

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Бахмутський навчально-науковий професійно-педагогічний інститут
Кафедра електромеханічних та комп'ютерних систем

До захисту допущено

Завідувач кафедри


(підпис)

Інна НЕФЬОДОВА

(ім'я, прізвище)

«05» грудня 2024 року

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА (ПРОЄКТ)

рівень вищої освіти другий (магістерський)

спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

освітньо-професійна Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

тема «Синтез електромеханічної системи із асинхронним двигуном і частотно-керованим перетворювачем»

Виконав(ла)

здобувач(ка) групи БД-П23мг
(шифр групи)

Павло СУПРУН

(ім'я, прізвище)

Керівник роботи

д.т.н., проф. Валентина ШЕВЧЕНКО

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

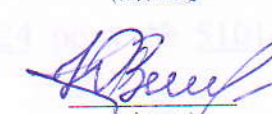
Рецензент роботи

к.т.н., доц. Юрій ЗАЧЕПА

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


(підпис)


(підпис)


(підпис)

Засвідчую, що у цій роботі
немає цитат та вилучень з
праць інших авторів без
відповідних посилань
здобувач (ка) 
(підпис)

Харків – 2024

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

Факультет/ІНІ Бахмутський навчально-науковий професійно-педагогічний інститут

Кафедра Електромеханічних та комп'ютерних систем

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Освітньо-професійна програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Інна НЕФЬОДОВА

(підпис)

(ім'я, прізвище)

«08» гесовтня 2024 року

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ПРОЄКТ)

Супрун Павло Михайлович

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема роботи Синтез електромеханічної системи із асинхронним двигуном і частотно-керованим перетворювачем

керівник роботи Шевченко Валентина Володимирівна, д. т. н., професор
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «08» жовтня 2024 року № 5101-5/3236

2. Строк подання здобувачем роботи «02» грудня 2024 р.

3. Перелік питань, які потрібно розробити: В пояснювальній записці необхідно відобразити аналітичний огляд та опис технологічного процесу, формулювання вимог до електроприводу, енергосиловий розрахунок параметрів технологічного об'єкта, обґрунтування вибору потужності двигуна, вибір електродвигуна та силового електрообладнання, математична модель електромеханічного об'єкта, розрахунок статичних та динамічних параметрів електроприводу, синтез системи керування та дослідження динамічних характеристик електромеханічної системи шляхом моделювання.

4. План роботи

№ з/п	Назви етапів роботи
1	Огляд літературних джерел, нових розробок, опублікованих даних та іншої інформації, пов'язаної з темою роботи
2	Обґрунтування теоретичної бази обраної проблеми.
3	Характеристика об'єктів галузі: стан і стратегії розвитку
4	Дослідження синтезу електромеханічної системи із асинхронним двигуном і частотно-керованим перетворювачем
5	Розробка електромеханічної системи із асинхронним двигуном і частотно-керованим перетворювачем
6	Оформлення першого варіанту тексту, подання його на ознайомлення науковому керівнику
7	Усунення недоліків, написання остаточного варіанту тексту, оформлення дипломної роботи
8	Подання роботи на кафедру, перевірка на плагіат та зовнішні рецензування роботи
9	Захист дипломної роботи у ЕК

5. Дата видачі завдання «08» жовтня 2024 р.

Здобувач(ка)


 (підпис)
Павло СУПРУН

(ім'я, прізвище)

Керівник роботи


 (підпис)
Валентина ШЕВЧЕНКО

(ім'я, прізвище)

АНОТАЦІЯ

У роботі проведено аналіз енергоефективності обладнання з метою виявлення потенційних резервів для економії електроенергії. На основі огляду науково-технічної літератури визначено основні фактори, які впливають на питомі витрати електроенергії на одиницю виробленої продукції. Було встановлено, що теоретичні розрахунки оптимальної енергоефективності режимів роботи обладнання підтверджуються результатами експериментальних досліджень.

Досліджуючи вплив завантаження на енергоспоживання, були визначені основні шляхи оптимізації режиму роботи цього об'єкту, а також способи їх реалізації. На основі статичних характеристик об'єкта було розроблено алгоритм оптимізації режиму роботи, який реалізовано в програмному пакеті Simulink MatLab.

У роботі розглянуто питання автоматизації технологічного процесу як основного засобу для забезпечення оптимальних режимів роботи обладнання. Було створено функціональну модель, спроектовано локальні системи автоматичного регулювання та розроблено структурну схему автоматичної системи управління процесом. На основі складеної блочної схеми було спроектовано та реалізовано комплексну систему автоматичного керування, використовуючи програмний пакет Simulink MatLab.

Проведено порівняння результатів моделювання, яке засвідчило високу ефективність застосування розробленої системи автоматичного управління. Результати досліджень відкривають нові можливості для підвищення енергоефективності обладнання та зменшення витрат на енергоресурси в промислових процесах.

ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ, СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО
РЕГУЛЮВАННЯ, АВТОМАТИЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ.

ABSTRACT

The work analyzed the energy efficiency of the equipment in order to identify potential reserves for saving electricity. Based on a review of scientific and technical literature, the main factors that affect the specific electricity consumption per unit of output were identified. It was found that theoretical calculations of the optimal energy efficiency of equipment operating modes are confirmed by the results of experimental studies.

By studying the impact of the load on energy consumption, the main ways to optimize the operating mode of this facility were identified, as well as methods for their implementation. Based on the static characteristics of the facility, an algorithm for optimizing the operating mode was developed, which was implemented in the Simulink MatLab software package.

The work considered the issue of automation of the technological process as the main means for ensuring optimal operating modes of the equipment. A functional model was created, local automatic control systems were designed, and a structural diagram of an automatic process control system was developed. Based on the compiled block diagram, a complex automatic control system was designed and implemented using the Simulink MatLab software package.

A comparison of the modeling results was carried out, which demonstrated the high efficiency of the developed automatic control system. The research results open up new opportunities for increasing the energy efficiency of equipment and reducing energy costs in industrial processes.

ENERGY SAVING, AUTOMATIC REGULATION SYSTEM, AUTOMATIC OPTIMIZATION.

ВСТУП

Останнім часом, у зв'язку з постійним зростанням цін на енергетичні ресурси, зокрема електроенергію, енергозберігаючі технології набувають все більшої актуальності. У контексті гірничорудної промисловості, особливо в гірничо-збагачувальній галузі, існує значний потенціал для підвищення ефективності використання енергії.

Підвищити енергоефективність, а також продуктивність і якість концентрату на рудозбагачувальних фабриках можна через кілька ключових підходів. Серед них важливе місце займає розробка нових технологій для переробки руд, що передбачає технічне оновлення процесів підготовки і збагачення. Це може включати модернізацію наявних технологій та обладнання, а також впровадження нових, більш ефективних рішень.

Оптимізація технологічних схем і режимів роботи також може суттєво вплинути на загальну продуктивність. Зміна складу і структури діючих збагачувальних секцій, зокрема їх укрупнення, сприяє зниженню енергетичних витрат. Автоматизація технологічних процесів і впровадження локальних систем контролю дозволяють підвищити ефективність використання обладнання та енергоресурсів, створюючи умови для автоматизованого управління.

Серед інших важливих аспектів варто зазначити використання комп'ютерних програм для прогнозування, що допомагає вдосконалити технологічні процеси. Подрібнення руди, яке є найбільш енергоємним етапом у збагаченні, відкриває значні можливості для економії електроенергії на рудозбагачувальних фабриках.

Таким чином, основною метою цієї роботи є пошук оптимальних режимів роботи рудорозмольного обладнання з акцентом на енергоефективність, а також розробка методів і засобів для їх реалізації. Для досягнення цієї мети необхідно виконати ряд завдань, таких як дослідження

енергетичних процесів, що відбуваються під час роботи подрібнюючого обладнання, а також огляд можливостей підвищення енергоефективності.

Крім того, важливо знайти оптимальні режими роботи кульового млина, створити математичну базу для автоматичної оптимізації, експериментально підтвердити результати досліджень і розрахунків. Розробка концепції автоматизованого управління процесом подрібнення також є важливим завданням, що включає створення моделі кульового млина, проектування супутніх систем регулювання технологічних параметрів і комплексної системи автоматичної оптимізації процесу подрібнення.

1 ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМУ РОБОТИ РУДОРІЗМОЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ

1.1 Аналіз енергоефективності рудорізмольного обладнання

Найбільш енергоємним етапом на рудозбагачувальних фабриках є рудопідготовка. Якщо проаналізувати електроенергетичний баланс, зокрема на прикладі ПівдГЗК, можна побачити, що процес розмолу споживає приблизно 78% загальної електроенергії, витраченої на фабриці. Цей показник свідчить про те, що в глобальному масштабі на рудопідготовку припадає близько 5% усієї споживаної електроенергії. Рудопідготовка є найбільш витратною стадією обробки сировини. На неї припадає від 50% до 60% капітальних витрат і до 80% експлуатаційних витрат. Наступним за енергоємністю процесом є транспортування пульпи, яке може становити понад 8% загального електроспоживання, а в окремих випадках цей показник може досягати 21%. Крім того, варто зазначити, що постійна складова витрат електроенергії на рудозбагачувальних фабриках становить близько 30%. Це підкреслює важливість оптимізації енергетичних процесів для зниження витрат та підвищення ефективності виробництва [1].

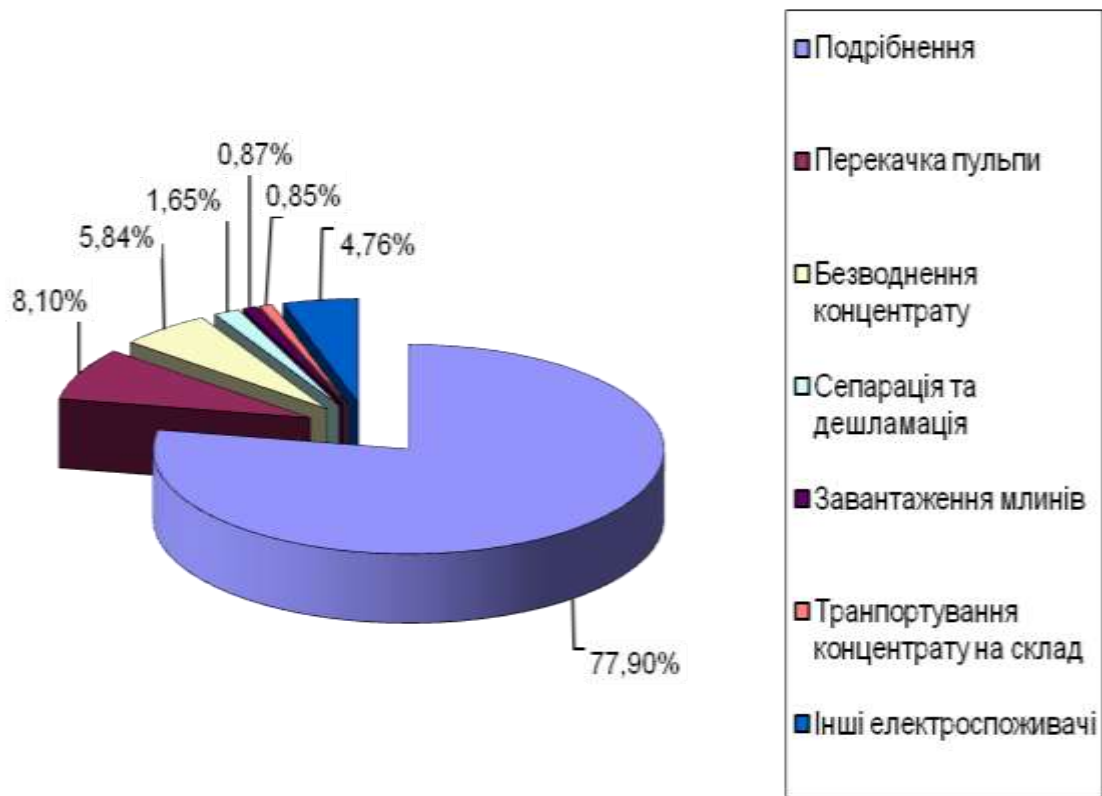


Рисунок 1.1 Електроенергетичний баланс рудозбагачувальної фабрики

Таким чином, максимальний енергозберігаючий ефект можна досягти в процесах рудопідготовки, зокрема в розмолі та дробленні, а також у гідротранспорту пульпи й хвостів. Проте, значні резерви економії енергоресурсів також існують в інших процесах дробильно-збагачувального виробництва. Основним обладнанням для подрібнення руд є барабанні млини, в які завантажують різні млинці (кулі, стержні). Залежно від типу млинців, розрізняють кульові, стержневі, рудногалькові та самоподрібнювальні млини. Продуктивність млинів, споживана потужність та питома витрата електроенергії (ПВЕ) на тонну здрібненого матеріалу залежать від багатьох факторів, включаючи параметри та розміри млина, частоту обертання барабана, характеристики вихідного матеріалу (дрібність, міцність) і кінцевого продукту (ступінь подрібнення, вміст за готовим класом, густина пульпи), а також масу й розміри млинців. Аналіз режимів роботи подрібнюючого середовища в кульових млинах показав, що падаючі на продукт млинці впливають на його зерна з силою, яка в декілька разів перевищує їх міцність.

При цьому лише частина енергії удару виконує корисну роботу. Це свідчить про те, що режим роботи подрібнюючого завантаження, при якому матеріал подрібнюється за рахунок удару, перетирання та стиснення, є не оптимальним з точки зору енергетичного впливу на рудну масу. Внаслідок цього існує певний резерв для підвищення ефективності та зниження питомих витрат електроенергії при подрібненні в кульових барабанних млинах. Оскільки подрібнення є найбільш енергоємною частиною процесу рудопідготовки, ефективність енерговикористання на цьому етапі суттєво впливає на ПВЕ при виробництві концентрату. Це підкреслює важливість оптимізації режимів роботи млинів для зниження енергетичних витрат і підвищення загальної ефективності виробництва. Причинами надлишкової витрати електроенергії в процесі подрібнення є неефективне устаткування, нераціональні режими роботи млинів і вузлів подрібнення зі зниженою продуктивністю, неоптимальним завантаженням рудою та розмелюючими тілами тощо [3].

У результаті збурюючих впливів під час роботи млинів можуть змінюватися характеристики вихідної рудної сировини, такі як крупність, твердість, гранулометричний склад, стан футеровки, а також навантаження і стан тіл, що мелють. Це, в свою чергу, призводить до різного навантаження приводних двигунів млинів. Згідно з даними різноманітних досліджень, завантаження двигунів коливається від 0.5 до 1 від номінальної потужності в відносних одиницях. Керування процесом подрібнення часто є малоефективним. Установлені емпірично технологами та задані вручну операторами режими подрібнення, зокрема значення продуктивності за вихідною рудою, що потім стабілізується ПД-регулятором, не завжди є оптимальними для поточних умов. Обстеження свідчать, що час, протягом якого млини працюють при оптимальному заповненні, не перевищує 30%. Процес подрібнення регулюється шляхом класифікації виходу млина та повернення недопрацьованого матеріалу для повторної обробки. Втрати енергії залежать від частки виходу, що повинна бути повернена. Ефективність здрібнювання в барабанному млині змінюється від максимуму до мінімуму в

залежності від змісту великого класу в завантажувальній та розвантажувальній частинах. В енерговитратах значну роль відіграє співвідношення внутрішнього діаметра барабана млина (D) до довжини корпусу (L) ($D:L$). Дослідження показують, що ідеальним рішенням було б вести здрібнювання в млинах такої короткої довжини, щоб матеріал піддавався мінімально необхідній кількості ударів, а весь готовий продукт одразу ж видалявся з млина. На практиці показник $D:L$ коливається в широких межах — від 0.3 до 5, причому найбільша розбіжність спостерігається для млинів самоподрібнення, а найменша — для кульових млинів. Для підвищення енергоефективності подрібнюючого устаткування необхідно визначити його оптимальні конструктивні параметри ($D:L$). Однак слід зазначити, що такий захід не можливий для вже наявного устаткування, що підкреслює важливість розробки нових технологій та конструкцій для подрібнення [4].

Для традиційних млинів з об'ємом (місткістю) до 160–170 м³ використовують нерегульований однодвигунний привод з високовольтним тихохідним синхронним двигуном (СД) потужністю до 4 МВт, який приводить барабан за допомогою комплекту передач, що складається зі сполучної муфти, редуктора та зубчастої передачі. Для живлення обмотки збудження ротора постійним струмом застосовують статичні тиристорні збуджувальні пристрої (ТЗУ). Вони підвищують коефіцієнт корисної дії (ККД) двигуна, збільшують швидкодію, автоматизують керування системою збудження та дозволяють форсувати збудження при зниженні напруги мережі на 15–20%. В залежності від характеру навантаження, параметрів двигуна та мережі живлення автоматичні регулятори вольтажу (АРВ) реалізують один або комбінацію декількох законів регулювання: на сталість реактивної потужності двигуна, на сталість $\cos\phi$ двигуна або вузла навантаження, а також на мінімум втрат енергії в двигуні. Серйозною проблемою нерегульованих потужних СД є їхній пуск. В залежності від потужності двигуна млина використовують різні способи пуску: прямий асинхронний від повної напруги мережі, на зниженій напрузі або плавний. Найчастіше на практиці застосовують прямий пуск, який є найбільш

простим при наявності автоматизованої напівпровідникової системи збудження. Прямий пуск СД може впливати на рівень напруги в мережі та роботу інших споживачів збагачувального комплексу і допускається при потужності двигунів до 2 МВт. Щоб зменшити цей вплив, можна застосувати пуск на зниженій напрузі, для чого зазвичай використовують реакторний пуск. Цей метод базується на додатковому зниженні напруги шляхом включення послідовного індуктивного опору до статорного ланцюга двигуна. Реакторні схеми пуску зменшують негативний вплив на роботу мережі та інших електроспоживачів, але не дозволяють часті пуски двигунів. Це обмеження можна усунути за допомогою пристроїв плавного пуску, які забезпечують більш м'який і контрольований старт двигуна, зменшуючи механічні навантаження та електричні імпульси в мережі [2].

Для рудорозмельних млинів потужністю від 1 МВт і вище, які стикаються з важкими умовами запуску, зокрема з великим моментом навантаження, високими пусковими струмами та обмеженим числом пусків, оптимальним рішенням є використання системи «перетворювач частоти – частотно керований синхронний двигун» (ПЧ-СД). Ця система електроприводу змінного струму надає ряд переваг, що значно поліпшують експлуатаційні характеристики. Однією з ключових функцій є можливість забезпечення контрольованого пуску та гальмування, що дозволяє зменшити механічні навантаження на весь технологічний механізм. Це сприяє більш плавному процесу запуску, знижуючи ризики, пов'язані з різкими змінами навантаження. Крім того, система дозволяє регулювати частоту обертання ротора під час роботи, що забезпечує гнучкість в управлінні технологічними процесами. Завдяки цій технології можна зменшити обертовий момент при запуску на 20-30%, що знижує навантаження на механізми. Пускові струми також можуть бути зменшені до п'яти разів, що робить їх близькими до номінальних значень. Це, в свою чергу, зменшує обмеження на кількість запусків, що є важливим фактором у виробничих умовах. Однак, основною перешкодою для впровадження таких систем є висока вартість потужного високовольтного

перетворювального обладнання. Додатково, використання силової перетворювальної техніки може негативно впливати на якість електроенергії в мережі, що є важливим аспектом, який слід враховувати при проектуванні та експлуатації електроприводів [5].

Для суттєвого підвищення ефективності процесу подрібнення у світовій практиці спостерігається тенденція до збільшення розмірів, продуктивності та потужності електроприводів млинів. Внаслідок цього розробляються та впроваджуються різні типи млинів. Наприклад, кульові млини можуть мати обсяги до 159-420 м³ з потужністю приводних двигунів від 4 до 35 МВт, самоподрібнювальні млини досягають 400 м³ і потужності від 4,8 до 14,9 МВт, тоді як галькові млини мають обсяг до 320 м³ і потужність у межах 3,2-8,4 МВт. Ці зміни ставлять перед інженерами завдання вибору електроприводів для надпотужних млинів, які можуть забезпечити оптимальні енергетичні та техніко-економічні показники, а також можливість частих запусків. У цьому контексті розглядаються різноманітні типи приводів, включаючи електромеханічні системи, що містять різні передачі, а також електричні приводи, де обертання барабана відбувається безпосередньо від тихохідного двигуна. Важливо також враховувати можливість використання одного чи декількох приводних двигунів, а також опції з нерегульованою або регульованою частотою обертання. Розвиток електроприводів для надпотужних млинів реалізується в кількох напрямках. Один із них передбачає застосування нерегульованого дводвигунного привода потужністю до 10 МВт, що базується на серійних низькошвидкісних синхронних двигунах. У такій системі важливим є впровадження пристроїв для вирівнювання навантажень, що може ускладнити конструкцію, але водночас забезпечує високу надійність та ефективність при автоматичному вирівнюванні. Ще одним напрямком є регульований електропривод змінного струму, що використовує тиристорний перетворювач для управління низькошвидкісними кульовими млинами. Цей безредукторний електропривод дозволяє плавно регулювати частоту обертання двигуна, що підвищує його ефективність до 0,936 або навіть 0,951. Привід є

доцільним у ситуаціях, коли потрібна гнучкість у регулюванні частоти обертання, хоча він може негативно впливати на електричну мережу. Окрім того, існує нерегульований безредукторний однодвигунний електропривод потужністю 12-20 МВт, що базується на серійних синхронних двигунах з підвищеною частотою обертання. Цей тип привода дозволяє досягти ефективної роботи традиційних барабанних млинів на значно вищих частотах, що суттєво підвищує їхню продуктивність. Використання інтенсифікаторів дає змогу зменшити пусковий момент і, відповідно, полегшити пускові режими. Останнім часом особливу увагу приділяють регульованому вентильно-індукторному електроприводу, який є одним з перспективних варіантів з електронною комутацією. Завдяки оптимальному керуванню системою «електрична машина – комутатор», цей привод демонструє високі споживчі, енергетичні, технічні та економічні показники, перевищуючи традиційні типи електроприводів [8].

Основні переваги вентильно-індукторних приводів (ВІП) в порівнянні з їх найближчими аналогами, такими як регульовані приводи постійного струму, асинхронні та синхронні частотно регульовані приводи змінного струму, включають широкий діапазон потужностей, що може сягати десятків мегават, а також частоти обертання. ВІП відрізняються простотою у виробництві, високою надійністю та компактністю, а також значною питомою потужністю на одиницю маси. Крім того, вони демонструють кращу швидкодію і керованість у порівнянні з системами постійного струму, а також забезпечують високий пусковий момент. Важливою характеристикою є їх функціональна універсальність, яка дозволяє працювати без редукторів у широкому діапазоні частот обертання (до 10:1). Енергетичні показники ВІП також вражають, з коефіцієнтом корисної дії (КПД) у межах 0,85-0,95, а їх вартість є відносно низькою, приблизно вдвічі нижчою за асинхронні двигуни. Проте ВІП мають суттєвий недолік: при відмові будь-якого з блоків, що входять до складу привода, система стає непрацездатною. На відміну від цього, регульовані приводи постійного та змінного струму можуть продовжувати працювати в

нерегульованому режимі навіть при повній відмові перетворювача частоти. Незважаючи на цей недолік, ВПІ мають сукупність властивостей, які роблять їх конкурентоспроможними альтернативами традиційним системам регульованого електропривода. ВПІ великої потужності є особливо доцільними в гірничорудній промисловості, де їх використання економічно виправдане. Однією з найбільш перспективних областей застосування ВПІ є привод млина для подрібнення мінеральної сировини. Зниження питомих витрат електроенергії (ПВЕ) на подрібнення можна досягти шляхом оптимізації режимів цього процесу. Це включає в себе вибір, визначення та підтримку оптимальних значень технологічних параметрів, які впливають на енергоефективність. Оптимізація зазвичай проводиться з урахуванням головних економічних і технологічних критеріїв. Ефективність процесу подрібнення найкраще оцінюється через економічний критерій, що відображає частку собівартості кінцевого продукту, яка приходить на процес подрібнення. Однак виділити цю частку вкрай важко через багатфакторний характер процесу. Тому для оцінки використовують параметри, що найбільше впливають на собівартість концентрату, такі як питомі енерговитрати та продуктивність млина за готовим класом дрібності. Енергетична ефективність характеризується питомою витратою електроенергії, що визначається активною потужністю приводного двигуна млина. Продуктивність враховується з урахуванням загальної переробки та вмісту зазначеного класу, що постійно вимірюється в зливі млина. На ефективність роботи вузла подрібнення впливають кілька параметрів, зокрема об'ємне заповнення млина рудою, заповненість млина тілами, що мелють (кулями та іншими елементами), щільність продуктів у процесах подрібнення та класифікації, а також міцність і крупність вихідної руди. Кутова частота обертання барабана млина і стан його броні також мають значення. Вибір оптимальних значень серед цих параметрів, що підлягають керуванню, дозволяє підвищити ефективність подрібнення [7].

На даному етапі досліджень математичне моделювання процесу подрібнення руди, зокрема з акцентом на енергетичний аспект, набуває все

більшого значення. Виникає потреба в розробці математичних моделей подрібнюючого обладнання, які б здатні були пов'язувати вхідні технологічні параметри з вихідними змінними. Важливо знайти компроміс між складністю моделей, їх детермінованістю та загальністю, з одного боку, і прогностичними можливостями та простотою числового експерименту з іншого. У практиці управління процесом подрібнення зазвичай задають продуктивність по руді. Проте, задана продуктивність не завжди забезпечує досягнення оптимальних значень продуктивності за готовим класом та енергоспоживанням. Оптимальним вважається кульове завантаження млина, яке забезпечує задану продуктивність при мінімальних питомих витратах електроенергії (ПВЕ). Недостатнє кульове завантаження може призвести до зниження ефективності роботи за готовим класом, тоді як надлишок – до перевитрати електроенергії. Складність полягає в тому, що можливість прямого контролю заповнення млинів кулями відсутня. Оцінка кульового заповнення на основі величини електричної потужності приводного електродвигуна є проблематичною через труднощі в виділенні інформативної складової електричної потужності. Проте, за інших рівних умов, споживана активна потужність приводу млина в робочому режимі пропорційна кульовому завантаженню. Дослідження технологічного процесу подрібнення показують, що основний внесок у зміну активної потужності вносить саме кульове завантаження. Таким чином, розробка математичних моделей, які б враховували ці фактори, є важливим кроком для оптимізації процесу подрібнення та підвищення енергетичної ефективності [7].

1.2 Шляхи оптимізації режиму роботи барабанного кульового млина

У різних етапах і процесах рудозбагачувальних фабрик (РЗФ) енергозбереження досягається через впровадження специфічних заходів, які особливо важливі для операцій подрібнення руди. Підвищення ефективності подрібнення та оптимізації використання енергії можливе завдяки створенню

млинів з вдосконаленими конструктивними параметрами, що дозволяє підвищити їх продуктивність. Крім того, важливо використовувати відповідні електроприводи для млинів, а також впроваджувати автоматизовані системи управління. Оптимізація процесу подрібнення тісно пов'язана з визначенням статичних і регульовальних характеристик подрібнюючих агрегатів. Статичні характеристики описують зв'язок між регульованими величинами та впливами в усталеному режимі роботи агрегатів, враховуючи різноманітні збурюючі фактори. Регульовальні характеристики, у свою чергу, фокусуються на взаємодії між регулюючими та збурюючими впливами при фіксованих значеннях регульованих величин, або їх зміні за певними законами. Розуміння цих характеристик є критично важливим для створення ефективних систем управління.

У технологічних лініях рудозбагачувальних фабрик барабанні млини займають центральне місце в процесі подрібнення. На початкових етапах подрібнення ці млини часто функціонують у замкненому циклі зі спіральними класифікаторами, що формує подрібнюючий агрегат. У цьому контексті регульованою величиною є продуктивність за готовим класом продукту на виході класифікатора. Основним критерієм оптимізації є підтримання максимальної продуктивності шляхом коригування регулюючих впливів, незалежно від збурюючих факторів. Водночас важливим є зниження енергетичних витрат на одиницю продукції, що стає актуальним аспектом у дослідженнях енергозбереження в процесах подрібнення. У деяких дослідженнях пропонується здійснювати управління подрібнюючими агрегатами, спираючись на відомі регульовальні характеристики, які можна отримати різними методами. Для цього також рекомендується використовувати експериментальні статичні характеристики, які формуються на основі статистичного аналізу поточних даних про вхідні та вихідні параметри агрегатів. Це дозволяє підвищити точність управління та ефективність енергозбереження в технологічному процесі подрібнення. [11].

Для ефективного управління подрібнюючими агрегатами, що працюють у замкнутому циклі, важливими є статичні та регулювальні характеристики, які базуються на фізичних уявленнях про процеси, що відбуваються в об'єкті. Коефіцієнти, які входять до формулювання цих характеристик, можуть бути визначені за допомогою статистичного аналізу експериментальних даних. Хоча існує значна кількість літератури з даної теми, все ще залишається багато невирішених питань, пов'язаних з оцінкою та аналізом статичних характеристик подрібнюючих агрегатів у замкнутому циклі. Найглибші дослідження, що стосуються аналізу статичних характеристик таких агрегатів для задач управління, представлені в ряді наукових робіт. [1, 2].

Статична характеристика, що відображає залежність твердого матеріалу у зливі класифікатора від витрати вихідної руди, може бути встановлена на основі балансових взаємозалежностей вагових кількостей матеріалу, що надходить та виходить з об'єкта за одиницю часу. Це дозволяє визначити залежність продуктивності за готовим класом у зливі класифікатора та розходу пісків, що утворюються в кориті класифікатора, від кількості матеріалу, що заповнює барабан млина. Важливим аспектом є те, що на процес подрібнення руди істотно впливає внутрішнє заповнення барабану рудою G_p , а не загальний запас матеріалу в агрегаті. Встановлення зв'язку між величиною заповнення барабану рудою G_p та регулюючими і збурюючими впливами, такими як продуктивність за вихідною рудою, продуктивність за пісками, сумарна продуктивність, кульове навантаження, співвідношення "руда-вода" на вході млина, а також різна дрібність вихідної руди та пісків, є критично важливим для оптимізації процесу. При визначенні регулювальних характеристик необхідно враховувати обмеження на дрібність матеріалу у розвантаженні млина та реалізовувати ці обмеження через певні фізичні впливи. Однак статичні характеристики подрібнюючих агрегатів з замкнутим циклом, отримані в джерелах [1, 2], не можуть бути безпосередньо використані для екстремального керування через складнощі контролю розходу готового

класу в розвантаженні млина або зливу класифікатора, а також через неможливість регулювання кількості пісків, що надходять у млин.

Зміна величини завантаження млина подрібнюючими тілами та рудою безпосередньо впливає на величину гальмівного моменту на валу приводного двигуна, що, в свою чергу, призводить до зміни потужності, споживаної двигуном з електромережі. Таким чином, зміна споживаної потужності приводного двигуна може характеризувати як кульове завантаження, так і заповнення рудою для кульових млинів. Ця інформація є цінною для вдосконалення систем управління, що дозволяє підвищити ефективність процесу подрібнення та зменшити енергетичні витрати.

У джерелі [3] наведені експериментальні криві споживаної потужності та струму двигуна кульового млина в залежності від зміни амплітуди шуму, що виникає під час роботи млина. Ці залежності мають екстремальний характер, і їх можна використовувати, якщо екстремуми регресійних кривих співпадають з оптимальними умовами розмолу руди.

У ряді досліджень пропонується контролювати вагу куль у млині за величиною струму (або активного струму), незважаючи на зміну кількості подрібнюючого матеріалу в барабані. Проте існують також дані, які підтверджують доцільність контролю активного струму для визначення ступеня заповнення кульових млинів подрібнюючим матеріалом. У роботі [4] за допомогою методів планованого експерименту та регресійного аналізу були отримані статичні характеристики для подрібнюючого агрегату першої стадії подрібнення на збагачувальній фабриці ПГЗКа, що зв'язують активний струм статора I приводного двигуна з розходом вихідної руди Q_0 , розходом води в млин та кількістю кульового завантаження в млині. Отримані дані свідчать, що екстремальна залежність між I та Q_0 , хоча і є досить пологою, може бути використана в задачах екстремального керування.

Це підкреслює важливість моніторингу електричних параметрів двигуна для оптимізації роботи млинів, що може призвести до поліпшення загальної ефективності процесу подрібнення та зменшення витрат на енергію.

Задачу екстремального керування процесом подрібнення можна спростити, якщо мати пропорційну залежність між змінними P або I та змінною $Q_{-0,074}$ та довести відносно високу чутливість цих змінних до зміни величини заповнення внутрішнього об'єму барабану. Це значить, що екстремуми статичних характеристик, повинні співпадати при одному й тому ж значенні змінної G_p .

1.3 Вплив кульового та рудного завантаження на потужність млина

Механічну потужність P_{mex} на валу приводного двигуна млина можна визначити за формулою:

$$P_{mex} = P_m / \eta_n , \quad (1.1)$$

Корисна потужність, що споживається млином у водоспадному режимі, є результатом двох основних компонентів. По-перше, це енергія, необхідна для підтримання навантаження на кругових траєкторіях. По-друге, вона також включає потужність, що витрачається на прискорення навантаження, яке складається з часток матеріалу та куль, від початкової швидкості до певного рівня в кінці цих траєкторій. Кінетична енергія навантаження визначається через його масу і швидкість. Ця енергія може бути виражена формулою, що показує, як вона змінюється в залежності від швидкості руху. Витрати потужності, пов'язані з прискоренням навантаження, можна також розрахувати, враховуючи, як швидкість змінюється з часом.

Важливим аспектом є коефіцієнт корисної дії механічної передачі млина. Цей показник відображає, яка частина споживаної потужності перетворюється на корисну роботу, а яка втрачається в процесі. Споживана потужність від джерела живлення може бути розрахована, враховуючи корисну потужність та ефективність передачі. Отже, для досягнення оптимальної роботи млина

необхідно враховувати ці параметри, оскільки вони безпосередньо впливають на енергетичні витрати і загальну ефективність процесу подрібнення.

$$P_m = P_c + P_e. \quad (1.2)$$

Епюра заповнення барабану млина рудно-кульовим завантаженням представлена на рис. 1.2.

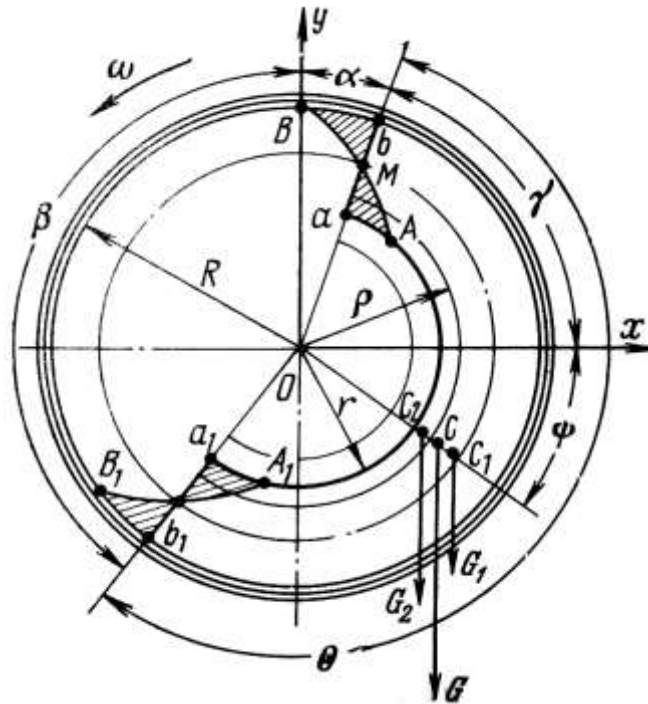


Рисунок 1.2 Епюра заповнення барабану

На епюрі використані наступні позначення: ω – кутова частота обертання барабану, рад/с; G_1 – вага кульового завантаження на кругових траєкторіях, т; R – радіус барабану млина, м; r – радіус кульового завантаження, м; ρ – радіус рудного заповнення, м.

Використовуючи співвідношення, що наведені в роботі [10], кути, позначені на епюрі, можна визначити наступним чином:

$$\alpha = \arccos \frac{\omega^2(R+r)}{2g}, \quad (1.3)$$

$$\theta = \arcsin \frac{\omega^2(R+r)}{2g}, \quad (1.4)$$

$$\psi = \frac{\pi}{2} - \alpha. \quad (1.5)$$

Вага кульового навантаження на кругових траєкторіях становить

$$G_1 = V_1 \gamma_k = \gamma_k 2L(R^2 - r^2) \arcsin \frac{\omega^2(R+r)}{2g}, \quad (1.6)$$

де γ_k – об’ємна вага куль, т/м³.

Зазвичай відома загальна вага куль, які використовуються в млині, але статичний момент формується лише тими кулями, що розташовані на кругових траєкторіях. Тому важливо визначити окремо кількість куль, що знаходяться на кругових та параболічних траєкторіях. У дослідженні [10] було встановлено, що вага куль на кругових траєкторіях, позначена як (G_1) , у стільки разів перевищує вагу куль на параболічних траєкторіях (G'_1) , у скільки разів час перебування куль на кругових траєкторіях більший за час їх перебування на параболічних траєкторіях. Це співвідношення дозволяє визначити вагу куль на параболічних траєкторіях, виходячи з відомих значень ваги куль на кругових траєкторіях та відповідних часів їх перебування на кожній з траєкторій. Таким чином, можна отримати точні дані про розподіл кульового завантаження, що є важливим для подальших розрахунків та аналізу ефективності роботи млина.

$$G'_1 = G_1 \frac{2 \sin \alpha \cos \alpha}{\pi - 2\alpha}. \quad (1.7)$$

Отже, загальна вага куль у млині визначається через суму двох її складових

$$G_k(r) = G_1(r) + G'_1(r). \quad (1.8)$$

$$V_\Sigma = \frac{L\pi R^2\theta}{2\pi} - \frac{L\pi\rho^2\theta}{2\pi} = \frac{L\theta}{2}(R^2 - \rho^2). \quad (1.9)$$

Об'єм кульового завантаження в рудно-кульовому тілі рівний

$$V_k = V_\Sigma \frac{\gamma_k}{\gamma'_k}, \quad (1.10)$$

де γ_k – об'ємна вага куль, т/м³; γ'_k – питома вага кульового завантаження, т/м³.

Об'єм, що займає рудна пульпа визначається за наступною формулою:

$$V_p = V_\Sigma - V_k = \frac{L\theta}{2}(R^2 - \rho^2)\left(1 - \frac{\gamma_k}{\gamma'_k}\right). \quad (1.11)$$

При цьому вага рудної пульпи

$$G_p = V_p \gamma_n = \frac{L\theta\gamma_n}{2}(R^2 - \rho^2)\left(1 - \frac{\gamma_k}{\gamma'_k}\right), \quad (1.12)$$

де γ_n – питома вага пульпи в барабані млина, т/м³.

$$M_C = \frac{\cos \psi}{2} \left\{ G_1(R+r) + L\theta\gamma_{\Pi}(R^2 - \rho^2) \left(1 - \frac{\gamma_{\kappa}}{\gamma'_{\kappa}} \right) (R+\rho) \right\}. \quad (1.13)$$

$$G'_p = \frac{L\theta\gamma_n}{2} (R^2 - \rho^2) \left(1 - \frac{\gamma_{\kappa}}{\gamma'_{\kappa}} \right). \quad (1.14)$$

Вага рудної пульпи, що знаходиться поза межами заповнення млина кулями

$$G''_p = \frac{L\theta\gamma_n}{2} (r^2 - \rho^2). \quad (1.15)$$

$$M_C = \frac{\cos \psi}{2} \left\{ G_1(R+r) + L\theta\gamma_{\Pi} \left[(R^2 - r^2) \left(1 - \frac{\gamma_{\kappa}}{\gamma'_{\kappa}} \right) \frac{R+r}{2} + \frac{r+\rho}{2} (r^2 - \rho^2) \right] \right\}. \quad (1.16)$$

$$P_E = \frac{\gamma'_{\kappa} L \omega^3}{8g} (R^4 - r^4). \quad (1.17)$$

$$P_M = \frac{9,81 \cdot \omega \cdot \cos \psi}{2} \left\{ G_1(R+r) + L\theta\gamma_{\Pi}(R^2 - \rho^2) \left(1 - \frac{\gamma_{\kappa}}{\gamma'_{\kappa}} \right) (R+\rho) \right\} + \frac{\gamma'_{\kappa} L \omega^3}{8g} (R^4 - r^4). \quad (1.18)$$

$$P_M = \frac{9,81 \cdot \omega \cdot \cos \psi}{2} \left\{ G_1(R+r) + L\theta\gamma_{\Pi} \left[(R^2 - r^2) \left(1 - \frac{\gamma_{\kappa}}{\gamma'_{\kappa}} \right) \frac{R+r}{2} + \frac{r+\rho}{2} (r^2 - \rho^2) \right] \right\} + \frac{\gamma'_{\kappa} L \omega^3}{8g} (R^4 - r^4), \quad (1.19)$$

Усі викладки велися відносно радіусу r , як параметру, який характеризує кульове завантаження млина. Цей параметр важко безпосередньо визначати. Більш доцільно вести розрахунки, опираючись на відносне заповнення млина кулями φ_k , тобто відношення об'єму, зайнятого кулями, до загального робочого об'єму барабану млина. Отже, необхідним стає визначення залежності $r=f(\varphi_k)$. Для цього, прийнявши r в якості змінної, побудуємо залежності за формулами (1.6), (1.7), (1.8). Відповідні графіки наведені на рис. 1.3, а.

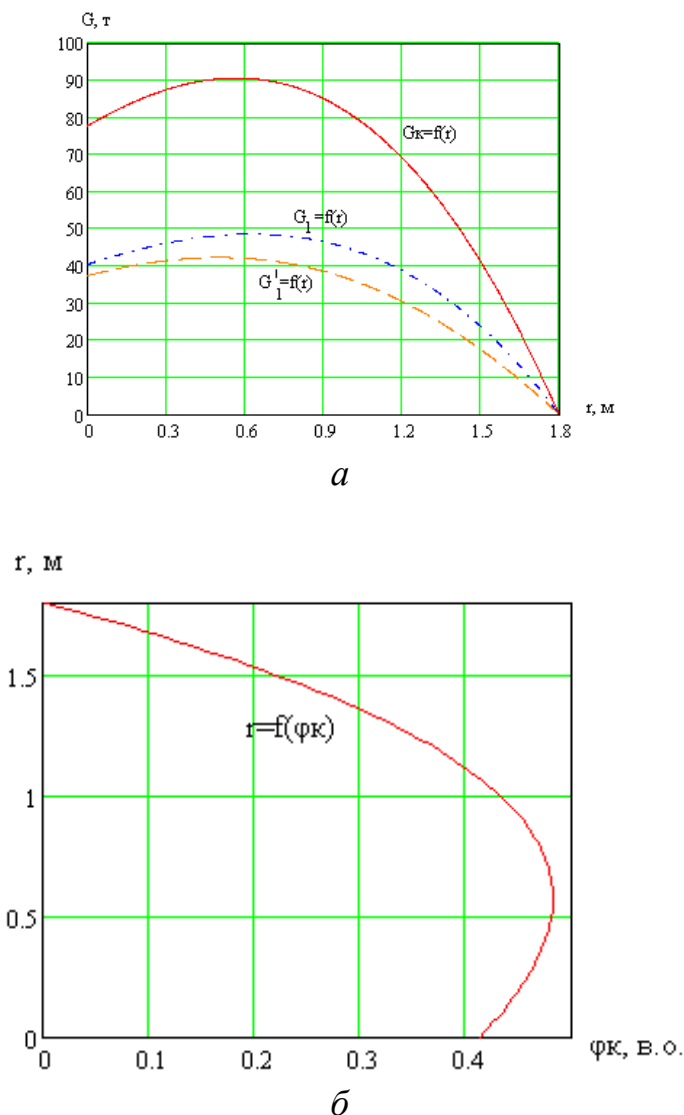


Рисунок 1.3 Графіки залежностей ваги повного кульового завантаження $G_k(r)$, куль на кругових $G_1(r)$ та параболічних $G'_1(r)$ траєкторіях (а) та радіусу кульового завантаження від відносного об'єму заповнення барабану кулями $r(\varphi_k)$ (б)

Не важко визначити загальний відповідно абсолютний та відносний об'єми кульового завантаження:

$$V_{\kappa} = \frac{G_{\kappa}}{\gamma_{\kappa}}, \quad (1.20)$$

$$\varphi_{\kappa} = \frac{V_{\kappa}}{V_{\text{м}}}, \quad (1.21)$$

де $V_{\text{м}}$ – загальний об'єм млина.

Для наочності побудуємо графік залежності радіусу r від відносного кульового завантаження φ_{κ} (рис. 1.3, б). З метою практичного більш зручного використання можна замінити зазначену залежність параболічною кривою, яку неважко визначити чисельними методами:

$$r(\varphi_{\kappa}) = -4.71\varphi_{\kappa}^2 + 0.1\varphi_{\kappa} + 1.76. \quad (1.22)$$

$$\rho = \sqrt{r^2 - \frac{2\varphi_{\text{р}}\pi R^2}{\theta} + (R^2 - r^2)\left(1 - \frac{\gamma_{\kappa}}{\gamma'_{\kappa}}\right)}. \quad (1.23)$$

Таким чином, відповідна залежність корисної потужності від ступеня заповнення млина рудною пульпою (у відносних одиницях) для різних значень кульового завантаження, що побудована на основі виразу (1.19), представлена у вигляді сімейства графіків на рис. 1.4.

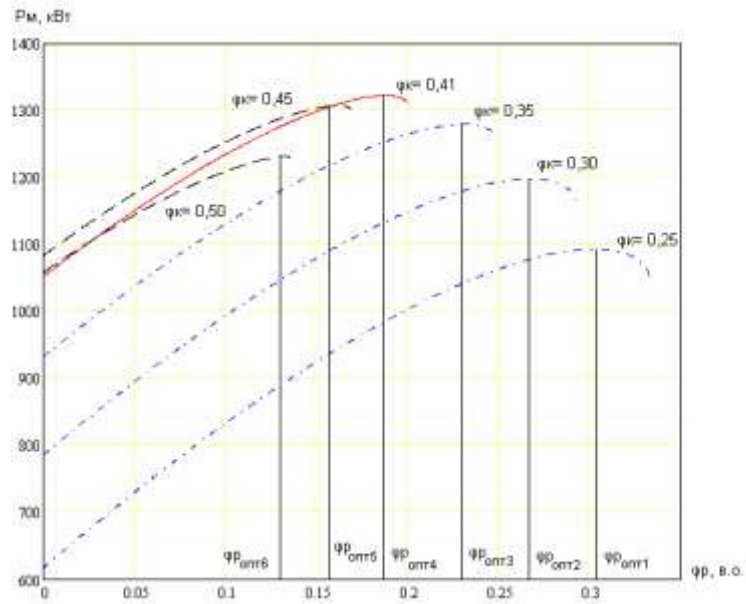


Рисунок 1.4 Залежність споживання корисної потужності від ступеня заповнення млина рудною пульпою для $\phi_k = 0,25$; $\phi_k = 0,30$; $\phi_k = 0,35$; $\phi_k = 0,41$; $\phi_k = 0,45$; $\phi_k = 0,50$

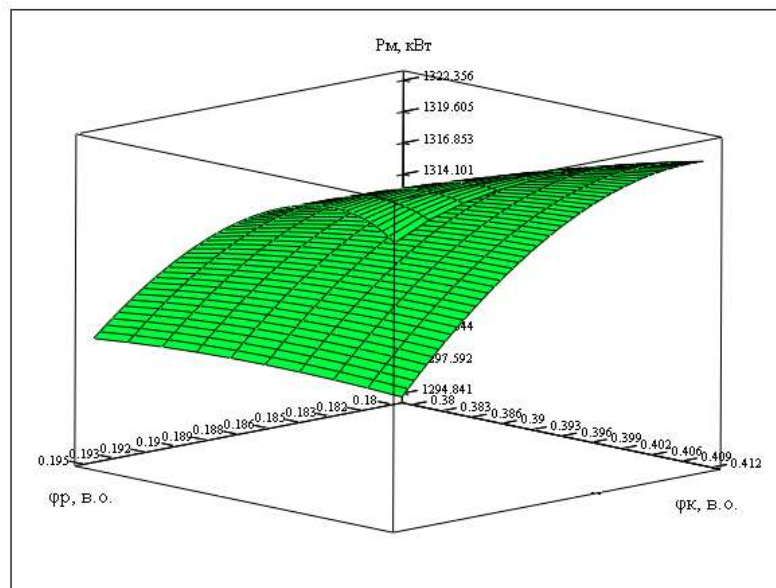


Рисунок 1.5 Залежність споживання корисної потужності у вигляді графіку функції двох змінних: кульового та рудного завантаження

З рисунків 1.4 та 1.5 можна помітити, що при різних рівнях кульового завантаження екстремум потужності досягається при різних значеннях ваги рудного завантаження. Ці межі варіювання кульового завантаження є характерними для збагачувальних фабрик гірничо-збагачувального комбінату Кривбасу. Також з цих рисунків видно, що зв'язок між споживанням корисної потужності та кульовим завантаженням має екстремальний характер, що означає, що максимальне споживання потужності спостерігається при певному обсязі куль.

1.4 Моделювання енергетичних процесів млина

Важливим етапом в автоматизації оптимізації режимів роботи розмольного обладнання є комп'ютерне моделювання. На основі раніше наведених розрахунків була створена математична модель у програмному середовищі Simulink MatLab. Структурна схема цієї моделі представлена на рисунку 1.6, і вона дозволяє отримувати значення корисної потужності в залежності від різних вхідних параметрів.

До вхідних величин, що використовуються в моделі, належать як технологічні, так і конструктивні характеристики. Серед них можна виділити кутову частоту обертання барабана, його радіус та довжину, а також об'ємні ваги пульпи і куль. Інші важливі параметри включають питому вагу кульового завантаження, відносне кульове завантаження та відносне завантаження рудною пульпою.

Перші шість параметрів, які можна класифікувати як збурюючі впливи, виділені в окрему групу та позначені жовтими блоками в структурі моделі. Водночас відносні завантаження барабана млина кулями та рудною пульпою представлені зеленими блоками, оскільки ці значення підлягають контролю та налаштуванню.

Для перевірки адекватності створеної моделі було проведено ряд симуляцій для різних значень кульового завантаження. При цьому рудне завантаження барабана задавалося як лінійно зростаючий сигнал, починаючи з нуля і досягаючи певного кінцевого значення. Результати цих симуляцій, представлені на рисунку 1.7, ілюструють різні значення відносного кульового завантаження, такі як 0,30, 0,35, 0,41 та 0,50.

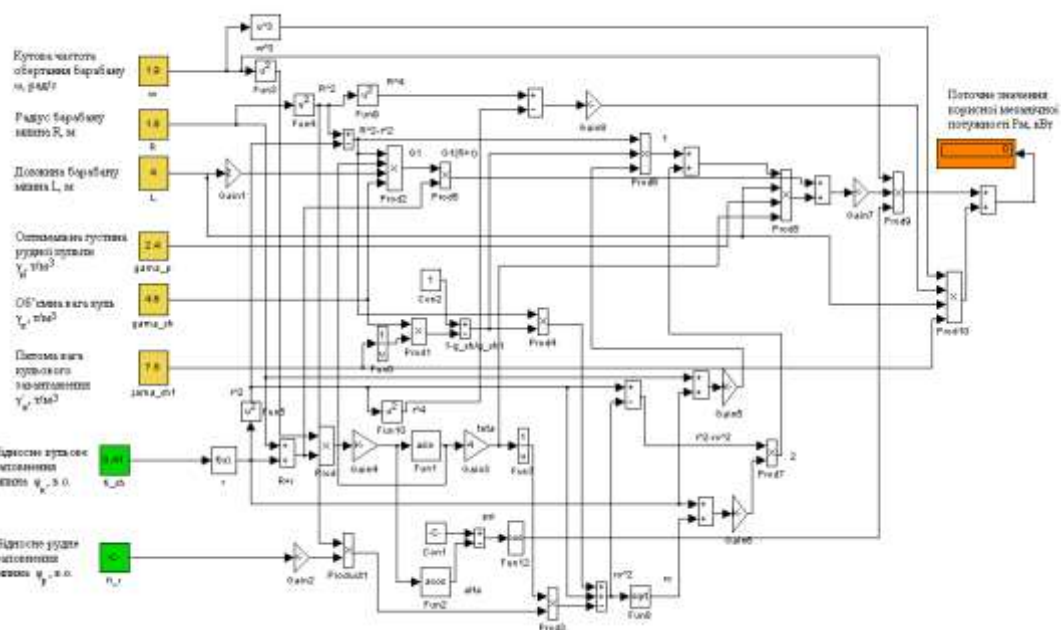


Рисунок 1.6 Структурна схема енергетичної моделі кульового млина

Ця модель дозволяє визначити поточне значення корисної потужності на основі набору вхідних параметрів. Вхідні величини охоплюють як технологічні, так і конструктивні характеристики. Серед них можна виділити кутову частоту обертання барабана млина, радіус та довжину барабана, а також об'ємні ваги пульпи і куль. Крім того, важливими є питома вага кульового завантаження, відносне кульове завантаження та відносне завантаження рудною пульпою.

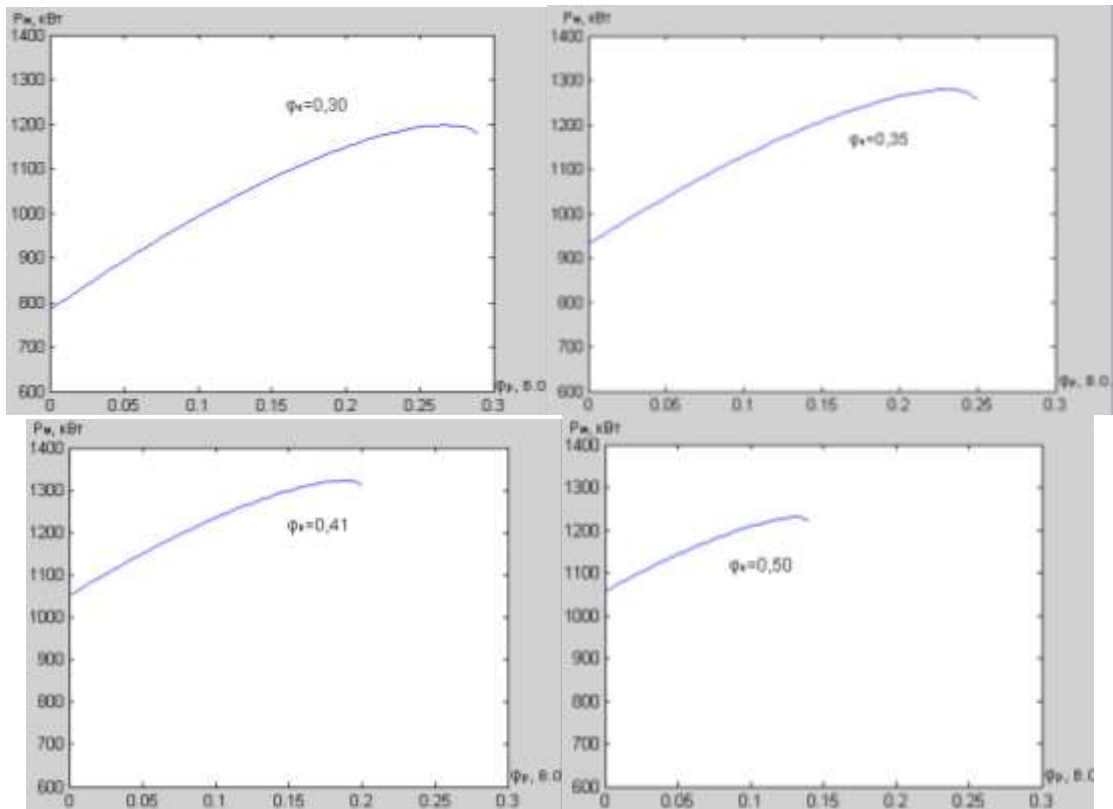


Рисунок 1.7 Енергетичні характеристики кульового млина, отримані в процесі комп'ютерного моделювання для $\phi_k = 0,30$; $\phi_k = 0,35$; $\phi_k = 0,41$; $\phi_k = 0,50$

Як видно, рис. 1.7 точно відтворює сімейство графіків на рис. 1.4, що підтверджує достовірність розробленої моделі, схема якої представлена на рис.1.6.

1.5 Оптимальні режими роботи кульового млина

Щоб знайти екстремальне значення кульового завантаження, потрібно прирівняти похідну до нуля і розв'язати отримане рівняння по відносному кульовому завантаженню. В результаті цього розрахунку отримане значення відносного об'єму кульової маси дорівнює 0,41. Для перевірки правильності цього результату слід проаналізувати графік залежності, представлений на

рисунку 1.8. Як видно з графіка, похідна дійсно перетинає нульову лінію при $\varphi_k = 0,41$, що підтверджує коректність отриманого значення.

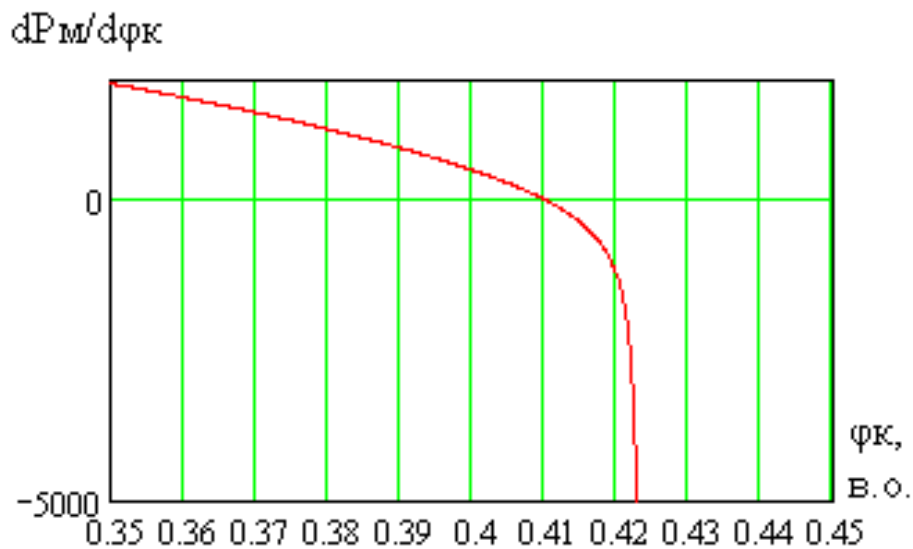


Рисунок 1.8 Графік залежності похідної корисної потужності $dP_M/d\varphi_k = f(\varphi_k)$

Оптимальне значення завантаження барабана млина рудою дійсно має значення для конкретного кульового завантаження. Важливо встановити залежність цього параметра від рівня завантаження млина кулями. У роботі [5] шляхом розв'язання відповідного рівняння було виявлено, що оптимальне значення рудного заповнення залежить лише від радіусу завантаження барабана кулями. Це свідчить про те, що зміна радіусу може суттєво впливати на ефективність роботи млина та його продуктивність. Подальші дослідження можуть зосередитися на конкретних математичних виразах наступним чином:

$$\rho_{\text{опт}} = \frac{r}{3}. \quad (1.24)$$

Функція залежності оптимального рудного завантаження від кульового завантаження має наступний вигляд:

$$\varphi_{\text{ропт}} = \frac{\left[(R^2 - r^2) \left(1 - \frac{\gamma_{\text{к}}}{\gamma'_{\text{к}}} \right) + (r^2 - \rho_{\text{онм}}^2) \right] \theta}{2\pi R^2}. \quad (1.25)$$

При цьому радіус кульового завантаження (r) визначається в залежності від відносного об'ємного завантаження $(\varphi_{\text{к}})$ відповідно до рівняння (1.22). Залежність оптимального рудного завантаження від об'єму кульової маси представлена на рисунку 1.9. Цей графік ілюструє, як зміна об'єму кульової маси впливає на оптимальне рудне заповнення, що є важливим для налаштування процесів в млинах для досягнення максимальної ефективності.

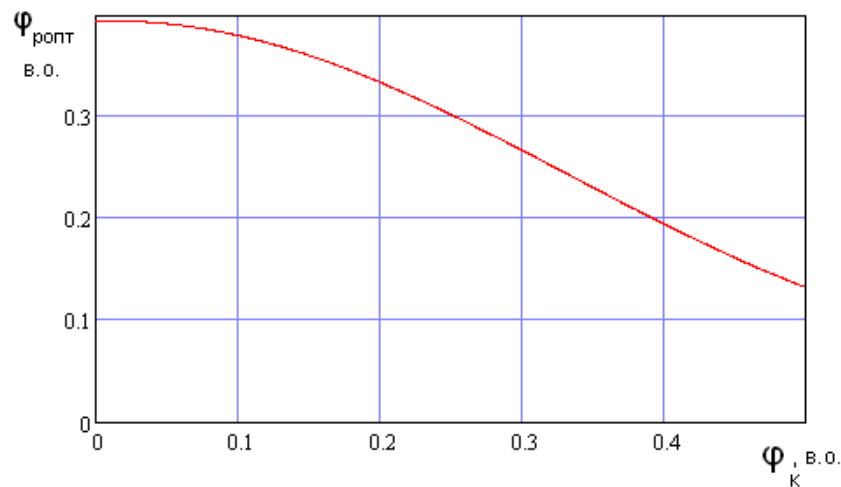


Рисунок 1.9 Залежність оптимального рудного завантаження від об'єму кульової маси

З рисунка 1.9 видно, що зі збільшенням відносного кульового завантаження оптимальне значення заповнення млина рудною пульпою з точки зору енергоефективності знижується. Це підтверджує тенденцію, яка

спостерігається на рисунку 1.4. Наступним кроком оптимізації роботи млина є визначення такого навантаження рудною масою, яке забезпечить оптимальне внутрішнє заповнення. У роботі [5] виведена відповідна залежність, що представляє собою статичну характеристику млина. Ця характеристика дозволяє точно визначити умови, за яких досягається максимальна ефективність процесу подрібнення, що є критично важливим для підвищення продуктивності та зниження витрат енергії:

$$Q = \frac{3600}{\frac{1}{d_{cp2}} + \frac{1}{d_{cp1}}} \left[0,817 \cdot \omega \cdot \cos \psi \cdot \gamma_p k_p \left\{ G_1(R+r) + L\theta \gamma_{II} \left[(R^2 - r^2) \left(1 - \frac{\gamma_{II}}{\gamma'_{II}} \right) \frac{R+r}{2} \right. \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. + \frac{r+\rho}{2} (r^2 - \rho^2) \right] \right\} + \frac{\gamma_p k_p \gamma'_{II} L \omega^3}{48g} (R^4 - r^4) \right], \quad (1.26)$$

де d_{cp1} , d_{cp2} – середня дрібність руди відповідно на вході та виході млина, м; γ_p – об’ємна вага руди, т/м³; k_p – коефіцієнт, що характеризує швидкість утворення нової поверхні на одиницю затраченої потужності, м²/(с·кВт).

Відповідно до виразу (1.26) побудовано сімейство статичних характеристик, які пов’язують потік рудної маси на вході млина з внутрішнім заповненням. Отримані графіки для різного значення кульового завантаження представлені на рисунку 1.10.

Підставляючи в вираз (1.26) оптимальні значення кульового та рудного завантаження, можна визначити оптимальний рівень рудного навантаження на млин.

Проте вираз (1.26) не враховує явно керуючий вплив на роботу млина – подачу води в завантаження млина (W). Саме цей вплив визначає якісну характеристику внутрішнього заповнення млина – густину пульпи всередині барабану (γ_p), яка значно впливає на ефективність процесу подрібнення. У роботі [10] встановлено залежність між потоками руди (Q) та води (W) в завантаженні млина, а також густиною рудної пульпи (γ_p)

в його барабані. Ця залежність є важливою для оптимізації процесу подрібнення та покращення загальної продуктивності млина.

$$\frac{Q}{W} = \frac{\gamma_p(\gamma_n - 1)}{\gamma_p - \gamma_n}, \quad (1.27)$$

де γ_p – об’ємна вага руди (т/м³), приймається на рівні 3,6 т/м³.

Задавшись встановленим за технологією значенням густини пульпи на рівні 2,4 т/м³, можна встановити залежність для оптимального потоку води

$$W = \frac{Q(\gamma_p - \gamma_n)}{\gamma_p(\gamma_n - 1)}. \quad (1.28)$$

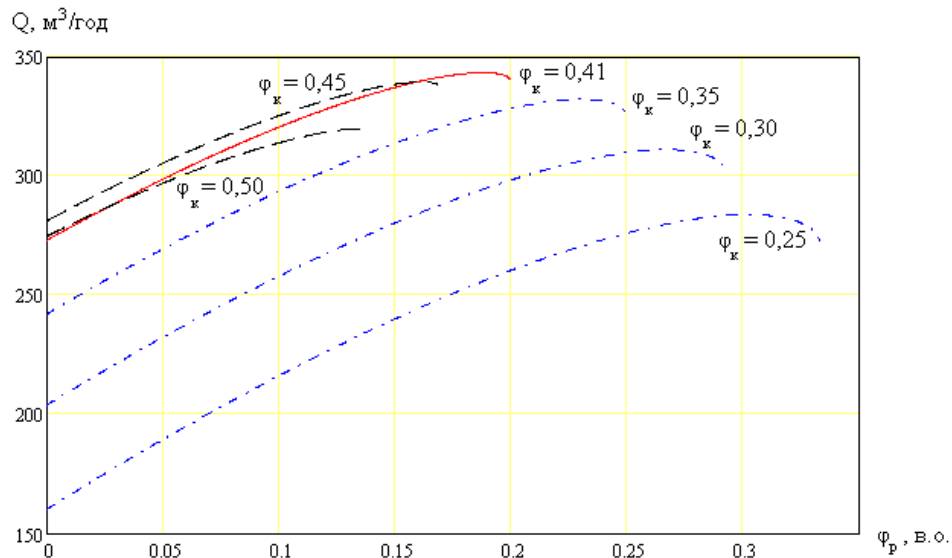


Рисунок 1.10 Графіки зв'язку потоку рудної маси на вході млина з внутрішнім рудним заповненням

Оптимальне значення заповнення млина рудною пульпою знаходимо наступним чином:

$$r_{opt}(\varphi_{k,opt}) = -4.71\varphi_k^2 + 0.1\varphi_k + 1.76 = -4.71 \cdot 0,41^2 + 0.1 \cdot 0,41 + 1.76 = 1,009 \text{ м},$$

$$\rho_{\text{опт}} = \frac{r_{\text{онм}}}{3} = \frac{1,009}{3} = 0,34 \text{ м},$$

$$\begin{aligned} \varphi_{\text{понм}} &= \frac{\left[\left(R^2 - r_{\text{онм}}^2 \right) \left(1 - \frac{\gamma_{\text{к}}}{\gamma'_{\text{к}}} \right) + \left(r_{\text{онм}}^2 - \rho_{\text{онм}}^2 \right) \right] \theta}{2\pi R^2} = \\ &= \frac{\left[\left(1,8^2 - 1,009^2 \right) \left(1 - \frac{4,6}{7,5} \right) + \left(1,009^2 - 0,34^2 \right) \right] \cdot 2,173}{2\pi \cdot 1,8^2} = 0,188. \end{aligned}$$

Оптимальний сумарний потік рудної маси на кульовий млин за одиницю часу становить

$$\begin{aligned} Q &= \frac{3600}{\frac{1}{d_{\text{cp2}}} + \frac{1}{d_{\text{cp1}}}} \left[0,817 \cdot \omega \cdot \cos \psi \cdot \gamma_p k_p \left\{ G_1 (R+r) + L \theta \gamma_{\text{п}} \left[(R^2 - r^2) \left(1 - \frac{\gamma_{\text{к}}}{\gamma'_{\text{к}}} \right) \frac{R+r}{2} + \right. \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \left. + \frac{r+\rho}{2} (r^2 - \rho^2) \right] \right\} + \frac{\gamma_p k_p \gamma'_{\text{к}} L \omega^3}{48g} (R^4 - r^4) \right] = \frac{3600}{\frac{1}{0,00051} + \frac{1}{0,00434}} \times \\ &\times [0,817 \cdot 1,9 \cdot \cos(0,543) \cdot 3,36 \cdot 0,223 \cdot \{ 44,4 \cdot (1,8 + 1,009) + 4 \cdot 2,173 \cdot 2,4 \cdot [(1,8^2 - 1,009^2) \times \\ &\times \left(1 - \frac{4,6}{7,5} \right) \cdot \frac{1,8 + 1,009}{2} + \frac{1,009 + 0,341}{2} \cdot (1,009^2 - 0,341^2)] \} + \\ &\quad \left. + \frac{3,36 \cdot 0,223 \cdot 7,5 \cdot 4 \cdot 1,9^3}{48 \cdot 9,81} \cdot (1,8^4 - 1,009^4) \right] = 342,2 \text{ м}^3 / \text{год}. \end{aligned}$$

Оптимальна подача води для підтримання необхідної густини пульпи всередині млина

$$W_{\text{онм}} = \frac{343,3 \cdot (3,36 - 2,4)}{3,36 \cdot (2,4 - 1)} = 70,06 \text{ м}^3 / \text{год}.$$

Таким чином, проведені дослідження кінетики процесу подрібнення дали змогу розрахувати та побудувати статичні характеристики кульового млина, визначити оптимальні режими його роботи в залежності від кульового та рудного завантаження. Зазначені характеристики можуть бути використані для створення систем керування.

1.6 Система оптимізації процесу подрібнення

Модель, що відображає поточне значення корисної потужності в рудорозмольному агрегаті в залежності від вектора вхідних параметрів не являється достатньою для процесу автоматизованої оптимізації роботи обладнання. Користуючись попередніми дослідженнями енергоспоживання на оптимум, доповнимо модель структурами, що визначають оптимальні вхідні параметри та здійснюють їх порівняння з поточними. Структура комплексної моделі, реалізованої в програмному пакеті Simulink MatLab, яка являє собою комплексну систему автоматичної оптимізації, наведена на рис. 1.11.

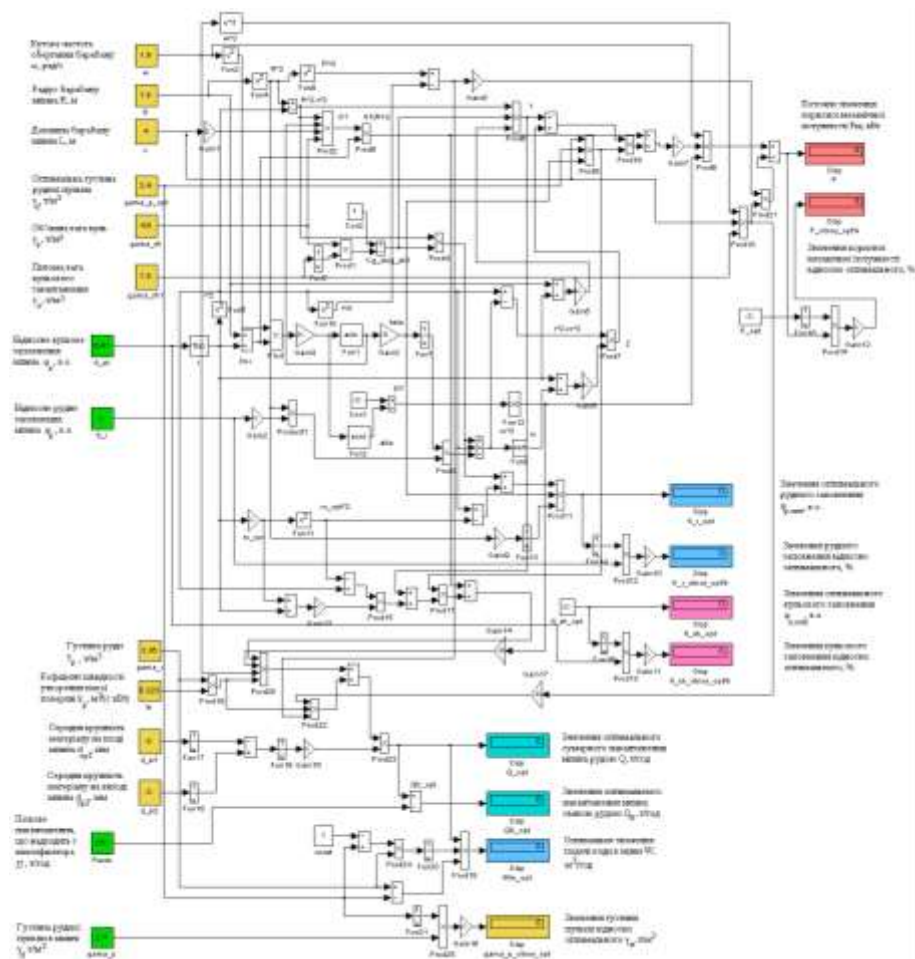


Рисунок 1.11 Схема системи автоматичної оптимізації процесу подрібнення (САО ПП)

Розроблена система оцінює поточне значення кульового завантаження та відтворює відсоткову частку цього параметру відносно його оптимального значення. За цією вихідною величиною можна судити про недостатнє або надлишкове заповнення млина кульовою масою, що сигналізується рожевим індикатором. Орієнтуючись на поточне значення об'ємного завантаження млина подрібнюючим середовищем, модель розраховує оптимальне значення заповнення млина рудною пульпою, при якому досягається максимум корисної потужності, що витрачається на процес подрібнення руди. Ці розрахунки базуються на виразах (1.24) та (1.25). Якщо задати кульове навантаження як лінійно зростаючий сигнал, можна отримати залежність оптимального заповнення млина рудою від відносного об'єму куль (рис. 1.12). Як видно, результати моделювання оптимального рудного заповнення співпадають з теоретично розрахованими даними (див. рис. 1.9).

Порівнюючи поточне вхідне значення рудного заповнення з оптимальним для даного режиму роботи, модель визначає їх відсоткове співвідношення, що характеризує недостатнє або надлишкове завантаження, сигналізуючи про це блакитними індикаторами. Такий сигнал може слугувати для автоматичного керування млином або в якості рекомендації для оператора. Це дозволяє підвищити ефективність роботи млина, оптимізуючи процес подрібнення та знижуючи енергетичні витрати.

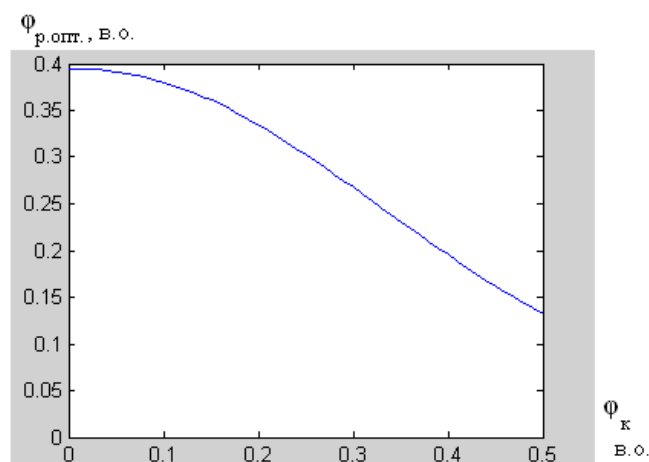


Рисунок 1.12 Залежність оптимального рудного завантаження від об'єму кульової маси, яка отримана в результаті моделювання

Червоні індикатори в моделі демонструють поточне значення корисної потужності та її відсоткову частку відносно оптимального значення. Максимальне значення потужності визначається на основі оптимальних вхідних параметрів. Завдяки контролю потужності, що споживається приводним двигуном, розроблена модель дозволяє визначити, яка частка цієї потужності витрачається на технологічний процес.

На основі виразу (1.26) та оптимальних значень кульового і рудного заповнення барабану, система визначає найбільш корисну продуктивність млина, яка є сумою двох складових: потоку свіжої руди та рециклу. Оптимізуючи навантаження млина рудою, система також визначає необхідну подачу води в млин, щоб підтримувати задану густину рудної пульпи в барабані.

Отже, можна підсумувати, що система автоматичної оптимізації процесу подрібнення (САО ПП) оцінює параметри технологічного процесу, які підлягають контролю, формуючи вектор оптимальних параметрів роботи млина та необхідні регулюючі впливи для їх утримання. Модель вказує процентні співвідношення поточних параметрів роботи та оптимальних, що надає повну інформацію про режим роботи об'єкта.

Система автоматичної оптимізації процесу подрібнення може слугувати основою для створення системи автоматичного керування подрібнюючим обладнанням з метою підтримання оптимальних режимів його роботи. Це забезпечить підвищення ефективності та зниження енергетичних витрат у процесі подрібнення.

2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КУЛЬОВОГО ЗАВАНТАЖЕННЯ НА ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ ТА ПРОДУКТИВНІСТЬ МЛИНА

2.1 Методика проведення експерименту

У виробничих умовах розрахункових заводів (РЗФ) зазвичай встановлюється номінальне кульове навантаження млина в межах $\phi_k = 0,45-0,50$, яке повинно підтримуватися на цьому рівні. Однак у процесі експлуатації маса та об'єм кульового завантаження зменшуються через стирання, що вимагає періодичного поповнення млина новими кулями. Вага цих куль визначається на основі даних про витрату на подрібнення тонни руди за певний час.

Незважаючи на регулярне довантаження, фактичне кульове завантаження часто відхиляється від встановленого стандарту, коливаючись у межах $\pm 50\%$. Це відхилення безпосередньо впливає на ефективність роботи млина, а також на технологічні та енергетичні показники.

У наукових джерелах існує безліч підходів до визначення оптимального кульового завантаження млина ($\phi_{k.опт}$) та оцінки його ефективності. Різноманіття результатів можна пояснити різними методами, які використовуються для визначення $\phi_{k.опт}$, а також специфікою умов, у яких відбувається подрібнення руди.

Для підтвердження оптимальних значень кульового навантаження та відповідної потужності необхідно вивести залежності продуктивності млина та його потужності від змін у кульовому навантаженні. Це передбачає аналіз експериментальних даних, отриманих у реальних умовах РЗФ, з використанням математичних статистичних методів.

Для цього слід зібрати інформацію про обсяги переробленої руди, витрати електроенергії, а також середнє значення кульового навантаження за зміну. На основі цих даних можна розрахувати середню продуктивність млина

та енергетичні витрати. Далі ці показники групуються за однаковими значеннями кульового навантаження, що дозволяє виявити кореляційні залежності між досліджуваними параметрами. Такий підхід допоможе оптимізувати умови роботи млина, підвищивши його продуктивність і зменшивши витрати енергії.

Середні групові значення продуктивності млина та $\overline{A}_x$ (т/год) та потужності приводного двигуна $\overline{P}_x$ (кВт) відповідно за формулами

$$\overline{A}_x = \sum_{i=1}^{n_x} \frac{A_{ix}}{n_x}, \quad (2.1)$$

$$\overline{P}_x = \sum_{i=1}^{n_x} \frac{P_{ix}}{n_x}, \quad (2.2)$$

де n_x – кількість дослідних підрахунків в кожному піддіапазоні $\varphi_{k,x}$.

За значеннями $\overline{A}_x$, $\overline{P}_x$ та $\varphi_{k,x}$ відомими методами виводяться залежності $A(\varphi_k)$ та $P(\varphi_k)$.

2.2 Аналіз експериментальних даних

Розглянута вище методика була застосована [11] при визначенні оптимального значення кульового завантаження млина МШР 3600×4000 першої стадії подрібнення, що працює в умовах ПівдГЗК (м. Кривий Ріг).

Дослідні та розрахункові показники статистичного зв'язку залежностей $A(\varphi_k)$ та $P(\varphi_k)$ для млина МШР 3600х4000 представлені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

Дослідні та розрахункові показники статистичного зв'язку $A(\varphi_k)$ та $P(\varphi_k)$

Показники	Значення показників при кульовому завантаженні φ_k			
	0,35-0,37	0,37-0,39	0,39-0,41	0,41-0,43
Кількість відрахунків	207	215	210	222
Діапазон зміни продуктивності, т/год	65-86	65-86	65-86	65-86
Діапазон зміни потоку енергії, кВт	560-800	640-820	680-900	680-940
Середня продуктивність $\overline{A_x}$, т/год	75,396	76,066	76,819	76,261
Середній потік енергії, кВт	683,67	735,73	788,19	817,39
Стандартне відхилення продуктивності σ_A , т/год	5,7607	5,7625	5,4589	5,6604
Стандартне відхилення потоку енергії σ_P , кВт	46,151	40,987	40,743	52,906
Коефіцієнт кореляції r	0,6055	0,5850	0,5755	0,4635
Оцінка дійсності зв'язку $ r \sqrt{n-1} > R_{\text{табл}}$	8,72 > 3	8,58 > 3	8,35 > 3	6,9 > 3

Визначені кореляційні залежності $A(\varphi_k)$ та $P(\varphi_k)$ з відповідними їм екстремальними даними для вище зазначеного млина наведені відповідно в таблицях 2.2 і 2.3.

Таблиця 2.2

Кореляційна залежність продуктивності млина від кульового завантаження

Кореляційна залежність $A(\varphi_k)$	Екстремальні значення	
	Продуктивність, $A_{\text{тах}}$, т/год	Кульове завантаження φ_k
$A = -46,8985 + 616,28\varphi_k - 769\varphi_k^2$	76,576	0,4007

Таблиця 2.3

Кореляційна залежність споживання активної потужності млина від кульового завантаження

Кореляційна залежність $P(\varphi_k)$	Екстремальні значення	
	Потужність млина, P_{max} , кВт	Кульове завантаження φ_k
$P = -2296,15 + 13422\varphi_k - 14300\varphi_k^2$	853,33	0,4693

Графіки, побудовані відповідно до визначених кореляційних залежностей для продуктивності млина та потоку енергії від кульового завантаження, зображені на рисунку 2.1. Для наочності на графіках нанесені середні експериментальні дані у вигляді точок.

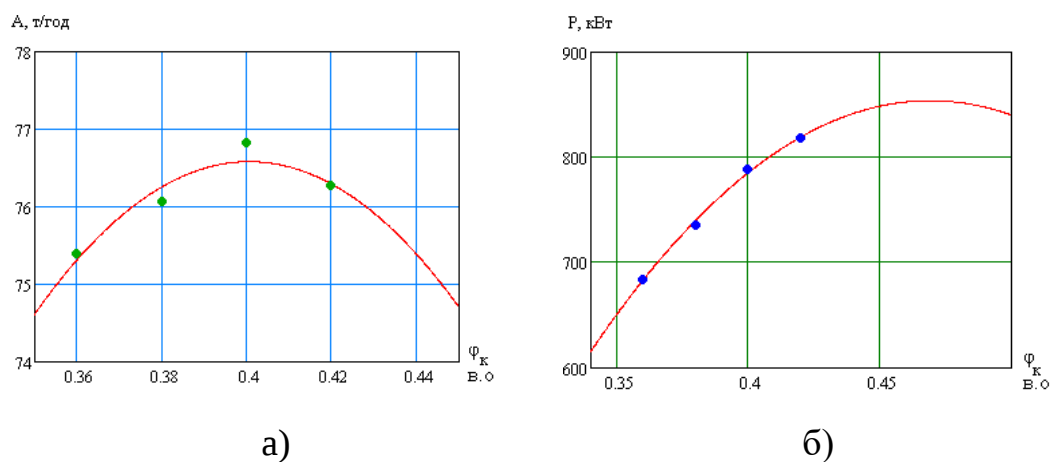


Рисунок 2.1 Дослідні дані, кореляційна залежність продуктивності млина (а) та потоку енергії (б) від кульового завантаження

При роботі млинів з максимальною продуктивністю та відповідним оптимальним кульовим навантаженням, яке було виведено з дослідної залежності $P(\varphi_k)$, значення енергетичного потоку становить 786,03 кВт. У практиці для млинів першої стадії подрібнення встановлено номінальні значення кульового навантаження в межах $\varphi_{k.норм} = 0,45-0,50$, що є вищим порівняно з оптимальними значеннями, отриманими на основі дослідних залежностей $A(\varphi_k)$ та $P(\varphi_k)$.

Залежність $P(\varphi_k)$ може бути використана для розрахунку різниці середніх потужностей між оптимальним режимом, визначеним в експериментальних умовах, та прийнятими номінальними значеннями роботи млина. Це дозволить краще оцінити ефективність роботи млинів і виявити можливості для їх оптимізації.

$$\Delta P = \frac{P(\varphi_k)_{норм} - P(\varphi_k)_{опт}}{P(\varphi_k)_{норм}} \cdot 100\% = \frac{848 - 786,03}{848} \cdot 100\% = 7,3\%. \quad (2.3)$$

Таким чином, робота розглянутих млинів за прийнятого на РЗФ навантаження $\varphi_{k.норм} = 0,45-0,50$ призводить до додаткових невиправданих, доволі значних втрат електроенергії. Бачимо, що навіть у порівнянні з нижньою межею прийнятого навантаження $\varphi_{k.норм} = 0,45$ млина кулями, перехід в оптимальний режим роботи дозволяє зекономити значну кількість електроенергії.

Для підтвердження достовірності проведених досліджень зробимо порівняння отриманих теоретичних результатів з дослідними. Теоретичні та експериментальні дослідження велися по розрахунку різних між собою характеристик, проте результатом обох досліджень було визначення оптимального режиму роботи млина. Тому порівняння результатів варто проводити саме для оптимального режиму.

Визначимо різницю між значеннями оптимального кульового завантаження, що були отримані теоретичним та дослідним шляхом

$$\Delta\varphi_k = \frac{\varphi_{\text{к опт.теор}} - \varphi_{\text{к опт.експ}}}{\varphi_{\text{к опт.теор}}} \cdot 100\% = \frac{0,41 - 0,4007}{0,41} \cdot 100\% = 2,3\% .$$

(2.4)

Невелика розбіжність отриманих результатів свідчить про справедливість теоретичних розрахунків, які підтверджуються експериментальними даними, отриманими в реальних виробничих умовах. Це підтверджує, що моделі, використані для визначення оптимальних значень кульового завантаження, адекватно відображають реальні процеси, що відбуваються в млинах.

Таким чином, можна вважати, що встановлене під час розрахунків екстремальне значення кульового завантаження, при якому корисна потужність досягає свого максимуму, є оптимальним з точки зору енергоефективності та продуктивності кульового млина. Це означає, що дотримання цього оптимального кульового навантаження може призвести до покращення загальної ефективності роботи млина, зменшення витрат енергії та підвищення продуктивності, що є важливим для економічної доцільності виробничих процесів.

3 АВТОМАТИЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ПОДРІБНЕННЯ

3.1 Загальні концепції автоматизації рудорозмольного обладнання

Сучасні методи автоматичного регулювання, а також традиційне ручне управління подрібнюючими комплексами не забезпечують необхідної стабільності та оптимальності в процесах. На сьогоднішній день концепція автоматизації управління акцентує увагу на оптимізації та стабілізації робочих режимів технологічного обладнання. Це, в свою чергу, дозволяє підвищити продуктивність, зменшити споживання енергії, поліпшити якість кінцевого продукту та досягти значного економічного ефекту.

Завдання, які постають перед автоматизацією, можна розглядати з двох ключових перспектив. З одного боку, технологи прагнуть отримати від автоматизованих систем підтримку необхідних режимів подрібнення та класифікації, особливо в умовах змінної якості сировини. З іншого боку, інвестори та керівництво підприємства зацікавлені в автоматизації як засобі для зниження витрат на виробництво та підвищення прибутковості. Додатково, керівництво все частіше виявляє бажання контролювати всі етапи виробництва та дії персоналу. Таким чином, автоматизація технологічного процесу є складним завданням, яке вимагає врахування численних взаємопов'язаних умов.

Рівень автоматизації в процесах подрібнення суттєво варіюється між різними підприємствами, починаючи від практично нульового до досить розвинених систем інтелектуальної оптимізації. Основні завдання автоматизації включають стабілізацію потоку руди, регулювання співвідношення «руда-вода» та контроль зливу класифікуючих апаратів.

Стабілізація потоку руди є важливою, але недостатньою умовою для досягнення оптимальних результатів. Продуктивність млина постійно змінюється через різні характеристики руди, такі як дробність і твердість, а

також інші чинники. Це змушує операторів коригувати процеси відповідно до змінних умов. Погіршення подрібненості руди може призвести до накопичення пісків, що викликає навантаження на рецикл. Якщо подача свіжої руди в млин залишається стабільною, це може призвести до поступового накопичення рудної маси в барабані.

Змінність об'ємного завантаження млина рудою змушує операторів підтримувати продуктивність нижче оптимального рівня через ризик аварійного перевантаження. Це означає, що навіть при стабільній подачі руди, не вдається максимально використовувати потенціал млина, що, в свою чергу, призводить до зниження загальної продуктивності та збільшення витрат енергії.

Для підтвердження даного положення наведемо графіки технологічних параметрів у часі для одного з млинів (рис. 3.1).

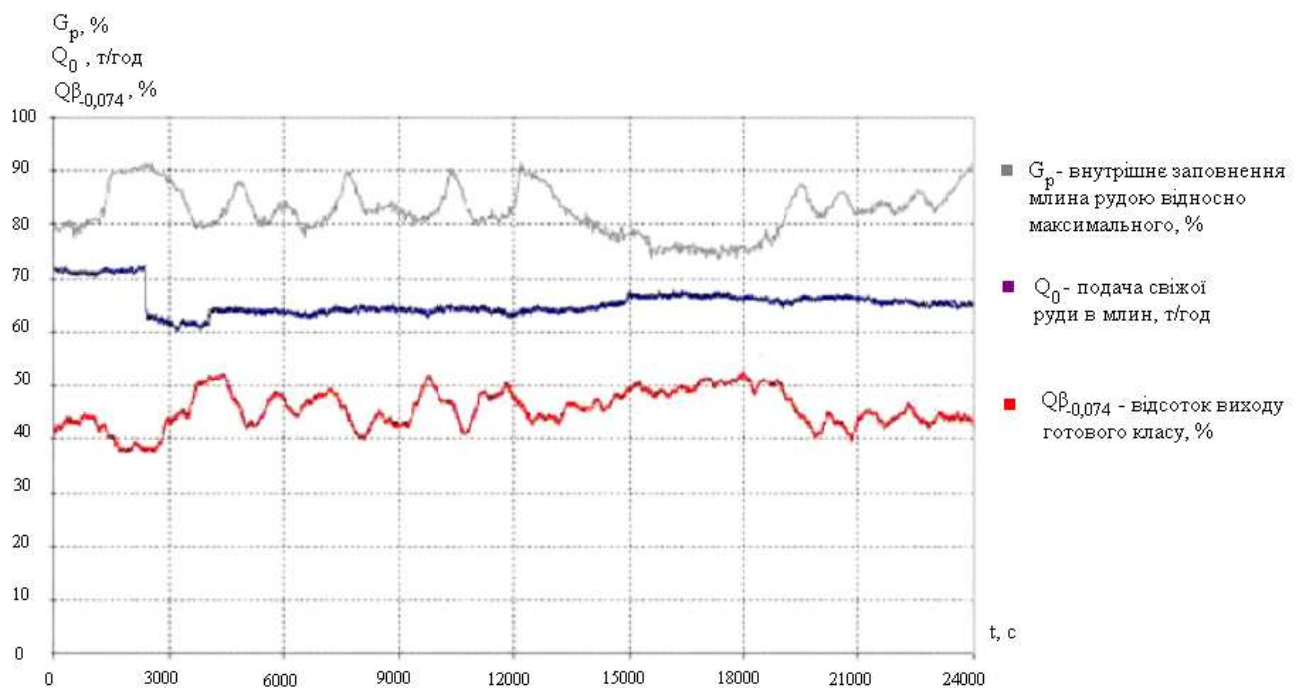


Рисунок 3.1 Діаграми технологічних параметрів млина

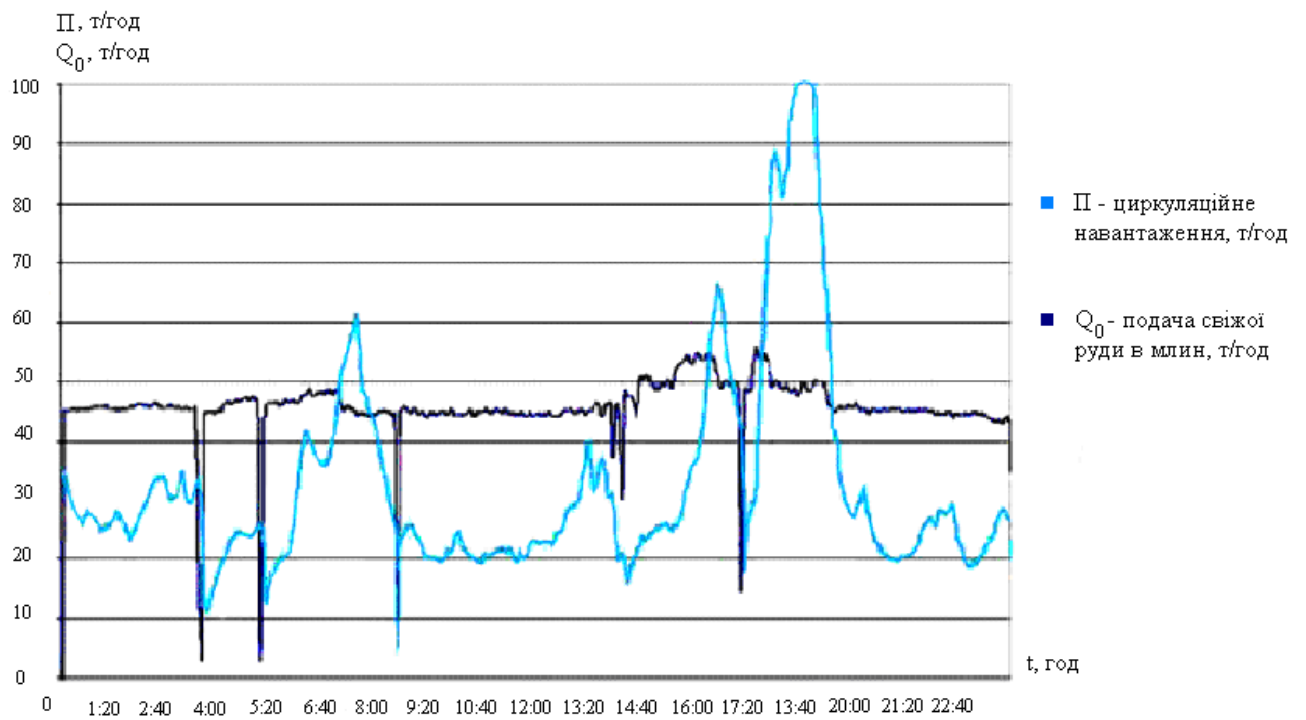


Рисунок 3.2 Діаграми потоків свіжої руди та пісків млина

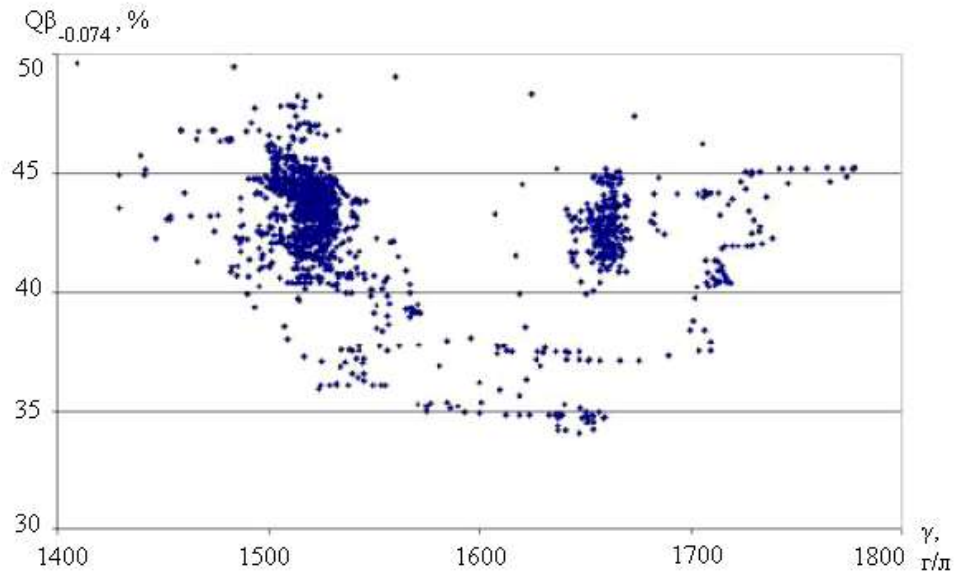


Рисунок 3.3 Залежність готового класу від густини зливу класифікатора

З графіка видно, що неможливо встановити точну залежність між густиною зливу та виходом готового продукту. Це підтверджує, що твердження про можливість стабілізації виходу готового класу шляхом контролю густини зливу є, в загальному випадку, помилковим. Проте, в умовах стабільної якості руди, така стабілізація може дати позитивні результати протягом обмеженого часу.

Відповідно, можна визначити загальні вимоги до систем автоматичного управління кульовим млином, які допоможуть досягти оптимальних умов для подрібнення. Головною метою є максимізація продуктивності при зниженні енерговитрат і уникненні надмірного подрібнення сировини. Важливо підтримувати оптимальний рівень завантаження млина, а також стабілізувати його заповненість рудою, регулюючи подачу сировини. Крім того, контроль за густиною рудної пульпи через управління водним режимом є необхідним для забезпечення стабільності процесу.

3.2 Моделювання кульового барабанного млина

Одним із ключових етапів у процесі проектування системи управління технологічним процесом є створення моделі об'єкта управління, в даному випадку — млина. Повна модель повинна відображати залежність вихідних параметрів від ряду вхідних, враховуючи наявні нелінійності в цих зв'язках. Важливо, щоб ці зв'язки демонстрували динамічні властивості об'єкта, показуючи, як змінюється певний вихідний параметр у часі внаслідок зміни вхідного впливу.

Серед вхідних параметрів, що впливають на процес подрібнення, можна виділити подачу води в млин (W , м³/год), циркуляційне навантаження пісків (Π , т/год), яке надходить з класифікатора, подачу свіжої руди (Q_0 , т/год) та початкове завантаження кульовою масою (ϕ_k , в.о.). Вказані величини

можуть регулюватися, за винятком потоку пісків, який значною мірою залежить від якості та твердості руди, що надходить до млина. Таким чином, подача води, свіжої руди та кульове завантаження виступають як керуючі величини, тоді як піськове навантаження є збурюючою величиною.

Основною метою управління кульовим млином є оптимізація внутрішнього заповнення барабана складовими процесу. Виходячи з цього, вихідними координатами моделі млина можна вважати параметри стану внутрішнього середовища: густину пульпи в барабані (γ_p , т/м³), загальний потік рудної сировини через млин (Q , т/год), внутрішнє заповнення млина рудою (ϕ_r , в.о.) та поточне внутрішнє заповнення кульовою масою (ϕ_k , в.о.). Спрощена функціональна модель млина, яка відображає основні характеристики виробництва, може бути представлена у вигляді, показаному на рисунку 3.4.

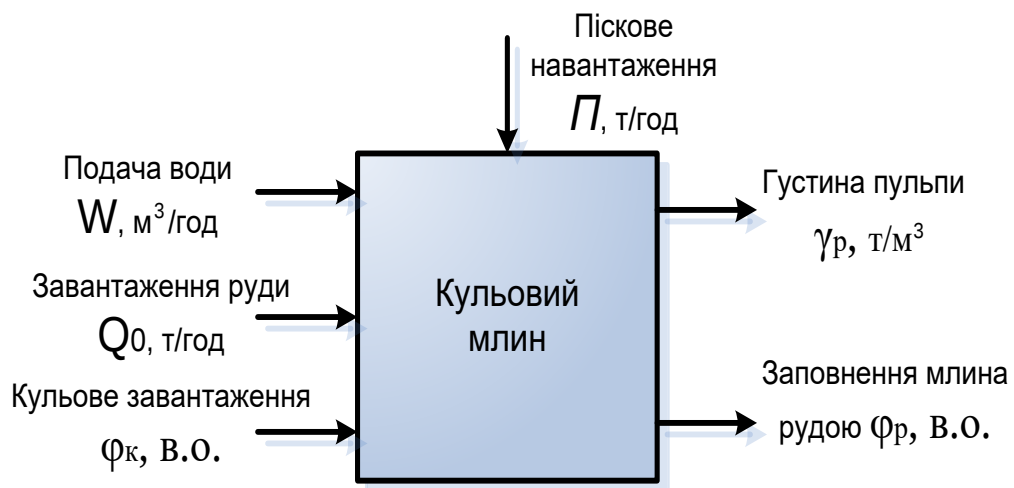


Рисунок 3.4 Функціональна модель млина

Повне завантаження млина рудною масою складається з потоку вихідної руди та рецирку

$$Q = Q_0 + P. \quad (3.1)$$

Густина рудної пульпи, що знаходиться в барабані млина залежить від співвідношення [5] кількості руди та води на вході

$$\gamma_n = \frac{\gamma_p(Q+W)}{W\gamma_p + Q}, \quad (3.2)$$

де γ_p – об’ємна вага руди (т/м³), приймається на рівні 3,6 т/м³.

Універсальні статичні характеристики, які зв'язують вхідні, проміжні та вихідні змінні, можуть бути представлені відповідно до рівняння (1.26). Для моделювання завантаження млина рудою важливо встановити зворотну залежність внутрішнього заповнення від значення вхідної руди та кульового завантаження. Цю залежність можна визначити з достатньою точністю за допомогою чисельних методів, апроксимуючи дані з декількох точок, отриманих з графіків статичних характеристик, представлених на рисунку 1.10. В результаті, отримана залежність внутрішнього заповнення від значення вхідної руди та кульового завантаження дозволить ефективно управляти процесом подрібнення в млині, забезпечуючи оптимальні умови для досягнення бажаних вихідних параметрів. Таким чином, встановлення цієї залежності є критично важливим для розробки моделі, яка точно відображає динаміку та ефективність роботи млина.

$$\begin{aligned} \varphi_p(Q, \varphi_k) = & -0,966393 \cdot 10^{-3} Q^2 \varphi_k^2 + 0,993171 \cdot 10^{-3} Q^2 \varphi_k - 0,209083 \cdot 10^{-3} Q^2 + \\ & + 0,785630 Q \varphi_k^2 - 0,770629 Q \varphi_k + 0,164350 Q - 139,431 \varphi_k^2 + 133,525 \varphi_k - 28,6132. \end{aligned} \quad (3.3)$$

Динаміка зміни завантаження млина подрібнювальним матеріалом при зміні потоку руди на її вході, відповідно до розрахунків в роботі [5], може бути виражена аперіодичною ланкою першого порядку з постійною часу, яка рівна

$$T_Q = \frac{\left(\frac{1}{d_{cp2}} + \frac{1}{d_{cp1}} \right) \rho}{0,408 \gamma_p k_p \omega \cos \psi \theta (3\rho^2 + 2r\rho - r^2)} =$$

$$= \frac{\left(\frac{1}{0,51} + \frac{1}{4,34} \right) \cdot 0,3367}{0,408 \cdot 2,4 \cdot 0,223 \cdot 1,9 \cdot \cos(0,543) \cdot 2,173 (3 \cdot 0,3367^2 + 2 \cdot 1,009 \cdot 0,3367 - 1,009^2)} = 525,3c$$

Динаміка зміни завантаження млина подрібнювальним матеріалом при зміні потоку води на її вході представляється також аперіодичною ланкою першого порядку з постійною часу, яка визначається наступним чином

$$T_W = \frac{Q}{W\gamma_p + Q} \cdot \frac{\left(\frac{1}{d_{cp2}} + \frac{1}{d_{cp1}} \right) \rho}{0,408 \gamma_p k_p \omega \cos \psi \theta (3\rho^2 + 2r\rho - r^2)} = \frac{343,32}{70,07 \cdot 2,4 + 343,32} \times$$

$$\times \frac{\left(\frac{1}{0,51} + \frac{1}{4,34} \right) \cdot 0,3367}{0,408 \cdot 2,4 \cdot 0,223 \cdot 1,9 \cdot \cos(0,543) \cdot 2,173 (3 \cdot 0,3367^2 + 2 \cdot 1,009 \cdot 0,3367 - 1,009^2)} = 311,6c$$

Як видно, постійні часу млина є функціями багатьох параметрів, тому вони змінюються в залежності від режиму роботи. Для спрощення побудови моделі ці постійні були прийняті за константи, що дорівнюють розрахованим значенням при оптимальних параметрах.

Відповідно до зазначених вище залежностей була побудована повна нелінійна динамічна функціональна модель кульового млина в програмному пакеті Simulink MatLab. Схему цієї моделі представлено на рисунку 3.5.

Ця модель дозволяє більш точно відобразити динаміку процесу подрібнення, враховуючи нелінійні взаємозв'язки між вхідними параметрами, проміжними величинами та вихідними результатами. Завдяки використанню Simulink, можна легко візуалізувати та аналізувати поведінку млина в різних режимах роботи, що сприяє оптимізації технологічного процесу.

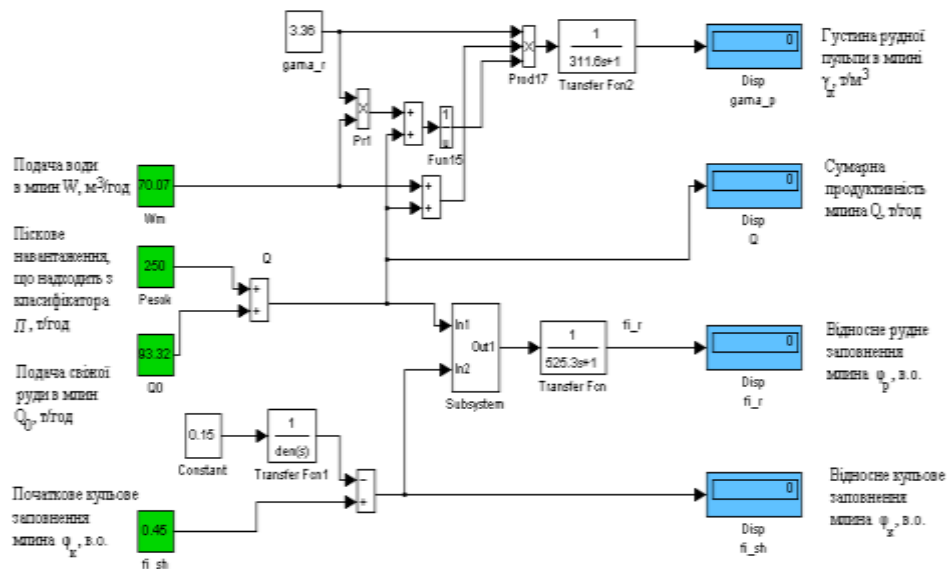


Рисунок 3.5 Повна нелінійна динамічна функціональна модель кульового млина

Зношення кульового завантаження в моделі виконано за аперіодичним законом, що залежить від часу роботи млина. Це дозволяє враховувати поступове зниження ефективності кульового завантаження в процесі експлуатації, що є важливим аспектом для точності моделювання.

Розроблена модель кульового млина може бути використана для проектування системи автоматичного керування даним об'єктом. Завдяки можливості аналізу динаміки млина та врахуванню зношення, ця модель дозволяє створити більш ефективні алгоритми управління, які можуть адаптуватися до змінюваних умов роботи. Це, в свою чергу, сприятиме підвищенню продуктивності та зниженню витрат на експлуатацію млина.

Впровадження системи автоматичного керування на основі цієї моделі може також забезпечити кращу стабільність процесу подрібнення, зменшити ризики перевантаження та покращити якість кінцевого продукту.

3.3 Моделювання технологічного процесу подрібнення

У даному розділі ми проведемо моделювання технологічного процесу подрібнення за допомогою моделі кульового млина, зображеної на рисунку 3.5. Структурна схема, створена в середовищі Simulink MatLab, представлена на рисунку 3.6.

Для спрощення моделі кульового млина вона була оформлена як підсистема, що має різні вхідні та вихідні параметри. Під час моделювання було встановлено три основні вхідні параметри: подача води становила 30 кубічних метрів на годину, подача свіжої рудної маси була на рівні 90 тонн на годину, а початкове кульове завантаження дорівнювало 0,45 в умовних одиницях, яке з часом зменшувалося за експоненціальною залежністю.

Крім того, піськове навантаження моделювалося як випадковий сигнал в межах від 200 до 400 тонн на годину. Це відображає варіації в якості руди, що впливають на коливання в рециклі.

Важливо зазначити, що зазначені параметри відповідають умовам, які спостерігаються на збагачувальних комбінатах Кривбасу. Це робить результати моделювання актуальними для подальшого аналізу та оптимізації процесу подрібнення.

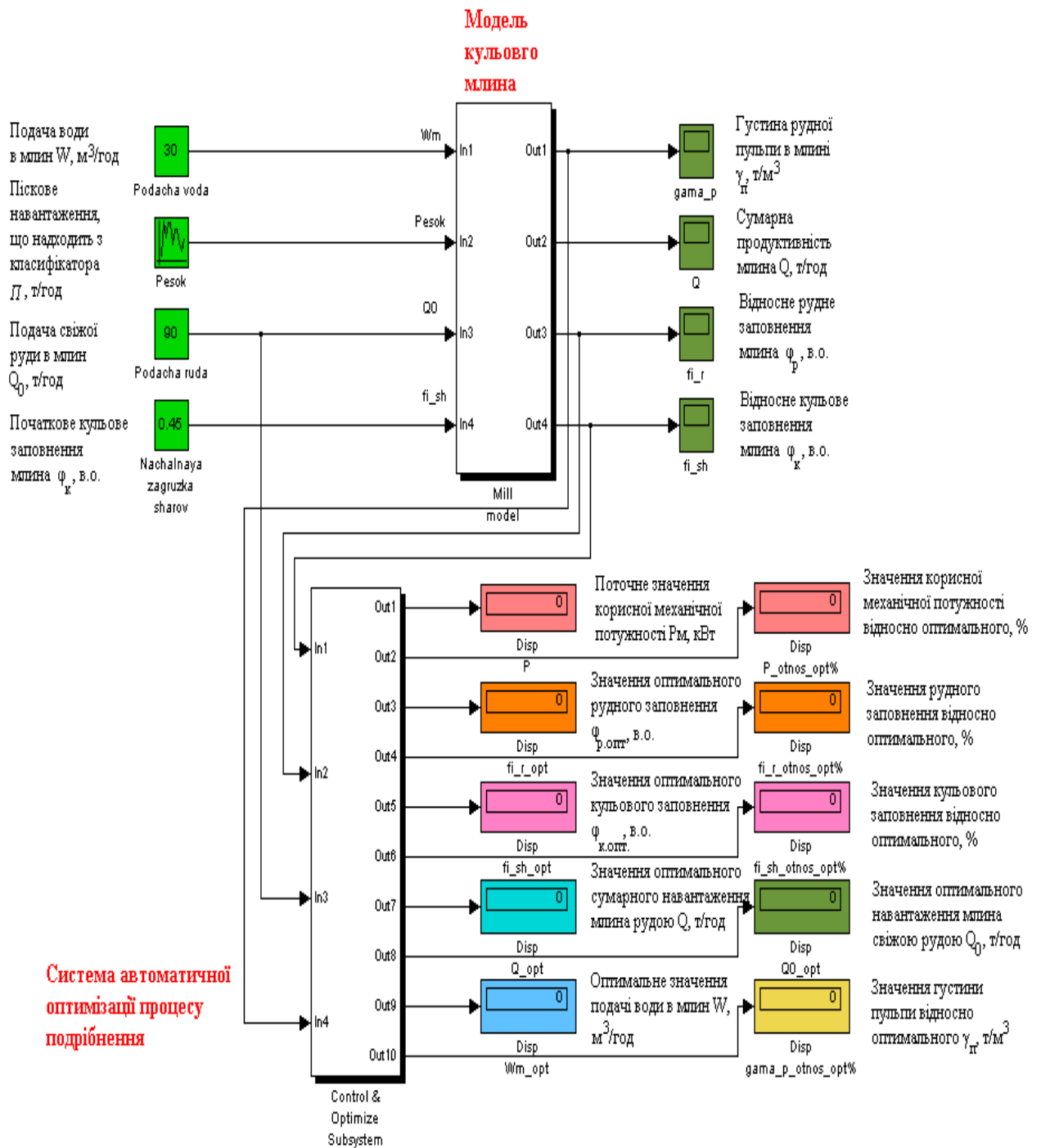


Рисунок 3.6 Модель технологічного процесу подрібнення

Система оптимізації працює під час моделювання в ролі експертного контролю, не здійснюючи безпосередніх керуючих впливів на об'єкт. Для оптимізаційної моделі використовуються дані про поточне заповнення млина

кулями, яке є першим вхідним параметром, а також інформація про заповнення млина рудою — другий вхідний параметр, і поточне значення пісового навантаження, що виступає третім вхідним параметром.

У процесі моделювання були отримані часові діаграми, які відображають зміни таких показників, як густина пульпи всередині млина (γ_n , т/м³), загальне навантаження подрібнювальним матеріалом (Q , т/год), відносне заповнення млина рудою, а також відносне заповнення барабана кульовою масою. Ці дані наведені на рисунку 3.7.

Система оптимізації забезпечує оперативний контроль за поточними параметрами, що характеризують режим роботи млина, і порівнює їх із оптимальними значеннями, вказуючи процентне співвідношення. На рисунку 3.8 представлені часові діаграми, що демонструють зміни корисної потужності, відносного заповнення рудою та кульовою масою, а також густини пульпи всередині млина у відношенні до їх оптимальних значень у відсотках.

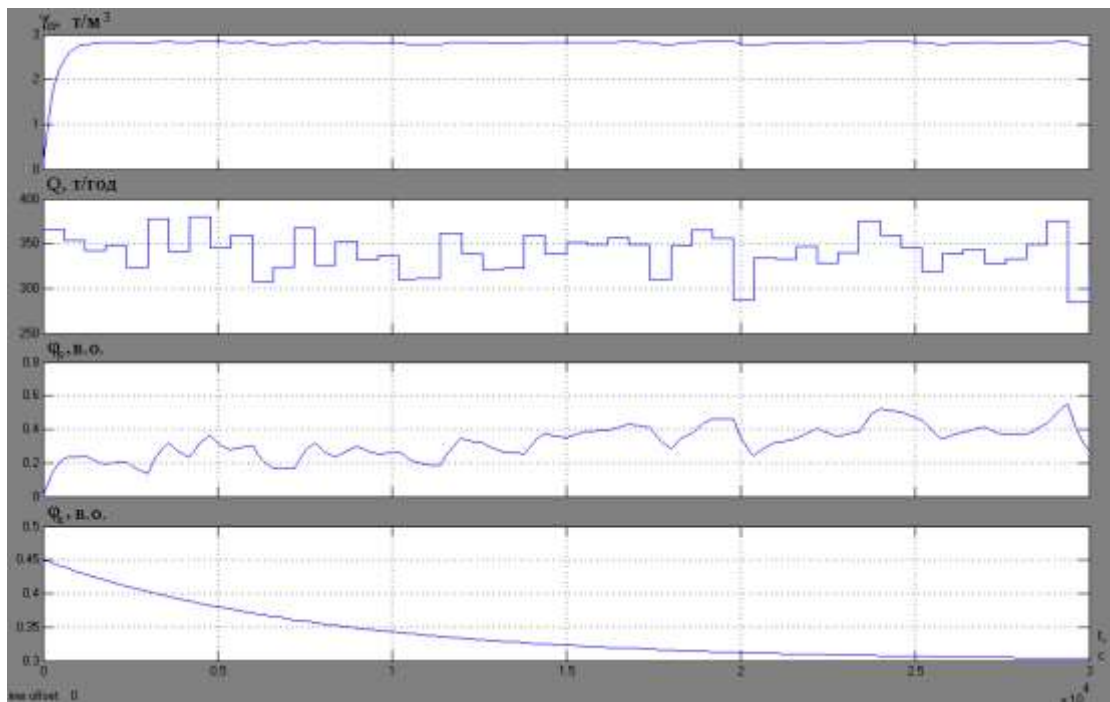


Рисунок 3.7 Часові діаграми густини пульпи в млині γ_n (т/м³), сумарного навантаження за рудою Q (т/год), відносного заповнення млина рудою ϕ_r (в.о.), відносного заповнення барабану кульовою масою ϕ_k (в.о.)

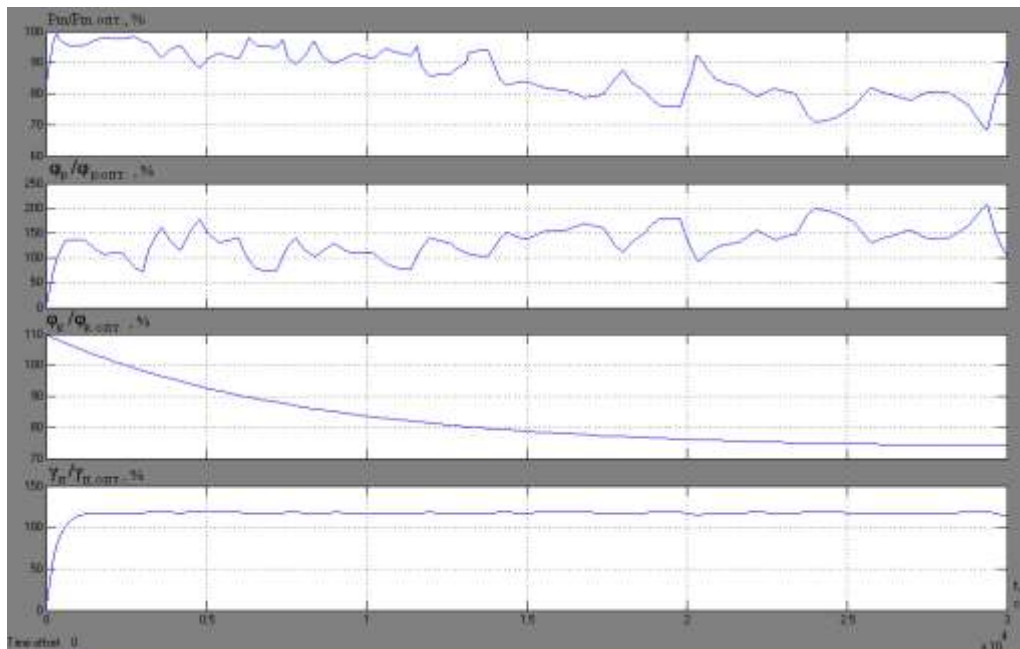


Рисунок 3.8 Часові діаграми зміни корисної потужності, відносного рудного та кульового заповнення, густини пульпи відносно їх оптимальних значень

Аналіз графіків на рисунках 3.7 і 3.8 дозволяє зробити кілька важливих висновків щодо роботи млина.

По-перше, густина рудної пульпи коливається навколо значення $2,8 \text{ т/м}^3$, що перевищує необхідну густину за технологічними умовами. Це підтверджується графіком відносної густини пульпи, який демонструє значення близько 120% від оптимального показника. Це свідчить про те, що процес подрібнення може бути неефективним через надмірну густину пульпи.

По-друге, сумарна подача руди в млин переважно залежить від піскового навантаження, що призводить до її коливань у межах 280-380 т/год. Ці коливання вносять нестабільність у відносне рудне завантаження всередині барабана, яке змінюється в межах 0,15-0,55 у відносних одиницях (70-200% відносно оптимального). Це свідчить про те, що зміни в подачі руди можуть негативно впливати на ефективність подрібнення.

Графіки кульового завантаження показують монотонне спадання, що зумовлено стиранням куль під час роботи. Відносні значення кульового завантаження зменшуються з 0,45 до 0,3, що відповідає 110% до 73% від оптимального. Це зменшення може вплинути на ефективність подрібнення, оскільки зменшення кількості куль може призвести до менш інтенсивного процесу подрібнення.

Відносна корисна потужність млина також демонструє значні коливання, іноді падаючи до рівня 70%. Це свідчить про нестабільну енергоефективність роботи млина. Отже, можна стверджувати, що об'єкт працює недостатньо ефективно, навіть за умови стабілізованих регулюючих впливів. Це підкреслює необхідність подальшого аналізу та оптимізації процесу для покращення загальної ефективності роботи млина.

3.4 Проектування локальних систем автоматичного регулювання

3.4.1 Система автоматичного регулювання подачі води. Подача води в млин є критично важливим параметром, що впливає на ефективність процесу подрібнення. Регулювання цього показника здійснюється за допомогою заслінки, кут повороту якої безпосередньо визначає розхід води. Однак, для підвищення точності контролю подачі води, доцільно впровадити систему автоматичного регулювання (САР).

Зміни, такі як коливання напору води у водопроводі або неточності в повороті заслінки, можуть призвести до відхилення фактичного значення подачі води (W) від заданого. Це свідчить про необхідність створення замкненої системи автоматичного регулювання, яка буде працювати на основі принципу керування за відхиленням.

Система автоматичного регулювання була спроектована в програмному середовищі Simulink MatLab. Структурна схема цієї системи представлена на рисунку 3.9. Вона включає в себе всі необхідні елементи для забезпечення стабільного і точного контролю подачі води, що дозволить

зменшити вплив зовнішніх факторів і підвищити загальну ефективність роботи млина. Система буде реагувати на відхилення в подачі води, автоматично коригуючи положення заслінки для підтримання оптимальних умов роботи.

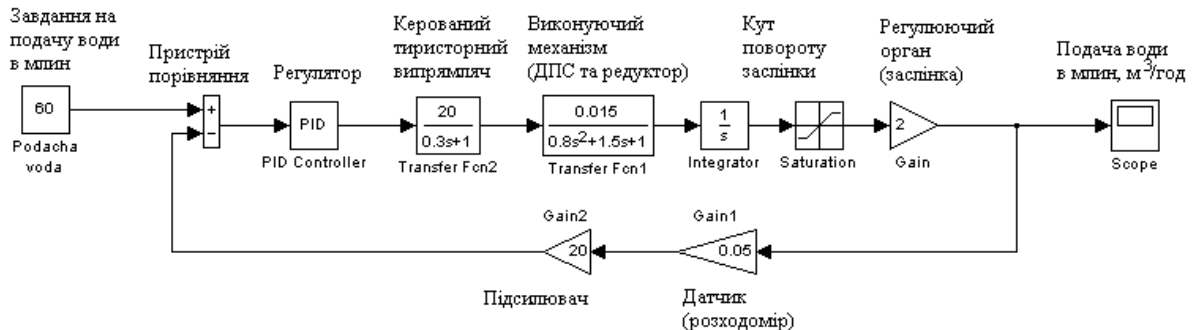


Рисунок 3.9 Система автоматичного регулювання подачі води в млин

Заслінка в даному випадку виконує функцію регулюючого органу. Прийmemo, що подача води пропорційна куту повороту заслінки, що змінюється в межах 0°-90°. При максимальному куту повороту подача води рівна 180 м³/год. Таким чином, заслінка моделюється пропорційною ланкою з коефіцієнтом передачі

$$k_z = \frac{180}{90} = 2 \text{ (м}^3\text{/год)/град.}$$

Виконуючий механізм – двигун постійного струму з редуктором, що обертає заслінку. Час переведення заслінки із одного крайнього положення в інше становить 30 с. Таким чином, виконуючий механізм моделюється аперіодичною ланкою другого порядку з коефіцієнтом передачі

$$k_{\text{вм}} = \frac{90}{30 \cdot 200} = 0,015 \text{ град/(с} \cdot \text{В).}$$

Тиристорний випрямляч моделюється аперіодичною ланкою першого порядку з коефіцієнтом передачі

$$k_{\text{тв}} = \frac{200}{10} = 20.$$

Коефіцієнт підсилення датчика розходу води у зворотному зв'язку становить 0,05. Для компенсації коефіцієнту передачі розходоми́ра у зворотній зв'язок ввімкнено підсилювач з коефіцієнтом підсилення 20.

Під час проектування методом направлено́го пошуку були отримані наступні коефіцієнти ПІД-регулятора, які оптимально задовольняють перехідний процес у САР по завданню:

$$k_{\text{п}} = 0,6; k_{\text{i}} = 0; k_{\text{д}} = 0,4.$$

Під час моделювання був отриманий графік перехідного процесу за завданням, який показано на рис. 3.10.

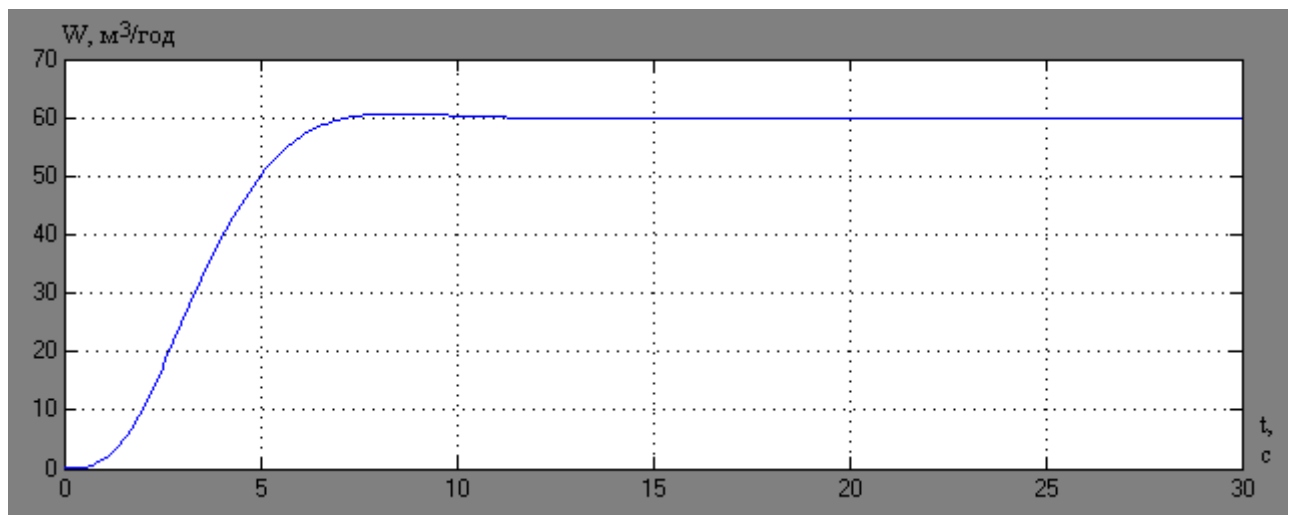


Рисунок 3.10 Перехідний процес подачі води в млин

Як видно з рисунка, САР точно відтворює сигнал завдання. При цьому показники перехідного процесу знаходяться в нормі. Час перехідного процесу не перевищує 10 с, що задовольняє такий інерційний об'єкт, як кульовий млин.

3.4.2 Система автоматичного регулювання подачі руди. Стабілізація швидкості стрічки конвеєра, що завантажує млин рудою, не завжди забезпечує необхідний рівень подачі руди. Це пов'язано з можливими коливаннями потоку

руди на стрічці, які можуть викликати відхилення від заданого значення подачі. У зв'язку з цим виникає потреба в розробці замкненої системи автоматичного регулювання (САР) подачі руди, що базується на принципі керування за відхиленням.

Система автоматичного регулювання дозволяє враховувати зміни в потоці руди та коригувати швидкість конвеєра, щоб підтримувати стабільну подачу руди на заданому рівні. Це забезпечить більш точний контроль за процесом завантаження млина, зменшуючи вплив зовнішніх факторів на продуктивність.

Структурна схема САР подачі руди була спроектована в програмному пакеті Simulink MatLab. Вона представлена на рисунку 3.11. Система містить всі необхідні компоненти для моніторингу та корекції подачі руди, що дозволить оптимізувати роботу млина та підвищити загальну ефективність технологічного процесу.

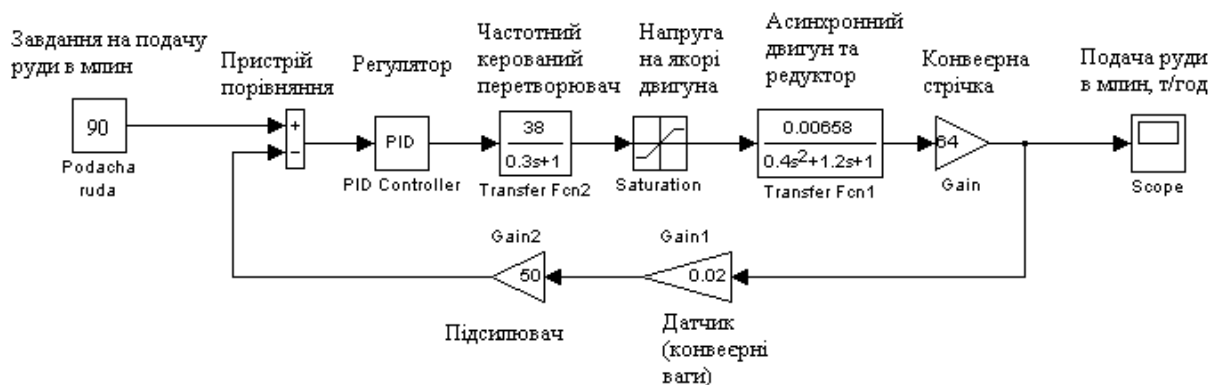


Рисунок 3.11 Система автоматичного регулювання подачі руди в млин

Керований частотний перетворювач моделюється аперіодичною ланкою першого порядку з коефіцієнтом передачі

$$k_{пч} = \frac{380}{10} = 38.$$

Частотний перетворювач у даній системі регулює вихідну напругу та частоту відповідно до пропорційного закону. Важливо зазначити, що вихідна напруга обмежена в межах від 0 до 380 В, що визначає максимальну потужність, яку може забезпечити асинхронний двигун.

Цей двигун, у свою чергу, з'єднаний з редуктором, що забезпечує передачу обертового моменту на барабан, який приводить в рух стрічку конвеєра. Для спрощення моделювання даний комплекс можна представити як аперіодичну ланку другого порядку, що дозволяє ефективно описати динамічні характеристики системи.

Передавальна функція цієї ланки має вигляд, що включає коефіцієнт передачі, часову константу та коефіцієнт загасання. Ці параметри допомагають зрозуміти, як зміна вхідних сигналів вплине на вихідні результати системи.

Моделювання цієї системи дає змогу аналізувати її динаміку, оцінювати стабільність та розробляти автоматизовані стратегії регулювання, що сприятиме досягненню стабільної роботи конвеєра. Впровадження таких систем автоматичного регулювання дозволить покращити контроль за подачею руди, зменшуючи коливання в потоці та підвищуючи загальну ефективність виробничого процесу.

$$k_{\text{вм}} = \frac{2,5}{380} = 0,00658 \text{ (м/с)/В.}$$

В якості регулюючого органу виступає стрічка конвеєра, яка моделюється пропорційною ланкою з коефіцієнтом передачі

$$k_c = \frac{160}{2,5} = 64 \text{ (т/год)/(м/с).}$$

Коефіцієнт передачі конвеєрних вагів встановлено на рівні 0,02, що впливає на точність вимірювання маси матеріалів, які переміщуються по конвеєру. Щоб компенсувати цей коефіцієнт, у зворотний зв'язок системи було інтегровано підсилювач з коефіцієнтом передачі 50. Це дозволяє підвищити чутливість системи та забезпечити більш точне управління.

Під час проектування системи автоматичного регулювання (САР) за допомогою методу направленого пошуку були визначені оптимальні коефіцієнти для ПД-регулятора. Ці коефіцієнти були підібрані так, щоб максимально задовольнити вимоги до перехідного процесу, що забезпечує стабільну і швидку реакцію системи на зміни входних сигналів. В результаті, система здатна ефективно реагувати на коливання, що виникають під час роботи конвеєра, забезпечуючи плавність і точність процесу.

$$k_p = 0,4; k_i = 0,1; k_d = 0,2.$$

Графік перехідного процесу за завданням для САР подачі руди показаний на рис. 3.12.

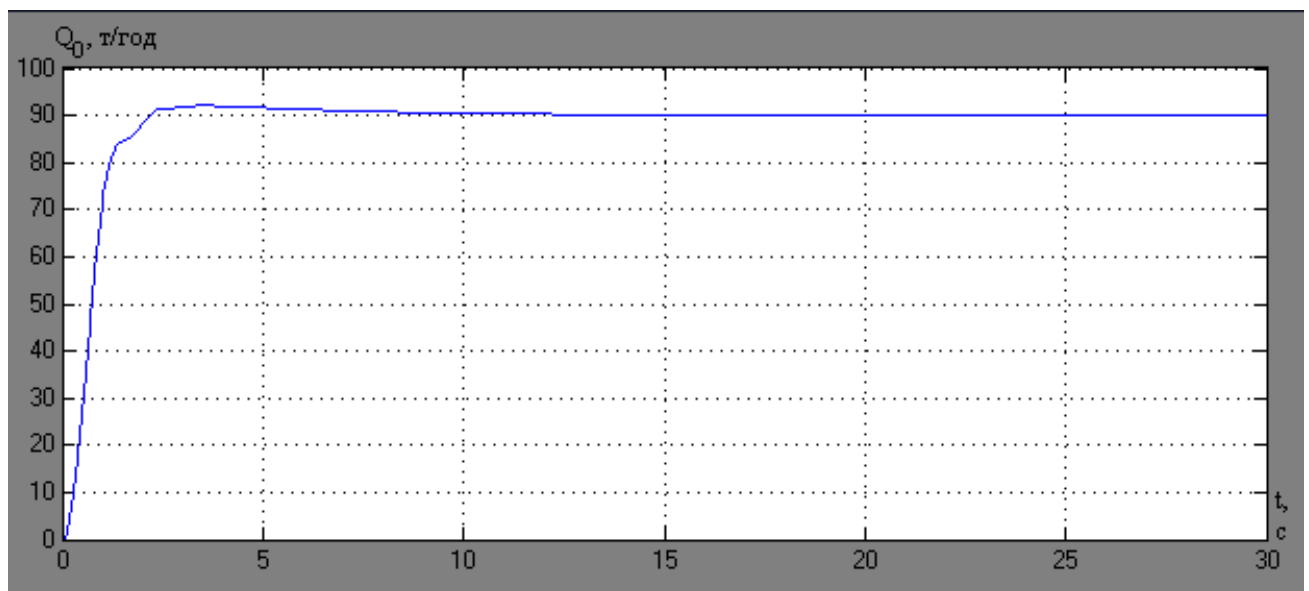


Рисунок 3.12 Перехідний процес подачі руди в млин

Показники перехідного процесу свідчать, що спроектована САР подачі руди якісно відтворює сигнал завдання.

3.4.3 Система автоматичного регулювання кульового завантаження. Щоб підтримувати рівень кульового завантаження в млині на заданому значенні, необхідно створити замкнуту слідкуючу систему автоматичного

регулювання. Основна мета цієї системи полягає в довантаженні куль у млин у процесі їх зношення.

На рисунку 3.13 представлена структурна схема системи автоматичного регулювання кульового завантаження, яка була розроблена за допомогою програмного пакету Simulink MatLab. Ця схема ілюструє всі ключові елементи системи, їх взаємозв'язки та алгоритми, що забезпечують ефективне управління процесом довантаження куль.

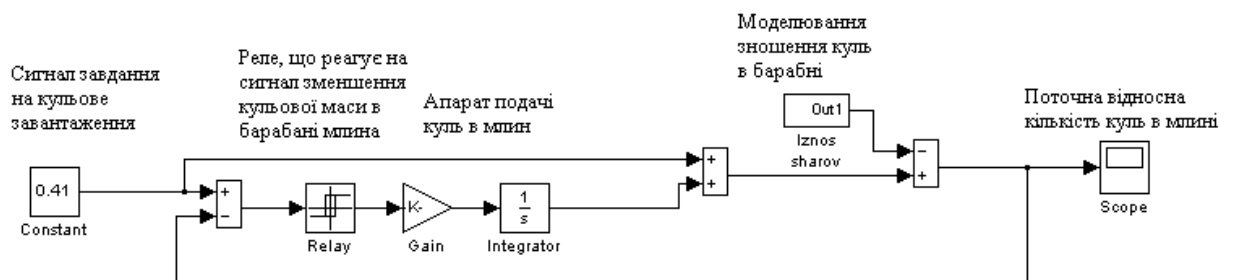


Рисунок 3.13 Система автоматичного регулювання кульового завантаження в барабані млина

Помилка між заданим та поточним значеннями кульового завантаження передається на реле, яке контролює подачу куль у млин. Коли маса куль у барабані досягає заданого значення, реле спрацьовує, і подача куль припиняється. Таким чином, система працює в постійному слідкуючому режимі, забезпечуючи стабільність кульового завантаження.

Графік поточного кульового завантаження барабана, з урахуванням стирання та довантаження куль, представлений на рисунку 3.14. Використовуючи більш точну апаратуру контролю, чутливість системи до зміни об'єму куль у млині може бути налаштована через уставки реле, що дозволяє зменшити коливання кульового завантаження. У такому випадку довантаження куль у млин буде виконуватись частіше, але меншими порціями, що сприяє більш стабільному та ефективному процесу роботи млина.

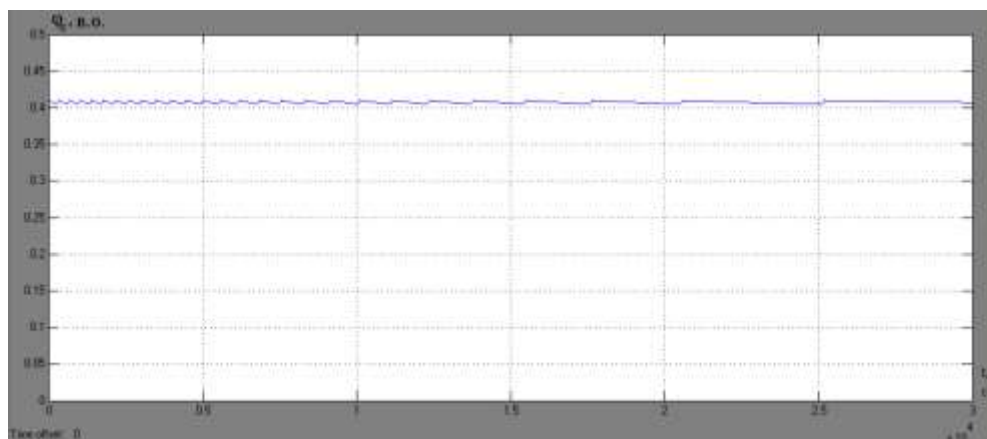


Рисунок 3.14 Графік зміни кульового завантаження в барабані млина

Як видно з рис. 3.14, система автоматичного регулювання кульового завантаження достатньо якісно контролює об'єм куль в барабані млина.

3.5 Комплексна система автоматичного керування процесом подрібнення руди

Система автоматичного керування процесом розмолу руди в кульовому млині повинна відповідати кільком ключовим вимогам. По-перше, важливо забезпечити комплексну оптимізацію роботи млина, зокрема зменшити витрати електроенергії. Крім того, необхідно оптимізувати завантаження млина кулями, а також внутрішнє заповнення рудною масою.

Наступним аспектом є регулювання співвідношення рідин і твердих частин у млині. Стабільність густини пульпи всередині обладнання також має бути під контролем, що сприяє покращенню загальної продуктивності за рахунок виходу руди.

Блок-схема системи автоматичного керування, що відповідає цим технологічним вимогам, ілюструє різні елементи, які беруть участь у процесі. Зокрема, система автоматичної оптимізації позначена зеленим кольором, у той час як системи автоматичного регулювання технологічних параметрів

представлені жовтими блоками. Світло-оранжевий блок символізує кульовий млин.

Зв'язки, що контролюють густину пульпи та навантаження, відзначені червоними штриховими стрілками, тоді як сині стрілки вказують на сигнали, які надходять до систем регулювання. Основні технологічні параметри, що підлягають контролю, виділені великими сірими стрілками. Ця схема демонструє інтеграцію різних компонентів, що сприяє досягненню оптимізації та стабільності в процесі розмолу руди.

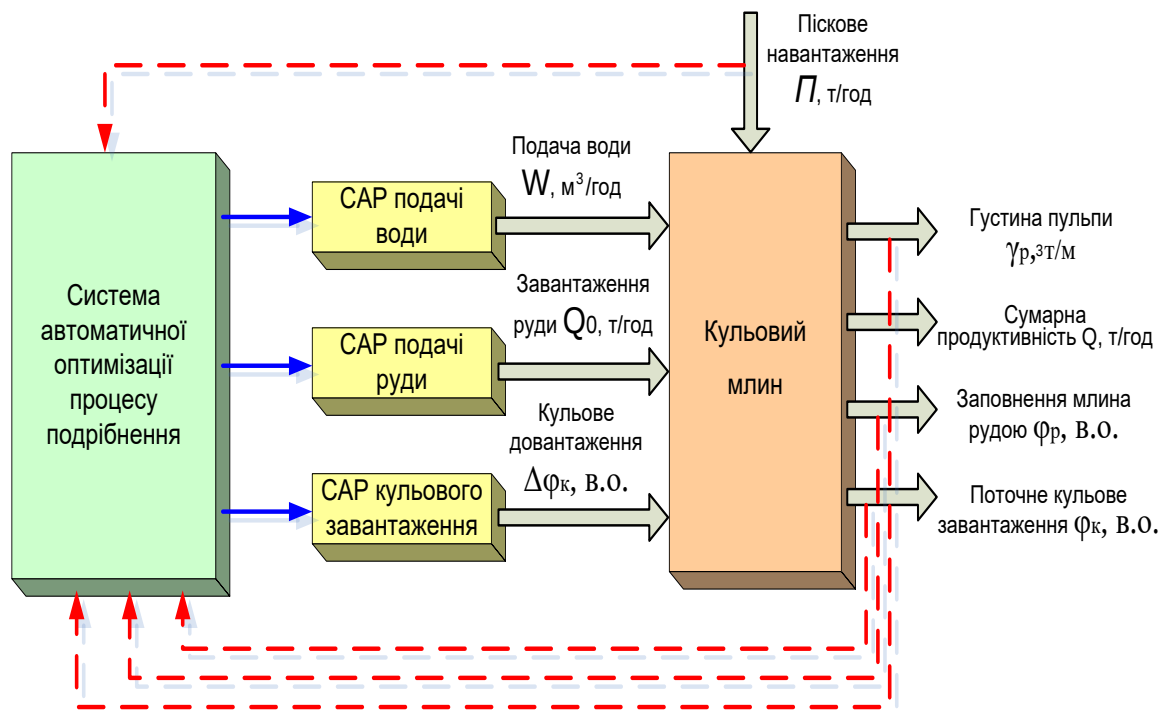


Рисунок 3.15 Блок-схема комплексної САК кульовим млином

Згідно з представленою блок-схемою, була розроблена комплексна система автоматичного керування технологічним процесом подрібнення. Структурна схема автоматизованої системи керування, реалізована в програмному забезпеченні Simulink MatLab, ілюструється на рисунку 3.16. Ця схема відображає всі ключові елементи та зв'язки, що забезпечують ефективне

управління процесом подрібнення, з акцентом на інтеграцію технологічних параметрів і автоматизацію контролю.

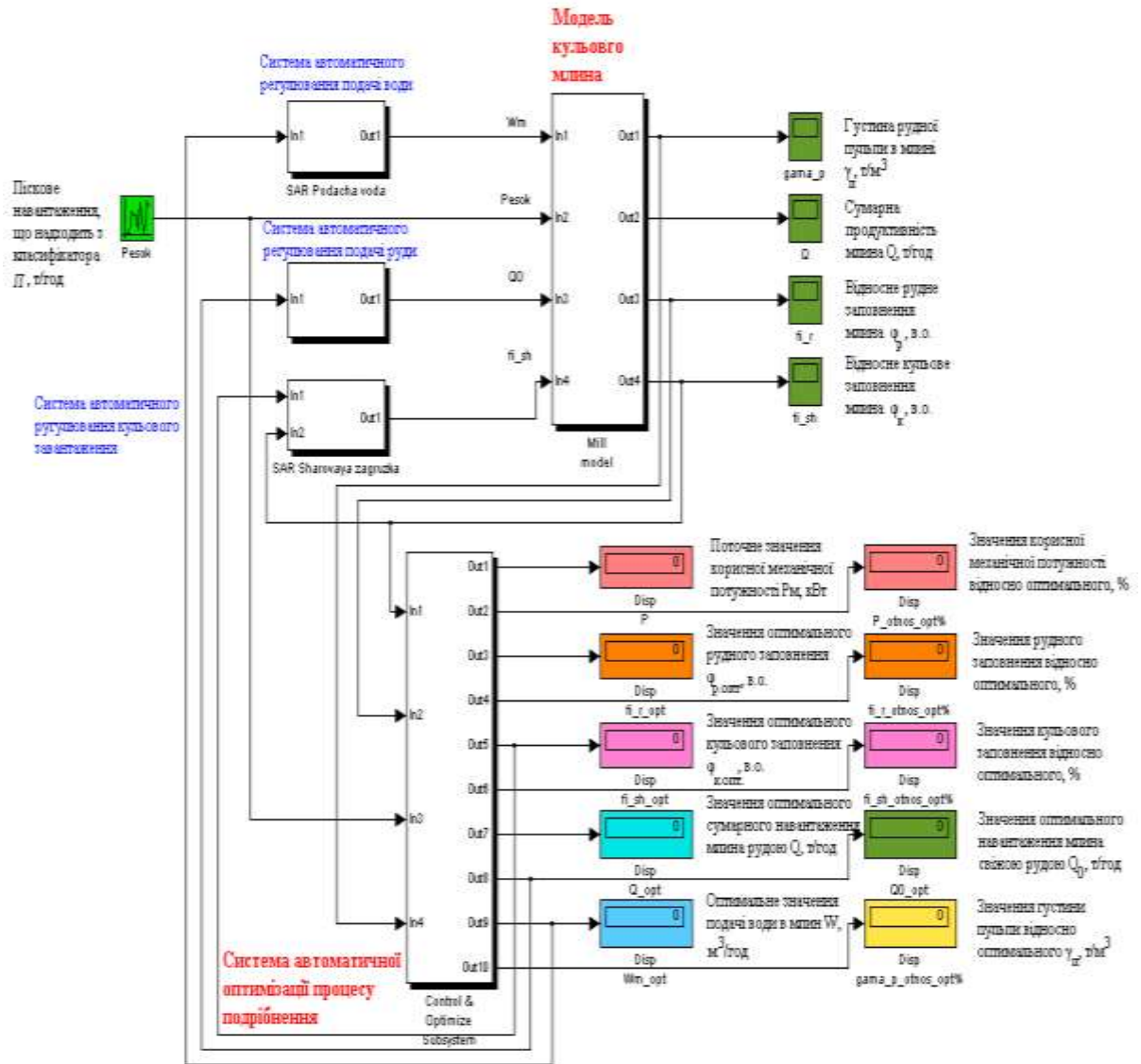


Рисунок 3.16 Комплексна система автоматичного керування процесом подрібнення

В основі розробленої системи керування лежить автоматична оптимізація процесу подрібнення в кульовому млині (САО ПП). Ця система, враховуючи актуальні значення технологічних параметрів, формує оптимальний набір керуючих сигналів. Ці сигнали є завданнями для трьох локальних систем автоматичного регулювання: подачі руди, подачі води та кульового завантаження. Таким чином, забезпечується повний контроль над

технологічним процесом за всіма можливими параметрами. Піськове навантаження виступає як збурюючий фактор для системи.

У процесі комп'ютерного експерименту були отримані графіки зміни основних параметрів роботи кульового млина в часі. На рисунку 3.17 представлені часові діаграми, що показують густину пульпи в барабані млина, сумарне навантаження за рудою, а також відносне заповнення млина рудою і кульовою масою. Рисунок 3.18 демонструє зміни корисної потужності, відносного рудного та кульового заповнення, а також густини пульпи відносно їх оптимальних значень у відсотках. Ці діаграми були створені на основі даних автоматичної оптимізації.

Аналіз графіків на рисунку 3.17 дозволяє зробити певні висновки. Після завершення перехідного процесу густина рудної пульпи стабілізується на рівні $2,4 \text{ т/м}^3$, який заданий в оптимізаційній системі. Стабільність цього показника підтверджується графіком відносної густини пульпи на рисунку 3.18, де він знаходиться на рівні 100% відносно оптимального значення. Сумарна подача руди, що складається з потоку свіжої руди та рециклінгу, стабілізується на визначеному оптимізаційною системою рівні, за винятком короткочасних перехідних процесів.

Відносне рудне завантаження млина після завершення перехідного процесу досягає усталеного значення близько 0,188, що видно на рисунку 3.17. Графік на рисунку 3.18 підтверджує, що завантаження рудою підтримується на оптимальному рівні. Кульове завантаження, згідно з графіком на рисунку 3.17, демонструє незначні коливання біля значення 0,41, що також підтверджується графіком на рисунку 3.18. Відсутність перехідного процесу на графіках кульового завантаження на початку моделювання пояснюється тим, що млин уже був заповнений кулями до оптимального рівня, а під час роботи кульки довантажувалися через систему автоматичного регулювання.

Перехідний процес на графіках відносного заповнення млина рудою зумовлений тим, що млин починав роботу порожнім, заповнюючись у міру подачі сировини. Оскільки всі технологічні параметри підтримуються на

оптимальних рівнях, енерговикористання також перебуває на максимальному значенні, що підтверджує графік відносної потужності на рисунку 3.18.

Отже, спроектована система автоматичного керування процесом подрібнення руди відповідає всім зазначеним технологічним вимогам.

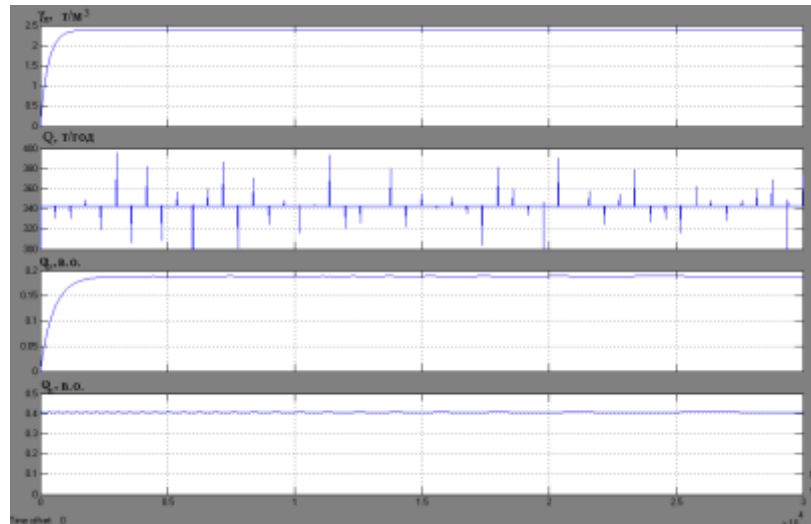


Рисунок 3.17 Часові діаграми густини пульпи в млині γ_n (т/м³), сумарного навантаження за рудою Q (т/год), відносного заповнення млина рудою ϕ_p (в.о.), відносного заповнення барабану кульовою масою ϕ_k (в.о.)

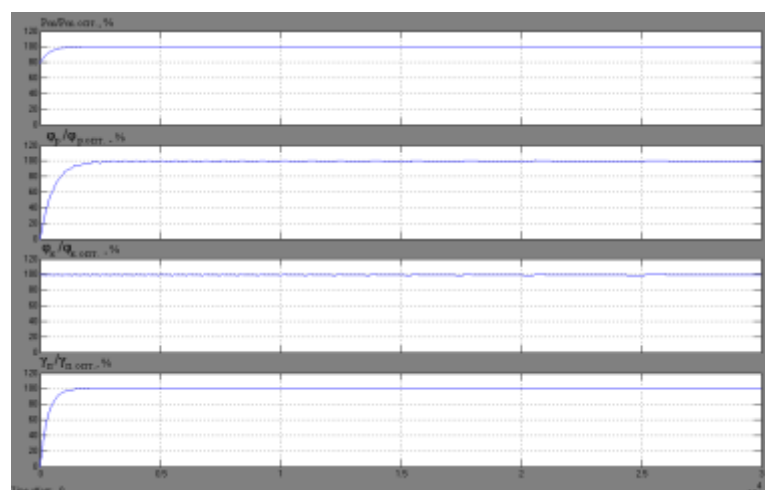


Рисунок 3.18 Часові діаграми зміни корисної потужності, відносного рудного та кульового заповнення, густини пульпи відносно їх оптимальних значень

ВИСНОВКИ

Аналіз енергоефективності обладнання для подрібнення руди виявив фактори, що спричиняють надмірне споживання електроенергії, а також потенційні можливості для її економії на гірничорудних підприємствах. На основі отриманих даних були визначені основні напрямки для підвищення ефективності процесу подрібнення та раціонального використання енергії.

Дослідження, що стосуються ключових технологічних аспектів роботи кульових млинів, дозволили з'ясувати важливі параметри, які впливають на продуктивність обладнання, такі як заповненість млина кульками та рудою, а також густина пульпи. В результаті були розроблені умови для оптимізації роботи млина, що знайшло підтвердження у моделюванні, виконаному за допомогою сучасних програмних засобів.

Експериментальні дослідження, що вивчали вплив завантаження куль на потужність і продуктивність млина, підтвердили оптимальні умови завантаження, сформульовані під час теоретичних розробок. Ці результати стали основою для створення системи автоматичної оптимізації процесу подрібнення, яка здатна в автоматичному режимі адаптувати регулюючі впливи, спираючись на актуальні технологічні параметри, з метою підвищення енергоефективності.

Аналіз методів автоматизації подрібнюючого обладнання показав їхні сильні та слабкі сторони, що дозволило сформулювати вимоги до автоматизованої системи керування кульовим млином. Ця система має на меті забезпечити оптимальні умови для подрібнення, підтримуючи стабільну продуктивність при мінімальних енергетичних витратах і запобігаючи надмірному подрібненню руди.

Реалізація автоматичної оптимізації технологічного процесу подрібнення була здійснена шляхом розробки комплексної системи автоматичного керування. Її основою став модуль, що генерує сигнали для локальних систем автоматизації, які безпосередньо впливають на об'єкт. Ця

система виконує низку завдань, серед яких стабілізація оптимального заповнення куль, оптимізація завантаження руди та підтримка необхідної густини пульпи через регулювання водного балансу.

У процесі комп'ютерного експерименту було проведено порівняння двох підходів до управління технологічним об'єктом: традиційного, що базується на стабілізації регулюючих параметрів, та системи, що використовує автоматичну оптимізацію. Моделювання показало, що розроблена система автоматичного керування демонструє вищу ефективність у порівнянні з традиційними методами.