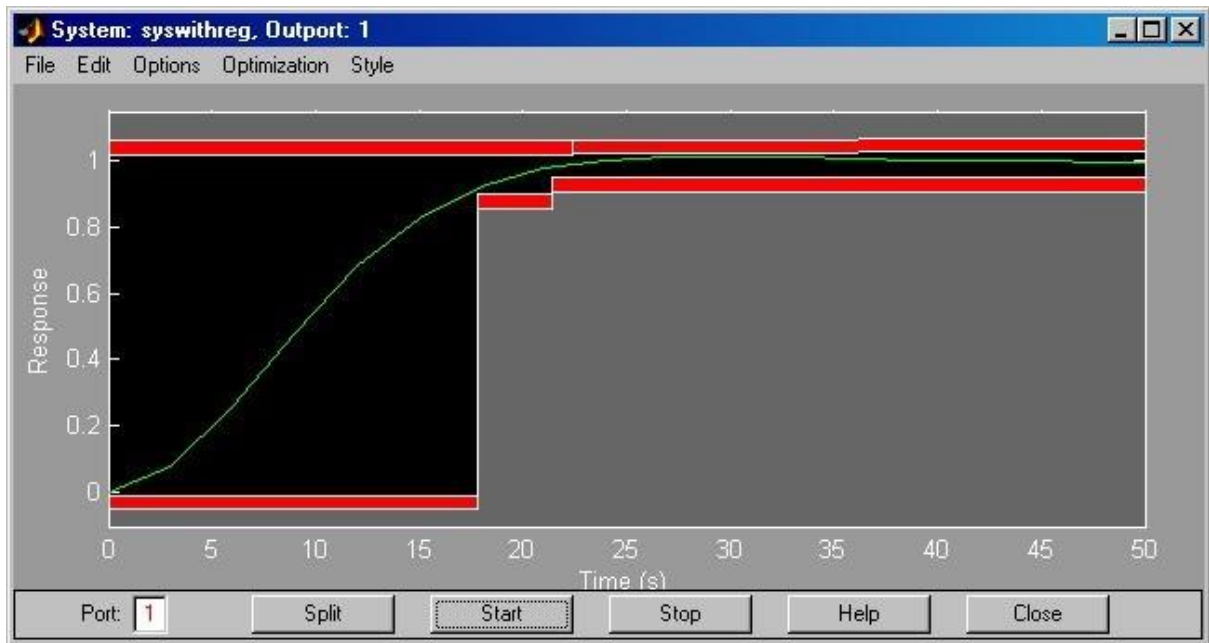


Рисунок 3.16 - NCD Outport процес оптимізації параметрів регулятора

У нашому випадку кращим буде $K_p = 0.575$ (рис. 3.17).

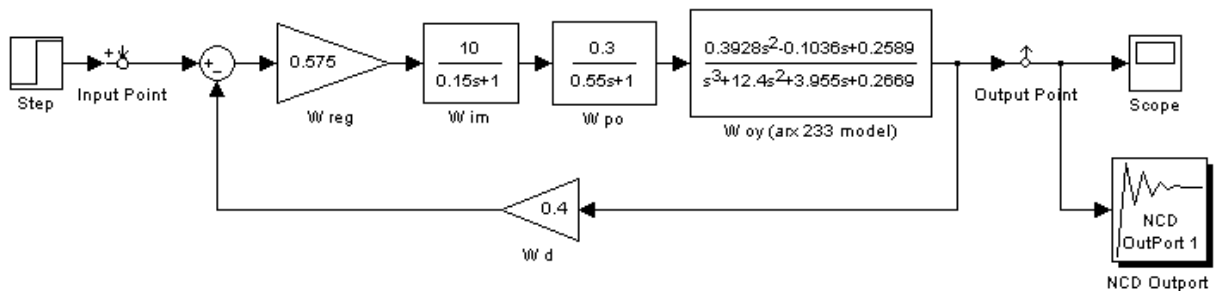


Рисунок 3.17 - САР з визначеними параметрами регулятора

3.4 Аналіз стабільності та якості системи управління

Побудуємо перехідну характеристику системи управління з визначеним параметром регулятора. Це наведено на рис. 3.18.

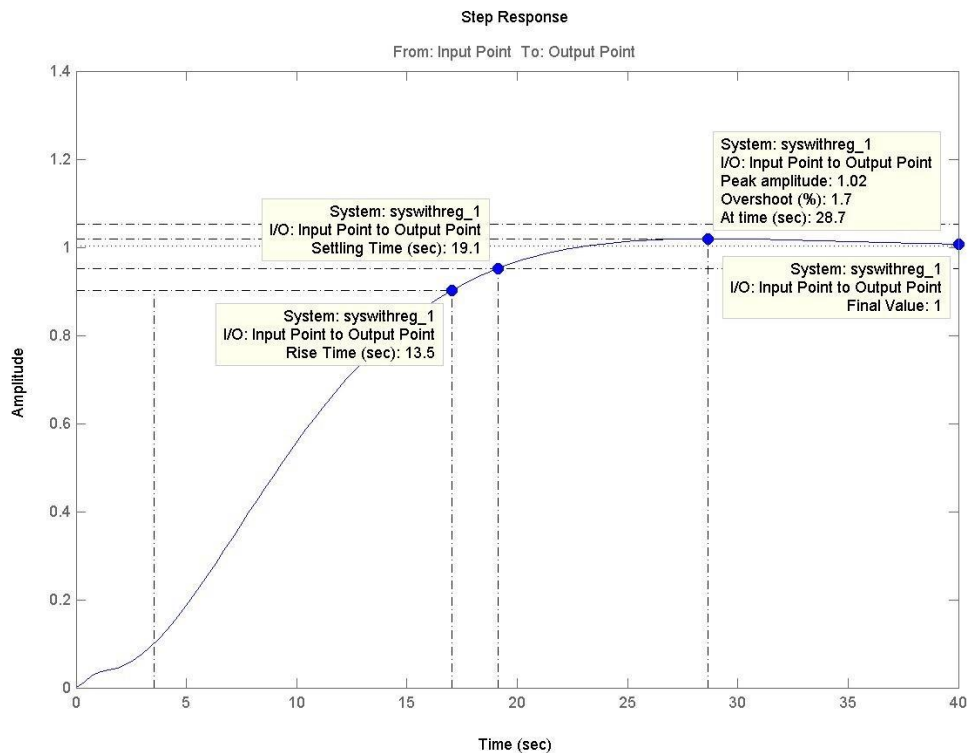


Рисунок 3.18 - Перехідна характеристика САР з оптимізованим П-регулятором

По вигляду перехідної характеристики можна визначити якісні показники перехідного процесу:

- час регулювання становить 19.1 с;
- стаціонарне значення – 1 ;
- час зростання – 13.5 с;
- статична похибка – 0 ;
- перерегулювання - 1.7 %

Для отримання логарифмічних амплітудних і фазових характеристик для визначення запасів стійкості і амплітуди і фази необхідно розімкнути систему (рис. 3.19). ЛАХ та ЛФХ наведено на рис. 3.20.

З рисунка ЛАХ і ЛФХ ми бачимо: запас по амплітуді – 20.4 дБ; запас по фазі – 100 градусів. Це означає, що виконуємо вимоги по створенню стійкої САР. Крім того, побудуємо також АФХ, щоб впевнитись в правильності розрахунків. Вона показана на рис. 3.21.

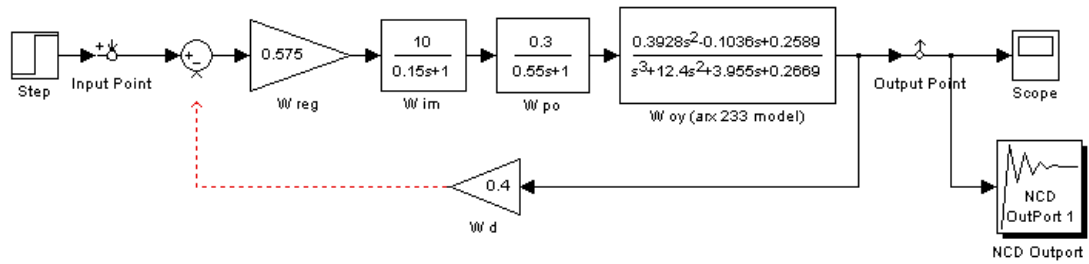


Рисунок 3.19 - Розімкнена система САР

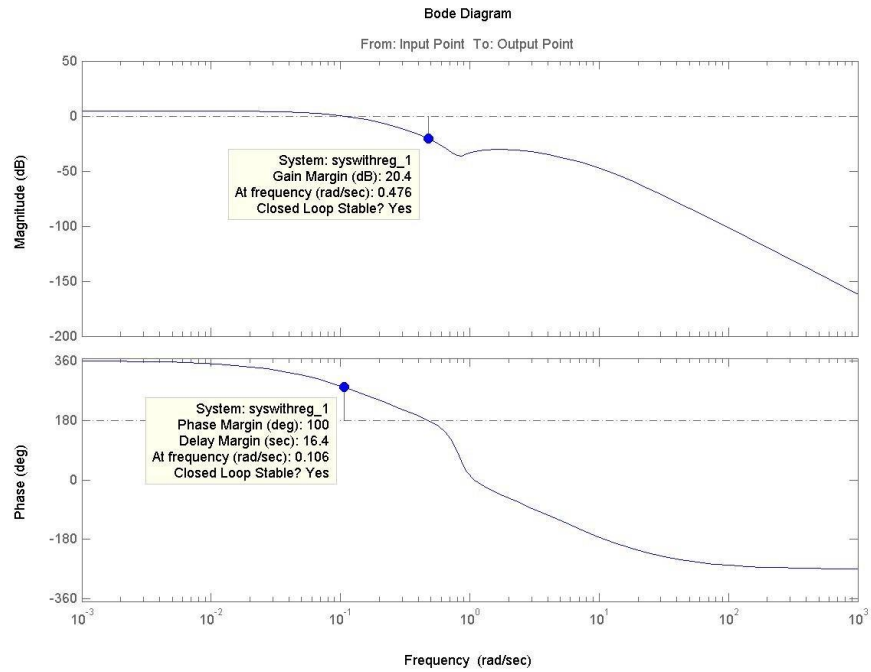


Рисунок 3.20 - ЛАХ і ЛФХ системи автоматичного регулювання

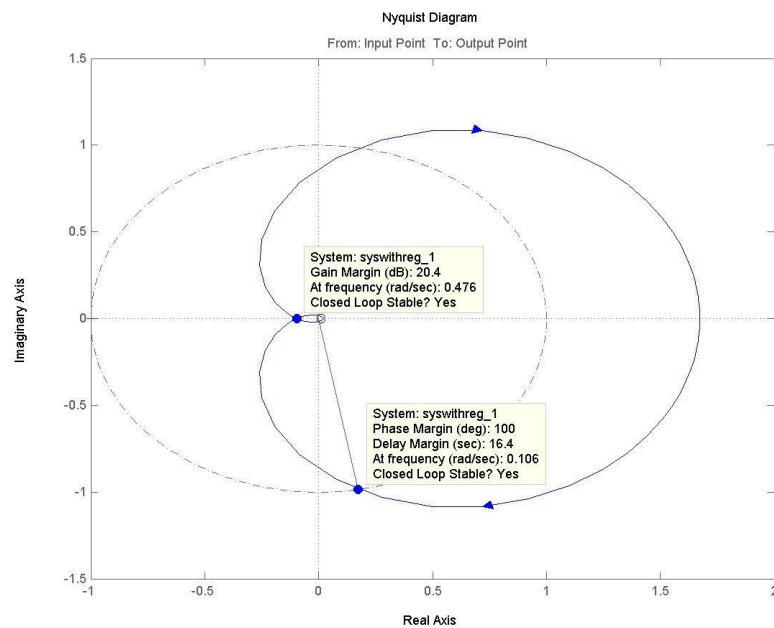


Рисунок 3.21 - АФХ системи автоматичного регулювання

На діаграмі Найквіста можна побачити точку $(-1; 0)$, яка пов'язана з критерієм стійкості, бачимо також резерви стійкості, як і у випадку з ЛАХ і ЛФХ.

3.5 Вибір технічних засобів реалізації системи

Серцем зворотного контуру САР має бути результативний прилад, що вимірює розмір частинок у процесі. Вважаємо, що найкращим технічним рішенням є лазерний аналізатор Sympatec MYTOS-TWISTER-in-line - система для безперервного вимірювання діапазону частинок $0.25\text{--}1750\text{ }\mu\text{m}$, інтегрується у трубопровідний потік із масовим обігом до 100 т/год. (рис. 3.22) Модулі TWISTER і RODOS забезпечують репрезентативне відбирання проби та її дисперсію. Інтерфейс: TCP/IP, OPC, Profibus, Modbus. Прилад застосовується у промислових сухих млинах, включно з цементною галуззю. [11]



Рисунок 3.22 - Інлайн-аналізатор розмірів частинок (гранулометрія)

Цей сенсор забезпечує пряме вимірювання вхідної змінної САР та дозволяє фіксувати затримку і динамічну реакцію системи, згадану в передаваннях.

Для відстеження струму на двигуні млина потрібен датчик струму, який буде давати зворотній зв'язок по навантаженню. Обираючи датчик струму, слід віддавати перевагу моделям із підтримкою True-RMS та виходом $4\text{--}20\text{ mA}$ для інтеграції з ПЛК. Конкретна і надійна модель LEM DHR 100 C420 — Open-loop Hall датчик, максимально до 100 A RMS (600 A імпульсного струму), вихід 4--

20 mA, пропускна здатність до 6 kHz, час реакції ≈ 150 мс - рис.3.23. Може монтуватися у промисловій шафі, із захистом до $-40...+70$ °C . [12]



Рисунок 3.23 - Датчик струму LEM DHR 100 C420

Таке рішення дозволяє точно фіксувати електричне навантаження двигуна кулькового млина, спростити коригування вхідної величини CAP та контролювати надмірне навантаження.

В якості виконавчого механізму виступає частотний перетворювач. Для невеликих навантажень може підійти INVT GD200A — універсальний VFD, потужністю від 0.75 до 55 кВт (для систем середнього масштабу) - рис. 3.24. Підтримує векторне керування, PID-регуляції, швидкий відгук ($Torque \leq 20$ ms), підтримується керування через цифрові інтерфейси. [13]



Рисунок 3.24 - Перетворювач частоти INVT GD200-004G/5R5P 4 кВт

Для великих приводів можливий перехід на Schneider Altivar ATV610 (75–500 кВт, рис. 3.25) - потужний та інтенсивний, з розширеними функціями діагностики і синхронної роботи на великих індуктивностях. [14]



Рисунок 3.25 - Перетворювач частоти Schneider Electric ATV610D75N4, 75 кВт

Ці VFD забезпечать точне, плавне і програмно доступне управління обертами млина в межах роботи САР.

Для реалізації контуру САР доцільно обрати Siemens SIMATIC S7-1200 - компактний ПЛК із можливістю PID-регулювання в реальному часі, підтримкою PROFINET, Ethernet/IP, RFID/NFC, вбудованими цифровими та аналоговими модулями. (рис.3.26) Завдяки TIA Portal дозволяє інтегрувати SCADA/HMI, здійснювати мережевий обмін даними й вести системний моніторинг. [15]



Рисунок 3.26 - Програмований логічний контролер Siemens SIMATIC S7-1200

Розширювальні модулі SM 1233 забезпечують під'єднання аналогових 4–20 мА сигналів від датчиків (гранулометр + струмовий), циркуляцію PID, контролюють VFD через цифрові виходи або Ethernet. Ця конфігурація забезпечує контроль основних часових постійних системи: швидкі зміни через VFD, середні - через навантаження і інерційну характеристику млина, і повільні - за рахунок гранулярного відповідного контролю.

Система легко масштабується: VFD для більшої потужності, розширення входів ПЛК, інтеграція SCADA. Компоненти широко представлені на ринку: Mytos, LEM, INVT, Siemens забезпечують підтримку, документацію, сервіси. Такий підбір технічних засобів реалізує концепцію інтелектуального помелу на базі структури CAP і повністю відповідає вимогам завдання.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

Забезпечення безпечних умов праці на підприємствах, пов'язаних із роботою тунельних печей, має надзвичайно важливе значення для збереження здоров'я працівників та стабільної роботи технологічних процесів. Особливості роботи із високотемпературним обладнанням обумовлюють підвищений рівень ризику, що вимагає впровадження системних заходів безпеки на всіх етапах виробництва. Важливою складовою є створення надійного температурного контролю, що дозволяє уникнути перегрівів та аварійних ситуацій, які можуть спричинити шкоду персоналу чи обладнанню.

У тунельних печах температура всередині камери досягає значних значень, тому безпечна експлуатація передбачає не тільки правильну організацію роботи обладнання, а й належну підготовку операторів. Вони повинні бути обізнані щодо небезпек, що виникають під час випалювання матеріалів, та методів мінімізації ризиків. Особливу увагу приділяють забезпеченню працівників засобами індивідуального захисту, такими як вогнетривкий одяг, захисні рукавиці, взуття та окуляри, здатні витримувати високі температури. Крім того, необхідна відповідна вентиляція робочої зони для видалення продуктів згоряння та забезпечення комфортного мікроклімату.

Згідно з вимогами охорони праці, приміщення, де встановлено тунельну піч, повинно бути обладнане системами пожежогасіння та аварійного відключення живлення. Своєчасне технічне обслуговування вузлів системи є обов'язковим для запобігання несправностям, які можуть призвести до надзвичайних ситуацій. Системи автоматичного контролю температури та сигналізації перевищення граничних значень мають бути інтегрованими у процес керування та відповідати сучасним стандартам безпеки.

Робочі процеси в зоні печей супроводжуються також фізичними навантаженнями, тому організація режиму праці й відпочинку, забезпечення

правильних інструктажів та контроль за дотриманням технологічної дисципліни є необхідними умовами підтримання нормальної працездатності персоналу. Особи, які працюють з печами, проходять обов'язковий медичний огляд та інструктажі з охорони праці перед допуском до виконання робіт.

Окрему увагу приділяють електробезпеці, оскільки системи автоматизації та електричні приводи в складі тунельної печі працюють під напругою. Усі електротехнічні пристрої повинні мати заземлення відповідно до вимог нормативних документів. Регулярна перевірка стану ізоляції, правильність підключення та справність автоматичних вимикачів є обов'язковими умовами безпечної експлуатації електричних мереж. Працівники, допущені до обслуговування електрообладнання, повинні мати відповідну кваліфікаційну групу з електробезпеки та проходити періодичне навчання.

Ще одним суттєвим аспектом є захист від механічних травм під час обслуговування приводних механізмів печі. Редуктори, клапани й двигуни повинні бути оснащені захисними кожухами та мати обмежений доступ сторонніх осіб. Під час проведення ремонтних чи налагоджувальних робіт необхідно застосовувати блокування електроживлення, щоб уникнути випадкового ввімкнення обладнання.

Для охорони навколишнього середовища треба зменшувати негативний вплив технологічного процесу на довкілля. Робота тунельних печей супроводжується викидом тепла, газів та пилу, тому потрібно впроваджувати системи очищення вихідних газів та мінімізувати втрати теплової енергії. Використання сучасних методів теплоізоляції та рекуперації тепла сприяє підвищенню енергоефективності процесу та знижує викиди в атмосферу.

Організація регулярного екологічного моніторингу, контроль за якістю повітря в робочій зоні та впровадження заходів енергоощадності стають важливими частинами екологічної політики підприємства. Усі заходи з охорони праці та захисту навколишнього середовища повинні бути закріплені в нормативно-технічній документації підприємства та регулярно переглядатися з урахуванням змін у законодавстві та розвитку технологій.

Забезпечення пожежної безпеки є ще одним важливим аспектом під час експлуатації тунельних печей та їхніх систем автоматизації. Враховуючи високі температури технологічного процесу та можливість накопичення горючих матеріалів у зоні печі, необхідно передбачити систему автоматичного пожежогасіння або, принаймні, оснащення робочої зони достатньою кількістю первинних засобів пожежогасіння. Всі працівники повинні бути ознайомлені з інструкціями з пожежної безпеки, проходити регулярні навчання щодо дій у випадку виникнення пожежі, а евакуаційні виходи повинні бути вільними і чітко позначеними.

Вентиляція робочої зони має забезпечувати ефективне видалення продуктів горіння та зниження концентрації шкідливих газів. Наявність локальних витяжних систем поблизу джерел тепла та відкрити нагрівальні поверхні допомагає підтримувати безпечний мікроклімат у робочому просторі. Температура в приміщенні повинна регулюватися таким чином, щоб уникати перегріву повітря і забезпечувати комфортні умови праці для персоналу.

Організація робочого місця повинна відповідати ергономічним вимогам, щоб знизити ризик виникнення професійних захворювань. Оператори, які працюють з автоматизованими системами керування, повинні мати достатню візуальну інформацію про стан об'єкта та зручний доступ до засобів управління. Робочі поверхні, пульти управління та екрани необхідно розташовувати на висоті, що відповідає фізіологічним параметрам працівників.

Таким чином, комплексна система заходів з охорони праці та навколишнього середовища в процесі експлуатації САР тунельної печі має будуватися на принципах безперервного вдосконалення, навчання персоналу, впровадження сучасних технологій захисту та постійного моніторингу виробничого середовища. Лише за таких умов можна досягти високого рівня безпеки праці, зменшити вплив на навколишнє середовище і підвищити загальну ефективність виробничого процесу.

РОЗДІЛ 5

ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

Впровадження автоматизованої системи регулювання процесу сухого помелу цементного клінкеру в умовах сучасного виробництва має не лише технологічну доцільність, але й чітко виражену економічну вигоду.

Основу економічного ефекту становлять кілька ключових чинників: зниження питомих енергетичних витрат, підвищення стабільності якості продукту, зменшення відходів, продовження ресурсу обладнання та скорочення простоїв унаслідок людського фактору.

Оцінювання економічної доцільності автоматизації повинно базуватися на реальних параметрах роботи млина до й після впровадження системи регулювання.

Передусім, помел цементного клінкеру — це один з найбільш енерговитратніших етапів усього виробничого процесу.

В середньому на подрібнення 1 тонни клінкеру витрачається від 25 до 35 кВт·год електроенергії залежно від типу млина, режиму його роботи та параметрів сировини.

Історично багато підприємств працюють у фіксованих режимах, де млин обертається з постійною швидкістю, незалежно від змін у властивостях матеріалу чи ступені завантаження.

В результаті це веде до перевитрати енергії, неефективного використання потужностей та зниження якості продукту через недостатній або надмірний помел.

В запропонованій системі автоматизації реалізовано зворотний зв'язок на основі безперервного контролю зернистості та навантаження електропривода. Керування здійснюється через частотний перетворювач, що дає змогу динамічно

змінювати швидкість обертання барабана млина залежно від поточного стану об'єкта.

Після впровадження системи, згідно з даними, отриманими з подібних виробництв, енергоспоживання на одиницю продукції може бути знижене на 8–12 %.

В наших умовах, враховуючи середню витрату 30 кВт·год/т, це еквівалентно економії 2.4–3.6 кВт·год на кожну тону.

При середній ціні електроенергії для промислових підприємств на рівні 4.32 грн/кВт·год, маємо економію приблизно 12–16 грн/т.

За обсягу виробництва в 150 000 тонн на рік це становить до 2.4 млн грн щорічної економії лише за рахунок електроенергії.

Іншим важливим джерелом економічного ефекту є стабілізація якості помелу, що безпосередньо впливає на витрати в подальших технологічних ланцюгах, особливо у випадку виготовлення цементу з високими показниками однорідності.

Система автоматизації дозволяє уникати ситуацій, коли продукція не відповідає стандарту через недопомел або пересушування матеріалу.

Це знижує потребу у рециркуляції або додатковому повторному подрібненні, що також економить енергію та зменшує знос обладнання. Наприклад, скорочення рециркуляції на 5 % при тому ж обсязі продукції може означати до 5–6 тис. тонн зайвої обробки щороку, що дає економію ще ≈ 600 –800 тис. грн на рік.

Зменшення механічного навантаження на обладнання внаслідок адаптивного регулювання також дозволяє продовжити термін служби основних вузлів кулькового млина, особливо підшипникових опор, футерування та привідної системи.

Це не тільки знижує частоту та вартість ремонтів, але й зменшує тривалість вимушених простоїв.

Навіть часткове скорочення аварійних зупинок — на 2–3 % робочого часу — дає змогу щороку виробляти додатково 2–4 тис. тонн продукції, що при

ринковій вартості цементу близько 2500 грн/т еквівалентно до 5–10 млн грн виручки.

Капітальні витрати на впровадження системи автоматизації, включаючи обладнання (аналізатор, датчики, частотний перетворювач, ПЛК), монтаж та налаштування, становлять орієнтовно 1.5–2.0 млн грн.

Таким чином, уже в перший рік експлуатації інвестиції повністю окупаються за рахунок енергетичної та експлуатаційної економії.

Подальші роки приносять чистий прибуток без додаткових витрат, оскільки елементи системи мають ресурс 5–10 років при мінімальному обслуговуванні.

Узагальнюючи, можна стверджувати, що автоматизація процесу сухого помелу цементного клінкеру не лише технологічно виправдана, але й економічно високоефективна.

Її реалізація дозволяє досягнути зниження енерговитрат, стабільності якості продукції, підвищення ресурсу обладнання та загального економічного зростання підприємства.

В сучасних умовах високих цін на енергію та конкуренції на ринку цементу така модернізація є одним із найраціональніших напрямів розвитку.

ВИСНОВКИ

В ході виконання кваліфікаційної роботи розроблена система автоматизованого управління технологічним процесом сухого помелу цементного клінкеру. Виконані такі задачі:

1. Проведено аналіз предметної області та з'ясовано технологію помелу цементу з клінкеру та розглянуті основні типи млинів.
2. На основі даних з відкритих джерел зроблена ідентифікація складного об'єкта та визначена модель, яка найбільш відповідає наявним даним. Крім того, проведено попереднє моделювання системи автоматичного регулювання, яке виявило необхідність застосування П-регулятора.
3. Проведено визначення параметрів П-регулятора, досліджена поведінка системи з регулятором та її стійкість. Отримані результати свідчать, що характеристики системи задовільняють наявним вимогам.
4. Запропоновані технічні засоби автоматизації, завдяки яким може бути побудована реальна система автоматичного регулювання.
5. Розроблені міри по охороні праці та навколишнього середовища, а також здійснений розрахунок економічної ефективності системи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Цемент. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Цемент>.
2. Матеріали та технологія виробництва цементу. URL: <https://centrcement.com.ua/materiali-ta-tehnologiya-virobnictva-cementu/>.
3. Цемент: виробництво, характеристики, марки, види, властивості, типи URL: <https://ektabud.in.ua/cement-vyrobnytvo-harakterystyky-marky-vydy.html>.
4. Кульовий млин з центральним розвантаженням. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Кульовий_млин_з_центральним_розвантаженням.
5. Що таке кульовий млин. URL: <https://ua.planetary-mill.com/info/what-is-a-ball-mill-machine-95088723.html>.
6. Конспект лекцій до розділу «Механічні процеси» з курсу — Процеси та апарати хімічних виробництв» для студентів III-IV курсів механічних спеціальностей / Укл. С.О. Опарін. — Дніпропетровськ: ДВНЗ УДХТУ, 2012. — 112 с. URL: https://udhtu.edu.ua/wp-content/uploads/2017/08/Paht_2729.pdf
7. Тертишний О.О., Опарін С.О., Рябік П.В. Механічні процеси в хімічній технології. — Дніпропетровськ: ДВНЗ УДХТУ, 2015. — 215 с.
8. Виробництво цементу сухим способом. URL: <https://pp-budpostach.com.ua/ua/a118334-proizvodstvo-tsementa-suhim.html>.
9. Які існують основні показники якості цементів? URL: <https://chemtech-bayern.com.ua/uk/statti/168>.
10. Помел клінкеру під час виробництва цементу. URL: <https://energosteel.com/uk/pomel-klinkeru-pid-chas-virobnictva-cementu/>
11. In-line Configuration Mytos Twister. URL: <https://www.sympatec.com/en/particle-measurement/sensors/laser-diffraction/mytos/mytos-twister-in-line>
12. DHR 100 C420. URL: <https://www.lem.com/en/product-list/dhr-100-c420>
13. Перетворювач частоти INVT GD200-004G / 5R5P-4. URL: <https://220volt.com.ua/ua/preobrazovatel-chastoti-invt-gd200-004g-5r5p-4/>
14. ATV610D75N4, перетворювач частоти 75 кВт 3ф 380В Altivar 610 Schneider Electric. URL: <https://europromtrading.com.ua/ATV610D75N4>

15. SIMATIC S7-1200 - гнучке рішення Ваших завдань. URL:
<https://www.siemens.com/ua/uk/produkty/avtomatyzatsiya-promyslovosti/systemy-avtomatyzatsiyi/systemy-promyslovoyi-avtomatyzatsiyi-simatic/plc-kontrolery-simatic/simatic-s7-1200.html>