

Міністерство освіти і науки України
Сумський державний університет
Кафедра комп'ютерних наук
Секція комп'ютеризованих систем управління

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри КН

_____ А. С. Довбиш

“ ____ “ _____ 2020 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

зі спеціальності 151- Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології на тему:
" Оптимізація параметрів керування процесом помелу компонентів цементу"

Керівник роботи

к.ф.-м.н., доцент

Соколов С.В.

Дипломник

студент гр. СУ.м-91

Сотников С.О.

Суми – 2020

Сумський державний університет

(назва вузу)

Факультет _____ ЕЛІТ _____ Кафедра Комп'ютерних наук

Спеціальність «Комп'ютеризовані системи управління та робототехніка»

Затверджую:

зав.кафедрою _____

» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

СОТНИКОВУ СЕРГІЮ ОЛЕКСАНДРОВИЧУ

(прізвище, ім'я по батькові)

1. Тема наукової роботи: Оптимізація параметрів керування процесом помелу компонентів цементу затверджую наказом по інституту від «25» листопада 2020р. № 1820-III
2. Термін здачі студентом закінченого наукової роботи «16» грудня 2020р.
3. Вхідні дані до наукової роботи: звіт з переддипломної практики, наукові публікації, статті, технічна документація та перелік літературних джерел з матеріалами опису технологічного процесу відповідної установки.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки: : аналіз загальних відомостей про помел цементу; сформульовані критерії керування об'єктом; розроблена імітаційна модель для отримання кращих показників та підвищення енергоефективності в процесі аспірації цементу та рівнем завантаження млина, побудована сиситема керування процесом помелу.

5. Календарний план досліджень

Номер етапу	Зміст етапу досліджень	Термін виконання (початок - кінець)
1	Аналіз завдання кафедри. Складання ТЗ. Підбір та аналіз літератури	
2	Розгляд загальних технологічних питань	
3	Опанувати засоби оптимізації та моделювання, розробку критерія керування	
4	Розроблення пояснювальної записки	
5	Розробка імітаційної моделі в середовищі MATLAB	
6	Побудова системи керування процесом помелу	
7	Технічне оформлення проекту. Здавання проекту керівнику	

Студент – дипломник

(підпис)

Керівник наукової роботи

(підпис)

Міністерство освіти і науки України
Сумський державний університет
Факультет електроніки та інформаційних технологій
Кафедра комп'ютерних наук
Секція комп'ютеризованих систем управління

Пояснювальна записка
до магістерської роботи

Керівник роботи:
к.ф.-м.н., доцент
Соколов С.В

Виконав студент гр. СУ.м-91
Сотников С.О

Суми – 2020

РЕФЕРАТ

Сотников Сергей Александрович. Оптимізація параметрів керування процесом помелу компонентів цементу. Магістерська робота. Сумський державний університет. Суми, 2020. Система керування процесом помелу розроблена на базі контролера ОВЕН ПЛК 160. Проект містить 51 сторінку, 37 рисунків. При виконанні дипломного проекту було використано 19 літературних джерел.

Розглянуті завдання, видані на практику. У пояснювальній записці приведена опис процесу помелу цементу, параметри що впливають на отримання продукції високої якості, імітаційна модель процесу, здійснено ідентифікацію параметрів регулювання, показана неефективність ПІД-регулятора і переваги екстремального регулятора, розроблена імітаційна модель роботи та побудована система керування процесом помелу.

Ключові слова : керування рівнем завантаження млина, керування аспірацією, математичне та імітаційне моделювання.

ABSTRACT

Sotnikov Sergey Alexandrovich. Optimization of control parameters of the process of grinding cement components. Master thesis. Sumy State University. Sumy, 2020. The grinding process control system is developed on the basis of the ARIES PLC 160 controller. The project contains 51 pages, 37 figures. In performing the qualifying work was used 19 literature sources.

Tasks issued for practice are considered. The explanatory note describes the cement grinding process, the parameters that affect the production of high quality products, simulation model of the process, identifies the control parameters, shows the inefficiency of the PID controller and the advantages of the extreme controller, developed a mathematical model and built a process control system grind.

Key words: mill loading level control, aspiration control, mathematical and simulation modeling.

ЗМІСТ

Перелік скорочень та умовних позначень	7
Вступ	8
1. Функціональні завдання керування процесом виробництва цементу	9
1.1. Фактори зниження енергоємності процесу.	9
1.2. Аналіз параметрів якості цементу.	11
1.3 Розгляд каналів керування	16
2. Формування критеріїв керування об'єктом	21
2.1 Завдання керування	21
2.2 Ідентифікація параметрів об'єкту керування	25
3. Розробка імітаційної моделі об'єкту	32
3.1. Моделювання керування рівнем завантаження млина	33
3.2. Моделювання керування аспірацією	42
4. Побудова системи керування процесом помелу	47
Висновки	55
Список літератури	

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ККД - Коефіцієнт корисної дії

ПЧ - Перетворювач частоти

КМ-Кульовий млин

МК- Мікроконтролер

ПЛК- Програмований логічний контролер

ПК- Персональний комп'ютер

АД-Асинхронний двигун;

БО- Блок обробки;

БП- Блок корекції ;

ОК- Об'єкт керування;

ПЗ- Програмне забезпечення;

ВСТУП

Актуальність: відповідно до запитів інтенсифікації розвитку економіки та промисловості йде зростання виробництва цементу. Воно визначається активністю суспільного будівництва та збільшенням або зменшенням інвестицій в інфраструктуру будівельної галузі. Капіталовкладення у виробництво цементу спрямовуються на здешевлення компонентів цементу, зниження енергоємності виробництва та автоматизацію як окремих ділянок, так і заводів в цілому.

Проблема дослідження: згідно із тенденціями розвитку цементної промисловості, спрямованими на підвищення загальної ефективності виробництва, ця промисловість все ж постійно збільшує загальне споживання енергії. Витрати енергії пов'язані із збільшенням об'ємів виробництва, виконанням вимог по захисту навколишнього середовища, підвищенням вимог до якості цементу.

Мета дослідження: визначити оптимальні, за критерієм перерегулювання та часом перехідного процесу, параметри керування процесом помелу компонентів цементу.

Об'єкт дослідження: процес помелу компонентів цементу.

Предмет дослідження: система керування процесом помелу компонентів цементу.

Завдання дослідження:

1. Провести вибір критеріїв оцінки якості процесу помелу та методів його автоматизації.
2. Розробити імітаційну модель процесу помелу, як об'єкта керування.
3. Розробити структуру системи керування процесу помелу.

Теоретичну значимість з імітаційного моделювання було виявлено, що для об'єктів із запізненням у часі та значними сталими часу, яким є процес мелення, звичайні ПДД –регулятори неефективні. Значні переваги дає використання екстремального регулятора, який налаштовується на оптимум завантаження по похідним витрат продукту.

Практична цінність: підвищення якості продукту помелу та енергоефективності об'єкту

1 ФУНКЦІОНАЛЬНІ ЗАВДАННЯ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ВИРОБНИЦТВА ЦЕМЕНТУ

1.1 Фактори зниження енергоємності процесу

Виробництво цементу здійснюється шляхом виконання двох етапів:

- отримання клінкеру;
- переробка клінкеру до дрібнофракційного стану з додаванням до суміші гіпсу або інших спеціальних добавок.

Згідно із тенденціями розвитку цементної промисловості, спрямованими на підвищення загальної ефективності виробництва, ця промисловість все ж постійно збільшує загальне споживання енергії. Витрати енергії пов'язані із збільшенням об'ємів виробництва, виконанням вимог по захисту навколишнього середовища, підвищенням вимог до якості цементу, використанням альтернативних джерел енергії [1].

Структура складових споживання загальної енергії цементного виробництва представлена на рис. 1.



Рисунок 1 – Структура споживання енергії устаткуванням цементного виробництва

Найбільш вагомим устаткуванням цементного виробництва є піч для випалу клінкеру, яка обертається в процесі випалювання. Тим не менш, об'єм енергії, що споживається піччю в виробничому циклі, складає 25%.

Значно більший об'єм енергії у сукупності споживає процес фінішного помелу. У розрахунках показано [1], що на виробництво тони цементу витрачається 40% від усієї енергії. Ці витрати пов'язані не тільки з енергією, що споживається електроприводом млинів, але й із витратами на тертя у подрібнювальному середовищі. Зазначені витрати залежать від ступеня подрібнення сировини на попередньому етапі технологічного процесу.

Сировина, що переробляється для виробництва цементу, істотно відрізняється не тільки фізико-технічними параметрами –міцність, вологість. Навіть в межах одного родовища спостерігається різниця за складом одного зразка матеріалу. Тому для отримання фінішної суміші однорідного стану використовуються технології, що передбачають корекцію режимів для кожного виду сировини. В той час, коли кожний режим характеризується певними енергетичними витратами, мінімізувати ці витрати одночасно для всіх компонентів цементної суміші проблематично. Це в першу чергу стосується операцій подрібнення і перемішування. З цієї причини в цементному виробництві використовується три способи виробництва цементу: мокрий, сухий та комбінований.

Мокрий спосіб передбачає використання водного середовища для тонкого подрібнення сировини до отримання водної суспензії - шламу, що має вологість 30 ... 50%.

Для реалізації сухого способу сировинну шихту перед помелом або в процесі мелення висушують, отримуючи дрібно помелений сухий порошок. В результаті на випал клінкеру надходить порошкоподібна суха суміш.

Комбінований спосіб є сполученням мокрого та сухого способу приготування шихти. Якщо технологія базується на мокрому способі, то шлам зневоднюється за допомогою фільтрів до вологості 16 – 18%, щоб надалі видати суміш на випал до випалювальної печі. Альтернативний варіант передбачає використання сухого способу із наступним гранулюванням до розміру 10 – 15 мм.

Вибір технологічної схеми, послідовності операцій та обладнання визначається властивостями сировини- твердість, вологість, однорідність.

Виходячи із загальних світових тенденцій по економії енергетичних ресурсів при виготовленні цементу, можна констатувати, що мокрий спосіб виробництва цементу

не має перспективи. Тому, незважаючи на певні переваги технології мокрого способу у порівнянні з сухим, подальше нарощування потужностей цього способу в наш час зупинилося.

При переробці по сухому способу сировинних компонентів підвищеної твердості і помірної вологості висока твердість матеріалів, що подрібнюються вимагає їх попереднього дроблення. Чим тонше роздроблене сировину, тим менше витрата енергії на його помел. Подрібнення матеріалів може проводитися в млинах при вологості не більше 1%. У видобутку така сировина практично не зустрічається, тому доводиться застосовувати технологічну операцію – сушіння. Ця операція зазвичай поєднується з операцією помелу компонентів, що входять до складу цементу. Перемішування компонентів та тонке подрібнення до тонко дисперсного порошку здійснюється у кульовому трубному млині.

Коригування складу порошкової суміші до заданих параметрів та гомогенізація суміші здійснюється у залізобетонних силосах за допомогою стиснутого повітря. Після гомогенізації проходить випал сировини- спочатку в запічних теплообмінниках, де інтенсивно нагрівається в підвішеному стані. Процес випалу завершується у печі, що обертається. Завдяки використанню розплаву в печі формуються кулясті зерна клінкера.

Намагання зекономити паливо приводять до спроб збільшення об'ємів переробки вологої сировини в кульових трубних млинах, які використовуються при сухому способі виробництва. Неефективність такого підходу змусила проводити попереднє подрібнення матеріалів підвищеної вологості до 25%. Для реалізації сухого способу використовуються млини самоподрібнювання- типу «Аерофол». Проте, при цьому способі сировина повністю висушуватися не встигає. Тому використовується друга стадія подрібнення в кульовому млині. Для цього одночасно з остаточним подрібненням великих частинок і отриманням однорідної сировинної суміші здійснюється її досушка.

Підсумовуючи переваги сухого способу виробництва цементу, можна стверджувати, що використання печей відповідної потужності дозволяє знизити витрати палива приблизно вдвічі, зменшити собівартості продукції на 10% та скоротити капіталовкладення при будівництві заводів на 50%.

Проте, слід враховувати, що приготування компонентів порошкової суміші ускладнює технологічну схему і збільшує кількість обладнання. При сухому способі ускладнюється забезпечення охорони навколишнього середовища, підвищуються трудові витрати.

Разом з тим можливості застосування сухого способу обмежуються вологістю сировини, що переробляється. Переробка сировини з вологістю більше 20 – 25% за сухим способом вимагає відповідних витрат теплоти на сушіння. Тому для виробництв, що використовують сировину підвищеної вологості, доцільно використовувати комбінований спосіб, який дозволяє економити витрати палива.

Комбінований спосіб виробництва, що базується на приготуванні сировинної суміші мокрим способом, передбачає використання прес-фільтрів для зневоднення шламу. Якщо подавати суміш на випалювання у вигляді гранульованого слою, то фактично реалізується технологія мокрого способу. Але у порівнянні з мокрим способом вдається знизити витрати теплоти на випал. Крім того, при такому підході на 30% зменшується витрати палива, а капітальні витрати – на 10%. Проте, одночасно на 15 – 20% підвищується витрата електроенергії.

При побудові комбінованого способу виробництва цементу на базі сухого способу до технологічної схеми додається технологічна операція - грануляція. Ця операція передбачає додавання 10 – 14% води в спеціальних тарілчастих грануляторах. Гранульована суміш із розміром гранул 10 – 15 мм обпалюється в шахтних пічках з конвеєрними кальцинаторами.

Випал попередньо гранульованої сировини сприяє стабілізації режиму випалювання, поліпшенню теплообміну в печі, підвищенню якості цементу. Слід враховувати, що комбінований спосіб вимагає трохи більшого, ніж сухий, витрат теплоти, яка необхідна на випаровування доданої води. Крім того, ускладнення технології за рахунок грануляції, вимагає використання більш складних конструкцій пічних агрегатів.

Висока енергоємність та низька ефективність описаних методів помелу цементних сумішей обумовило пошук шляхів модернізації процесів подрібнення твердих матеріалів. В результаті з'явився метод помелу у кульовому млині із використанням замкнутого циклу. Істотні переваги – продуктивність та якість помелу сприяють широкому впровадженню цього методу [2].

На рис. 2 показана технологічна схема помелу із використанням замкнутого циклу. Помел здійснюється у кульовому млині 9 (КМ), до якого подається сировина. Живлення процесу сировиною забезпечується із силосів живлення 4 живильниками млина 7 через вагові дозатори 8.

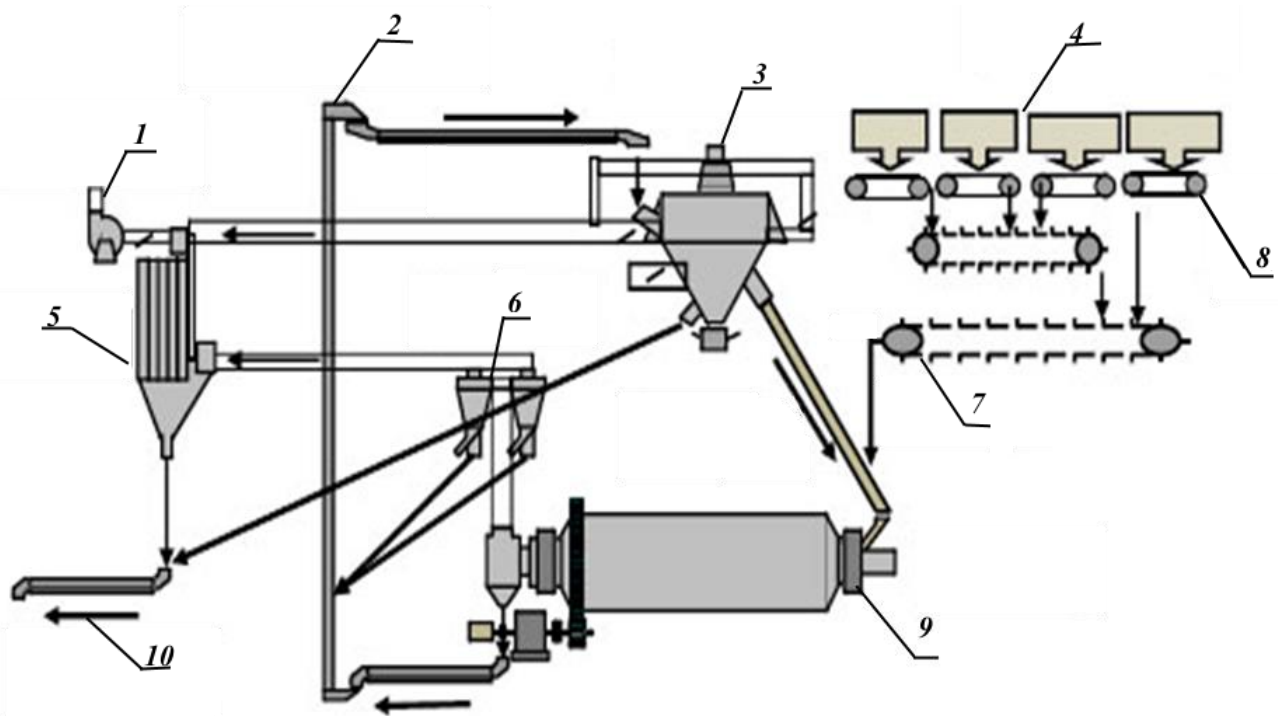


Рисунок 2 - Технологічна схема помелу із використанням замкнутого циклу

1– Система вентиляторів; 2 – Рециркуляційний елеватор; 3– Сепаратор;
4 – Силоси живлення; 5 – Фільтр; 6 – Циклони; 7 – Живильник млина; 8 – Вагові до-
затори; 9– Кульбовий млин; 10 – Готовий продукт

Замикання циклу помелу отримується із допомогою рециркуляційного елеватора 2, через який помелений продукт надходить у динамічний сепаратор 3. Використання

сепаратора забезпечує контроль розмірів отриманих частинок продукту. Частинки потрібного розміру виводяться із кола переробки готовим продуктом 10, в той час як недомелені частинки повертаються обернено в КМ для повторного подрібнення.

У порівнянні із технологією відкритого циклу, завдяки введенню сепаратора економиться до 30% енергії, оскільки вивід дрібної фракції продукту із процесу мелення полегшує роботу КМ. Додатковою перевагою використання сепаратора є запобігання надлишкового подрібнення фракцій продукту.

Вибір технології здійснюється відповідно до властивостей сировини, що використовується. При цьому до уваги в першу чергу приймаються вимоги до якості продукції при мінімальних витратах палива, енергії та трудових ресурсів.

1.2 Аналіз параметрів якості цементу

Головним показником якості цементу є міцність бетону, який утворено із цього цементу. Непряма характеристика міцності цементу формується показниками параметрів тонкощі помелу складових цементної суміші [3]. Зв'язок міцності цементу з параметрами тонкощі помелу пояснюється завданням подрібнення – звільнення поверхонь компонентів, необхідних для реакції гідратації. Ця реакція йде за рахунок дифузії від поверхні частинки до її внутрішнього шару. Гідратація цементу, яка визначає його міцність, має оптимальну залежність від розмірів частинок. Найдрібніші частинки - до 3 мкм дають підвищену питому поверхню і необхідні для початкової міцності. Частинки від 3 до 30 мкм складають найбільшу цінність для міцності [4], оскільки впливають на забезпеченні кінцеву міцність.

Таким чином організація керування процесом помелу передбачає вимірювання тонкощі помелу, що є критерієм керування процесом помелу цементу.

Прагнення оцінки поверхні реакції гідратації призвело до появи методу Блейна, який базується на вимірюванні питомої поверхні отриманого продукту. Проте складнощі автоматизації вимірювань, низька відтворюваність результатів, а також інерційність не дає можливості оперативно керувати процесом помелу за даними по методу Блейна.

До сучасних методів оцінки розмірів частинок цементу та їх розподілу по розмірам відноситься метод лазерної гранулометрії. Цей метод не тільки усуває перераховані недоліки вимірювання питомої поверхні, але й внаслідок зменшення вартості стає більш доступним.

Англійська компанія Malvern Instruments Ltd постачає, в тому числі на цементні заводи, лабораторні прилади Mastersizer 2000, що показаний на рисунку 3.

Основною перевагою Mastersizer 2000 є можливість встановлення його в потоці обробки продукту [5]. Цей гранулометр для вимірювання розмірів частинок використовує метод лазерної дифракції. Лазерний промінь при опроміненні частинок розсіюється на кути, що залежать від розмірів частинок. При збільшенні розмірів ці кути також збільшуються. Розсіюванні промені фіксуються світлочутливим детектором. Вмонтований контролер автоматично здійснює розрахунки розподілу часток за розмірами. Результати розрахунків виводяться на дисплей або принтер. Діапазон розмірів вимірюваних часток від 0,01 до 2500 мкм, похибка вимірювання 1%.



Рисунок 3 - Гранулометр Mastersizer 2000

Функція розподілу часток за розмірами є інформацією для коригування режимів процесу, наприклад, зміною кратності циркулюючої навантаження або асортименту мелючих кульок. Керування роботою помольної системою може здійснюватися за даними, які отримуються із лабораторії з лазерного гранулометра. Для оперативного,

поточного керування помольним процесом, не чекаючи даних з лабораторії, використовується лазерний гранулометр, що встановлюється в потоці цементу, як показано на рисунку 4.

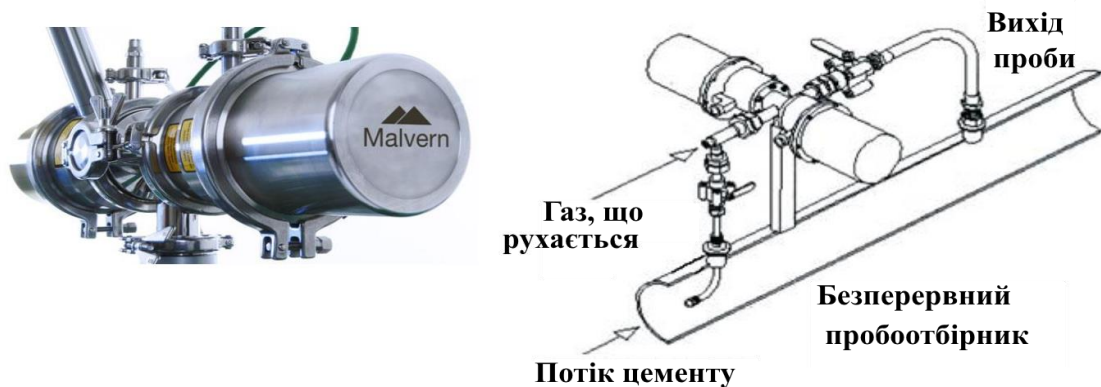


Рисунок 4 - Лазерний гранулометр Insitac Dry та його розміщення у потоці

Дані, що надходять з потоку кожні 5 секунд, дозволяють реалізувати безперервне керування ходом помелу.

1.3 Аналіз каналів керування

Основним напрямком розвитку технології цементного виробництва є підвищення тонини помелу. Це пов'язано із впливом розміру частинок цементу на тривалість процесів гідролізу та гідратації, відповідно підвищенням міцності цементних виробів. З іншого боку, намагання отримати тонкий помел гальмується зниженням продуктивності обладнання та підвищенням витрат електроенергії.

Дослідження, що проводяться в області помелу цементу [6,7] в основному спрямовані на покращення технічних характеристик обладнання для помелу. Для задоволення вимог виробництва по техніко-економічним показникам проводяться роботи, що дозволяють забезпечити оптимальні режими функціонування з допомогою сучасних методів керування. Саме оптимальні методи керування дають змогу подолати протиріччя між якістю продукту та енерговитратами на процес помелу.

Підвищення техніко-економічних показників виробництва здійснюється за рахунок мінімізації впливу коливань характеристик сировини. Суттєвим фактором покращення показників процесу є моніторинг відхилень режимів функціонування, які впливають на якісні характеристики готового продукту.

Якість цементу, що оцінюється гранулометричним складом готового продукту, залежить від ступеня завантаження млина. У разі перевантаження чи недовантаження млина отримують або недостатньо подрібнений або занадто подрібнений продукт. Крім якості цементу, ступень завантаження млина впливає на об'єм енерговитрат.

Можливість ефективного регулювання режимів помелу визначається ступенем стабілізації факторів взаємодії продуктів мелення із тілами мелення. Тому першим заходом стабілізації операції мелення є використання системи стабілізації швидкості обертання млина. Функціональна схема автоматизації контуру керування швидкістю обертання зображена на рис. 5. Регулювання швидкості здійснюється засобами електроприводу SCY по сигналу, що надходить від датчика швидкості SE. Необхідність стабілізації швидкості обертання обумовлена нерівномірним характером навантаження млина, що виникає внаслідок збурень характеристик сировини, яка надходить на помел.

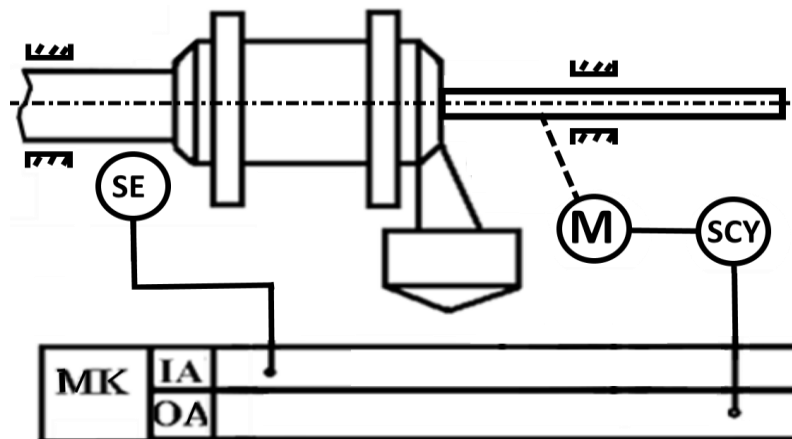


Рисунок 5 - Функціональна схема керування швидкістю обертання

SE– Датчик швидкості; SCY– Частотний перетворювач;
МК– мікроконтролерний регулятор; М– електродвигун

Другим важливим фактором впливу на ступень завантаження млина, а значить і на стабільність процесу помелу, є точність дозування сировини, що надходить до

млина. Класичною схемою побудови процесу дозування, є схема із використанням стрічкового конвеєра. Функціональна схема процесу дозування зображена на рис. 6.

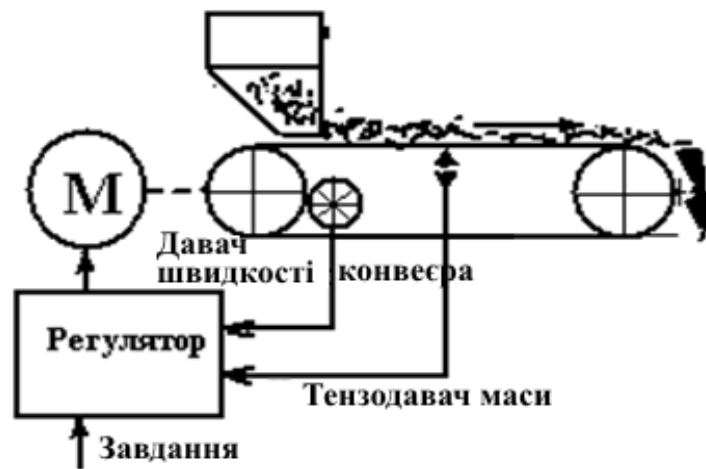


Рисунок 6 - Функціональна схема процесу дозування

Згідно алгоритму функціонування, інформація про масу матеріалу на конвеєрі та швидкість його руху поступає до обчислювального пристрою, що розраховує значення витрат матеріалу живильника. Забезпечення необхідної величини витрат здійснюється за рахунок зміни швидкості переміщення конвеєрної стрічки. Утримання значення витрат є підпорядкованим процесом, темп проходження якого залежить від результатів аналізу гранулометричного складу продукту, що отримується на виході млина.

Процес аспірації є важливішим фактором формування якості цементу. Цей процес, що забезпечує винос дрібних фракцій продукту, дає змогу підвищити продуктивність процесу мелення на 20%. Підвищення продуктивності досягається за рахунок зменшення рівня агломерації частинок та налипання подрібнюваної маси на тіла мелення.

Зміна параметрів процесу аспірації призводить до зміни гранулометричного складу продуктів подрібнення та опосередковано впливає на ефективність процесу мелення. Ці зміни здійснюються шляхом регулювання перепаду тиску на виході млина і після електрофільтрів. В результаті керування перепадом тиску по сигналам датчиків тиску PE (рис.7) змінюються об'ємні витрати прокачаного повітря, відповідно гранулометричний склад вихідного продукту.

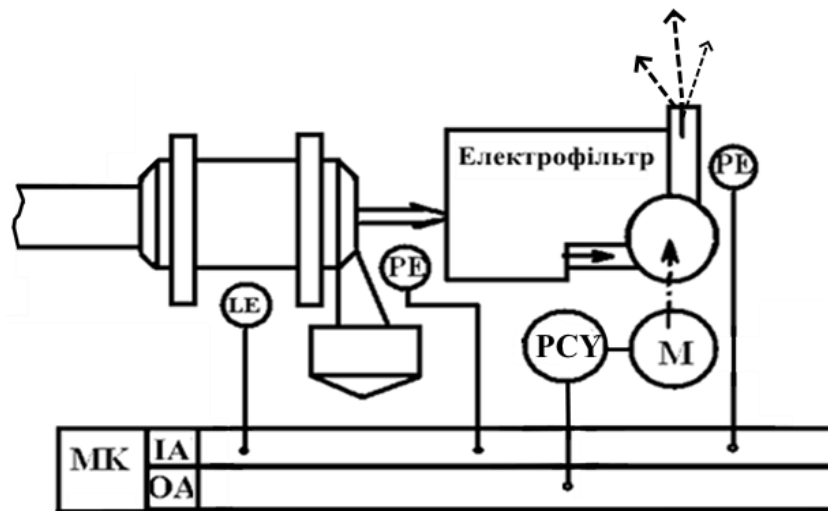


Рисунок 7 - Функціональна схема процесу аспірації

Результати аспірації будуть залежати від можливостей стабілізації параметрів кульового млина:

- енергетичних витрат приводу млина;
- швидкості обертання млина при наявності збурень по завантаженню;
- значення витрат живильника.

Виконання сформульованих вимог досягається використанням локальних систем регулювання.

Відомі локальні системи автоматизації при вирішенні завдань стабілізації зазначених параметрів процесу мелення не вирішують завдання оптимального керування процесами помелу. Тому для отримання максимальної продуктивності задіяного обладнання при заданому гранулометричному складі продукту необхідна розробка системи керування, яка б забезпечила виконання сформульованих критеріїв.

Схема аспіраційного процесу, що враховує взаємовплив параметрів процесу представлена на рис.8. До схеми входить нагнітальний агрегат, живильник, тракт аспірації, сепаратор і засувка, з допомогою якої регулюються витрати повітря, що надходить до тракту аспірації.

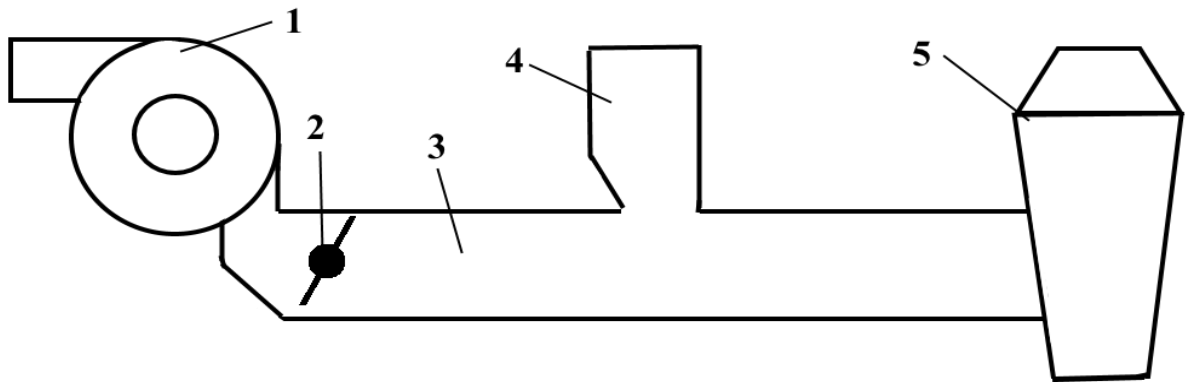


Рисунок 8 - Схема процесу аспірації

1– Нагнітальний агрегат; 2– Засувка; 3– Тракт аспірації; 4– Живильник;
5– Сепаратор

Таким чином всі параметри процесу мелення:

швидкість обертання млина при меленні;

ступінь заповнення об'єму млина;

інтенсивність аспірації об'єму млина;

динаміка живлення млина сировинним матеріалом

формує вектор керування процесом мелення, результати якого оцінюються величиною витрат енергії та отриманими показниками гранулометричного складу кінцевого продукту.

2 ФОРМУВАННЯ КРИТЕРІЇВ КЕРУВАННЯ ОБ'ЄКТОМ

2.1 Завдання керування

Для вирішення завдань оптимізації процесу помелу компонентів цементу необхідно з'ясувати особливості функціонування об'єкту та можливі діапазони зміни параметрів обладнання, що визначають характеристики процесу та продукту. Оскільки основним недоліком процесу помелу компонентів цементу є низький ККД (коефіцієнт корисної дії), який становить від 2 до 5% [8], то першочерговим завданням керування згаданим процесом до теперішнього часу залишається підвищення його ефективності.

Основним фактором зниження ККД процесу є нестабільне споживання енергії обладнанням помелу. Згадані нестабільності зумовлені нестабільними характеристиками сировини, що надходить на помел.

Розробка ефективних регуляторів процесу, які б забезпечили збільшення ККД, гальмується складністю опису процесу помелу. Ця складність обумовлена нелінійним характером взаємозв'язків параметрів процесу, відповідно неточностями математичних моделей. Певні складнощі керування виникають внаслідок затримки реакції на керуючі впливи та різниці сталих часу складових процесу помелу. Внаслідок дії неконтрольованих збурень знижується точність регулювання яка погіршується із-за недостатньої точності та надійності датчиків, що використовуються для оцінки стану об'єкту.

Зазначені фактори ускладнюють змоги безпосереднього підвищення ККД шляхом оптимізації параметрів процесу, оскільки внаслідок зміни фракційного складу, вологості та твердості вхідного матеріалу змінюються параметри оптимальних налаштувань процесу. В результаті непередбачуваним чином змінюється заповнення млина. Внаслідок недовантаження або перевантаження млина відбуваються значні витрати електроенергії, що і призводить до зниження ККД.

Складнощі оптимального керування помелом пов'язані з відсутністю точного методу вимірювань, здатного адекватно оцінити об'єм заповнення млина.

В переробній промисловості робляться спроби вимірювання завантаження млина, виходячи із аналізу потужності, що споживається електроприводом млина [9, 10]. Втім, оцінка адекватності цих вимірювань показує суперечливі результати. Це пояснюється специфікою процесу мелення. Спочатку, відповідно до збільшення завантаження млина, витрати енергії зростають. Але збільшення витрат спостерігається до певного значення, а при подальшому зростанні заповнення млина витрати енергії зменшуються. Остання обставина не дає впевненості в оцінці ступеня завантаження млина.

Альтернативним варіантом вимірювання рівня завантаження млина є використання промислового приладу ВАЗМ-1 [11], призначення якого полягає в аналізі звукових сигналів, що супроводжують процес помелу.

Акустичний перетворювач («електронне вухо») встановлюється безпосередньо біля млина, в той час як вимірювач вібрацій, наприклад, акселерометр, монтується на цапфи підшипників обертання млина. Використання мікропроцесорних засобів у віброакустичному аналізі дозволяє підвищити достовірність вимірювань приладу ВАЗМ-1 та використати його для вирішення завдання керування рівнем завантаження млина. Наслідком стабілізації завантаження, як вказувалось, є стабілізація гранулометричного складу продукту та опосередковане заощадження енергоресурсів (підвищення ККД). Виконавчим органом процесу завантаження млина є устаткування дозування компонентів (рис. 6).

Таким чином завдання керування контуром завантаження, що забезпечує максимальну продуктивність млина, полягає в дозуванні компонентів цементу. Це дозування здійснюється у відповідності до даних про завантаження млина, які надходять від акустичного перетворювача «електронне вухо».

Із завданням підвищення енергоефективності та продуктивності пов'язане завдання отримання цементу із потрібним гранулометричним складом, вирішення якого залежить від режимів помелу. Ця залежність обумовлена організацією замкнутого циклу мелення із використанням сепаратора (Рис. 7). Якщо процес мелення здійснюється без аспірації сепаратора, то продуктивність млина зменшується. Зниження продуктивності пояснюється налипанням дрібненьких частинок матеріалу сировини

на футеровку млина, внаслідок чого пом'якшується сила удару тіл помелу. В результаті зменшення сил взаємодії мелення, помел проходить менш ефективно. Прокачування аспіраційного повітря через сепаратор зменшує ефект налипання частинок, але при цьому може спостерігатись винос частинок з простору сепаратора. Для підтримки оптимального об'єму повітря, що видаляється, використовуються механічні засувки (рис. 8). Керування положенням засувки дозволяє налаштовувати необхідне значення тиску розрядження та витрати вихідного потоку. Ці значення встановлюють відповідно до оптимальних технологічних вимог - витратам 1 м³/год повітря повинно відповідати витрати 1 кг цементу. Такі значення дотримують до відносних аеродинамічних показників млина і сепаратора – швидкість потоку/переріз потоку. Рекомендований діапазон приведених швидкостей потоку – 1–2 м/с.

Використання частотного регулювання привода вентилятора аспірації замість механічних засувки дає змогу значно підвищити енергоефективність процесу, особливо при низьких значеннях швидкості потоку [12]. Додатковою перевагою частотного регулювання вентилятора є підвищення точності регулювання, зниження динамічних навантажень, відповідно, збільшення надійності регулювання.

Таким чином другий важливий контур керування процесом помелу цементу будується на базі вимірювань гранулометричного складу продукту, які формують керуючі впливи для електроприводу процесу аспірації.

Переміщення продукту в аспіраційному тракті здійснюється завдяки перепаду тиску повітря P_D між входом і виходом. Умовою переміщення частинок продукту є перевищення швидкості потоку над швидкістю осідання цих. Крім того, кількість (маса m) транспортованого продукту залежить від концентрації та розміру його частинок (щільності потоку ρ).

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

$$N_a = Q_a P_D, \tag{1}$$

де Q_a – витрати напірного агрегату, P_D – тиск аспірації.

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

$$E = \frac{E_c}{Q_m} \quad (2)$$

де E – енергоємність системи аспірації; E_c – енергія, що споживається системою; Q_m – витрати на транспортування суміші.

Із співвідношення (2) витікає завдання енергозберігаючого керування процесом аспірації. У разі зміни значення витрат суміші змінюється аеродинамічний опір тракту аспірації, що потребує корегування тиску аспірації. Цей тиск створює силу, що рухає частинки цементу. Регулювання перепаду тиску повітря P_D дає змогу відстежувати гранулометричний склад продукту відповідно до поточного значення витрат цементу, не витрачаючи зайвої потужності напірного агрегату для транспортування частинок цементу.

Функціональна схема, що реалізує канал керування аспіраційним трактом, зображена на рис. 9.

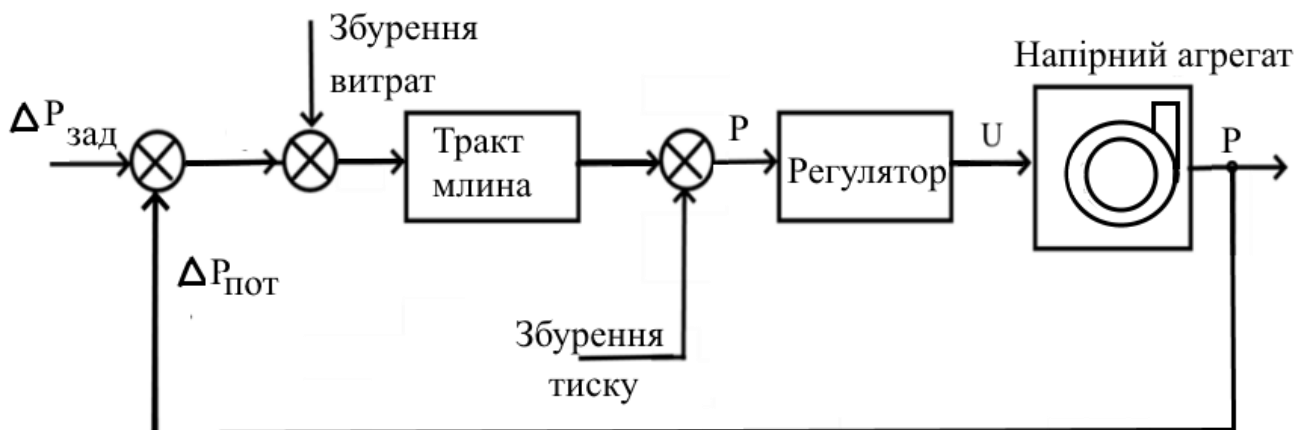


Рисунок 9 - Функціональна схема тракту аспірації

До схеми входять: регулятор, напірний агрегат та тракт аспірації. Збурення гранулометричного складу продукту та тиску внаслідок зміни аеродинамічного опору тракту повинні відпрацьовуватись регулятором напірного агрегату. Тому основним

параметром регулювання в аспіраційному тракті є його навантаження, яке підтримується максимально можливому рівні при можливих змінах зовнішніх умов.

Структура системи керування процесом формується за результатами розгляду каналів керування. До складу системи входить контур керування рівнем завантаженості млина та контур керування трактом аспірації.

Передумовою побудови регулятора є оцінка динамічних параметрів об'єкту по обом контурам керування, оскільки значення сталих часу процесів та обладнання відрізняються не тільки за контурами, але й в одному контурі.

2.2 Ідентифікація параметрів об'єкту керування

2.2.1 Тракт аспірації

Відомі моделі процесу помелу ґрунтуються на рівняннях масового або енергетичного балансу. Головне завдання моделювання полягає в прогнозуванні фракційного складу готового продукту з урахуванням технологічних параметрів обладнання, що задіяно в процесі [12, 13, 14]. Іншим завданням моделювання є дослідження можливостей оптимізації процесу з огляду підвищення продуктивності обладнання на базі зменшення енергії, що споживається [15].

Незалежно від мети моделювання передумовою досліджень є визначення параметрів та конструктивних характеристик моделі, які у більшості випадків вимагають цілеспрямованих оціночних експериментів.

Одним із підходів оцінки результатів помелу цементу є визначення величини утвореної поверхні продукту (оцінка Блейна). Відповідно, продуктивність млина замкнутого циклу подрібнення оцінюється швидкістю утворення цієї поверхні. На рис. 10 зображена функція продуктивності млина Q від його завантаження тілами мелення μ та циркуляційного навантаження C .

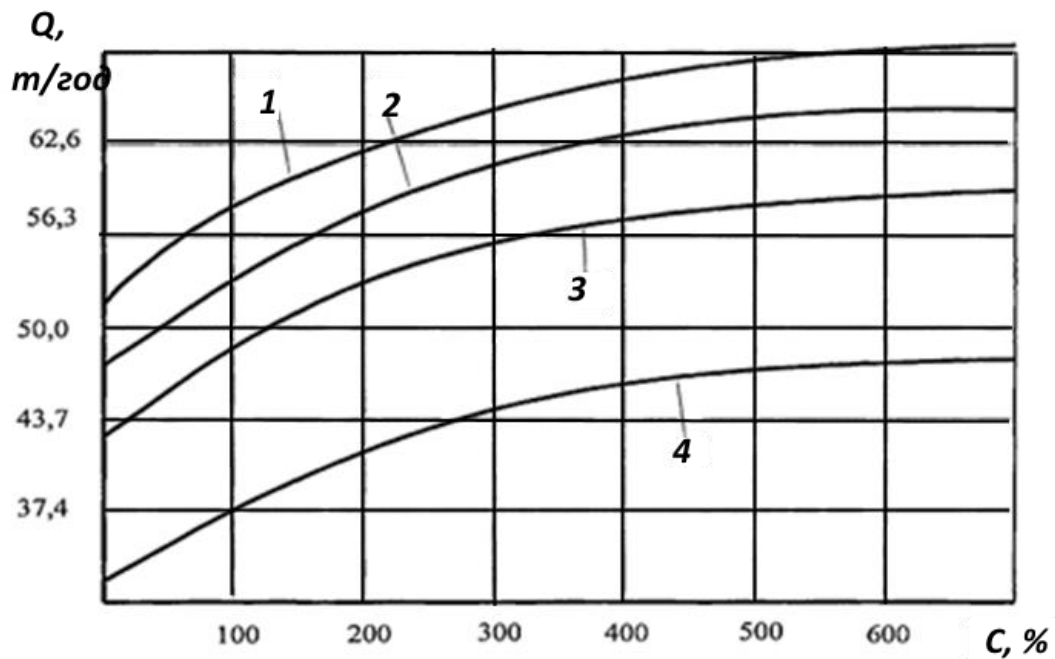


Рисунок 10 - Функція продуктивності млина від циркуляційного навантаження для різних μ : 1- $\mu = 0,33$; 2 - $\mu = 0,3$; 3- $\mu = 0,25$; 4- $\mu = 0,2$

Максимальна продуктивність кульового млина досягається при максимально можливому завантаженні $\mu = 0,33$ (крива 1).

Вплив параметрів другого контуру керування процесом мелення оцінюється після статистичної обробки даних оцінювання. Звертаючись до оброблених результатів помелу (рис. 11), можна прогнозувати фракційний склад вихідного продукту.

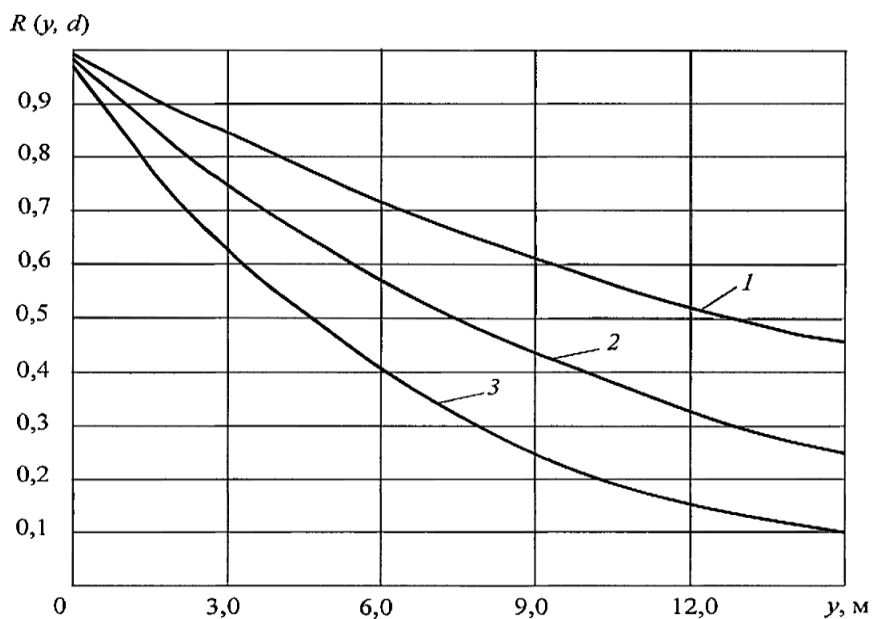


Рисунок 11 - Дисперсний склад продукту по довжині млина:

1 - $d = 20 \mu m$; 2- $d = 40 \mu m$; 3- $d = 80 \mu m$

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

Для налаштувань регулятора гранулометричного складу продукту використовується характеристика відносного вмісту твердої фази. Цей вміст описується концентрацією зважених часток, кг/м^3 . Тонина помелу оцінюється з допомогою сита із сіткою № 008, клітинки якого мають діаметр 0,08 мм. Залежність початкової тонини $C_{008}^{\text{Поч}}$ від кінцевої $C_{008}^{\text{Кін}}$, що представлена на рис. 12, показує вплив циркуляційного навантаження на зв'язок між розмірами частинок матеріалу на вході і виході кульового млина. Із залежності видно, при зростанні циркуляційного навантаження крупність продукту збільшується. При цьому зростання розміру спостерігається як на вході, так і на виході млина.

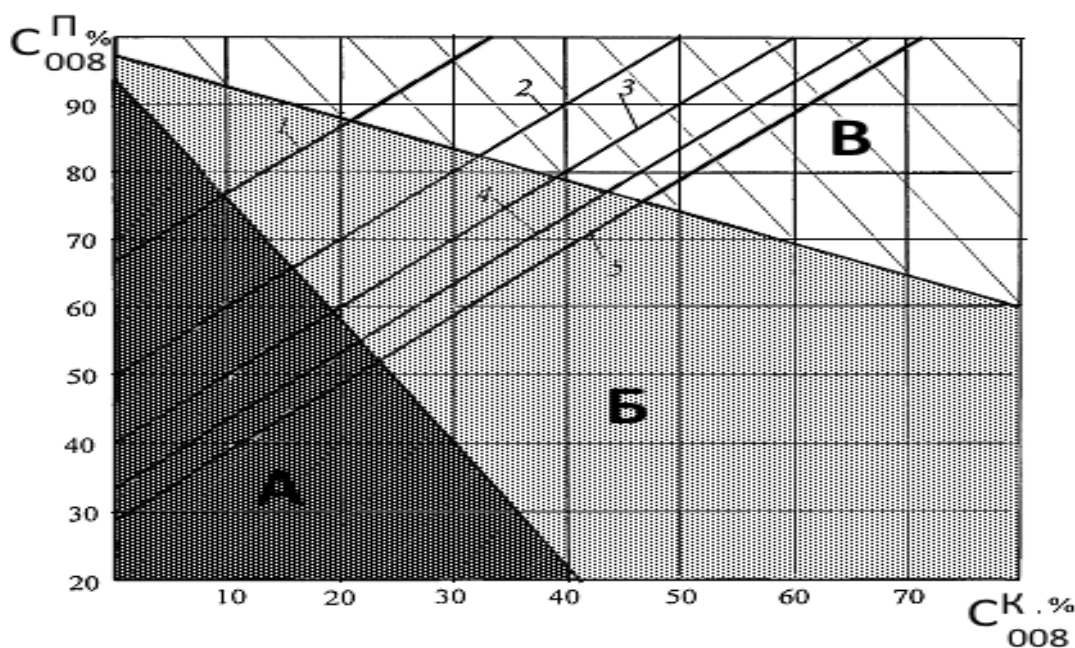


Рисунок - 12 Залежність якості цементу від циркуляційного навантаження:

$$n = 50 \% (1); n = 100 \% (2); n = 150 \% (3); n = 200 \% (4); n = 250 \% (5)$$

Практично вплив характеристик млина на ефективність процесу аспірації (рис. 12) оцінюється на основі поділу поля на три сектори. Для сектору А характерна низька ефективність процесу мелення. Це пояснюється тим, що дрібні частинки продукту

сприяють згасанню впливу ударного завантаження. Для підвищення ефективності процесу подрібнення потрібно збільшувати параметр C_{008} шляхом оптимізації режиму аспірації млина.

Сектор **В** має більшу ефективність роботи процесу помелу. Зазвичай обладнання замкнутого циклу подрібнення працює саме при цих значеннях технологічних параметрів млина.

Для забезпечення функціонування обладнання в режимах, що визначається сектором **С** потрібне адаптаційне налаштування параметрів регуляторів та стабілізація режимів видалення дрібних фракцій продукту. При роботі в режимах параметрів сектору **С** досягається найбільша ефективність процесу, якщо отримано оптимальний режим аспірації. Для цього ставиться мета керування об'єктом, яка передбачає досягнення узгодженості режимів завантаження млина та режиму його аспірації.

2.2.2 Канал керування рівнем завантаження млина

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

$$\frac{dL}{dt} = Q_1 - Q_2 \quad (3)$$

де L – рівень завантаження в млина; Q_1 – вхідна витрата сировини, яка характеризує потік сировини, що надходить до млина; Q_2 - вихідна витрата продукту, що характеризує продуктивність мелення.

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

$$Q_2 = f(L) \quad (4)$$

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

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

Функція (4) має сенс тільки для врівноважених режимів. Для перехідних режимів, які супроводжують процеси регулювання, функція витрат Q_2 нелінійно залежить від рівня завантаження млина L [13].

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

Для оцінки перехідних режимів отримаємо передатну функцію об'єкту в результаті лінеаризації рівняння (4). Умовою лінеаризації функції завантаження є невеликі відхилення Q_2 (10%) від номінального режиму. Тоді лінеаризація здійснюється шляхом опису динаміки процесу у *відхиленнях* змінних від усталеного режиму.

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

$$L^o = L - L_0; \quad Q_1^o = Q_1 - Q_{10}; \quad Q_2^o = Q_2 - Q_{20}; \quad (5)$$

Використовуючи ці позначення, співвідношення (3) прийме вигляд:

$$dL^o/dt = [Q_1 + Q_{10}] - [Q_2 + Q_{20}] \quad (6)$$

Похідна dL/dt у рівнянні (6) нелінійно залежить від змінних L^o , Q_1^o та Q_2^o .

Запису (6) відповідає лінійне рівняння

$$dL/dt = -L/T + K_1 * Q_1^o - K_2 Q_2^o \quad (7)$$

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

$$T_M \frac{dL}{dt} + L = K_1 Q_1 - K_2 Q_2 \quad (8)$$

Коефіцієнти рівняння (8) знаходяться з умов функціонування об'єкту в номінальному режимі, для випадку, коли $dL/dt = 0$

Операторна передатна функція, що відповідає рівнянню (8) для керуючого і збудуючого впливів виглядає наступним чином:

$$W_{\text{ker}}(p) = \frac{L^o(p)}{Q_1^o(p)} = \frac{K_1}{T_M p + 1} \quad (9)$$

$$W_{\text{zB}}(p) = \frac{L^o(p)}{Q_2^o(p)} = -\frac{K_2}{T_M p + 1} \quad (10)$$

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

$$W_{\text{ker}}(p) = \frac{K_1}{T_M p + 1} * \exp(-\tau p) \quad (11)$$

Сталі часу передатної функції визначаються експериментально по перехідній функції об'єкту керування, яка зображена на рис. 13.

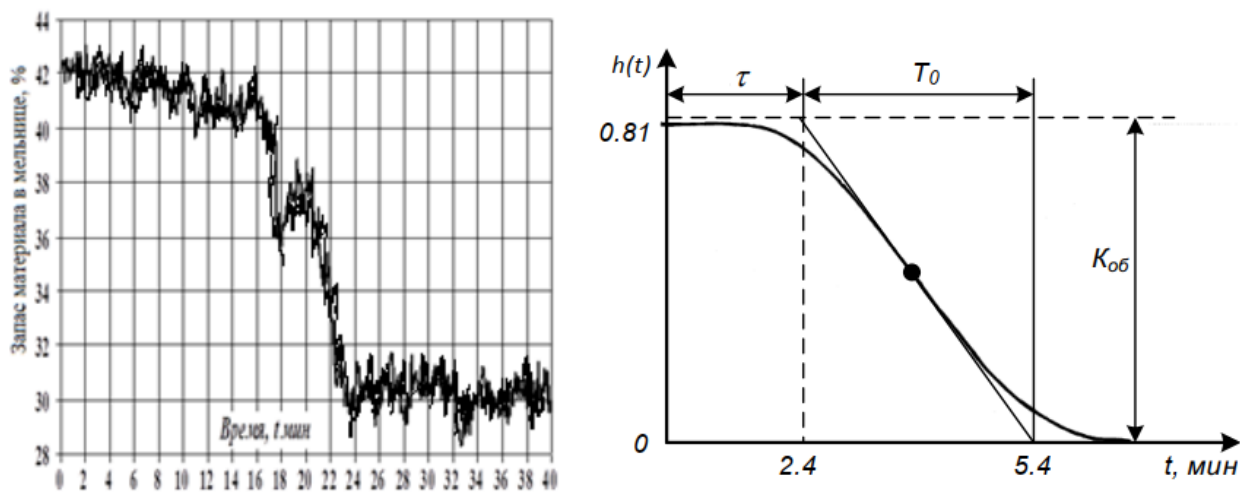


Рисунок - 13 Перехідна характеристика млина по каналу керування

Виконуючи графічні побудови, розраховуємо потрібні значення сталих процесу мелення:

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

Таким чином передатна функція по каналу керування

$$W_{\text{кер}}(p) = \frac{K_1}{168p + 1} * \exp(-144p) \quad (12)$$

3 РОЗРОБКА ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ ОБ'ЄКТУ

Виходячи із технологічної схеми процесу помелу цементу (рис. 2), імітаційна модель системи керування розділяється на дві підсистеми:

підсистема керуванням рівнем завантаження млина та підсистема керуванням процесом аспірації. Рівень завантаження та розподіл фракційного складу продукту, що отримується в результаті мелення, оцінюється відповідними давачами.

Представлення процесу помелу кульового млина, як об'єкта керування, дозволяє формалізувати його імітаційну модель і отримати можливості для розробки регуляторів процесів та їх налаштування. Складність керування процесом помелу цементу формується наступними факторами:

- наявність технологічних обмежень по параметрам сировини;
- транспортні часові запізненні в тракті помелу;
- необхідність статистичної обробки даних вимірювань;
- нелінійність зв'язків параметрів, що характеризують процес.

Тому основним завданням моделювання об'єкту знаходження адекватних описів зв'язків між вихідними (гранулометричними) характеристиками продукту та параметрами режимів, що супроводжують процес мелення. Частково ці завдання вирішуються в процесі ідентифікації параметрів об'єкту. При комплексному вирішенні задачі керування приймаються до уваги всі фактори функціонування об'єкту, але обов'язковим кроком розробки моделі передбачається ранжування впливів цих факторів на результати моделювання. Оцінка впливів дає змогу спростити модель до практичного використання, тобто реалізації на ПЛК. Якщо на передній план виходить завдання досягнення техніко-економічних показників обладнання, то критерій керування формулюється як досягнення максимальної продуктивності при мінімальних енерговитратах. Відповідно, в моделі необхідно передбачити симулятори показників енерговитрат. У разі завдань керування, що ставлять на меті досягнення потрібної якості продукту, модель повинна відслідковувати зміни характеристик стану об'єкту під дією керуючих впливів.

Оскільки завдання оптимізації керування процесом помелу цементу полягає в одночасному досягненні якості продукту та енергоефективності, то рішення цього завдання здійснюється на базі схеми, що наведена на рис. 14.

Функціонування підсистем координує керуюча система, що реалізована в ПК, яка формує керуючі впливи γ_3 та $L_{за}$ на підсистему керування аспірацією та підсистему рівня завантаження млина. Збурюючими впливами для цієї системи є γ (зміни гранулометричного складу), рівень завантаження млина ΔL та зміни витрат ΔQ .

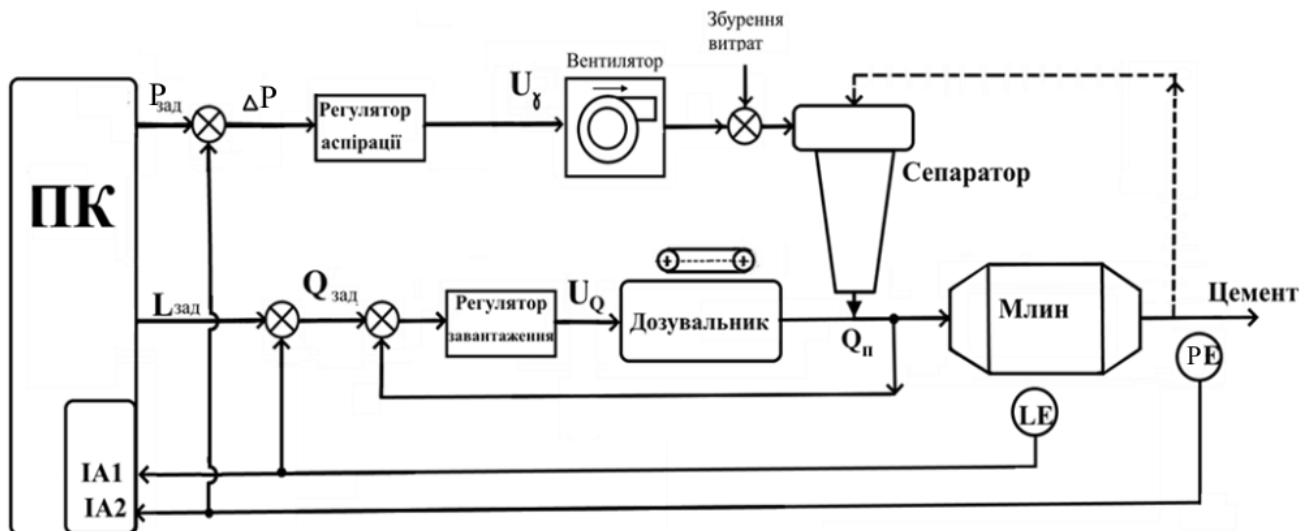


Рисунок 14 - Функціональна схема моделі системи

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

3.1 Моделювання керування рівнем завантаження млина

Проектування системи керування рівнем завантаження базується на математичному описі її ланок. Контур керування рівнем завантаження (рис. 14) утворюється засобами керування витратами сировини та готового продукту. До складу засобів входить частотний перетворювач, привод конвеєра (дозувальник), давач завантаження.

До структури контуру керування входить ПІД -регулятор, але на етапі побудови моделі контуру, коефіцієнт передачі приймається $K_{ПІД}=1$

Елемент «млин» є центральною ланкою системи, що моделюється. Його динамічні параметри визначаються передатною функцією (12). Входом елемента є значення витрат сировини, а виходом –рівень завантаження млина L . Цей рівень також залежить від витрат вивантаження готового продукту.

Інші елементи моделі керування рівнем завантаження млина, до яких належить асинхронний привод, що регулюється частотним перетворювачем(ПЧ), та дозувальник, можна представити передатними функціями аперіодичних ланок. Сталі часу та коефіцієнти перетворення цих ланок отримуються в результаті проведеної ідентифікації об'єкта.

Особливістю функціонування системи керування завантаженням млина, імітаційна модель в пакеті Matlab якої зображена на рис. 15, є підтримка заданого завантаження в умовах дії збурень параметрів технологічного процесу та характеристик діючого обладнання. Для імітації збурень в схему моделювання вводяться блоки підсумовування та генератори сигналів збурення.

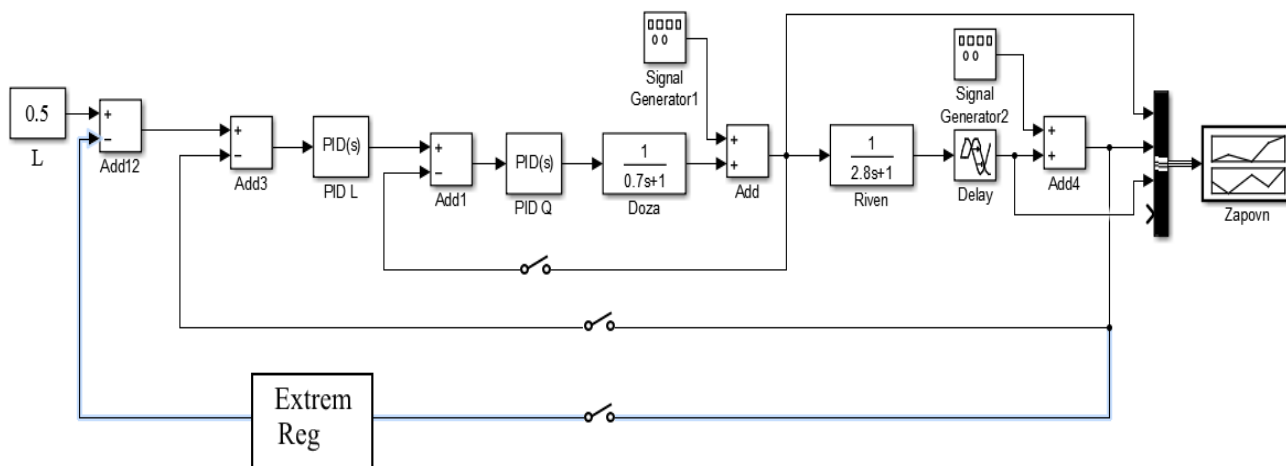


Рисунок 15 - Схема моделі системи в пакеті Matlab

Як видно із схеми, модель має три контури регулювання. Перший-внутрішній стабілізує значення витрат сировини. Другий контур шляхом зміни витрат дозування

регулює рівень завантаження млина. Зовнішній, третій контур вирішує завдання оптимізації продуктивності процесу мелення.

Для налаштування параметрів регуляторів отримується перехідна характеристика процесу із розімкнутим зворотнім зв'язком. Вважаємо, завданням регулювання є підтримка рівня завантаження млина $L=40\%$.

Осцилограма процесу, що відображає завантаження млина до заданого рівня, показано на рис. 16.

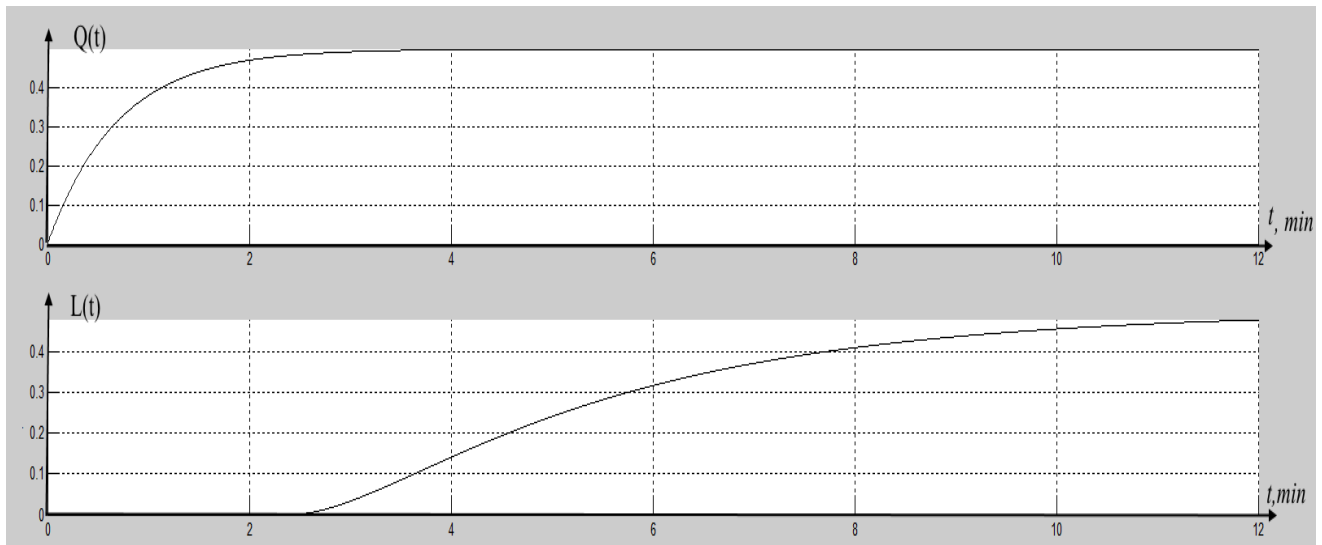


Рисунок 16 - Осцилограма витрат (Q) та рівня (L) розімкнутої системи керування

Налаштування параметрів регулятора починають із внутрішнього контуру регулювання. В результаті замикання контуру негативного зворотнього зв'язку по витратам сировини, що дозується, отримуємо перехідну характеристику. Критерієм налаштувань параметрів ПД регулятора є вимоги мінімального часу перехідного процесу без суттєвого перерегулювання (менше 20%). Налаштування здійснюється з допомогою вбудованих інструментів Matlab. Результат налаштування зображено на рис. 17, де визначаються коефіцієнти ПД регулятора.

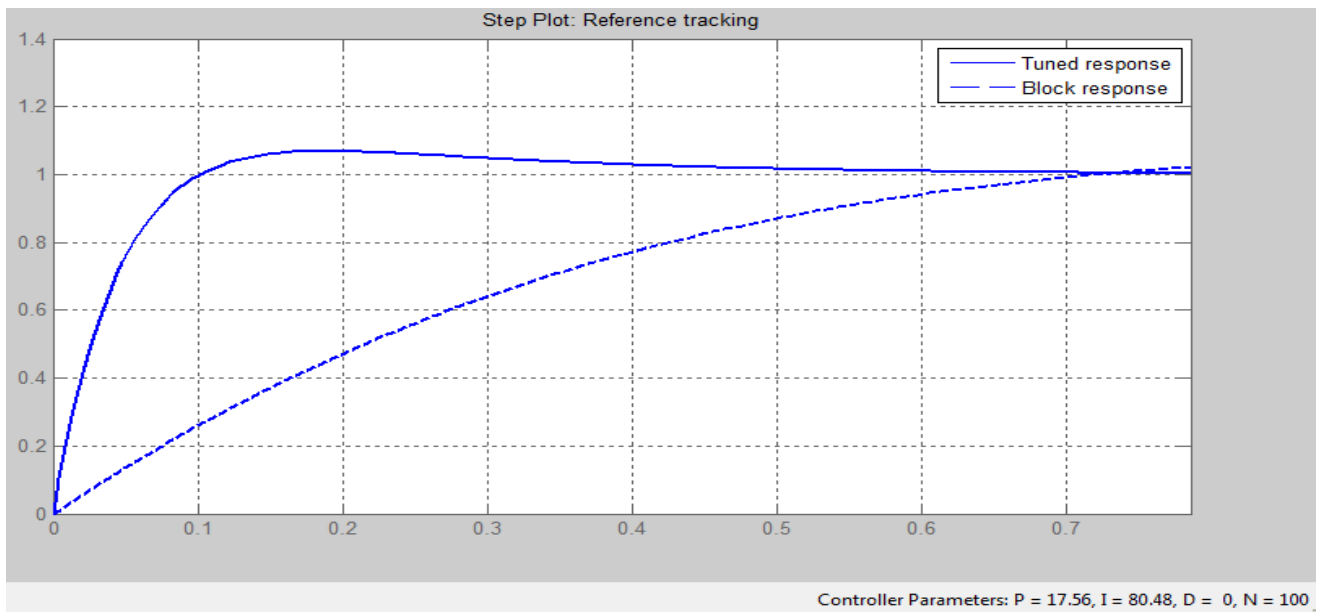


Рисунок 17 - Панель налаштувань Matlab

Як видно із панелі налаштувань, оптимальними параметрами ПІД регулятора є:
 $P=17,5$ $I=80,5$

На рис. 18 наведено результат дії ПІД регулятора, із якої видно, що час перехідного процесу скоротився вдвічі.

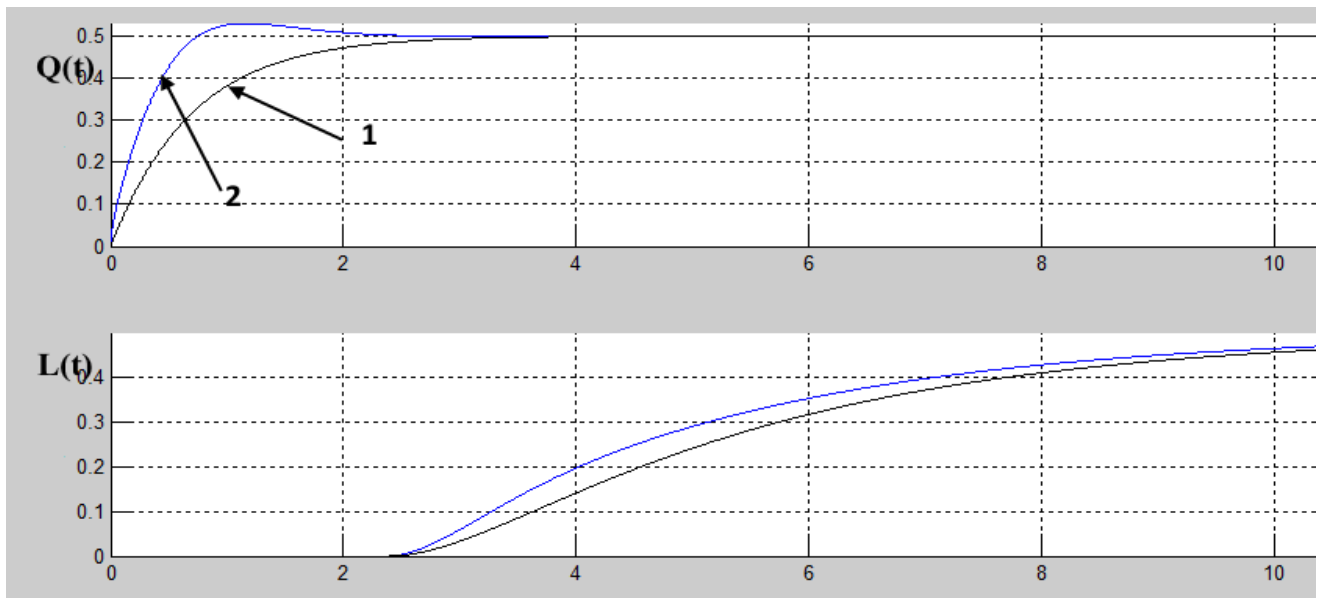


Рисунок 18 - Осцилограма параметрів процесу:
 без регулятора (1) та з налаштованим регулятором (2)

Дія регулятора перевіряється при наявності збурень, які імітуються підключенням зовнішнього генератора сигналів після завантаження млина з допомогою елемента «

Step». На осцилограмі рис. 19 зображено результат дії налаштованого регулятора в умовах дії збурень.

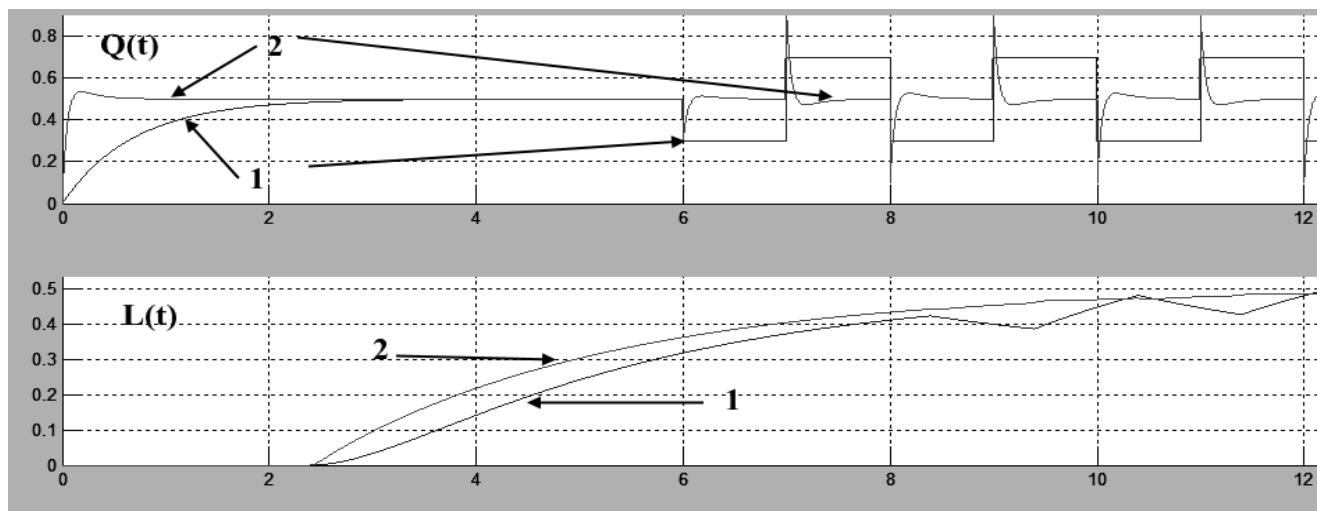
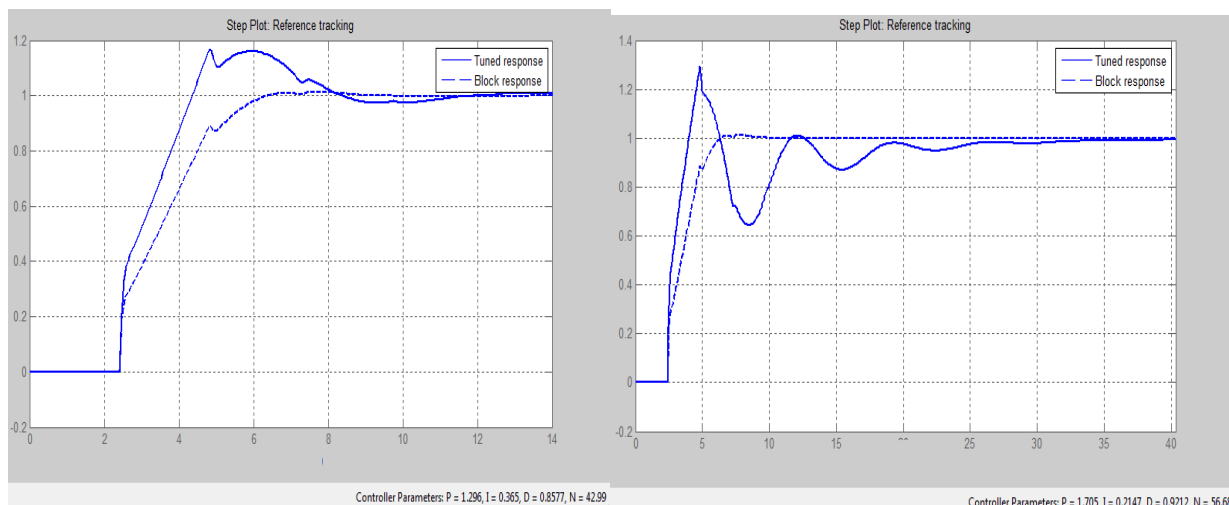


Рисунок 19 - Осцилограма параметрів процесу при дії збурень без регулятора (1) та з налаштованим регулятором (2)

Наступний крок налаштувань регулятора здійснюється після замикання другого кола зворотнього зв'язку (L). Із графіку панелі налаштувань, приведену на рис. 20 а) видно, що якість процесу регулювання при значеннях параметрів регулятора:

$$P=1,3; \quad I=0,365; \quad D=0,85$$

незначно покращилася, та набула коливальних властивостей. При спробах покращити якість регулювання шляхом переналаштування параметрів ПД регулятора рівня завантаження млина перехідний процес становиться нестійким (рис. 20б).



а)

б)

Рисунок 20 - Результат налаштувань на панелі Matlab

Такі властивості об'єкту керування [передатна функція (12)] свідчать про неефективність ПД регулятора для процесів, що мають значну інерційність та транспортне запізнення. Графік модельованого процесу із збуреннями рівня завантаження млина, зображений на рис. 21, показує, що регулятор ефективний тільки під час завантаження млина. Після входу процесу мелення в номінальний режим вплив регулятора з отриманими налаштуваннями на рівень завантаження млина мінімальний.

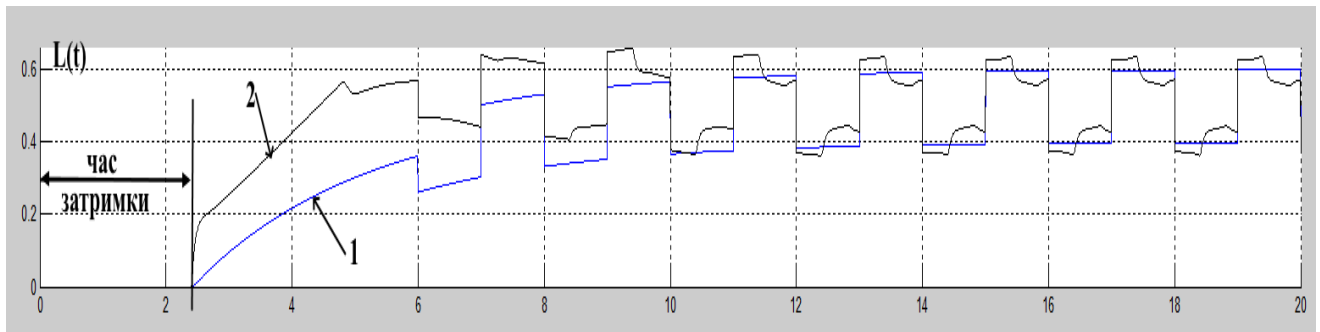


Рисунок 21 - Осцилограма параметрів процесу при дії збурень без регулятора (1) та з налаштованим регулятором (2)

Альтернативним варіантом розбудови регулятора, що забезпечує більш ефективне регулювання об'єктів із запізненням, виступають екстремальні регулятори. Відмінність таких регуляторів від звичайних ПД регуляторів полягає у тому, керуючі впливи у напрямку оптимуму вихідного параметру видаються в дискретні проміжки часу [13, 16].

Тому в третьому контурі регулювання для *оптимізації процесу* мелення використовується екстремальний регулятор. Цей регулятор через утримання оптимального рівня завантаження млина повинен забезпечити максимальну продуктивність процесу, що і вирішує завдання енергозбереження. Оптимізація здійснюється в результаті використання нелінійної функції продуктивності P (відносні од.) від рівня завантаження (%) млина L :

$$P(L) = 9,5 * L^3 - 15,2 * L^2 + 7 * L + 0,001 \quad (13)$$

Ця функція, зображена на рис.22, має характерний екстремум продуктивності при певному рівні завантаження L_{opt} (в нашому випадку 38%). Функція продуктивності отримується в результаті апроксимації експериментальних даних при дослідженні процесу помелу.

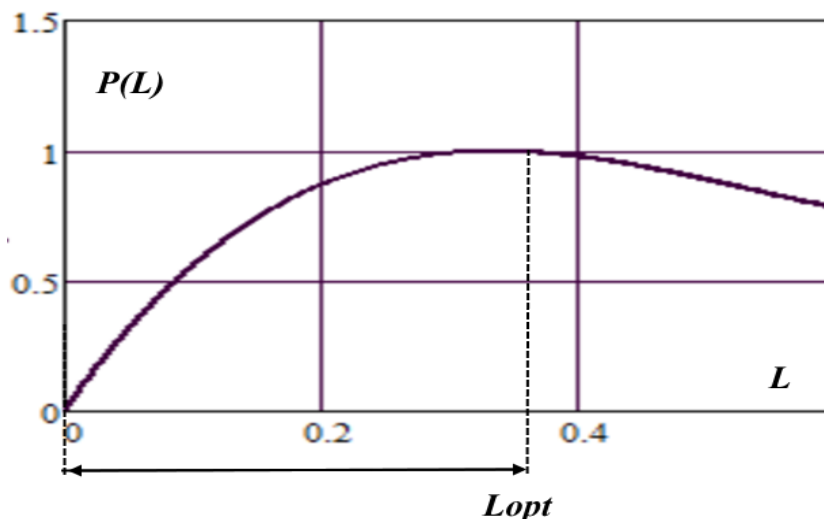


Рисунок 22 - Функція продуктивності від рівня завантаження млина

На даний час відомі декілька методів реалізації екстремального регулятора: визначення похідної, ітераційні крокові алгоритми, фіксація екстремуму, використання пошукового періодичного сигналу.

Одна із схем регулятора, що відпрацьовує похідну від параметру, що оптимізується, приведена на рис. 23. В схемі екстремального регулятора використовується наявність екстремуму в статичній характеристиці об'єкту. Відомо, що при пересіченні значення функції точки екстремуму похідна змінює свій знак (рис. 23б). Саме при $L=L_{opt}$ похідна продуктивності P $dP/dL = 0$.

Для знаходження градієнта пошуку оптимуму регулятора до блоку обробки (БО) надходять значення похідних входу dL/dt та виходу dP/dt функції (13), які отримуються в диференціаторах D1 та D2.

В блоці БО визначається знак похідної dP/L . Значення коефіцієнта передачі блоку корекції БК визначається в процесі налаштувань регулятора. Сигнал з виходу БК надходить до виконавчого органу (дозувальника), який корегує рівень завантаження млина, що є об'єктом керування (ОК).

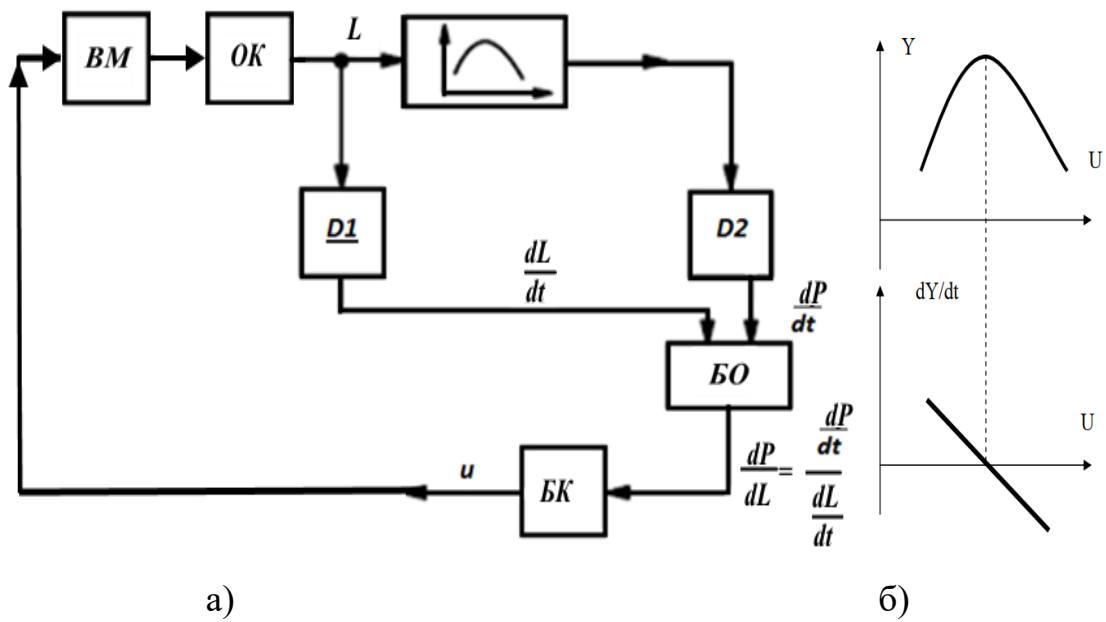


Рисунок 23 - а) Структурна схема екстремального регулятора; б) Графіки залежності для екстремального регулятора

Зазвичай в екстремальних регуляторах використовується блок логіки, який потрібен для визначення напрямку градієнту руху до максимуму. В нашому випадку у ньому немає потреби, оскільки в лінійному об'єкті відомо наперед, що значення $dP/L = 0$ (при $L=L_{opt}$). У разі відсутності зовнішніх збурень екстремальний регулятор працює

як звичайний, для якого завданням регулювання є $U_p=0$. Саме збурюючі впливи ініціюють новий пошук екстремуму, підлаштовуючись на відомий оптимум. Збільшення величини зовнішніх збурень лише прискорює рух регулятора до точки екстремуму, що є перевагою цього типу регулятора.

Слід зазначити, що сигнал корекції зворотного зв'язку для OK є позитивним, на відміну від класичних регуляторів, де використовується негативний зворотній зв'язок. Тому коефіцієнт передачі блоку корекції $БК$ залежить від загального коефіцієнту передачі OK , оскільки при певних значеннях процес регулювання перестає бути стійким. Таким чином коефіцієнт позитивного зворотного зв'язку налаштовується таким чином, щоб загальний коефіцієнт передачі в точці екстремуму забезпечував стійкість процесу, тобто $K_3=1$.

Врахування описаних факторів дало змогу розробити модель екстремального регулятора, що оптимізує процес помелу цементу, схема якої зображена на рис. 24.

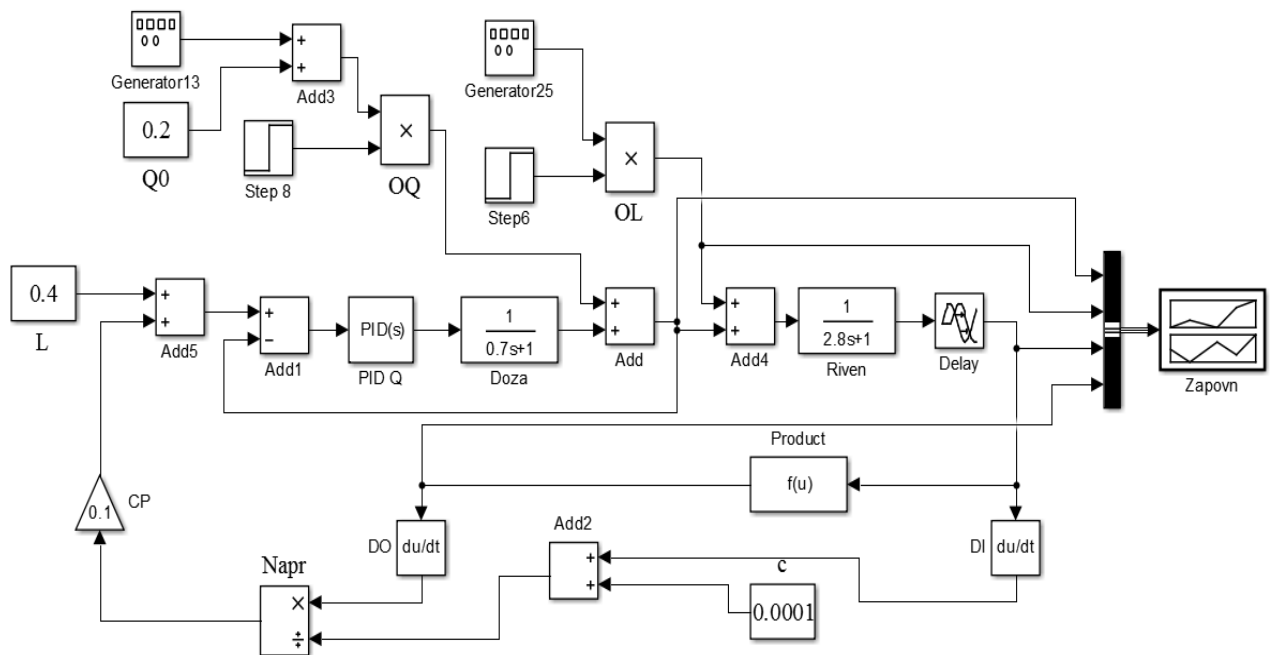


Рисунок 24 - Схема моделювання системи регулювання процесу помелу.

Випробування регулятора із використанням імітаційного моделювання, дало змогу відмовитись від зовнішнього контуру регулятора по завантаженню млина, який використовувався в схемі моделі, що зображена рис.15. Таке рішення прийнято внаслідок більш ефективної роботи (зменшення рівня вихідних збурень) екстремального регулятора та погіршення стійкості регулювання процесу при наявності в загального контуру PID-регулятора завантаження.

Осцилограми, що підтверджують якість регулювання продуктивності млина та мінімізації збурень параметрів процесу, показані на рис. 25.

В процесі виходу процесу на номінальний режим по утриманню заданого рівня завантаження млина (40%) оцінюється рівень його продуктивності. Ця продуктивність, навіть при вивантаженні продукту (зміна величини витрат Q) та зміні рівня завантаження при надходженні сировини на помел (зміна рівня L) утримується на максимальному значенні.

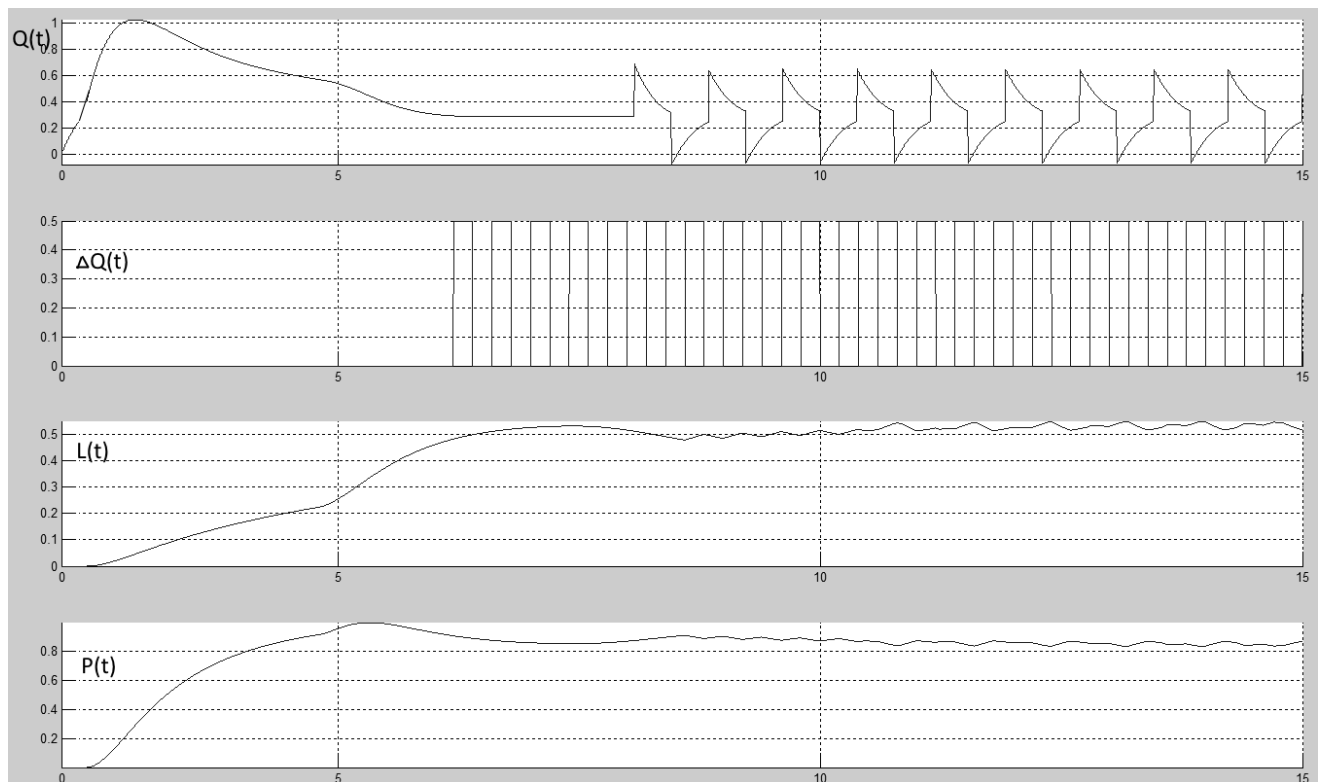


Рисунок 25 - Осцилограми зміни параметрів ОК у часі.

$Q(t)$ – зміни витрат сировини в умовах дії збурень

$\Delta Q(t)$ – збурення витрат сировини

$L(t)$ – зміни рівня завантаження млина в умовах дії збурень

$P(t)$ – зміни продуктивності при завантаженні млина та номінальному режимі в умовах дії збурень

3.2 Моделювання керування аспірацією

Оскільки якість процесу аспірації визначається співвідношенням швидкостей осадження частинок продукту та швидкостей їх винесення, то утримання тиску в тракці аспірації є основним завданням керування. При стабілізації тиску тракту, в умовах зміни його аеродинамічного опору, зміни рівня завантаження млина, слід враховувати, що перепад тиску визначає швидкість потоку повітряної суміші V_p (витрати суміші $Q_p = V_p \cdot S$):

$$Q_p = 0.65 \cdot S \cdot \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}} \quad (14)$$

де S – переріз тракту; ΔP – перепад тиску; ρ – щільність повітряної суміші.

Тому завдання значення величини стабілізації тиску розраховується, виходячи із врахування взаємодії контурів системи керування (схема рис. 14).

Виходячи із функціональної схеми ОК (рис. 9), основним параметром регулювання є перепад тиску, що рухає частинки продукту. Керуючим впливом для нього є частота обертів електродвигуна напірного агрегату, яка визначає витрати повітряної суміші, що рухається у тракті. Необхідність спостереження значення витрат суміші пов’язана із дотримання умов осідання частинок цементу в фільтрі сепаратора.

Отримання певного ступеня аспірації досягається в результаті врахування аеродинамічного опору млина та фільтру аспіраційної системи. Хоч аеродинамічний опір самої системи залежить від конструктивних параметрів використовуваного обладнання(зокрема перерізу S), та в процесі мелення він змінюється. Ці зміни відбуваються внаслідок варіації параметрів сировинного матеріалу та перехідних процесів регулювання помелу. Аеродинамічний опір оцінюється втратами тиску потоку, тому вимірюється в одиницях тиску. Це дає змогу в схемі моделювання процесу аспірації, що зображена на рис. 26, імітувати зміни аеродинамічного опору з допомогою блока підсумовування та генератора сигналів збурення.

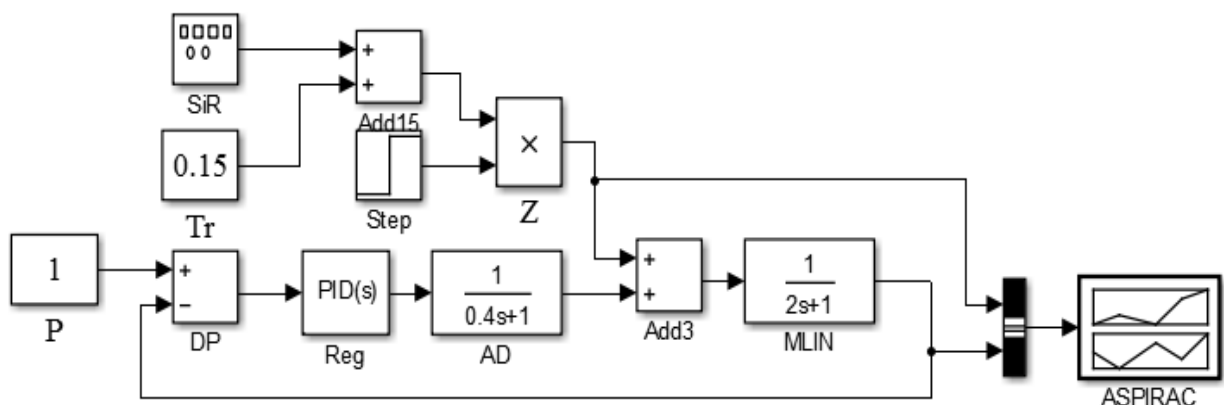


Рисунок 26 - Схема моделювання процесу аспірації

Крім PID-регулятора розрідження тиску, модель має у своєму складі ланку, що моделює привод напірного агрегату (AD), та ланку аспіраційного тракту (MLIN).

Завданням моделювання процесу аспірації є дослідження можливостей мінімізації коливань тиску по тракту при змінах аеродинамічного опору млина.

Як і канал керування завантаженням млина, канал керування аспірацією характеризується затримками у часі. Електромеханічні сталі часу досліджуваного каналу знаходимо із довідкової літератури, наприклад, електромеханічну сталу часу АД та сталу часу частотного перетворювача. Оцінку сталої часу тракту знаходимо з перехідної характеристики з використанням пілотної установки [17].

Запускаючи моделювання при розімкнутому зворотному зв'язку ОК (без збурень), отримуємо графік перехідної функції каналу аспірації, який зображено на рис.27.

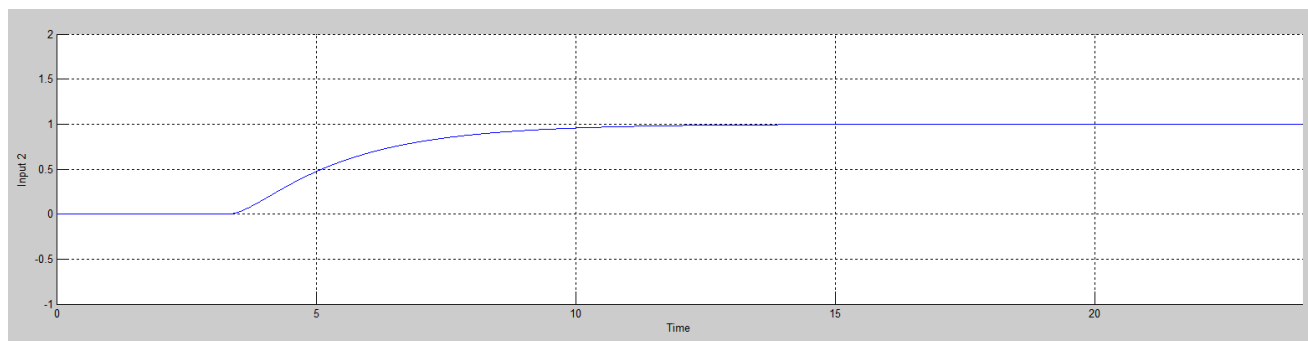


Рисунок 27 - Графік перехідної функції каналу аспірації

При замиканні від'ємного зворотнього зв'язку, але відсутньому PID-регуляторі, перехідна функція каналу аспірації набула коливального характеру (рис. 28), що свідчить про критичний стан стійкості регулятора. При цьому також збільшився час перехідного процесу.

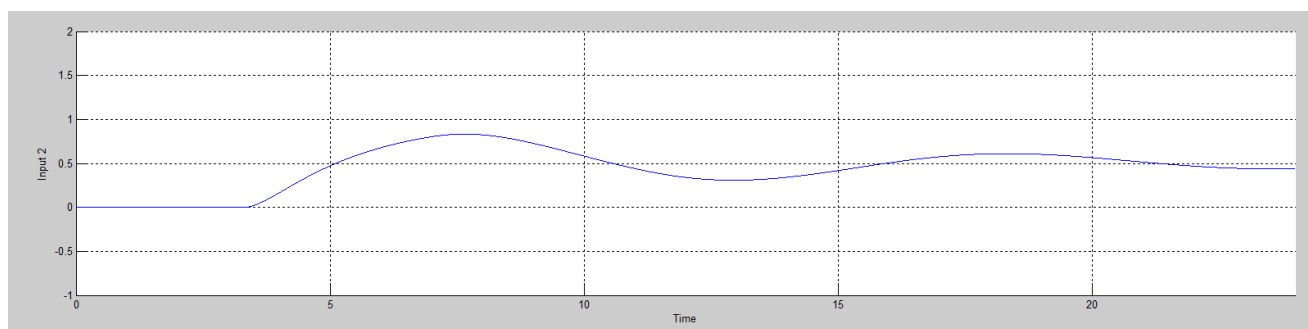
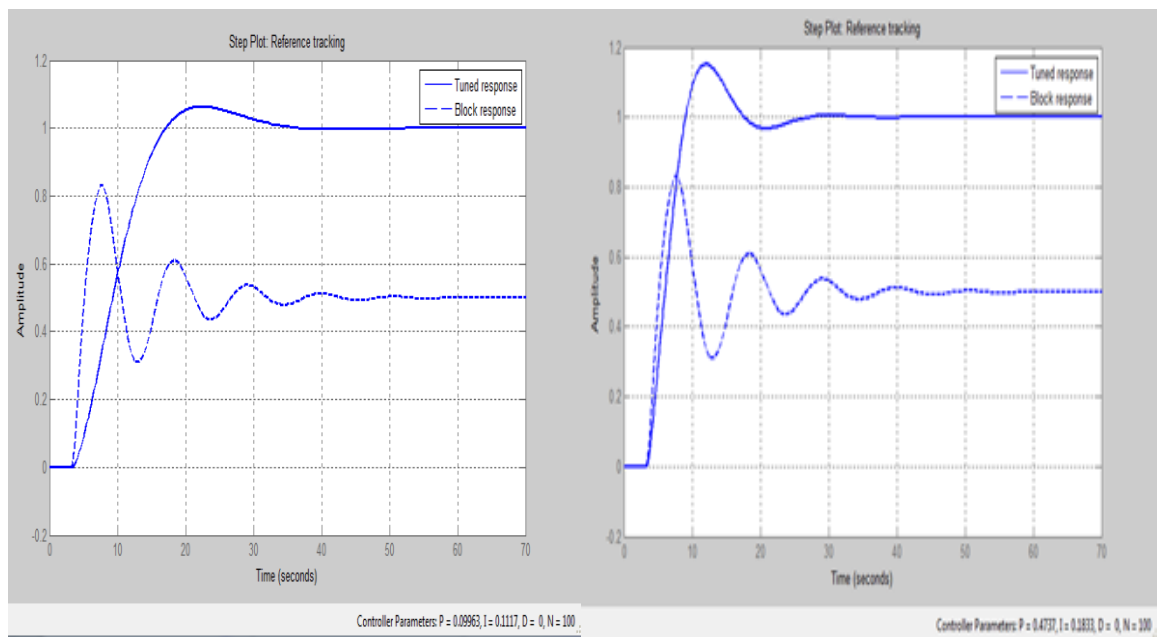


Рисунок 28 - Графік перехідної функції із замкненим контуром.

Скориставшись опцією налаштувань пакета Matlab для PID-регулятора, що входить до контуру регулювання аспірацією, отримаємо перехідну характеристику налаштованого (Tuned) та неналаштованого регулятора, яка показана на рис. 29 а). Не задовольняючись класичними налаштуваннями PID – регулятора, що отримуються по прийнятим в Matlab критеріям, оптимізуємо вигляд перехідної характеристики по мінімальному часу перехідного процесу (рис. 29 б). Із рис. характеристики рис. 29 б видно, при зменшенні часу перехідного процесу збільшилося величина перерегулювання, яка теж досягає критичних значень (18%).



а)

б)

Рисунок 29 - Результат налаштувань параметрів PID-регулятора

Щоб сформулювати висновки про спроможність регулятора тракту аспірації, оцінимо його ефективність в умовах дії збурень. Для цього в схемі моделювання рис. 26 підключимо імітацію збурень, які починають діяти після завершення перехідного процесу. В параметрах моделювання використаємо отримані параметрами налаштувань регулятора. Результати моделювання цих варіантів налаштувань приведені на рис. 30.

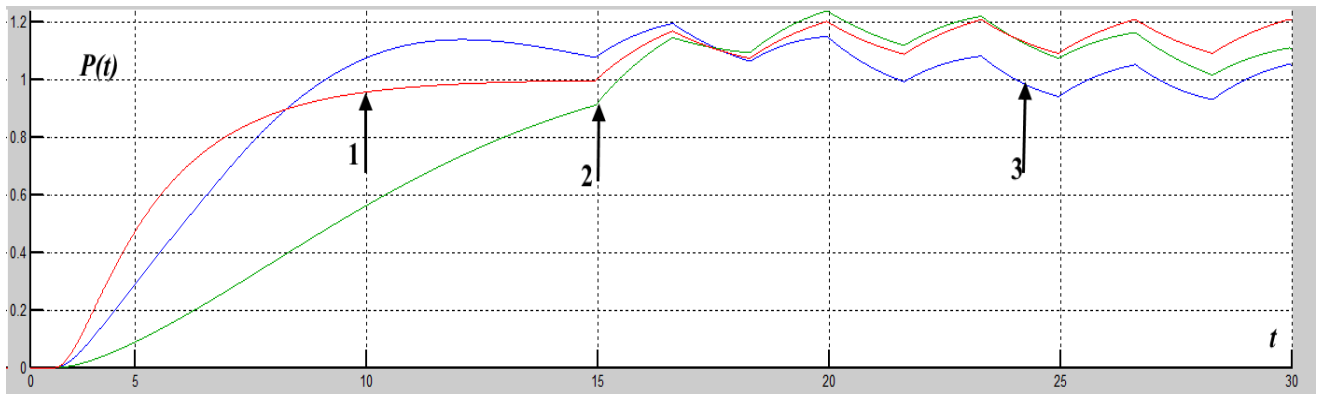


Рисунок 30 - Стабілізація збурень контуру регулювання аспірацією

- 1– відключений регулятор; 2– налаштування за критеріями MatLab (рис. 29а);
 3– налаштування за виглядом перехідної характеристики(рис.29б)

Із аналізу результатів стабілізації тиску (рис. 30) витікає, що налаштування PID – регулятора, що є оптимальними по тривалості перехідного процесу та по перерегулюванню більш ефективно мінімізують дію збурень, ніж при налаштуваннях регулятора по методу Зіглера Нікольса.

Недостатня ефективність задіяного PID-регулятора пояснюється специфікою ОК, зокрема великими сталими часу процесу. Намагання поліпшення якості регулювання процесу за рахунок підвищення коефіцієнта підсилення регулятора порушує стійкість системи. Можливим варіантом побудови регулятора цього контуру було б також застосування екстремального регулятора, але для цього необхідні додаткові дослідження оптимальних режимів його роботи.

4. ПОБУДОВА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ПОМЕЛУ

Для практичної реалізації системи керування процесом помелу компонентів цементу використовується SCADA-система. Такі системи, що передбачають комплексну систему автоматизації, будуються на сучасних мікропроцесорних засобах. Це дозволяє отримати необхідні комунікаційні та обчислювальні можливості для побудови потрібної архітектури системи.

До системи керування входять наступні підсистеми:

- підсистема керування швидкістю обертання млина;
- підсистема керування ваговими дозувальниками;
- підсистема керування процесом аспірації.

Якщо будується потужне виробництво процесів помелу, то з'являється верхній рівень керування, і до перерахованих підсистем додається підсистема моніторингу про функціонування технологічного обладнання та режими процесу.

На попередньому етапі проектування зроблено вибір засобів автоматизації та програмованого логічного контролера (ПЛК), зокрема ПЛК ОВЕН. На рис. 31 приведена функціональна схема ПЛК 160, із якої видно архітектуру контролера та можливості підключення периферійних засобів. Зазначені можливості визначаються характеристиками ПЛК 160, що наведені у таблиці 1.

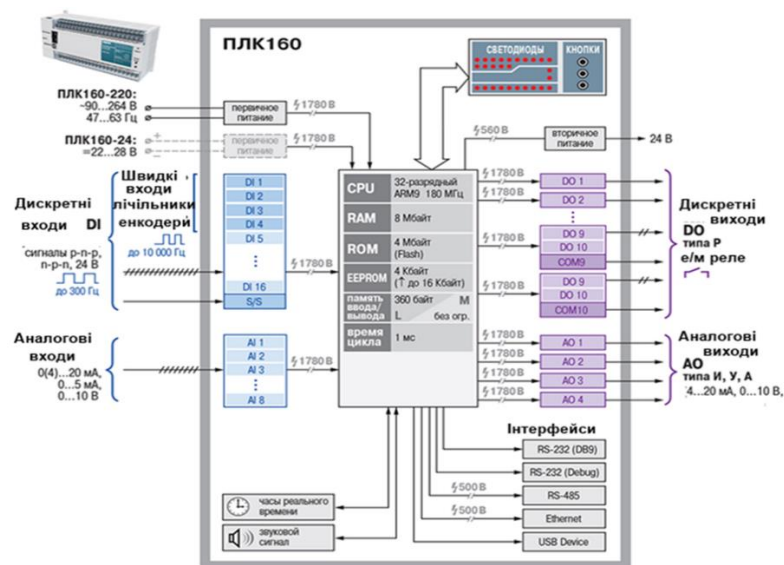


Рисунок 31 - Функціональна схема ОВЕН ПЛК-160

Параметр	Значення
Напруга живлення, В: ПЛК160-24.X-X ПЛК160-220.X-X	від 22 до 28 постійного струму (ном 24 В). від 90 до 264 змінного струму частотою від 47 до 63 Гц
Спож потужність, ВА, не більше	40
Цифрові (дискретні) входи	
кількість входів з них швидкодіючих	16 4 (DI1-DI4)
Напруга живлення дискретних входів, В Максимальний вхідний струм дискретного входу	24 ± 3 не більше 7 мА при живленні 24 В, не більше 8,5 мА живленні 27 В
Дискретні виходи (контакти електромагнітних реле)	
Кількість релейних вихідних каналів	12
Гальванічна розв'язка	Індивідуальна (для DO1-DO8), групова (DO9-DO10) і групова (DO11-DO12)
електрична міцність ізоляції між групами дискретних виходів і групами інших ланцюгів, В	1 780
Максимальний струм, комутований контактами реле, А, не більше	3 (для змінної напруги не більше 250 В, частотою 50 Гц)
Час перемикування контактів реле зі стану «лог. 0 »в«Лог. 1 »і назад, мс, не більше	50 (виходи DO1-DO12)
Аналогові виходи	
Кількість аналогових виходів	4
Тип вихідного сигналу Універсальний	від 4 до 20 мА, Розрядність ЦАП (біт) 12 від 0 до 10 В Розрядність ЦАП (біт) 10
Межа основної зведеної похибки ЦАП	± 0,5%
Мінімальний період оновлення виходів	100 мс
Живлення аналогових виходів	Зовнішнє (24 ± 3 В)
Гальванічна ізоляція аналогових виходів	індивідуальна
Електрична міцність ізоляції між групами аналогових виходів і групами інших ланцюгів, В	1 780

Таблиця 1 – Характеристики ОВЕН ПЛК-160

Вибір цього ПЛК передбачає використання програмного забезпечення Owen Process Manager (OPM). Це дозволяє організувати зв'язок між ПК та первинними перетворювачами різних типів. В результаті ініціалізації OPM на екрані ПК створюється головне вікно, що дозволяє користувачу реалізовувати мнемосхему технологічного процесу. Необхідними даними для побудови схеми є:

- параметри опитування периферійних пристроїв, що підключаються до інтерфейсу;
- тип адаптера, що створює зв'язок із вибраним інтерфейсом;
- типи адаптерів, що створює зв'язок пристроїв ОВЕН із вибраним інтерфейсом.

Схема підключення периферійних пристроїв (вводу/виводу) сімейства ОВЕН показана на рис. 32



Рисунок 32 - Схема підключення периферійних пристроїв

До складу схеми рис. 32 входить модуль ОВЕН ИП320, що дозволяє створити людино машинний інтерфейс (НМІ) керування процесом. Саме інтерфейс НМІ візуалізує параметри технологічного процесу для автоматизованого робочого місця (АРМ) оператора. На дисплейній панелі АРМ (рис. 33) відображується режим роботи кульового млина (М1). До параметрів, що характеризують режим у реальному часі, відносяться: частота обертання (об/хв); завантаження млина, %; стан помелу, як функція

часу; час мелення; стани вхідного та вихідного клапанів завантаження/вивантаження; стан режиму обладнання (вкл/викл)

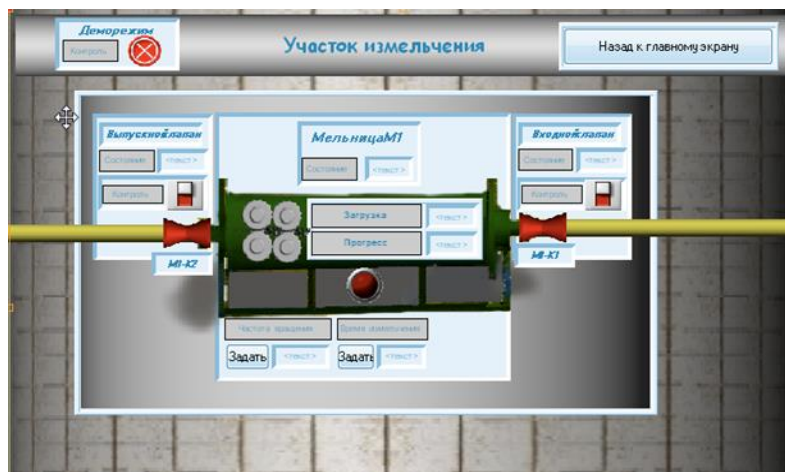


Рисунок 33 - Экран наладки мельницы

Оскільки ефективне керування процесом помела компонентів цементу залежить не тільки від рівня стабілізації обертання млина, а й від якості функціонування підсистеми дозування компонентів, то в системі передбачається окремий контур керування дозуванням компонентів. В схемі, що зображена на рис. 34, локальні засоби автоматизації підключаються до керуючого ПЛК по інтерфейсу RS-485. Це забезпечує оперативне корегування уставок керування процесом, що сприяє підвищенню продуктивності кульових млинів, навіть у випадку об'єднання певної їх кількості в потужний комплекс.

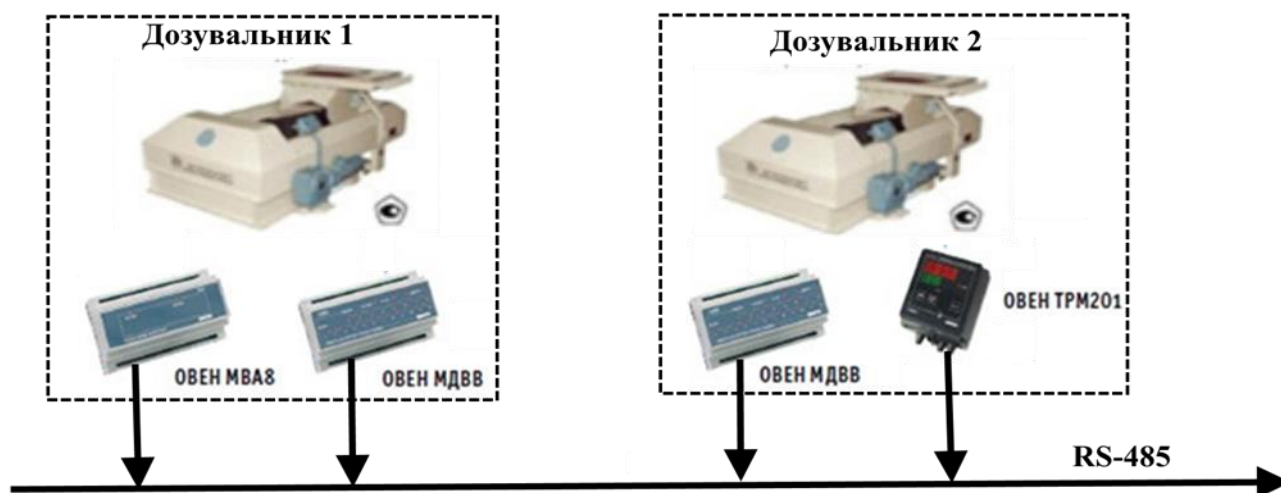


Рисунок 34 - Схема керування дозуванням компонентів

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

Згідно алгоритму оптимізації, приведеному на рис. 35, в результаті формування вектору керування, для локальних контурів регулювання отримуються відповідні значення керуючих впливів.

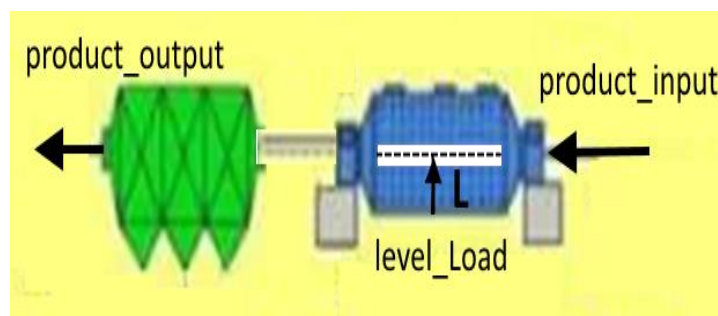


Рисунок 35 – Схема алгоритму керування дозуванням

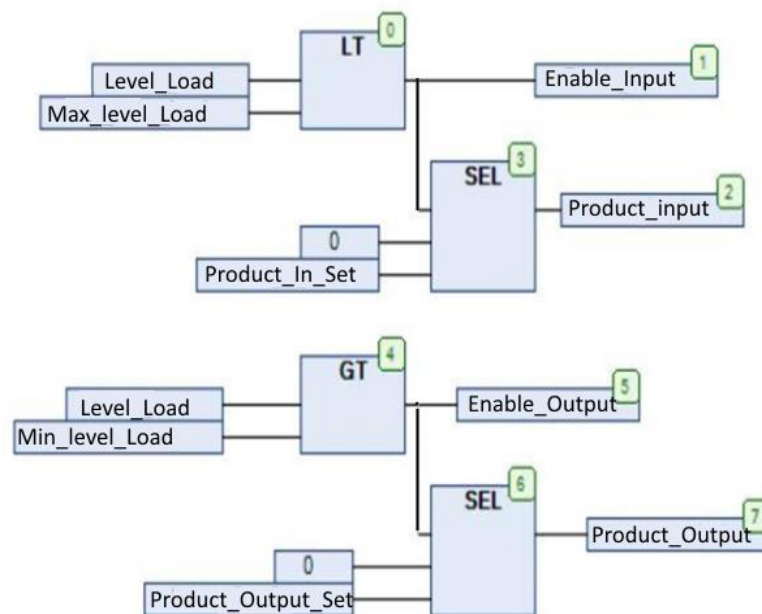
Програмне забезпечення системи керування помелом компонентів цементу будується, відповідно до архітектури ОВЕН, на програмному продукті CoDeSys. Функціональні можливості цього середовища визначаються засобами візуального програмування в стандарті IEC 61131-3. CoDeSys, як засіб програмного забезпечення (ПЗ) ПЛК, характеризується набором функціональних елементів і має 2 частини: середовище програмування та систему виконання.

Можливості імітаційного моделювання та відлагодження взаємодії НМІ системи керування досліджуються з використанням програми, що зображена на рис. 36. Згідно з цією програмою, яка створена у середовищі Codesys [19], з віртуального ПЛК здійснюється керування моделлю млина.

Вхідними змінними є витрати сировини та значення вивантаження продукту. Вихідна змінна – рівень завантаження млина.



а) Візуальна модель



б) Графічний редактор Codesys

Рисунок 36 - Схема моделювання завантаження млина

При моделюванні задіяні такі змінні:

Product_In_Set; Product_Out_Set – змінні витрати сировини та продукту;

Level_Load – змінна завантаження млина;

Max_level_Load; и Min_level_Load – максимальний та мінімальний рівень завантаження млина;

Product_Input; Product_Output – витрати продукту.

В програмі використовуються оператори:

LT, GT – двійкові оператори порівняння;

SEL –бінарний оператор вибору;

Enable_Input; Enable_Output – операторы логічного типу.

Взаємодія між віртуальним ПЛК Codesys, в якому знаходиться програма (рис. 36) із середовищем моделювання Matlab, в якому емулюється процес завантаження млина (схема рис. 24), здійснюється з допомогою OPC-серверу. Для організації двостороннього зв'язку між програмами в середовище Matlab вбудовано OPC- клієнт (Рис. 37).

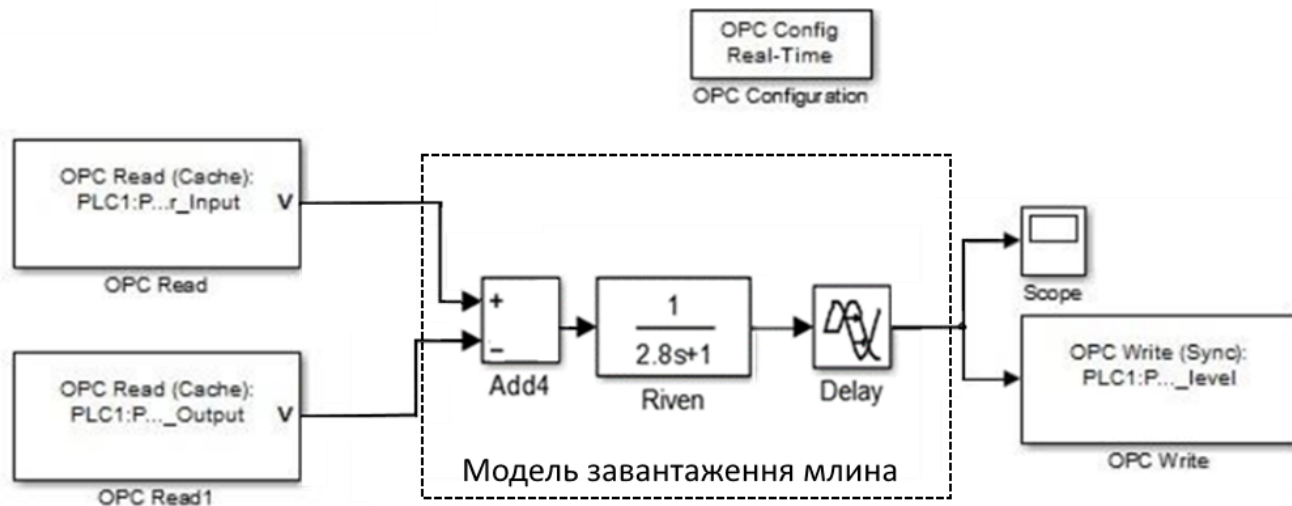


Рисунок 37 - Схема моделювання взаємодії віртуального ПЛК та моделі млина

Значення витрат сировини, що надходить у млин (Input) та значення вивантаження продукту (Output) задаються в ПЛК та передаються в Matlab Simulink. Відпрацьовані значення динаміки параметру рівня завантаження розраховуються в моделі (Level) та передаються знову до віртуального ПЛК.

При необхідності результати роботи регулятора при різних його налаштуваннях виводяться на графічний дисплей.

Використання розробленої схеми дозволяє досліджувати взаємодію програмних засобів імітації та візуалізації, тим самим реалізовувати пошук оптимальних значень параметрів керованого процесу.

ВИСНОВКИ

Аналіз процесу помелу компонентів цементу, як об'єкту керування, дозволив визначити функціональні завдання керування об'єктом.

Оскільки енергоємність процесу мелення до теперішнього часу залишається значною, то завдання проведених досліджень сформовано, як пошук ефективних каналів керування процесом, що забезпечують зниження енергоспоживання.

Критерії керування об'єктом отримано із аналізу завдань керування. Ці завдання передбачають отримання потрібного фракційного складу продукту та забезпечення енергозберігаючих режимів мелення.

В результаті ідентифікації параметрів об'єкту керування розроблена імітаційна модель об'єкту, до якої входить модель керування рівнем завантаження млина та модель керування аспірацією млина.

Показано, що для об'єктів із запізненням у часі та значними сталими часу, яким є процес мелення, звичайні ПДД – регулятори неефективні. Значні переваги дає використання екстремального регулятора, який налаштовується на оптимум завантаження по похідним витрат продукту. ПДД– регулятор процесу аспірації, внаслідок специфіки процесу, не дає змоги досягти значної ефективності керування параметрами процесу.

Розглянуто варіант побудови системи керування процесом помелу на мікропроцесорних засобах ОВЕН, архітектура якого дозволяє застосувати програмний продукт CoDeSys для побудови SCADA системи керування процесом помелу цементу. Шляхом використання опції OPC- сервер /OPC- клієнт перевірено можливості імітаційного моделювання фрагмента програмного забезпечення при взаємодії продукту CoDeSys та Matlab Simulink.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Alsop P. Cement plant operations handbook for dry process plants / P. Alsop. – Tradeship Publications Ltd., Portsmouth, United Kingdom, 2001. – 159 p.
2. Tsamatsoulis D. C. Optimizing the control system of cement milling: process modeling and controller tuning based on loop shaping procedures and process simulations/Brazilian Journal of Chemical Engineering. – **2015**. –vol. 31 no.1. – <https://doi.org/10.1590/S0104-66322014000100015>
3. Li Huajian, Yang Lu, Xie Yongjiang. Effect of Fineness on the Properties of Cement Paste// Trans Tech Publications. Switzerland . – **2015**. –Vols 629-630. P. 366-370// doi. 10.4028/www.scientific.net/KEM. 629-630.
4. Классен В.К. Технология и оптимизация производства цемента. – Белгород: Изд-во БГТУ. –2012. – 308с.
5. Looser В. On-line particle size analysis. // Труды шестой международной конференции по цементу ПЕТРОЦЕМ. – СПб, 2010. – С. 100 – 102
6. Ömürden Genç. Energy-Efficient Technologies in Cement Grinding, High Performance Concrete Technology and Applications/ Salih Yilmaz and Hayri Baytan Ozmen, IntechOpen. –**2016**. –(5th). – DOI: 10.5772/64427.<https://www.intechopen.com/books/high-performance-concrete-technology-and-applications/energy-efficient-technologies-in-cement-grinding>
7. Shi Hua HaoBing Hua LiuXin Yong Yan. Review on research of cement grinding fids and certain problems. / Key Engineering Materials753: 295-299.–**2017** August .–DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.753.295
8. Кузнецова М.М. Определение энергоэффективности режимов измельчения твердых материалов в шаровой мельнице / М.М. Кузнецова, В.Е. Ведь, С.А. Вамболь // Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харків: ПП «Технологічний центр». – 2014.– № 2/1 (68). – С. 20 – 23
9. Ястребов К. Л. Расчет мощности, потребляемой барабанными мельницами // К. Л. Ястребов, М. Д. Николаев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. Иркутск : Изд-во ИрГТУ. – **2015**. – № 4(48). – С. 56–59

10. Алексеев М.А. Автоматизированный контроль степени заполнения барабанных мельниц рудой // Науковий вісник НГУ. – 2014. – № 4. –С. 13–19.
11. Улитенко К.Я., Маркин Р.П., Соколов И.В. Виброакустический анализ процессов дробления и измельчения на горно-обогатительных предприятиях // Горный журнал. – 2009. – № 10. – С. 72–76.
12. Шаптала В.Г. Математическая модель управления технологической аспирацией цементной мельницы/ В.Г. Шаптала, В.В. Шаптала // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2017. – № 5. –С. 144–150.
13. Ужеловський В.О. Екстремальне керування продуктивністю помелу вапняку у двокамерному млині / В.О. Ужеловський, О.А. Руденко// Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. –2016. – № 2 (215).– С.55 –61
14. Черномордов В.А. Розробка математичної моделі млина для помелу цементного клінкеру /В.А. Черномордов, О. Г Шутинський// Матеріали XIII Міжнародної науково-практичної конференції магістрантів та аспірантів. – 2019. –С.194.
15. Исаева М. Р. Автоматизация процесса производства органоминеральной добавки на основе золошлаковой смеси/ М.Р. Исаева, А. М. Колбасин, Ю.Э. Васильев // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». – 2013. –№1 <http://publ.naukovedenie.ru>
16. Еременко Ю.И. О возможности построения экстремальной шаговой САУ шаровой мельницы. /Ю.И. Еременко, Д.А. Полещенко, Ю.А. Цыганков // Управление большими системами. – 2016 . – Самара. – С. 611-622.
17. Кафаров, В. В. Системный анализ процессов химической технологии : основы стратегии : монография / В. В. Кафаров, И. Н. Дорохов. – Москва: Издательство Юрайт. –2019. – 499 с.
18. ОВЕН. Каталог продукції 2017. вилучено із <https://owen.ua>.
19. Рыбалев А.Н., Николаец Ф.А. Разработка и эмулирование АСУТП с использованием программ разных производителей и типов /Вестник Амурского государственного университета. – 2016. – №65. – С. 73-82.