Міністерство освіти і науки України
Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва, транспорту та енергетики
Кафедра автоматизації виробничих процесів

«Допущено до захисту»
Зав. кафедри АВП
к.т.н., доцент
_____Олександр ДІДИК
“___“ _____2026 р.

ВИПУСКНА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти

на тему
«Автоматизована система керування процесом дозування шихтових матеріалів»

«Automated control system for batch material dosing process»

Виконав: здобувач вищої освіти IV курсу
групи АК-22
151 «Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології»
_____ Максим БУТЕНКО
«___»_____ 2026 р.

Керівник роботи
д.т.н., професор
_____ Анатолій МАЦУЙ
«___»_____ 2026 р.

Рецензент
_____
«___»_____ 2026 р.

м. Кропивницький

ЗМІСТ

Вступ

1 Призначення та область застосування системи керування процесом дозування шихтових матеріалів

1.1 Характеристика технологічного процесу дозування шихтових матеріалів

1.2 Характеристика існуючої АСК ТП відділення підготовки шихти

1.2.1 Призначення, характеристика комплексу завдань та функції АСК ТП відділення підготовки шихти

1.2.2 Структура технічних засобів АСК ТП підготовки шихти

2 Огляд існуючих рішень та обґрунтування прийнятого принципу побудови системи керування процесом дозування шихтових матеріалів

2.1 Аналіз існуючих структур систем керування процесом дозування шихтових матеріалів

2.2 Вибір структури системи керування процесом дозування шихтових матеріалів

2.3 Обґрунтування необхідності модернізації системи керування процесом дозування шихтових матеріалів

2.4 Вимоги до системи керування процесом дозування шихтових матеріалів

3 Опис та обґрунтування обраних проектних рішень системи керування процесом дозування шихтових матеріалів

3.1 Опис структури комплексу технічних засобів АСК процесом дозування шихтових матеріалів

3.2 Вибір обладнання автоматизації першого рівня

3.3 Вибір та обґрунтування промислового контролера та модулів введення-виведення

4 Розрахунки та експериментальні матеріали, що підтверджують працездатність виробу

4.1 Вибір критеріїв якості роботи системи керування процесом дозування шихтових матеріалів

4.2 Розробка систем керування дозаторами компонентів шихти

4.3 Синтез системи керування процесом дозування шихтових матеріалів

4.4 Комп’ютерне моделювання системи керування процесом дозування шихтових матеріалів

Висновки

Список літератури

ВСТУП

Дільниця дозування шихтових матеріалів фабрики огрудкування виконує функцію підготовки суміші, до складу якої входять концентрат, зворотний продукт, вапняк і бентоніт, з подальшим їх перемішуванням та подачею на наступний етап технологічного процесу – огрудкування. Для отримання готової продукції з необхідними якісними характеристиками важливим завданням є підтримання встановленого вмісту кожного компонента в загальній масі шихти. У процесі дозування на одній технологічній лінії задіяно п’ять дискових живильників концентрату, два дозатори аглоруди, а також по два стрічкові дозатори для подачі вапняку та коксу. За таких умов виникає потреба в узгодженій роботі всіх елементів технологічного комплексу, що дозволяє знизити похибки під час формування складу суміші. Досягнення необхідної точності дозування забезпечується завдяки створенню та впровадженню автоматизованої системи керування технологічним процесом, яка здійснює контроль і регулювання параметрів роботи обладнання в режимі реального часу.

Таким чином, розроблення автоматизованої системи дозування є важливим практичним завданням, спрямованим на забезпечення стійкого функціонування агломераційного виробництва, покращення характеристик готової продукції та підвищення ефективності експлуатації технологічного обладнання. У зв’язку з цим метою бакалаврської роботи є проєктування системи керування дозаторами для аглофабрик гірничо-збагачувальних підприємств із впровадженням засобів диспетчерського контролю та візуального відображення параметрів процесу.

Для реалізації поставленої мети необхідно виконати комплекс взаємопов’язаних досліджень і проєктних робіт. Насамперед слід провести аналіз особливостей технологічного процесу подачі та дозування компонентів шихти. На основі отриманих результатів потрібно сформувати технічні вимоги до автоматизованої системи керування технологічним процесом. Подальшим етапом є вибір раціональної структури системи керування дозаторами та визначення показників, за якими оцінюватиметься якість її функціонування. Важливим

завданням також є дослідження роботи окремих складових системи та її поведінки в цілому, виконання параметричного налаштування регуляторів для забезпечення необхідних показників точності та стійкості. Завершальним етапом передбачено комп’ютерне моделювання розробленої системи з подальшим підтвердженням відповідності її характеристик реальним умовам експлуатації.

Виконання поставлених завдань створює передумови для проєктування сучасної автоматизованої системи керування технологічним процесом, яка забезпечуватиме високу ефективність, надійність і стабільність роботи. Розроблене рішення відповідатиме основним вимогам до АСК ТП дозування складових шихти та враховуватиме особливості функціонування технологічного обладнання на гірничо-збагачувальних підприємствах.

1 Призначення та область застосування системи керування процесом дозування шихтових матеріалів

1.1 Характеристика технологічного процесу дозування шихтових матеріалів

Завдання агломераційного виробництва полягає у підготовці матеріалів для подальшого використання в доменних печах. Для цього застосовують шихту, до складу якої входять залізорудний концентрат, аглоруда, різноманітні залізовмісні відходи агломераційного та металургійного виробництва. Отримання якісного агломерату забезпечується шляхом термічного спікання підготовленої суміші з додаванням необхідної кількості вапняку та використанням твердого і газового палива як джерел теплової енергії.

На більшості металургійних комбінатів агломераційний цех включає дві аглофабрики, які розміщуються симетрично відносно шихтового відділення. Організація виробничого процесу передбачає безперервний режим роботи технологічного персоналу, при якому зміни тривають по 12 годин, що дозволяє підтримувати стабільність технологічних операцій і безперервність випуску продукції.

Найважливішими операціями технологічної схеми (рис.1.1, 1.2) є [1, 2]:

– підготовка компонентів шихти;

– дозування компонентів шихти;

– усереднення і оґрудкування шихти;

– підігрів шихти;

– виділення постелі і система завантаження на агломераційні машини;

– дроблення агломерату та виділення повернення;

– відсмоктування і очищення відхідних газів.

Сировинні матеріали, призначені для виготовлення агломерату, доставляються до виробничого підрозділу залізничним транспортом та після прибуття розвантажуються на спеціалізованих складських майданчиках, розміщених у II та III районах підприємства. На цих складах формується

резервний запас компонентів шихти, що дає змогу забезпечити безперервність технологічного процесу та стабільність роботи агломераційного виробництва.

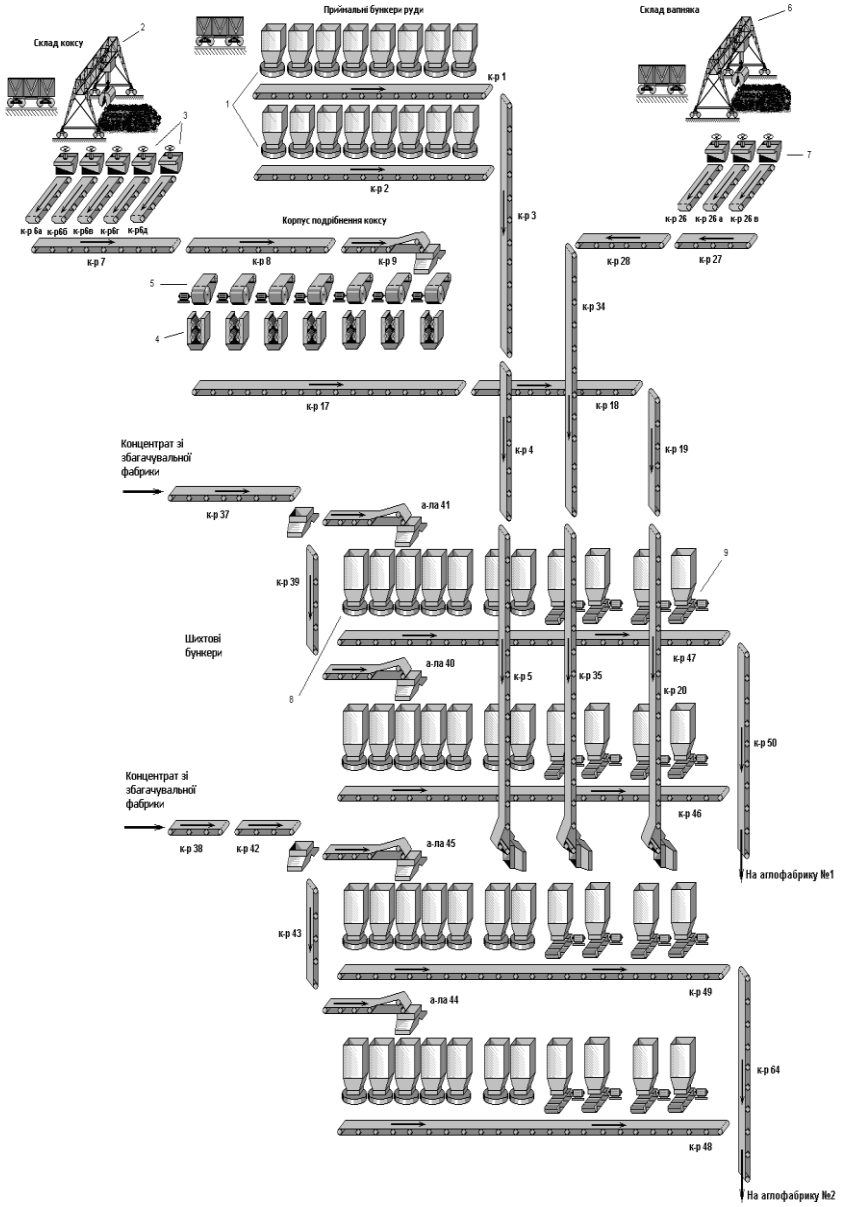


Рисунок 1.1 – Структурна схема шихтового відділення агломераційного виробництва, що використовується на гірничо-збагачувальних підприємствах.

Для подачі аглоруди до складу шихтових матеріалів проєктом агломераційної фабрики передбачено встановлення шістнадцяти приймальних бункерів 1 (рис. 1.1), які розташовані двома паралельними рядами [5]. Загальна місткість бункерного господарства розрахована на одночасне приймання повного

залізничного маршруту аглоруди, що обумовлює необхідність її ритмічного постачання через однакові часові інтервали.

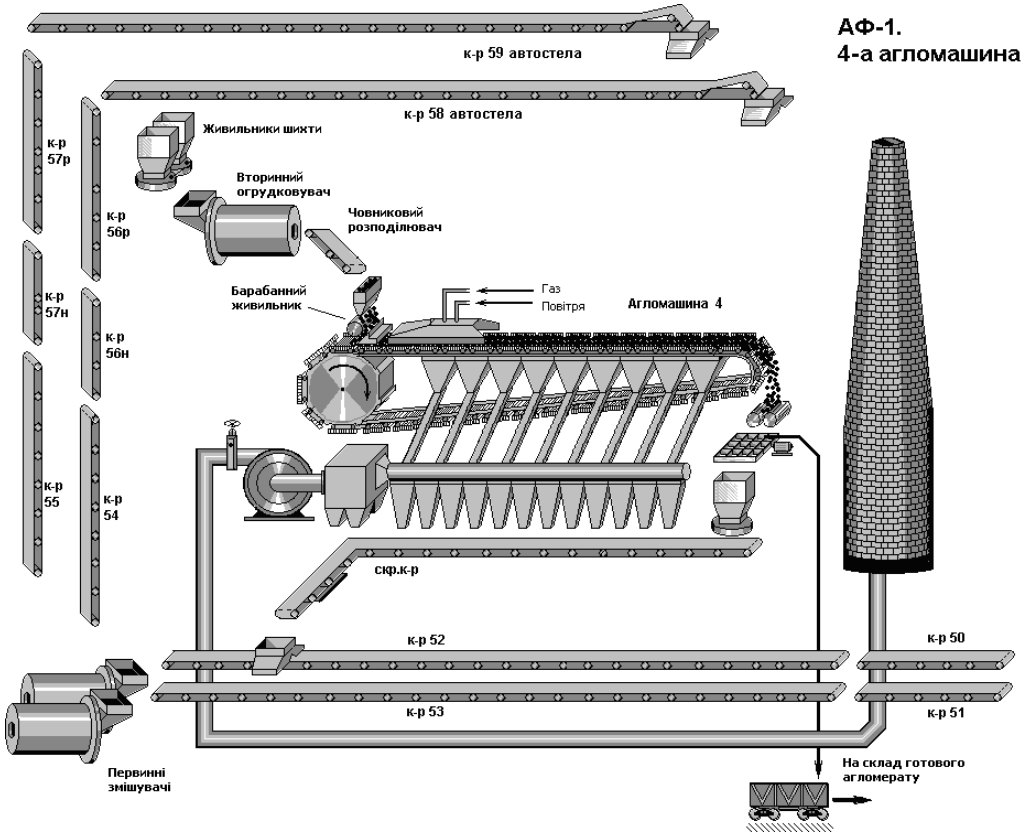


Рисунок 1.2 – Схема завантаження агломераційної машини в умовах аглофабрики

Склади для зберігання вапняку та палива мають місткість по 20 тис. т кожен і обладнані спеціальними розвантажувальними естакадами. Доставка зазначених матеріалів на підприємство здійснюється залізничним транспортом із використанням люкових піввагонів або вагонів-хоперів. На складі вапняку встановлено чотири мостові крани 6, три з яких оснащені грейферними захватами для переміщення сипких матеріалів, а ще один обладнаний вібраційним пристроєм, що забезпечує ефективне обвалення злежаного вантажу під час розвантаження вагонів.

Для обслуговування складу палива передбачено два мостові крани 2, які виконують операції з переміщення та подачі сировини. Агломераційна руда або залізовмісні відходи металургійного виробництва надходять до приймальних бункерів, після чого транспортуються конвеєрними системами до шихтових відділень для подальшої підготовки.

Вапняк і тверде паливо, до якого належать коксовий дріб’язок та антрацитовий штиб, розміщуються на проміжних складах місткістю по 20 тис. т. Така схема роботи потребує безперервного та рівномірного постачання сировинних ресурсів. Відбір вапняку і палива виконується мостовими кранами через завантажувальні воронки (живильники) 3 і 7, після чого матеріали надходять до бункерів шихтового відділення за допомогою стрічкових конвеєрів, що забезпечують стабільність технологічного процесу.

Вапняк та аглоруду вводять до складу шихтової суміші без попереднього подрібнення. Тверде паливо, представлене коксовою дрібницею та антрацитовим штибом, на складському майданчику попередньо змішують у встановленому співвідношенні, після чого направляють до дробильного відділення. У цьому підрозділі матеріал проходить стадію подрібнення в семи чотиривалкових дробарках, що забезпечують необхідну крупність палива для подальшого використання в агломераційному процесі.

Залізорудний концентрат надходить до шихтових відділень із рудозбагачувальної фабрики РЗФ-1. Для зберігання та розподілу сировини передбачено 44 бункери, які розміщені на чотирьох технологічних потоках. Кожне випалювальне відділення забезпечується матеріалами через два потоки. У межах одного потоку для концентрату використовують п’ять бункерів, а для аглоруди, вапняку та палива передбачено по два бункери на кожен компонент. Для запобігання зависанню матеріалів та забезпечення їх стабільного сходження бункери обладнані вібраторами типу ІВ-107-380. Завантаження здійснюється автоматизовано, що сприяє підтриманню сталого складу шихти.

Подача концентрату та аглоруди виконується за допомогою тарілчастих живильників, тоді як вапняк і тверде паливо дозуються стрічковими пристроями в автоматичному режимі. Головною метою цього етапу є формування шихти з оптимальними характеристиками для отримання агломерату необхідної якості та стабільного хімічного складу. Контроль точності подачі компонентів забезпечується сучасними ваговимірювальними системами, які дозволяють своєчасно коригувати процес.

Сумарна кількість шихти повинна відповідати реальній продуктивності агломераційних машин. Відхилення від установлених значень у бік збільшення або зменшення подачі негативно впливає на перебіг процесу спікання та може призвести до погіршення якості готового агломерату.

Кожна агломераційна фабрика оснащена п’ятьма однотипними агломашинами К-1-75, початкова площа спікання яких становила 75 м². У процесі модернізації та тривалої експлуатації цей показник було збільшено до 88,2 м². Із загальної площі 84 м² безпосередньо використовується для спікання шихтового матеріалу, тоді як решта 6,2 м² призначена для додаткового зміцнення готового агломерату. Для транспортування шихти на фабриках передбачено два незалежні маршрути – парний та непарний, при цьому в більшості випадків експлуатація здійснюється лише по одному з них.

Із шихтового відділення матеріал за допомогою конвеєрного транспорту подається на наступні технологічні лінії, де до нього додається повернення, отримане після грохочення подрібненого агломерату. Технологія роботи агломераційного виробництва передбачає використання гарячого повернення під час підготовки шихти, що сприяє прискоренню процесу спікання та покращенню його ефективності. Особливістю даного етапу є висока температура повернення, яка досягає 500-600°С. У разі контакту розігрітого матеріалу з гумовою поверхнею конвеєрної стрічки виникає небезпека її займання. Для запобігання таким ситуаціям на стрічці постійно підтримується захисний шар шихти, а контроль за процесом забезпечується автоматизованими системами та персоналом відповідної кваліфікації. Після введення повернення шихта надходить до барабанного змішувача первинної підготовки. На цій стадії відбувається інтенсивне перемішування компонентів, рівномірний розподіл теплової енергії гарячого повернення та часткове зволоження суміші. Подача води для зволоження регулюється оператором відповідно до візуальної оцінки стану шихти з метою досягнення її необхідних технологічних властивостей.

Автостели забезпечують рівномірне подавання шихти до всіх бункерів, при цьому обсяг завантаження повинен узгоджуватися з виробничою потужністю

агломераційних машин. Для підтримання стабільної роботи обладнання протягом зміни необхідно періодично очищувати внутрішні поверхні бункерів від нашарувань матеріалу із застосуванням системи пневматичного обвалення. Після цього шихта надходить до барабанних змішувачів вторинної підготовки, де завершується процес її зволоження та грануляції. Вода подається у вигляді дрібнодисперсного розпилення, що сприяє рівномірному розподілу вологи по всьому об’єму суміші. Контроль вологості здійснюється у напівавтоматичному режимі з ручним коригуванням залежно від властивостей компонентів. У разі зменшення розміру частинок матеріалу вологість доцільно підвищувати, тоді як для більш крупних фракцій її слід знижувати. Відхилення від оптимального рівня зволоження негативно впливає на проникність шару для газів, порушує тепловий режим спікання та призводить до зменшення продуктивності агломераційного обладнання.

Із грануляторів шихта за допомогою човникових розподільників подається безпосередньо на агломашини. Під час переміщення транспортними магістралями значної довжини відбувається поступове охолодження матеріалу: на вході до гранулятора його температура зазвичай становить 64-70 °С, тоді як на агломераційну стрічку суміш надходить уже з температурою близько 53-55 °С.

Спікання підготовленої сировинної суміші є ключовою стадією виробництва агломерату. Цей процес відбувається на колосникових решітках агломераційної установки за умови проходження повітря крізь шар шихти. Необхідний тепловий режим формується внаслідок згоряння вуглецевмісного палива та використання теплової енергії, що накопичується у верхніх шарах матеріалу й частково повертається до процесу.

Початковий нагрів шихти забезпечується газовим запалювальним пристроєм, обладнаним пальниками торцевого типу. Для створення необхідної температури застосовується паливна суміш, до складу якої входять доменний, коксовий і природний гази із теплотворною здатністю близько 3000 ккал/м³. У зоні займання температура продуктів згоряння над поверхнею матеріалу повинна

підтримуватися в межах від 1050 до 1200 °С, що гарантує стабільний початок процесу спікання.

Підтримання горіння палива всередині шару досягається завдяки проходженню атмосферного повітря, яке подається ексгаустерами у кількості п’яти одиниць. Для видалення технологічних газів використовуються потужні димососи з початковою продуктивністю 6500 м³/хв. Після модернізації агломераційного обладнання та збільшення площі спікання їх продуктивність було підвищено до 7500 м³/хв шляхом зміни конструктивних параметрів робочого колеса, зокрема кількості лопаток і кута їх встановлення [4]. При цьому основні габаритні розміри агрегату не зазнали змін, тоді як потужність привідного електродвигуна зросла з 2000 до 2500 кВт.

Продукти, що утворюються в процесі спалювання палива, надходять до колекторів, де здійснюється очищення технологічного газу від механічних домішок. Великі частинки осідають у пилозбірних бункерах, тоді як дрібнодисперсний пил затримується батарейним циклоном, який включає 486 окремих елементів. Видалення пилу з пилових мішків виконується безперервно через водяний затвор скребкового транспортера або, на двох агломераційних машинах фабрики №1, періодично подається на пиловий конвеєр. Для батарейних циклонів передбачена система постійного гідравлічного змиву, що забезпечує ефективне відведення накопиченого пилу. Утворені шлами після газоочищення транспортуються на спеціальні шламонакопичувачі, де проходять зневоднення та подальшу утилізацію.

Повторне використання шламів забезпечується шляхом їх введення до складу аглорудної суміші на території III району агломераційного складу. Перемішування здійснюється рудними перевантажувачами, після чого підготовлена суміш подається до приймальних бункерів аглоруди та дозується у шихту за допомогою тарілчастих живильників, що дозволяє раціонально використовувати вторинні матеріальні ресурси.

Вивантаження готового агломерату відбувається під час переходу випалювальних візків із робочої частини траси на зворотну гілку. Спечений

агломераційний пиріг надходить на двовалкові дробарки, де проходить первинне подрібнення. Після цього матеріал розсіюється на стаціонарних грохотах для розподілу за гранулометричним складом. Фракція розміром 0-5 мм повертається через спеціальний бункер до складу шихти, тоді як кондиційний агломерат завантажується у хоперні вертушки. Після проведення відбору проб для лабораторного контролю хімічного складу готовий продукт транспортується на склад агломерату для подальшого зберігання та використання.

Агломерат із завантажувальних бункерів надходить до приймальної траншеї складу готової продукції, який налічує 36 комірок. Із траншеї матеріал за допомогою грейферних кранів переміщується до відвантажувальних бункерів і далі направляється споживачам. За відсутності вільного рухомого складу або при необхідності забезпечення доменного виробництва додатково охолодженим агломератом допускається його розміщення на відкритому майданчику готової продукції.

Проєктна продуктивність агломераційного цеху становить 5250 тис. т агломерату на рік з основністю 0,44 одиниці модуля. Водночас затверджений виробничий показник складає 5 млн т готової продукції на рік за умови експлуатації десяти агломашин.

Характеристика сировини:

Концентрат є продуктом мокрого магнітного збагачення залізистих кварцитів, що виробляється на РЗФ-1 ПАТ «Південний ГЗК». Вміст заліза в ньому становить 65,2 ± 0,5 %, а масова частка вологи досягає 11,0 ± 0,3 %. Розрахункова витрата цього компонента в шихті складає 740,0 кг на 1 т агломерату.

Аглоруда надходить із ПАТ «Суха Балка» та використовується як один із основних компонентів агломераційної шихти. Масова частка заліза в ній перебуває в межах 57,0 ± 3,0 %, а вміст діоксиду кремнію не перевищує 20,1 % для руди шахти ім. Фрунзе та 23,0 % для шахти «Ювілейна». Вологість матеріалу підтримується на рівні не більше 5,0 %, а планова витрата становить 221,51 кг на тонну готового агломерату.

Вапняк, який використовується у виробництві агломерату, надходить із родовищ АТ «Крим», розташованих у районах Євпаторії, Сак та Золотої Балки. До якості цієї сировини висуваються певні вимоги: вміст оксиду кальцію повинен становити щонайменше 52,0 %, тоді як частка діоксиду кремнію не має перевищувати 3,0 %. Розрахункова норма споживання вапняку складає 265,53 кг на одну тонну готового агломерату.

Як тверде паливо для агломераційного процесу застосовується коксовий дріб’язок, що постачається з родовищ Донецького басейну. Для нього встановлено обмеження щодо вмісту зольних домішок не більше 18,0 % та вологості до 24,0 %. Середня витрата такого палива становить 52,0 кг у натуральному вираженні на тонну агломерату. Крім того, до паливної шихти вводиться антрацитовий штиб марок АШ Донецького басейну та АШС виробництва «Сибантрацит». Цей матеріал характеризується вмістом золи до 18,0 %, вологи не більше 9,0 % і масовою часткою сірки до 2,0 %. Його нормативне споживання складає 38,0 кг на тонну виробленого агломерату.

1.2 Характеристика існуючої АСК ТП відділення підготовки шихти

1.2.1 Призначення, характеристика комплексу завдань та функції АСК ТП відділення підготовки шихти

У технологічному маршруті, що охоплює шлях сировини від кар’єру до агломераційної установки, важливе місце займає відділення підготовки шихтових матеріалів (ВПШ), оскільки саме на цьому етапі значною мірою формується якість готового агломерату [1, 2, 5].

Подібно до інших безперервних виробничих процесів, система керування підготовкою шихти повинна забезпечувати виконання двох ключових функцій: підтримання необхідних показників якості продукції та зниження витрат сировини й енергетичних ресурсів на одиницю випуску.

На практиці досягнення зазначених цілей є складним завданням, оскільки між ними існує певна суперечність.

Показники якості шихтових матеріалів регламентуються державними стандартами, технічними умовами та іншими нормативними вимогами, які встановлюють характеристики продукції гірничо-збагачувальних підприємств, що постачається споживачам.

Для дотримання встановлених нормативів на дільниці підготовки шихти необхідно використовувати ефективну систему автоматизованого керування, здатну забезпечувати стабільність технологічних параметрів і сприяти підвищенню металургійної цінності агломерату [10].

Реалізація сучасної автоматизованої системи керування технологічними процесами на дільниці підготовки шихтових матеріалів сприяє підвищенню ефективності виробничого процесу як за кількісними показниками, так і за рівнем якості готової продукції. Це досягається завдяки впровадженню комплексу функцій, спрямованих на вдосконалення контролю та управління технологічними операціями:

– мінімізація впливу людського чинника під час виконання операцій автоматизованого регулювання та моніторингу технологічних параметрів;

– покращення інформаційного забезпечення працівників, які здійснюють оперативне керування виробничими процесами;

– посилення контролю за прийняттям і реалізацією технологічних рішень упродовж виробничого циклу.

Найвищий економічний результат від впровадження АСК ТП даної дільниці забезпечується за умови комплексного виконання зазначених функцій та їх ефективної взаємодії в межах єдиної системи управління.

На даний час у шихтовому відділенні агломераційного виробництва функціонує автоматизована система керування технологічним процесом підготовки шихтових матеріалів, створена спеціалістами ВАТ «Одесаточмаш». Подача та дозування основних складових шихти здійснюється за допомогою різних типів дозувального обладнання. Для концентрату та аглоруди застосовуються тарілчасті живильники з діаметром тарелі 2000 мм, що забезпечують продуктивність до 240 т/год. Дозування вапняку виконується

стрічковими автоматичними дозаторами безперервної дії типу 7422 ДН 100-150-3 із продуктивністю 100 т/год, тоді як для подачі твердого палива використовуються дозатори моделі 7422 ДН 100-50-3, розраховані на продуктивність 50 т/год.

Формування шихти відповідно до встановленого виробничого завдання реалізується за допомогою автоматизованої системи керування процесом підготовки шихтових матеріалів. Система являє собою програмно-технічний комплекс, призначений для координації роботи дозувального обладнання. До її складу входять п’ять промислових контролерів та операторська станція, які забезпечують керування окремою технологічною ниткою та контроль параметрів процесу в режимі реального часу.

Керування дозаторами вапняку і твердого палива здійснюється на основі сигналів, отриманих від ваговимірювальних контролерів конвеєрних ваг «Єрмак». Дані пристрої виконують безперервний контроль витрати рудної складової шихти, до якої належать концентрат та аглоруда. Підтримання необхідного співвідношення компонентів забезпечується автоматично: при зміні витрати рудної частини система коригує подачу вапняку та палива пропорційно до нових значень, що дозволяє стабілізувати якість підготовленої суміші [2].

Підтримання технологічних показників у межах нормативних значень забезпечується завдяки використанню в АСК ТП спеціалізованих контурів автоматичного регулювання. Реалізація локальних систем керування дозволяє оперативно реагувати на зміни режимів роботи обладнання та забезпечувати дотримання вимог технологічного регламенту під час підготовки шихти.

1.2.2 Структура технічних засобів АСК ТП підготовки шихти

Структурну організацію комплексу технічних засобів автоматизованої системи керування технологічним процесом дільниці підготовки шихтових матеріалів представлено на рис. 1.3. Наведена схема відображає взаємозв’язки

між основними елементами системи та забезпечує наочне уявлення про їхню взаємодію в процесі керування виробництвом.

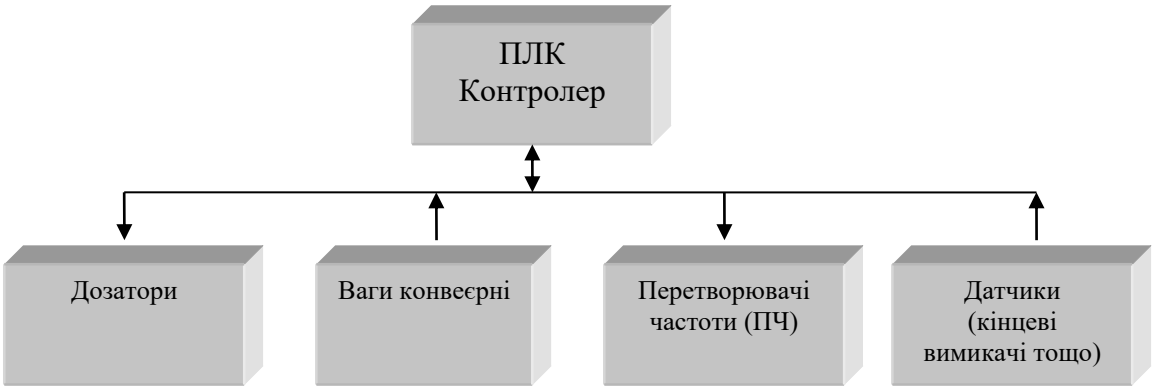


Рисунок 1.3 – Структурна схема комплексу технічних засобів АСК ТП дільниці підготовки шихти

Реалізація задачі оперативного керування технологічним процесом, технологічним устаткуванням та всією системою загалом, а також виконання ручного налаштування параметрів процесу здійснюється в інтерактивному режимі взаємодії між оператором і системою. Для цього використовується панель оператора дільниці підготовки шихти, виконана у вигляді кольорового графічного термінала, що забезпечує відображення поточної інформації та введення керуючих команд.

Функціонування системи забезпечують два контролери автоматизованої системи керування технологічним процесом, на які покладено виконання основних операцій з моніторингу, обробки технологічних даних і формування керуючих впливів відповідно до встановлених алгоритмів роботи.

2. Огляд існуючих рішень та обґрунтування прийнятого принципу побудови системи керування процесом дозування шихтових матеріалів

2.1 Аналіз існуючих структур систем керування процесом дозування шихтових матеріалів

Структурна побудова систем керування дозаторами визначається особливостями технологічного процесу, типом застосованого обладнання, фізико-механічними характеристиками сировини та вимогами до точності дозування. Подача компонентів шихти може виконуватися окремими дозувальними пристроями, які функціонують незалежно один від одного. Необхідне співвідношення між потоками матеріалів у такому випадку досягається шляхом встановлення відповідних значень продуктивності для кожного дозатора. У промисловій практиці також широко застосовуються схеми, у яких робота окремих дозаторів взаємопов’язана між собою [2].

Індивідуальний дозатор (рис.2.1) являє собою одноконтурну систему автоматичного регулювання, основним призначенням якої є підтримання сталої витрати матеріалу, що надходить із бункера. Керування продуктивністю Q електровібраційного живильника здійснюється регулятором P, до складу якого входять підсилювальні та перетворювальні елементи. Система оснащена контуром зворотного зв’язку, що включає ваговимірювальний пристрій ВВ і датчик маси, які забезпечують контроль фактичної подачі матеріалу. Встановлення необхідного значення продуктивності $Q_з$ виконується за допомогою задатчика Зд, функції якого може реалізовувати програмований логічний контролер.

Груповий дозатор (рис.2.2) також належить до одноконтурних автоматичних систем регулювання та використовується для забезпечення стабільної подачі однорідного матеріалу з кількох бункерів на спільний транспортний конвеєр. Сумарна продуктивність системи $Q_{заг}$ визначається за допомогою конвеєрного ваговимірювача ВВ і автоматично підтримується на рівні

заданого значення $Q_з$. Для цього регулятор Р одночасно впливає на кілька виконавчих механізмів, зокрема на шиберні заслінки тарілчастих живильників ТЖ1–ТЖ3, забезпечуючи рівномірну та узгоджену подачу матеріалу.

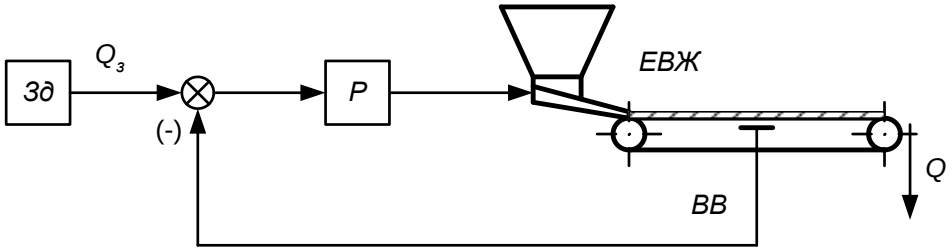


Рисунок 2.1 – Структурна схема системи автоматичного дозування з індивідуальним дозатором

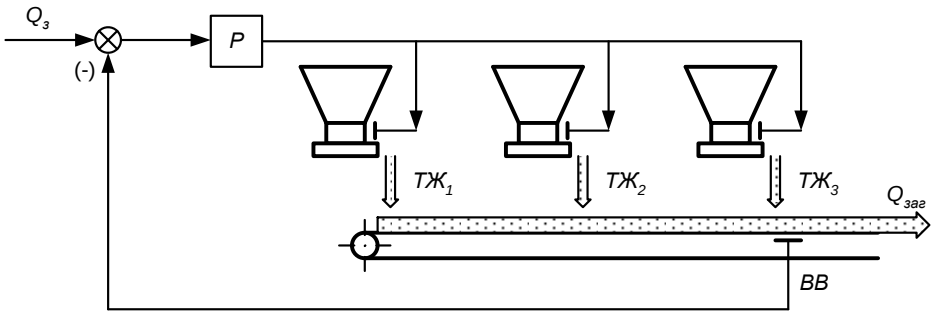


Рисунок 2.2 – Структурна схема системи автоматичного дозування з груповим дозатором

Послідовна схема підключення дозаторів (рис.2.3) застосовується для забезпечення незмінного співвідношення між витратами компонентів у процесі дозування. У такій системі дозатор Да виконує функцію ведучого пристрою та підтримує витрату основного компонента Q_a на рівні, що відповідає встановленому значенню $Q_{а.з}$. Робота веденого дозатора Дб залежить від параметрів ведучого дозатора, оскільки його необхідна продуктивність визначається автоматично. Для цього використовується елемент множення ЕМ, який формує сигнал завдання шляхом множення поточної витрати Q_a на наперед заданий коефіцієнт співвідношення $К_{ба.з}$. Такий підхід дає змогу підтримувати необхідний склад суміші та підвищує точність дозування компонентів.

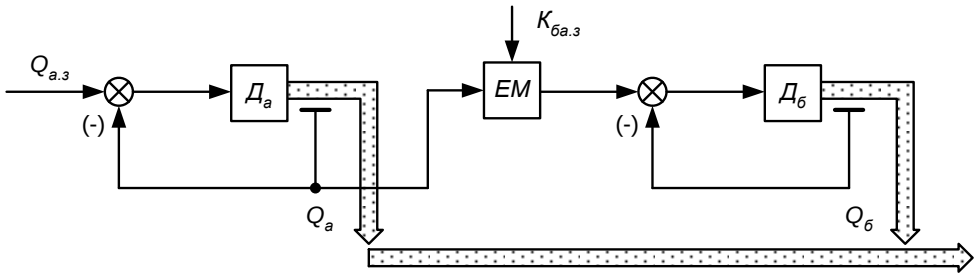


Рисунок 2.3 – Структурна схема системи автоматичного дозування з послідовним з’єднанням дозаторів

Паралельне підключення дозувальних пристроїв (рис.2.4) застосовується для підтримання сталого співвідношення між витратами компонентів суміші та витратою основного, або ведучого, компоненту. За такої схеми роботи дозатори Дб і Дд забезпечують подачу кожного матеріалу відповідно до наперед встановлених коефіцієнтів співвідношення ($К_{ба.з}$, $К_{да.з}$) відносно витрати ведучого потоку $Q_а$. Крім цього, підтримується визначене значення коефіцієнта $К_{дб}$, що характеризує залежність між продуктивностями $Q_д$ та $Q_б$ обох паралельно працюючих дозаторів. Водночас внутрішні збурення, які виникають у роботі одного дозатора, не компенсуються іншим, тому вплив таких факторів залишається локальним і не призводить до взаємного коригування їх роботи.

Якщо до складу дозатора Дб входить вимірювальний пристрій, призначений для контролю сумарної витрати компонентів $Q_{заг}$ (рис.2.5), то значення витрати $Q_б$ визначається непрямим методом. Для цього використовують різницю сигналів, отриманих від двох вагових вимірювачів, що дає змогу розрахувати необхідний параметр з достатньою точністю

$$Q_б = Q_{заг} - Q_а .$$

Витрати компонентів $Q_а$ та $Q_б$ підтримуються на заданому рівні окремими дозувальними пристроями, які функціонують автономно один від одного. Тому в усталеному режимі така система характеризується відсутністю взаємного впливу між каналами регулювання. Проте під час перехідних процесів зміни витрати $Q_а$ можуть спричиняти тимчасові відхилення значень $Q_б$, що свідчить про наявність динамічного зв’язку між ними. У результаті показники точності та швидкодії регулювання в даній системі поступаються характеристикам повністю незалежної

структури, де для кожного компонента використовується окремий дозатор без взаємного впливу.

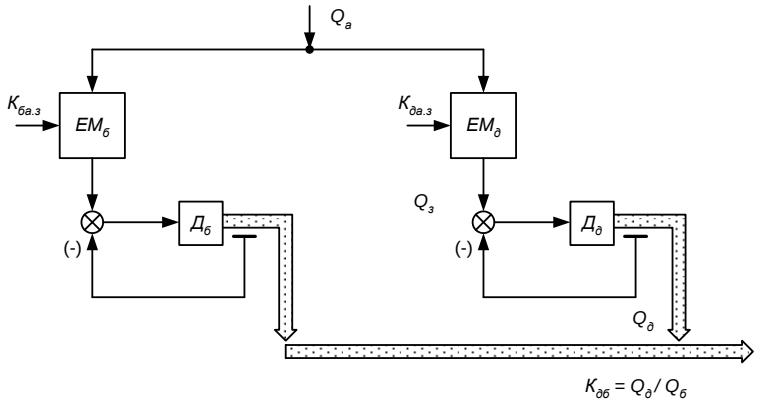


Рисунок 2.4 – Структурна схема системи автоматичного дозування з паралельним з’єднанням дозаторів

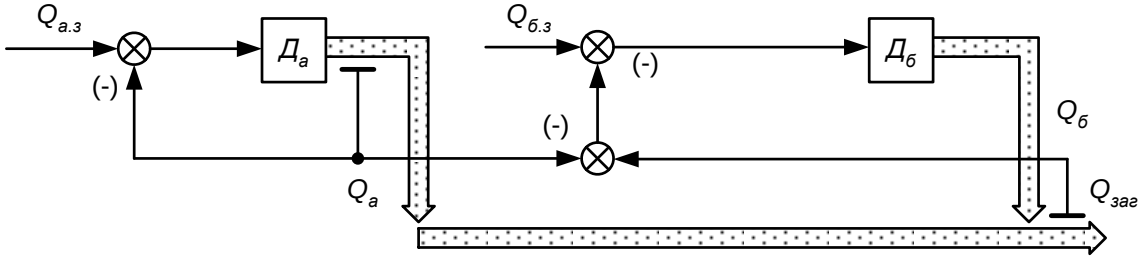
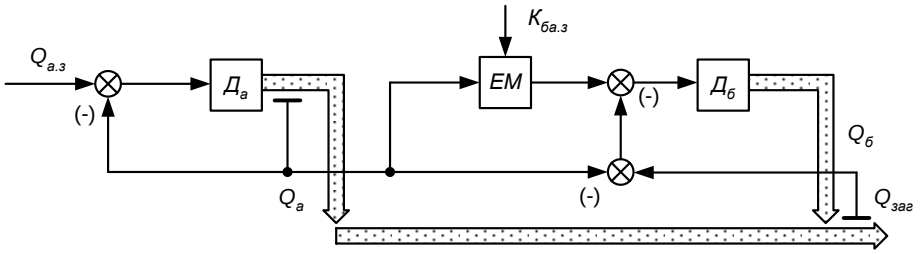


Рисунок 2.5 – Структурна схема системи автоматичного дозування з вимірювачем сумарної витрати компонентів

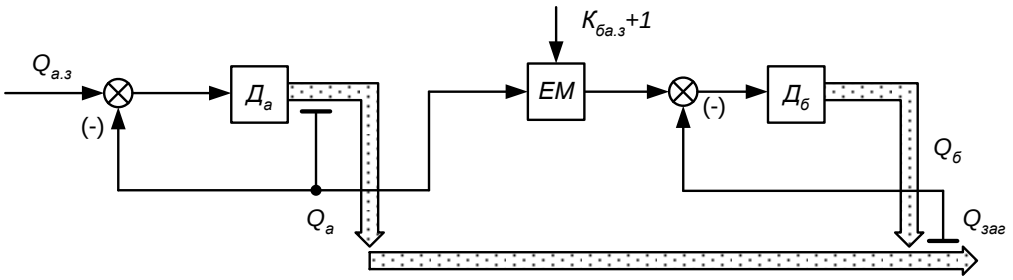
Сумарна продуктивність компонентів $Q_{заг}$ визначається за допомогою вагового вимірювача, встановленого на веденому дозаторі Дб. У схемі, поданій на рис.2.6, а, саме ведений дозатор забезпечує підтримання загальної витрати матеріалів $Q_{заг}$ відповідно до заданого співвідношення $K_{ба.з}$+1 відносно витрати основного компонента $Q_а$. У варіанті, наведеному на рису.2.6, б, фактичне значення витрати веденого компонента $Q_б$ отримують шляхом визначення різниці між сумарною витратою $Q_{заг}$ та витратою ведучого компонента $Q_а$. Формування керуючого сигналу для дозатора Дб здійснюється множенням значення $Q_а$ на встановлений коефіцієнт співвідношення $K_{ба.з}$.

Розглянута система належить до зв’язаних структур автоматичного дозування, оскільки робота дозатора Дб безперервно коригується залежно від зміни продуктивності дозатора Да. Такий принцип забезпечує підтримання необхідної пропорції між компонентами суміші, проте порівняно зі схемами, що

базуються на послідовному з’єднанні окремих дозаторів, характеризується менш сприятливими динамічними показниками та повільнішою реакцією на зміну режимів роботи.



а)



б)

Рисунок 2.6 – Структурні схеми автоматизованих систем дозування з послідовним розташуванням дозувальних пристроїв та засобом контролю загальної витрати компонентів суміші.

З позиції конструктивної побудови окремих дозувальних пристроїв важливим чинником покращення точності регулювання є мінімізація часових затримок у роботі системи. Зовнішні збурення зазвичай проявляються як випадкові коливання продуктивності живильного обладнання, що зумовлені зміною фізико-механічних характеристик сипкого матеріалу або варіацією ефективного прохідного перерізу живильника. У системі з індивідуальним живильником величина затримки визначається тривалістю транспортування матеріалу по лотку вібраційного живильника τп і переміщення його стрічкою вагового вимірювача τв.в. Додаткові часові запізнення виникають також у контурі зворотного зв’язку дозатора, зокрема у ваговимірювальному пристрої та, за певних умов, у вторинних засобах обробки сигналів. Особливо відчутним негативний вплив затримок стає при використанні групових дозаторів, коли збурюючий вплив виникає на живильнику, що розташований на найбільшій

відстані від вагового датчика. У такій ситуації підвищення ефективності регулювання може бути досягнуте шляхом керування не сумарною витратою матеріалу, а лише тією її частиною, яка надходить із бункера, розміщеного найближче до вузла вагового контролю.

2.2 Вибір структури системи керування процесом дозування шихтових матеріалів

Аналіз особливостей процесу дозування складових шихти на агломераційній фабриці гірничо-збагачувального комбінату свідчить, що найбільш ефективним рішенням є впровадження автоматизованої системи дозування, у якій дозатори працюють за паралельною схемою взаємодії (рис. 2.7). Такий підхід забезпечує стабільність подачі матеріалів, підвищує точність формування шихти та сприяє покращенню якості готового агломерату.

Сигнал завдання щодо сумарної продуктивності шихти надходить від системи координації роботи відділення підготовки шихтових матеріалів і спікального цеху. Після цього відповідно до алгоритму визначення рецептурного складу агломераційної суміші розраховуються частки окремих компонентів (*Кк*, *Каг*, *Кв, Ккокс*). На основі отриманих значень у вузлах множення (*ЕМк, ЕМаг, ЕМв, ЕМкокс*) формуються сигнали завдання продуктивності для груп дозаторів концентрату, аглоруди, вапняку та коксової дрібниці, що забезпечує підтримання необхідного співвідношення компонентів у шихті.

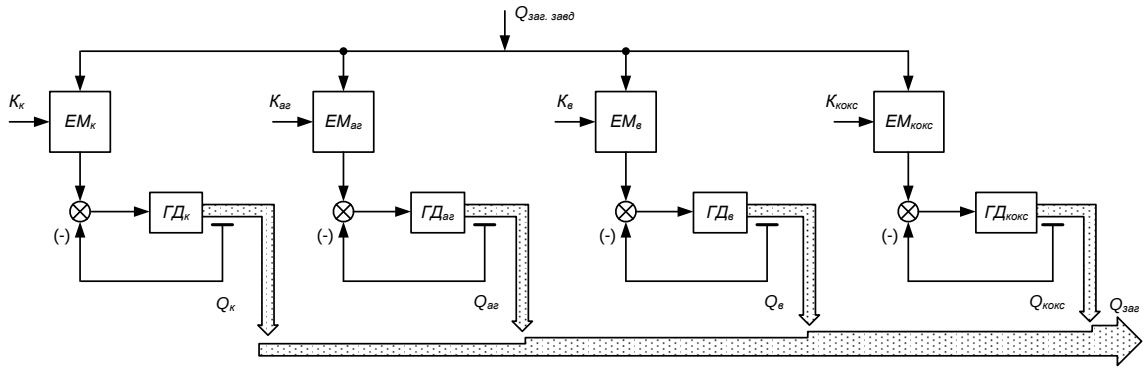


Рисунок 2.7 – Структурна схема системи автоматичного дозування компонентів шихти:

ГДк, ГДаг, ГДв і ГДкокс являють собою групові дозувальні пристрої, призначені відповідно для подачі концентрату, аглоруди, вапняку та коксу. Позначення ЕМк, ЕМаг, ЕМв і ЕМкокс використовуються для елементів множення, за допомогою яких визначають необхідні значення витрат зазначених компонентів. Параметр *Q*заг.завд характеризує встановлену продуктивність комплексу дозування шихтових складових. Коефіцієнти $K_к$, $K_{аг}$, $K_в$ і $K_{кокс}$ відображають частку концентрату, аглоруди, вапняку та коксу в складі агломераційної суміші. Величина $Q_{заг}$ визначає реальну продуктивність системи в процесі роботи, а параметри $Q_к$, $Q_{аг}$, $Q_в$ і $Q_{кокс}$ відповідають фактичним витратам окремих компонентів шихти.

Для подачі концентрату доцільно застосовувати груповий дозувальний вузол (рис.2.2), до складу якого входять п’ять дискових живильників, установлених під відповідними бункерами з матеріалом. Потік сировини від кожного живильника надходить на спільний збірний конвеєр, що забезпечує транспортування компонентів до наступних технологічних етапів. Контроль сумарної продуктивності такого дозатора рекомендується виконувати за допомогою конвеєрних ваг. Керування подачею матеріалу здійснюється шляхом зміни швидкості обертання дисків живильників. Для реалізації цього рішення в проєкті передбачається використання частотних перетворювачів і мікропроцесорної системи автоматичного керування, побудованої на основі програмованого логічного контролера, що дозволяє підвищити точність дозування та стабільність роботи обладнання.

Для подачі аглоруди доцільно застосувати груповий живильник, до складу якого входять два стрічкові живильники типу ДНЛ-1, що забезпечують вивантаження матеріалу з двох бункерів. Контроль кількості поданої аглоруди здійснюється за допомогою конвеєрного вагового вимірювача, після якого сировина надходить на стрічку збірного конвеєра. Необхідна продуктивність підтримується шляхом регулювання швидкості переміщення стрічки живильника, що дозволяє забезпечити стабільність технологічного процесу.

Для подавання вапняку доцільно передбачити використання групового дозатора, який складається з двох стрічкових дозаторів типу 7422 ДН 100-150-3, з'єднаних із двома бункерами зберігання матеріалу. Кожен дозатор обладнаний окремою системою автоматичного керування, до складу якої входять програмований логічний контролер та власний ваговий вимірювальний пристрій. Завдяки реалізації контуру зворотного зв’язку забезпечується безперервний контроль і коригування подачі вапняку. Зміна витрати матеріалу виконується шляхом регулювання швидкості руху стрічки конвеєра.

Для дозування коксової дрібниці доцільно використовувати груповий дозатор, що включає два стрічкові дозатори моделі 7422 ДН 100-50-3, які здійснюють розвантаження двох бункерів. Кожний із дозаторів оснащений автономною системою керування продуктивністю на базі ПЛК та ваговим вимірювачем, сигнали якого використовуються для формування зворотного зв’язку. Такий підхід дає змогу підтримувати задану витрату матеріалу з високою точністю. Керування подачею коксу реалізується зміною частоти обертання електродвигуна віброприводу дозатора.

2.3 Обґрунтування необхідності модернізації системи керування процесом дозування шихтових матеріалів

У процесі аналізу роботи наявної автоматизованої системи було встановлено низку суттєвих недоліків, які негативно впливають на ефективність дозування шихтових компонентів. Насамперед спостерігається значна тривалість циклу опитування вимірювальних пристроїв, що становить близько 5-6 секунд, унаслідок чого знижується оперативність реагування на зміни технологічних параметрів. Крім того, система характеризується недостатнім рівнем надійності та не забезпечує належної працездатності в разі виникнення окремих відмов обладнання.

Додатковою проблемою є застаріла елементна база керуючих пристроїв, функціональні можливості яких обмежують досягнення необхідної точності

регулювання процесу дозування. Наявні контролери також демонструють нестабільну роботу при зміні виробничих навантажень, що призводить до коливань продуктивності дозаторів коксу та вапняку і погіршує якість керування технологічним процесом.

Окремої уваги потребує програмне забезпечення, яке використовується як на рівні операторського керування, так і на рівні безпосереднього керування обладнанням. Його функціональні можливості не повною мірою відповідають сучасним вимогам автоматизації. Крім того, автоматизована система охоплює не всі технічні засоби, задіяні у підготовці та подачі шихтових матеріалів, що обмежує можливості комплексного контролю та координації роботи технологічного комплексу.

Для розглянутої системи характерним недоліком є відсутність узгодженого керування подачею аглоруди та концентрату. У разі зміни кількості концентрату витрата аглоруди або не коригується зовсім, або змінюється без урахування фактичної подачі концентрату. У результаті співвідношення цих компонентів у рудній складовій шихти не залишається сталим, що негативно впливає на стабільність технологічного процесу та спричиняє помітні відхилення показників якості агломерату, зокрема за вмістом заліза та значенням основності.

Для забезпечення постійного складу шихти доцільно підтримувати задану масову витрату концентрату автоматичними засобами регулювання. Одночасно подачу аглоруди необхідно пов’язати з фактичною витратою концентрату, а дозування вапняку та палива здійснювати відповідно до загальної кількості рудної частини шихти. Такий підхід дозволяє підвищити точність дозування матеріалів і забезпечити більш стабільні технологічні показники.

Підтримання необхідної витрати концентрату може бути реалізоване шляхом застосування частотного керування електроприводами тарілчастих живильників, що забезпечує плавне регулювання їх продуктивності. Автоматичне узгодження подачі аглоруди з витратою концентрату доцільно виконувати за допомогою сучасних стрічкових дозаторів, обладнаних програмованими

системами керування, які дають змогу оперативно змінювати режим роботи відповідно до параметрів технологічного процесу.

Потреба у заміні тарілчастих живильників стрічковими пояснюється також необхідністю забезпечення більш стабільної подачі суміші аглоруди та агломераційних шламів. Шлами, що утворюються у процесі власного виробництва, характеризуються значним вмістом вологи, який може досягати 20%. Для їх ефективного залучення до агломераційного процесу попередньо готується залізорудна суміш із аглоруди та аглошламів, яка надалі подається до шихтового відділення. Дозування цієї суміші здійснюється через живильник руди, проте підвищена вологість і липкість матеріалу призводять до нерівномірної подачі. Використання стрічкового дозатора, що має збільшену зону розвантаження, сприяє покращенню рівномірності надходження матеріалу та підвищує стабільність технологічного процесу.

Конвеєрні ваги «Єрмак», які нині експлуатуються у шихтовому відділенні, не забезпечують потрібного рівня точності вимірювання через конструктивні особливості застосованих вагових датчиків. Від достовірності сигналів, що надходять до системи керування дозаторами, безпосередньо залежить якість підготовки шихти та характеристики готового агломерату. Для підвищення точності дозування та зменшення коливань технологічних показників доцільним є використання конвеєрних ваг Milltronics із сучасними тензометричними датчиками виробництва компанії «Siemens». Додатковою проблемою залишається нестабільна подача концентрату та руди тарілчастими живильниками, що негативно впливає на ефективність функціонування автоматизованої системи керування процесом підготовки шихти.

Очікується, що впровадження автоматизованих систем дозування забезпечить суттєве підвищення стабільності хімічного складу шихтової суміші, яка надходить на стадію спікання. Практичний досвід свідчить, що використання автоматичних стрічкових дозаторів для подачі вапняку та твердого палива з урахуванням поточного рудного навантаження сприяє значному покращенню якості готової продукції. Зокрема, після введення в експлуатацію та налаштування

дозаторів типу 7422 ДН 100-150-3 і 7422 ДН 100-50-3 частка агломерату, що не відповідає встановленим вимогам за показником основності, скоротилася з 27,5% до 7,71%, що підтверджує ефективність автоматизації процесу дозування.

Для підвищення точності підготовки шихти доцільно передбачити комплексну автоматизацію вузлів дозування основних компонентів. Регулювання подачі концентрату може здійснюватися за допомогою систем контролю та підтримання заданої витрати із застосуванням сучасних частотних перетворювачів виробництва компаній «Schneider Electric», «Mitsubishi», «Hitachi» або аналогічних виробників. Для дозування аглоруди доцільним є використання автоматичних дозаторів ДНЛ-1, що характеризуються надійністю та достатньою точністю роботи. Контроль витрати концентрату і рудної складової шихти доцільно виконувати за допомогою конвеєрних ваг із вимірювальними перетворювачами типу Milltronics компанії Siemens. Також необхідно розробити програмне забезпечення автоматизованої системи керування технологічним процесом дозування з ваговим контролем усіх компонентів шихти та виконати модернізацію шихтового відділення шляхом впровадження оновленої АСК ТП, що забезпечить підвищення точності дозування, зниження впливу людського фактора та покращення техніко-економічних показників виробництва.

Для підвищення ефективності інформаційного забезпечення технологічного комплексу та впровадження запропонованих рішень щодо управління процесом підготовки шихтових матеріалів доцільно передбачити створення автоматизованого робочого місця оператора-дозувальника. Таке АРМ забезпечить можливість віддаленого моніторингу функціонування обладнання, накопичення та архівування виробничих даних, а також налаштування контурів регулювання і вимірювальних каналів.

Функціональні можливості АРМ повинні охоплювати отримання та опрацювання інформації про перебіг технологічного процесу і технічний стан агрегатів, оцінювання режимів роботи обладнання, підтримку вибору найбільш ефективних параметрів підготовки шихти та формування керуючих дій. Система має забезпечувати наочне відображення поточного стану виробництва, передачу

інформації до диспетчерського рівня, ведення обліку витрат енергетичних і матеріальних ресурсів, а також надійне збереження даних із можливістю резервного копіювання.

Крім цього, АРМ повинно підтримувати інформаційний обмін між окремими підсистемами, автоматичне документування роботи технологічного комплексу та параметрів обладнання. Важливими функціями є виконання діагностики технічних засобів автоматизації, засобів контрольно-вимірювальної техніки, коригування параметрів ПІ- і ПІД-регуляторів, а також конфігурування та супровід інформаційних каналів системи керування.

2.4 Вимоги до системи керування процесом дозування шихтових матеріалів

Система керування повинна забезпечувати виконання наступних функцій:

1) інформаційних:

– централізований контроль технологічних параметрів;

– реєстрація історії процесу;

– контроль стану технологічного обладнання;

– обчислювальні і логічні функції інформаційного характеру;

2) керуючих:

– дистанційне і автоматичне керування технологічним процесом;

– вибір режимів керування обладнанням;

3) допоміжних:

– діагностика стану апаратних засобів самої АСК ТП;

– підвищення стійкості системи до перешкод та відмов обладнання;

– забезпечення стійкості системи до порушень зовнішнього електроживлення;

– забезпечення можливості розвитку, розширення і модифікації системи.

Вимоги до структури та функціонування системи

Для проєктування автоматизованої системи керування технологічним процесом слід враховувати, що система дозування належить до нижнього ієрархічного рівня засобів автоматизації. Водночас вона має функціонувати як складова частина загальної автоматизованої системи оперативно-диспетчерського управління підприємства, зокрема в межах агломераційного цеху.

Інформація, сформована в процесі роботи АСК ТП, повинна передаватися на вищий рівень керування через мережу Ethernet. Взаємодія між рівнями здійснюється шляхом використання стандартних SQL-запитів до бази даних MS SQL. Передавані дані мають містити узагальнені показники перебігу технологічного процесу, зокрема відомості про витрати енергетичних ресурсів, стан і тривалість роботи обладнання, параметри технологічних режимів, виробничі показники та обсяги виготовленої продукції.

Актуалізація інформації повинна виконуватися щонайменше один раз на хвилину, що забезпечує своєчасний контроль за перебігом виробництва та оперативне прийняття керуючих рішень. Остаточний перелік параметрів, які підлягають передачі та збереженню, уточнюється під час подальшого опрацювання проєктних рішень.

Автоматизована система керування підготовкою шихтової суміші є складовою чинної автоматизованої системи керування технологічними процесами агломераційного виробництва та взаємодіє з нею на рівні обміну технологічною інформацією. Для виконання розрахунків вона використовує відомості про поточний якісний склад шихти, що формується в реальному часі, що дає можливість оцінювати та прогнозувати основні показники процесу агломерації. До структури системи підготовки шихти входять засоби контролю й керування підготовкою її компонентів, транспортно-конвеєрний комплекс подачі матеріалів до агломераційних машин, підсистема моніторингу та регулювання витрат концентрату й аглоруди із застосуванням конвеєрних ваг на збірному транспортері, а також підсистема автоматизованого вагового дозування компонентів шихти, обладнана конвеєрними вагами на лініях подачі кожного матеріалу.

Таким чином, об’єктом розробки в даній бакалаврській роботі виступає автоматизована система керування процесом дозування шихтових матеріалів, до складу якої належать підсистеми контролю витрат сировини та автоматичного вагового дозування компонентів шихтової суміші.

Автоматизована система керування технологічним процесом дозування шихтових компонентів має будуватися за трирівневою ієрархічною структурою. Перший рівень включає технічні засоби вимірювання та виконавчі пристрої, призначені для контролю і регулювання параметрів технологічного процесу. Другий рівень забезпечує збір, попередню обробку, передавання та опрацювання даних, що надходять від польового обладнання. Для реалізації цих функцій доцільно використовувати програмовані логічні контролери, розміщені в локальних пунктах автоматизованого керування. Верхній рівень призначений для візуалізації технологічної інформації, її архівування, обміну даними з автоматизованими інформаційними системами підприємства та організації взаємодії оператора з обладнанням. Як технічну основу цього рівня використовують автоматизовані робочі місця операторів шихтового відділення.

Нижній рівень системи повинен забезпечувати безперервне надходження достовірних даних про стан технологічного процесу в необхідному для керування обсязі. Сигнали від первинних засобів вимірювання мають бути сумісними з обладнанням системи та передаватися у дискретному вигляді (0-24 В або 0-220 В), аналоговому форматі (4-20 мА) або через цифрові інтерфейси RS232 та RS485.

Канали передавання даних повинні характеризуватися високою завадостійкістю та бути захищеними від впливу зовнішніх чинників. Для підвищення надійності функціонування системи на критично важливих ділянках необхідно передбачити дублювання ліній зв’язку та резервування інформаційних каналів.

Середній рівень системи має виконувати функції приймання та початкового опрацювання сигналів, що надходять від технологічних агрегатів, а також забезпечувати збереження внутрішніх параметрів і заданих значень у разі зникнення електроживлення. Крім того, він повинен підтримувати накопичення та

зберігання інформації про перебіг технологічного процесу щонайменше протягом 48 годин при відсутності зв’язку з верхнім рівнем. Формування керуючих дій здійснюється відповідно до параметрів, отриманих від системи верхнього рівня. Під час роботи в автоматизованому режимі необхідно гарантувати виконання всіх технологічних блокувань, а при втраті комунікації з верхнім рівнем автоматично переводити контури регулювання на ручне керування. Також важливо забезпечити безударне перемикання між ручним та автоматичним режимами роботи в обох напрямках.

Верхній рівень системи призначений для отримання та обробки інформації від програмованих контролерів, а також для представлення оператору поточного стану технологічного процесу за допомогою мнемосхем та інших засобів візуалізації. Його функціональні можливості повинні передбачати довготривале архівування даних щодо роботи обладнання, аварійних ситуацій і дій персоналу протягом щонайменше трьох років. У разі виходу контрольованих параметрів за встановлені межі система має формувати попереджувальні та аварійні повідомлення. Важливим завданням є також організація розподілу прав доступу користувачів до окремих компонентів програмно-технічного комплексу, забезпечення інформаційної взаємодії з верхнім рівнем автоматизованої системи комбінату та підтримання єдиного часу для всіх елементів АСК ТП. Крім цього, верхній рівень повинен надавати персоналу агломераційного цеху необхідні звітні дані щодо параметрів процесу у вигляді графічних матеріалів, таблиць та інших аналітичних форм за будь-який обраний часовий проміжок із використанням архівної інформації.

Додаткові вимоги до обладнання

Для надання обслуговуючому персоналу актуальних і достовірних відомостей щодо технічного стану обладнання та перебігу технологічного процесу необхідно організувати автоматизоване робоче місце оператора. Таке рішення забезпечує оперативний контроль виробництва, своєчасне виявлення відхилень і підвищення ефективності керування технологічними операціями.

Автоматизоване робоче місце оператора шихтового відділення доцільно розмістити в диспетчерській цього підрозділу. Його склад повинен включати персональний комп’ютер у промисловому захищеному виконанні, оснащений рідкокристалічним монітором з діагоналлю 19 дюймів, а також джерело безперебійного живлення потужністю 1000 ВА для підтримання стабільної роботи комп’ютерного, мережевого та комунікаційного обладнання у разі перебоїв електропостачання.

Для реалізації функцій автоматизованого керування доцільно застосовувати програмовані логічні контролери промислового призначення. Такі пристрої мають модульну архітектуру, що дозволяє за потреби розширювати систему шляхом додавання нових модулів введення та виведення сигналів. Контролери повинні функціонувати в межах єдиної мережі нижнього рівня з використанням поширених промислових протоколів обміну даними, зокрема ProfiBus, CC-Link, Modbus та інших. Розроблення програмного забезпечення рекомендується виконувати за допомогою сучасних програмних комплексів для ПЛК із підтримкою графічних мов програмування, таких як мова релейно-контактних схем LD, що спрощує процес створення та налагодження алгоритмів керування.

Для візуалізації технологічних параметрів, архівування даних і реалізації диспетчерського контролю можуть використовуватися SCADA-системи Citect SCADA або Trace Mode, які забезпечують ефективний моніторинг та керування виробничим процесом у реальному часі.

Підсумкова інформація про функціонування системи має передаватися на рівень автоматизованої системи керування комбінатом (АСОДУ) з періодичністю один раз за хвилину. Передача даних повинна виконуватися шляхом формування SQL-запитів до бази даних MS SQL. Під час розроблення технічного проєкту необхідно визначити структуру таблиці для збереження агрегованих показників, яка буде розташована на сервері баз даних та автоматично наповнюватися актуальною інформацією в процесі експлуатації системи. Формування та відправлення відповідних запитів мають здійснюватися засобами АСК ТП дозувального комплексу.

Контроль технічного стану та перевірка працездатності системи повинні виконуватися із застосуванням програмних і апаратних інструментів, що забезпечують комплексне оцінювання функціонування програмно-технічного комплексу, а також надійності каналів обміну даними між окремими елементами системи.

Процедури діагностування та випробування мають проводитися як у процесі керування технологічним обладнанням, так і під час виконання планових сервісних робіт, коли обладнання зупинене або система тимчасово відключена від об’єкта автоматизації.

У нормальному режимі експлуатації система повинна постійно здійснювати автоматичний моніторинг стану основних і допоміжних технічних засобів, а також засобів зв’язку. Результатом такої перевірки має бути оперативне виявлення та точне визначення місця виникнення несправності, незалежно від того, чи пов’язана вона з апаратною частиною, програмним забезпеченням, вимірювальними колами або каналами передачі даних. За результатами діагностики повинні автоматично формуватися відповідні повідомлення та звіти для технологічного й обслуговуючого персоналу.

Структурна побудова АСК ТП має забезпечувати достатню гнучкість для пристосування до змін у виробничому процесі та методах опрацювання даних. Це передбачає можливість розширення функцій контролю шляхом підключення нових технологічних показників, інтеграції додаткових контурів регулювання, коригування коефіцієнтів перетворення вимірюваних параметрів, а також заміни або підключення нових засобів збору інформації без необхідності зміни електричних характеристик стандартизованих вхідних сигналів.

Технічна та функціональна організація АСК ТП повинна створювати умови для подальшого розвитку системи за рахунок збільшення кількості параметрів, що підлягають контролю, а також розширення спектра виконуваних задач. Крім того, архітектура системи має забезпечувати можливість її оновлення та адаптації до сучасних поколінь обчислювальних засобів без суттєвого ускладнення процесу модернізації.

З погляду надійності роботи та стійкості до відмов структура АСК ТП повинна гарантувати безперервний контроль технологічних об’єктів і віддалено розташованого обладнання як в автономному режимі, так і в складі єдиної автоматизованої системи. Досягнення таких вимог забезпечується комплексним використанням програмних рішень і відповідних технічних засобів, що підтримують стабільне функціонування всіх елементів системи.

3 Опис та обґрунтування обраних проектних рішень системи керування процесом дозування шихтових матеріалів

3.1 Опис структури комплексу технічних засобів АСК процесом дозування шихтових матеріалів

Для забезпечення виконання визначених раніше вимог комплекс технічних засобів автоматизованої системи керування технологічним процесом дозування компонентів шихти на агломераційній фабриці гірничо-збагачувального комбінату доцільно реалізувати за багаторівневою ієрархічною структурою, яка включатиме три взаємопов’язані рівні управління та обробки інформації.

У процесі модернізації вузла дозування пропонується замінити наявні конвеєрні ваги «Єрмак», що застосовуються для визначення загальної витрати концентрату, який надходить із п’яти бункерів, а також для контролю сумарного потоку рудної сировини, на сучасні стрічкові ваги Milltronics MSI виробництва Siemens. Використання цього обладнання дозволить підвищити точність вимірювання та надійність роботи системи. Для забезпечення коректного функціонування вагового обладнання на збірних конвеєрах шихти передбачається встановлення датчиків контролю швидкості MD-36 того ж виробника.

У складі комплектів стрічкових ваговимірювальних пристроїв ВЛ-1058 планується подальше використання диференціально-трансформаторних перетворювачів ПД-5 разом із ваговими датчиками типу Д3.000.2, які забезпечують необхідні метрологічні характеристики.

Для передачі вимірювальної інформації від первинних перетворювачів до промислових програмованих контролерів доцільно застосувати модулі перетворення аналогових сигналів 3RS1706-1FE00 компанії Siemens, що забезпечують узгодження сигналів та підвищують достовірність їх подальшої обробки.

Контроль заповнення бункерів шихтовими матеріалами передбачається здійснювати за допомогою контактних датчиків рівня ДУ вітчизняного

виробництва, які характеризуються простотою конструкції, достатньою надійністю та придатністю до експлуатації в умовах промислового виробництва.

Для реалізації плавного керування швидкістю обертання чаш дискових живильників концентрату типу ДТ-200 доцільно модернізувати систему електроприводу шляхом використання частотних перетворювачів серії Altivar 61 виробництва Schneider Electric. Таке рішення забезпечить підвищення точності регулювання технологічних параметрів і сприятиме більш стабільній роботі обладнання.

Другий рівень автоматизованої системи керування технологічним процесом дозування шихтових матеріалів пропонується побудувати на базі промислового програмованого контролера TSX Premium компанії Schneider Electric [7]. У локальних контурах керування окремими дозувальними пристроями цей контролер дозволить замінити застарілі феродинамічні пропорційно-інтегральні регулятори РФ-Ф та електронні регулятори типу РПУБ-ІІІ. Зміна продуктивності дозаторів здійснюватиметься шляхом передачі керуючого сигналу через аналогові вихідні модулі контролера на входи завдання частотних перетворювачів Altivar 61 [9], а також перетворювачів, що забезпечують роботу стрічкових дозаторів ДНЛ-1, 7422 ДН-100-150-3 і 7422 ДН-100-50-3.

Для організації інформаційного обміну з іншими автоматизованими системами агломераційного виробництва передбачається використання промислової мережі Modbus Plus. Передавання даних між контролером та верхнім рівнем автоматизованої системи планується здійснювати через мережу Ethernet, що забезпечує необхідну швидкодію та надійність зв’язку.

На верхньому рівні автоматизованої системи для реалізації функцій моніторингу, архівування технологічної інформації, діагностування обладнання, відображення параметрів процесу та підвищення ефективності керування за техніко-економічними критеріями доцільно застосувати персональні комп’ютери зі спеціалізованим програмним забезпеченням.

Для відображення значень витрати окремих компонентів безпосередньо на робочих місцях операторів пропонується використовувати програмований

вимірювальний перетворювач IPA 2000 виробництва Scaime, оснащений цифровими засобами індикації та налаштування параметрів вимірювання.

3.2 Вибір обладнання автоматизації першого рівня

Конвеєрні ваги

Конвеєрні вагові системи Milltronics MSI виробництва Siemens належать до сучасних засобів контролю маси матеріалів, що транспортуються стрічковими конвеєрами. Вони призначені для безперервного визначення кількості сипких вантажів у потоці та успішно застосовуються в різних галузях промисловості. Такі пристрої широко використовуються на гірничодобувних підприємствах, металургійних комбінатах, а також у харчовій і хімічній промисловості, де необхідний постійний контроль продуктивності транспортних ліній.

Висока точність роботи MSI досягається завдяки використанню тензометричних датчиків спеціальної прямокутної конструкції. Таке технічне рішення забезпечує оперативне сприйняття вертикальних навантажень і швидке реагування на зміну маси матеріалу на стрічці. У результаті система зберігає стабільність вимірювань навіть за нерівномірного розподілу вантажу та значних швидкостей переміщення конвеєрної стрічки.

Функціонування ваг здійснюється спільно з мікропроцесорним інтегратором Milltronics, який виконує обробку отриманих сигналів і відображає основні параметри процесу на засобах людино-машинного інтерфейсу. Оператор має можливість контролювати поточну та накопичену продуктивність, навантаження на стрічку, а також швидкість переміщення матеріалу. Вимірювання швидкості руху конвеєра реалізується за допомогою спеціального датчика, що передає відповідні дані до інтегратора для подальших розрахунків.

Монтаж вагової системи не потребує складних конструктивних змін конвеєра та виконується з використанням стандартних кріпильних елементів. Роликоопора встановлюється на динамічну балку, яка сприймає навантаження від транспортованого матеріалу. Завдяки відсутності механічних вузлів, що постійно

рухаються, експлуатаційні витрати є невеликими, а технічне обслуговування переважно обмежується періодичною перевіркою та калібруванням обладнання.

Датчики швидкості

Датчики контролю швидкості MD-36 виробництва Siemens застосовуються спільно з конвеєрними ваговими системами Milltronics для визначення параметрів руху стрічки. Пристрій монтується безпосередньо на вал привідного двигуна або обвідний ролик, що дає можливість отримувати достовірні дані про швидкість транспортування матеріалу та усувати похибки, спричинені ковзанням стрічкового полотна чи накопиченням на його поверхні сипких вантажів. Конструкція датчика забезпечує високу точність вимірювань як у режимі малих швидкостей, так і під час їх зміни в процесі роботи обладнання. Завдяки використанню імпульсного перетворювача положення вала значно знижується вплив механічних коливань і вібрацій, що дозволяє уникнути появи некоректних сигналів та підвищує надійність контролю швидкісних параметрів конвеєра.

Перетворювачі аналогових сигналів

Для передавання інформації від первинних вимірювальних перетворювачів до засобів обробки даних, зокрема промислових програмованих контролерів, а також для формування керувальних впливів на виконавчі механізми необхідно застосовувати спеціалізовані перетворювачі аналогових сигналів. У системі автоматизованого керування технологічним процесом дозування шихти доцільним є використання універсальних багатодіапазонних модулів 3RS1706-1FE00 виробництва Siemens. Ці пристрої характеризуються високою точністю перетворення, стабільністю характеристик та значною лінійністю. Крім того, вони забезпечують надійну гальванічну ізоляцію між вимірювальними засобами, програмованим логічним контролером і виконавчими елементами. Модель 3RS1706-1FE00 реалізує тристороннє гальванічне розділення між вхідними, вихідними та живильними колами. Конструктивно перетворювачі виконані у вигляді компактних модулів для монтажу на стандартну DIN-рейку шириною 35 мм. Під’єднання зовнішніх ланцюгів здійснюється через гвинтові затискачі. Для

роботи пристрою необхідне зовнішнє джерело живлення, оскільки він належить до активних перетворювачів.

Під час налаштування приладу можна обрати необхідний тип вхідного сигналу серед широкого набору діапазонів: від 0–60 мВ до 0–20 В для сигналів напруги, а також від 0–5 мА до ±20 мА для струмових сигналів. Аналогічно задається і формат вихідного сигналу, який може відповідати стандартам 0–10 В, 0–20 мА або 4–20 мА, що забезпечує сумісність із більшістю сучасних засобів автоматизації.

Для вхідних кіл передбачено опір 330 кОм при роботі з сигналами напруги та 100 Ом у разі використання струмових входів. Вихідні характеристики становлять 55 Ом для каналу з діапазоном 0–10 В і 400 Ом для струмових виходів 0–20 мА та 4–20 мА, що дозволяє забезпечити стабільну передачу сигналів у системах промислової автоматизації.

Блоки живлення

Для забезпечення електроживлення первинних електричних кіл, вимірювальних датчиків і різноманітних перетворювачів доцільно застосувати стабілізовані блоки живлення моделі 6EP1334-2AA00 серії SITOP виробництва компанії Siemens. Дані пристрої розраховані на експлуатацію в умовах промислового середовища, характеризуються високою надійністю та стабільністю вихідних параметрів.

До основних переваг цих блоків належать забезпечення високої точності підтримання вихідної напруги навіть за суттєвих змін напруги живлення та різких коливань навантаження. Важливою характеристикою також є незначна величина пульсацій на виході, що позитивно впливає на якість електроживлення споживачів. Конструкція передбачає ефективний захист від аварійних режимів роботи, зокрема перевантажень і коротких замикань у колах навантаження. Додатковою перевагою виступає електричне розділення вхідної та вихідної частин пристрою, що підвищує рівень безпеки та надійності. Відведення тепла здійснюється природним способом без застосування додаткових систем охолодження, що спрощує експлуатацію обладнання.

3.3 Вибір та обґрунтування промислового контролера та модулів введення-виведення

На підставі вимог, що висуваються до технічних засобів системи автоматизованого керування процесом дозування компонентів шихти на агломераційному виробництві, для реалізації другого рівня АСК ТП доцільно використати два програмовані логічні контролери серії TSX Premium. Таке рішення передбачає застосування окремого контролера для обслуговування двох технологічних потоків кожної аглофабрики. Вибір даної серії зумовлений її значною продуктивністю, високим рівнем безвідмовності роботи, підтримкою побудови розподілених систем введення та виведення інформації, а також можливістю використання різних мережевих конфігурацій за помірної вартості порівняно з аналогічними рішеннями інших виробників [7].

Контролери TSX Premium мають модульну конструкцію, що забезпечує гнучкість під час проєктування та модернізації системи. Вони підтримують роботу з вбудованим годинником реального часу, дозволяють збільшувати обсяг пам’яті та оснащуватися додатковими модулями зв’язку. Крім того, до їх функціональних можливостей належать аналогові канали введення та виведення даних, а також спеціалізовані лічильні входи для обробки імпульсних сигналів.

Після аналізу кількості сигналів, що надходять до системи та формуються нею, а також оцінювання технічних характеристик процесорних модулів лінійки TSX Premium, найбільш доцільним варіантом для реалізації керування процесом дозування шихтових матеріалів є використання процесорного блока TSX 57 4634M, який забезпечує необхідний рівень швидкодії та достатній резерв обчислювальних ресурсів.

Процесор TSX 57 4634M, що входить до складу автоматизованої системи Premium, виконує функції центрального керуючого пристрою програмованого логічного контролера. Він забезпечує координацію роботи всіх підключених модулів, серед яких пристрої дискретного та аналогового введення-виведення, засоби безпеки Preventa, а також спеціалізовані модулі для підрахунку імпульсів,

керування приводами, вагових вимірювань і організації обміну даними. Кожен процесор оснащений:

– вбудованою оперативною пам’яттю RAM із захистом даних, призначеною для зберігання програмного забезпечення та користувацьких застосунків, обсяг якої може бути збільшений шляхом встановлення карти пам’яті стандарту PCMCIA;

– інтерфейсом термінального зв’язку, що забезпечує підключення засобів програмування, операторських панелей та інших пристроїв людино-машинної взаємодії;

– підтримкою додаткових комунікаційних можливостей завдяки використанню PCMCIA-модулів, які дозволяють працювати з промисловими протоколами Modbus Plus, Uni-Telway, AS-i та CANopen для інтеграції контролера в розподілені системи керування.

Процесор TSX 57 4634M входить до складу серії Premium і належить до модулів подвійної ширини, що потребують двох посадкових місць у шасі контролера. Пристрій оснащений вбудованим мережевим інтерфейсом Ethernet TCP/IP стандарту 100Base-TX, який забезпечує обмін даними з іншими програмованими логічними контролерами, промисловими комп’ютерами та автоматизованими робочими місцями операторів через локальну мережу. Завдяки цьому підвищується ефективність інтеграції обладнання в єдину систему керування технологічними процесами.

Створення та налагодження програмного забезпечення для контролера виконується в програмному середовищі Unity Pro, яке функціонує під керуванням операційних систем Windows. Дане середовище підтримує використання п’яти стандартних мов програмування, визначених міжнародним стандартом IEC 61131-3, зокрема LD, ST, IL, FBD та SFC. Крім того, система дозволяє реалізовувати багатозадачний режим роботи із застосуванням основних, швидкодіючих і подієвих задач, а також вносити зміни до програм без зупинки контролера, що є важливою перевагою під час експлуатації автоматизованих виробничих систем.

На підставі проведеного аналізу параметрів процесорного модуля контролера Premium можна стверджувати, що його технічні можливості повністю задовольняють вимоги системи щодо продуктивності обробки даних, швидкості виконання алгоритмів, доступного обсягу пам’яті та кількості підтримуваних каналів вводу-виводу. Це дає змогу застосовувати даний контролер для реалізації задач автоматизованого керування дозуванням шихтових компонентів на агломераційному виробництві гірничо-збагачувального комбінату.

Проєктом передбачено використання 144 дискретних входів для двох аглофабрик. З огляду на те, що система будується на базі двох однакових програмованих логічних контролерів, кожен з яких обслуговує окрему аглофабрику та має аналогічний склад обладнання, на один ПЛК припадає 72 дискретні вхідні сигнали. Для забезпечення необхідної кількості входів доцільно використовувати в складі кожного контролера по одному модулю TSX DEY 64D2K і TSX DEY 32D2K. Зазначені пристрої підтримують відповідно 64 та 32 гальванічно розв’язані входи постійного струму напругою 24 В із додатною логікою та оснащені роз’ємом типу HE10 для підключення зовнішніх кіл.

В автоматизованій системі керування дозуванням шихтових компонентів для двох агломераційних фабрик передбачено 44 дискретні сигнали керування. Таким чином, на кожен програмований логічний контролер припадає по 22 дискретні виходи. З огляду на це, для реалізації функцій керування доцільно застосувати модуль TSX DSY 32T2K. Даний пристрій оснащений 32 ізольованими каналами постійного струму напругою 24 В з додатною логікою та має роз’єм типу HE10. Для підвищення надійності експлуатації кожен канал обладнаний вбудованими засобами захисту від перевантажень і струмів короткого замикання, що реалізуються за допомогою теплового захисту та обмеження струму. Крім того, передбачено захист від імпульсних перенапруг і можливого переполюсування живлення. Використання схем швидкого розмагнічування забезпечує скорочення часу спрацьовування виходів до значень менше 0,5 мс, що позитивно впливає на швидкодію системи.

Для приймання та обробки аналогової інформації в системі передбачено 100 вхідних сигналів, по 50 на кожен ПЛК. З урахуванням цієї кількості доцільним є використання трьох модулів TSX AEY 1600 та одного модуля TSX AEY 800. Вказані пристрої мають відповідно 16 і 8 аналогових входів високого рівня із загальною точкою підключення. Модулі забезпечують перетворення та введення сигналів струму в діапазонах 0–20 мА або 4–20 мА, причому необхідний режим роботи для кожного каналу задається під час конфігурування системи. Це дозволяє забезпечити сумісність із широким спектром промислових датчиків та вимірювальних перетворювачів.

Дані вхідні модулі забезпечують опитування каналів надходження сигналів та накопичення отриманих значень. Крім того, вони здійснюють перетворення аналогових сигналів у цифрову форму з розрядністю 12 біт, що дає змогу передавати інформацію для подальшої обробки засобами контролера.

Окрім базових операцій збору даних, центральний процесор програмованого логічного контролера виконує додаткову обробку отриманих сигналів. Зокрема, реалізується перевірка на вихід параметрів за встановлені межі, придушення випадкових завад за допомогою фільтрації та масштабування результатів вимірювання до зручного для користувача вигляду. Завдяки цьому значення відображаються у фізичних одиницях, що спрощує їх аналіз і подальше використання в системі керування.

Для модулів TSX AEY 800 і TSX AEY 1600 передбачено виконання комплексу операцій з обробки аналогових сигналів на вході. До їх функцій належать зчитування виміряних значень, налаштування робочого діапазону, контроль виходу параметрів за допустимі межі, перевірка справності з’єднання з датчиком, а також цифрова фільтрація отриманих даних. Режим вибірки визначається під час налаштування обладнання та залежить від особливостей технологічного процесу. У стандартному режимі тривалість циклу опитування становить 32 мс і залишається сталою незалежно від числа задіяних каналів. Якщо використовується швидкий режим, контролю підлягають лише активні канали, що

дає змогу скоротити час оновлення інформації та підвищити оперативність роботи системи.

Для кожного аналогового входу може бути встановлений один із двох струмових діапазонів: від 0 до 20 мА або від 4 до 20 мА. Модуль безперервно відстежує відповідність сигналу встановленим межам і при перевищенні допустимого значення активує системний біт %I.Модуль.Канал.ERR. Допускається відхилення до 5 % від повного діапазону вимірювання. Для режиму 4–20 мА додатково реалізовано контроль цілісності кола датчика. У випадку, коли струм зменшується нижче 3,2 мА, система реєструє втрату зв’язку або несправність вимірювального перетворювача.

Для автоматизованого керування процесом дозування компонентів шихти передбачено використання 28 аналогових виходів, по 14 каналів на кожен із двох програмованих логічних контролерів. З огляду на це доцільно застосувати по два модулі TSX ASY 800 для кожного ПЛК. Кожен такий модуль оснащений вісьмома аналоговими виходами зі спільною точкою підключення та формує сигнал у межах ±10 В. Робота модулів не потребує додаткового зовнішнього джерела живлення, а коректне функціонування забезпечується за умови підключення навантаження опором не менше 2 кОм.

Для реалізації задач контролю та автоматизованого керування технологічним процесом дозування компонентів шихти передбачено використання двох ідентичних програмованих логічних контролерів серії TSX Premium. До складу кожного контролера входить процесорний модуль TSX 57 4634M подвійної ширини та дев’ять модулів введення-виведення стандартного виконання. З урахуванням встановлення джерела живлення для монтажу обладнання доцільно застосувати основне розширюване шасі TSX RKY 12EX, розраховане на дванадцять посадкових місць, а також додаткову корзину TSX RKY 4EX на чотири позиції. Взаємодія між цими елементами здійснюється через системну шину Bus X.

Шасі TSX RKY 12EX і TSX RKY 4EX належать до базових конструктивних елементів платформи Premium та забезпечують розміщення

відповідно дванадцяти і чотирьох модулів. Їх призначення полягає не лише у фіксації складових ПЛК, зокрема блока живлення, процесора, модулів дискретного й аналогового введення-виведення та спеціалізованих пристроїв, а й у створенні єдиного електричного середовища для обміну даними. Крім цього, шасі забезпечують передачу службових сигналів і розподіл живлення між усіма встановленими модулями контролера.

Аналіз енергоспоживання обраної конфігурації показав, що для живлення шасі TSX RKY 12EX, у складі якого знаходяться процесор TSX 57 4634M та вісім модулів введення-виведення, раціонально використовувати блок живлення TSX PSY 5500M. Для забезпечення роботи корзини розширення TSX RKY 4EX з одним модулем введення-виведення достатньо застосувати блок TSX PSY 2600M, параметри якого відповідають необхідному навантаженню.

4 Розрахунки та експериментальні матеріали, що підтверджують працездатність виробу

4.1 Вибір критеріїв якості роботи системи керування процесом дозування шихтових матеріалів

Якість функціонування систем керування процесом дозування визначається не лише точністю роботи дозувального обладнання та особливостями побудови системи керування, але й впливом зовнішніх збурень. У процесі експлуатації на систему діють різноманітні фактори, які можуть відрізнятися як за природою виникнення, так і за інтенсивністю впливу. Окрім короткочасних різких відхилень, що можуть виникати, наприклад, через раптове зміщення або осипання матеріалу в бункері, спостерігаються й повільні зміни параметрів процесу. До таких впливів належать коливання рівня завантаження бункера, зміна щільності сипкого матеріалу та інші чинники, що здатні впливати на стабільність дозування [3].

Статична похибка дозатора формується під впливом неточностей вимірювальних засобів і виконавчих елементів системи регулювання. Відповідно до характеристик вимірювальної частини, точність визначення маси матеріалу залежить від змін швидкості руху стрічкового транспортера, можливих відхилень довжини робочої зони внаслідок зміни точки подачі матеріалу, а також від метрологічних характеристик вагової системи. Точність контролю масової витрати значною мірою визначається якістю роботи датчиків зусилля та пристроїв вимірювання швидкості стрічки. Динамічні похибки пов’язані з особливостями перехідних процесів у контурі автоматичного регулювання та залежать від динамічних характеристик дозатора і правильності налаштування регулятора. На практиці фактична точність роботи обладнання нерідко виявляється нижчою від заявленої виробником через порушення вимог монтажу, зношення елементів конструкції або недостатній рівень технічного обслуговування.

Похибка під час контролю витрати матеріалів може набувати значних значень у випадках, коли ваговий вимірювальний пристрій використовується для

визначення сумарної витрати кількох компонентів одночасно. Якщо після кожного з двох дозаторів встановлено окремі конвеєрні ваги, то відносна помилка визначення витрати наступного компонента, за умови що його подача суттєво менша порівняно з попереднім, здатна перевищувати 25 %. Це свідчить про те, що розрахунок витрати матеріалу шляхом віднімання показів двох вагових систем забезпечує прийнятну точність лише тоді, коли подача наступного компонента істотно перевищує витрату попереднього.

Забезпечення високої точності дозування значною мірою залежить від коректного вибору діапазонів продуктивності живильників, ваговимірювальних пристроїв і параметрів регулятора. Гранична продуктивність обладнання, що входить до складу дозувальної системи, повинна перевищувати реальні максимальні витрати матеріалу не більше ніж на 15–20 %. Водночас параметри регулювання доцільно підбирати таким чином, щоб процес дозування відбувався з незначними керованими коливаннями, що сприяє стабільності роботи системи.

Ефективність функціонування дозатора оцінюють за інтегральними показниками, які відображають ступінь відхилення фактичної маси матеріалу від заданого значення або характеризують відносну похибку дозування протягом певного інтервалу часу. Для визначення якості регулювання зазвичай використовують середньоквадратичне відхилення продуктивності дозатора від встановленого значення, а також показники, що характеризують стабільність і рівномірність перебігу процесу дозування.

Ключовим показником ефективності функціонування автоматизованих систем дозування є забезпечення незмінності співвідношень між витратами компонентів, що подаються в процесі роботи. Для оцінювання точності дозування доцільно використовувати інтегральний показник якості, який враховує сукупний вплив відхилень. Водночас рівень стійкості процесу дозування визначають за величиною середньоквадратичного відхилення коефіцієнта співвідношення, що характеризує ступінь коливань параметрів у часі.

До основних критеріїв оцінки якості роботи окремих дозаторів належать:

1. Величина відхилення маси дозованого матеріалу від заданого значення

$$\Delta M_{(t_K)} = \int_0^{t_K} \Delta Q_i \cdot dt \le \Delta M_{прип}, \quad (4.1)$$

де t_K – час контролю; ΔQ_i – відхилення поточного значення витрати матеріалу від заданого значення; $\Delta M_{прип}$ – припустиме значення відхилення маси віддозованого матеріалу.

2. Відносна похибка дозування

$$\delta = \frac{M_{(t_K)} - Q_з \cdot t_K}{Q_{max} \cdot t_K} \le \delta_{прип}, \quad (4.2)$$

де $M_{(t_K)}$ – загальна маса матеріалу, яка пройшла через дозатор за час t_K (визначається зважуванням на контрольних вагах); $Q_з$ – задане значення витрати матеріалу; Q_{max} – максимальне значення витрати матеріалу.

3. Середньоквадратичне відхилення продуктивності процесу дозування

$$\sigma_{Qi} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(Q_i - Q_{сер})^2}{n} - \frac{\sum_{i=1}^{n}(Q_i - Q'_{сер})^2}{n}}, \quad (4.3)$$

де n – кількість врахованих при автоматичній реєстрації значень витрати матеріалу; Q_i – поточне значення витрати матеріалу; $Q_{сер}$ – середнє за час $t_K = n \cdot \Delta t$ значення витрати матеріалу; $Q'_{сер}$ – середнє за тривалий проміжок часу (декілька годин, діб) значення витрати матеріалу.

4. Показник нестабільності процесу дозування

$$K_н = \frac{Q'_{сер}}{Q_з} \le \frac{(Q_{сер} + 3 \cdot \sigma)}{Q_з}. \quad (4.4)$$

5. Коефіцієнт стабільності дозування

$$K_{ст} = \frac{Q_{сер} - \Delta Q}{Q_{сер} + \Delta Q}. \quad (4.5)$$

Для визначення ефективності функціонування автоматизованих систем дозування застосовують низку показників, серед яких одним із ключових є точність підтримання встановленого співвідношення між масами окремих компонентів. Цей критерій характеризується величиною відхилення фактичного

співвідношення дозованих матеріалів від значення, заданого технологічним регламентом

$$\Delta K_c = K_{c.з} - \frac{\int_0^{t_K} Q_б \cdot dt}{\int_0^{t_K} Q_а \cdot dt} \le \Delta K_{c.прип}, \qquad (4.6)$$

де $K_{c.з}$ – задане значення коефіцієнта співвідношення мас компонентів; $\Delta K_{c.прип}$ – припустиме значення відхилення коефіцієнта співвідношення віддозованих мас компонентів від заданого значення; $Q_а$, $Q_б$ – витрати першого та другого компонентів відповідно.

2. Середньоквадратичне відхилення коефіцієнту співвідношення витрат компонентів

$$\sigma_{Ki} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(K_{ci} - K'_{c.сер}\right)^2}{n} - \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(K_c - K'_{c.сер}\right)^2}{n}}, \qquad (4.7)$$

де K_{ci} – поточне значення коефіцієнта співвідношення мас; K_c – середнє за час $t_K = n \cdot \Delta t$ значення коефіцієнта співвідношення мас; $K'_{c.сер}$ – середнє за тривалий проміжок часу (декілька годин, діб) значення коефіцієнта співвідношення мас.

3. Розрахункове значення припустимої частоти зрізу амплітудно-частотної характеристики системи

$$\omega_{зр} \ge 0{,}1 \cdot \omega_{зр.ф}, \qquad (4.8)$$

де $\omega_{зр.ф}$ – частота зрізу амплітудно-частотної характеристики тракту шихтоподачі (пристроїв змішування).

Таким чином, під час аналізу ефективності автоматизованої системи дозування для характеристики точності функціонування окремого дозатора доцільно застосовувати показник середньоквадратичного відхилення його продуктивності. Водночас для комплексної оцінки роботи всієї системи автоматичного дозування найбільш інформативним критерієм є середньоквадратичне відхилення коефіцієнта співвідношення витрат дозованих

компонентів, оскільки саме цей параметр відображає стабільність підтримання заданої рецептури суміші.

4.2 Розробка систем керування дозаторами компонентів шихти

Для подачі концентрату в необхідній кількості застосовується груповий дозувальний вузол, до складу якого входять п’ять дискових живильників типу ДТ-200 з максимальною продуктивністю 240 т/год кожний. Обладнання встановлене під бункерами концентрату з інтервалом 5 м між сусідніми агрегатами. Визначення сумарної подачі матеріалу здійснюється за допомогою конвеєрних ваг Milltronics MSI виробництва компанії Siemens. Структурна схема автоматизованої системи дозування концентрату представлена на рис. 4.1. На схемі $W_{кш}(p)$ характеризує передаточну функцію контуру регулювання швидкості дискового живильника ДТ-200, $W_{дж}(p)$ описує динамічні властивості живильника при зміні продуктивності за рахунок варіювання частоти обертання чаші, $W_{кт}(p)$ відповідає передаточній функції конвеєрних ваг, а $W_{рп}(p)$ – регулятора продуктивності. Параметри $\tau 1,\ldots,\tau 4$ відображають часові затримки, що виникають під час транспортування матеріалу від відповідних бункерів до точки зважування.
У випадку зміни частоти обертання чаші дискового живильника шляхом керування швидкістю приводного електродвигуна, живлення якого здійснюється через частотний перетворювач, передаточна функція контуру автоматичного регулювання швидкості може бути подана у такому вигляді

$$W_{крш}(p)=\frac{k_{крш}}{T_м\cdot p+1}, \tag{4.9}$$

де $k_{крш}$ – коефіцієнт підсилення контуру; $T_м$ – електромеханічна стала часу електроприводу.

Коефіцієнт підсилення контуру регулювання швидкості приводного двигуна

$$k_{крш}=\frac{n_{\max}}{I_{1\max}}, \tag{4.10}$$

де n_{max} – максимальна частота обертання приводного двигуна, 720 об/хв; I_{1max} – максимальне значення сигналу завдання швидкості перетворювача частоти асинхронного двигуна приводу дискового живильника, I_{1max} = 20 мА

$$k_{крш} = \frac{12}{0{,}02} = 600 .$$

Електромагнітна стала часу приводу є одним із ключових параметрів, який характеризує швидкість протікання перехідних процесів у системі регулювання частоти обертання диска живильника. Використання сучасних частотних перетворювачів для керування асинхронним двигуном дає змогу гнучко налаштовувати динамічні характеристики електропривода відповідно до вимог технологічного процесу. Для забезпечення стабільної роботи дискового дозатора та отримання необхідної плавності зміни швидкості раціонально прийняти електромагнітну сталу часу на рівні $T_м$ = 1,4 с.

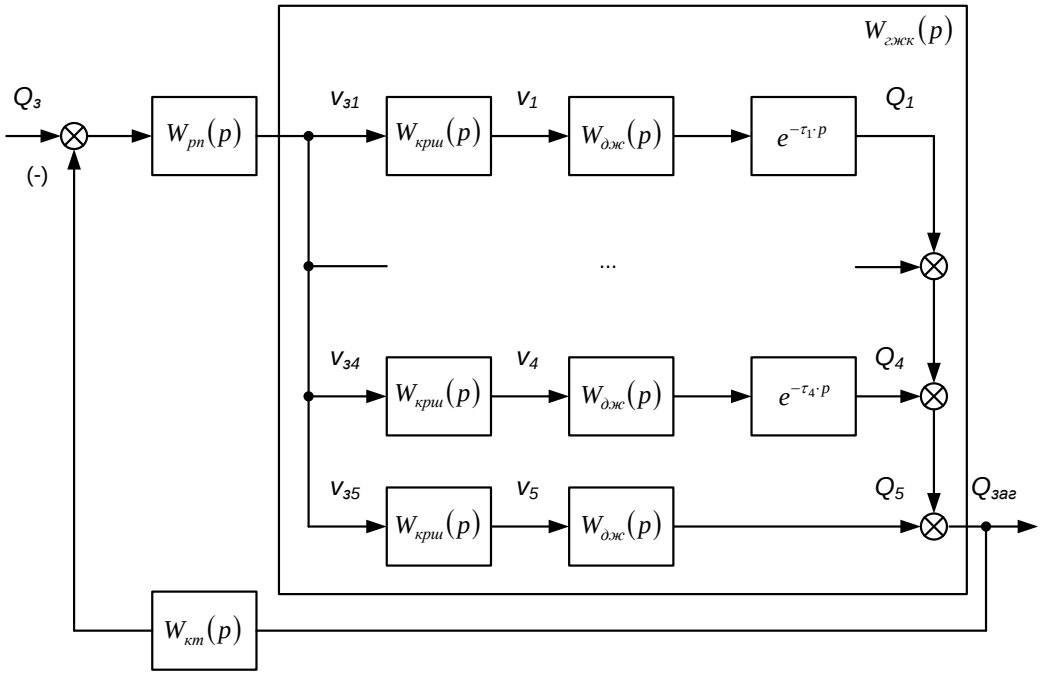


Рисунок 4.1 – Структурна схема замкненої САД концентрату

Таким чином, для контуру регулювання швидкості приводного електродвигуна дозатора ДТ-200 передаточна функція може бути подана у такому вигляді

$$W_{крш}(p) = \frac{600}{1{,}4 \cdot p + 1} . \qquad (4.11)$$

Коефіцієнт передачі редуктора

$$W_p(p) = K_p = \frac{n_{дж}}{n_д}, \quad (4.12)$$

де $n_{дж}$ – максимальна частота обертання дискового живильника, 30 об/хв; $n_д$ – максимальна частота обертання приводного двигуна, 720 об/хв;

$$W_p(p) = \frac{30}{720} = 0{,}042.$$

Продуктивність дискового живильника дорівнює [3]

$$Q_ж = k_ж \cdot h_ж \cdot n_ж, \quad (4.13)$$

де $k_ж$ – коефіцієнт, що враховує властивості матеріалу та конструктивні параметри живильника; $h_ж$ – висота підйому шиберу; $n_ж$ – швидкість обертання диску.

Передаточна функція дискового живильника ДТ-200 під час керування його продуктивністю шляхом зміни частоти обертання робочого диска характеризує залежність між вхідним керувальним сигналом та вихідною витратою матеріалу. Така математична модель дає змогу оцінити динамічні властивості живильника, визначити швидкість його реакції на зміну режиму роботи та врахувати вплив інерційності механічної системи на процес дозування сипких матеріалів

$$W_{дж}(p) = k_ж \cdot h_ж. \quad (4.14)$$

На підставі виразу (4.13) можна визначити коефіцієнт підсилення дискового живильника за умови керування його продуктивністю шляхом зміни частоти обертання чаші. Цей параметр характеризує чутливість системи до зміни швидкісного режиму роботи та дозволяє оцінити ефективність регулювання подачі матеріалу в заданому діапазоні експлуатаційних умов

$$K_{дж} = \frac{Q_{\max}}{n_{\max}} = \frac{240000}{3600 \cdot 0{,}5} = 133{,}3.$$

Отже передаточна функція (2.3) матиме вигляд

$$W_{дж}(p) = 133{,}3. \quad (4.15)$$

Перехідна характеристика незамкненої системи автоматизованого дозування, побудованої на базі групового дозатора, за умови надходження на вхід частотних перетворювачів електроприводів живильників керуючого струмового сигналу величиною 20 мА наведена на рис.4.2.

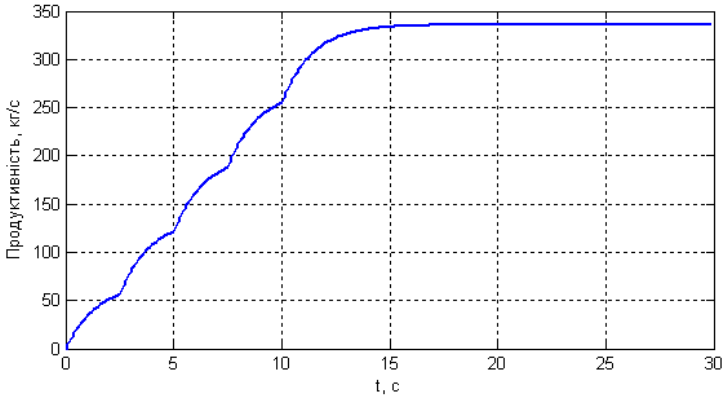


Рисунок 4.2 – Перехідний процес в САД на основі групового дозатору концентрату

На підставі аналізу рис. 4.2 можна стверджувати, що динамічні властивості групового дозатора за каналом керування, який пов’язаний зі зміною частоти обертання чаші дискових живильників, доцільно описувати за допомогою апроксимованої передаточної функції, наведеної в роботі [3]. Такий підхід забезпечує достатню точність відтворення поведінки об’єкта та дозволяє врахувати його основні інерційні характеристики в процесі математичного моделювання

$$W_{гжк}(p) = K \cdot \frac{1 - e^{-\tau \cdot p}}{p}, \qquad (4.16)$$

де τ – затримка часу, що залежить від відстані між першим та останнім живильником, лінійної швидкості руху збірного конвеєра та тривалості перехідних процесів в контурах продуктивності окремих дозаторів; K – коефіцієнт підсилення.

Наближену передаточну функцію групового дозатора концентрату доцільно подати у такій математичній формі. Вона відображає динамічні характеристики дозувального обладнання та дає змогу оцінити його реакцію на зміну керуючих впливів. Використання такої апроксимації спрощує подальший

аналіз роботи системи автоматичного регулювання і дозволяє виконувати розрахунки з достатньою для практичних задач точністю

$$W_{сжк}(p)=1333{,}3\cdot\frac{1-e^{-125\cdot p}}{p}. \qquad (4.17)$$

Перехідні характеристики системи, отримані на основі точної передаточної функції (крива 1) та її спрощеного математичного подання згідно з виразом (4.17) (крива 2), наведено на рис.4.3. Порівняння представлених залежностей свідчить про близькість результатів, отриманих за обома моделями, що підтверджує прийнятність використання наближеного опису для аналізу динамічних властивостей системи.

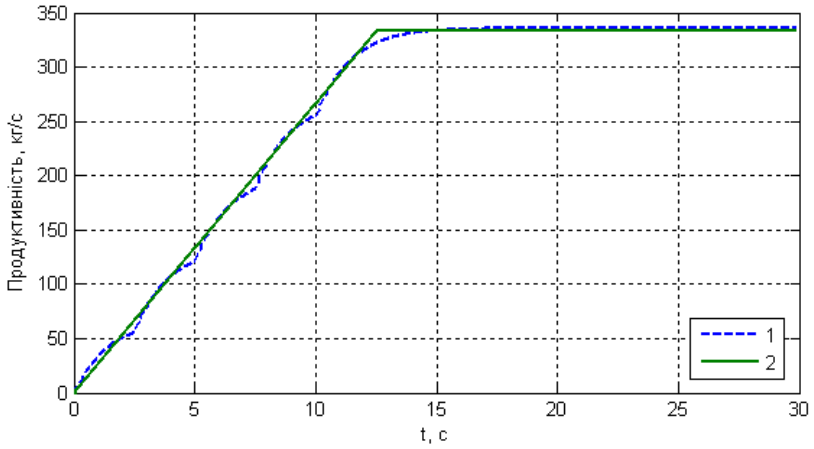


Рисунок 4.3 – Перехідний процес в САД на основі групового дозатору концентрату: 1 – точна модель; 2 – наближена модель.

Передаточна функція конвеєрних терезів

$$W_{кт}(p)=\frac{k_{кт}}{T_{кт}\cdot p+1}, \qquad (4.18)$$

де $k_{кт}=\frac{U_{\max}}{Q_{\max}}$ – коефіцієнт підсилення терезів; I_{max} – максимальний струмовий сигнал на виході терезів, що відповідає максимальній продуктивності Q_{max}; $T_{кт}$ – постійна часу терезів.

Отже, коефіцієнт підсилення конвеєрних терезів дорівнює

$$k_{кт}=\frac{0{,}02}{333{,}3}=6\cdot10^{-5}.$$

На основі (4.18) передаточна функція конвеєрних терезів

$$W_{кт}(p) = \frac{6 \cdot 10^{-5}}{0{,}01 \cdot p + 1}, \quad (4.19)$$

Відповідно до наведеної структурної схеми, передаточна функція замкненої системи автоматизованого дозування концентрату за відсутності регулятора продуктивності може бути визначена у такому вигляді

$$W_{зсжк}(p) = \frac{W_{сжк}(p)}{1 + W_{сжк}(p) \cdot W_{кт}(p)}. \quad (4.20)$$

Перехідна характеристика досліджуваної системи, яка визначається відповідною передавальною функцією, представлена на рисунку 4.4. Вона відображає зміну вихідного сигналу в часі після подачі вхідного впливу та дає можливість оцінити динамічні властивості об’єкта керування.

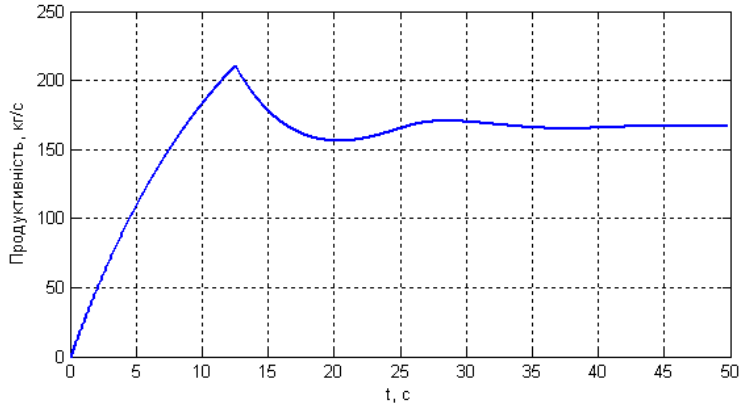


Рисунок 4.4 – Графік перехідного процесу в замкненій САД концентрату

Аналіз кривої перехідного процесу свідчить, що система характеризується аперіодичною реакцією з перерегулюванням на рівні 26 %. Крім того, наявність відхилення між заданим і фактичним значеннями у сталому режимі вказує на існування статичної похибки. Це підтверджується тим, що при надходженні керуючого сигналу величиною 20 мА груповий дозатор не досягає необхідного значення продуктивності, яке має відповідати встановленому режиму роботи

$$Q_{\max} = \frac{5 \cdot 240000}{3600} = 333{,}3 \text{ кг/с},$$

в той час як забезпечує продуктивність лише Q = 166,7 кг/с.

Для удосконалення роботи системи автоматичного керування доцільно застосувати ПІ-регулятор, який забезпечує необхідну точність та стійкість процесу. Визначення його налаштувань може бути виконане за допомогою

інструменту Simulink Response Optimization (рис. 4.5), що входить до складу програмного комплексу MATLAB R2007b і призначений для автоматизованого підбору параметрів регуляторів на основі заданих вимог до якості керування.

Під час проведення оптимізації за цільову функцію приймається мінімізація середньоквадратичної похибки продуктивності за умови дотримання встановлених технічних вимог. При цьому час виходу системи на усталений режим не повинен перевищувати 50 с, похибка регулювання має бути меншою за 0,05 %, а величина перерегулювання не повинна перевищувати 20 %.

У результаті виконаних розрахунків були отримані оптимальні значення коефіцієнтів ПІ-регулятора, які забезпечують необхідні показники якості функціонування системи керування продуктивністю групового дозатора концентрату та сприяють підвищенню ефективності його роботи

$$W_{pn}(p) = K_n\left(1+\frac{1}{T_i \cdot p}\right) = 1{,}1\cdot\left(1+\frac{1}{10\cdot p}\right).$$

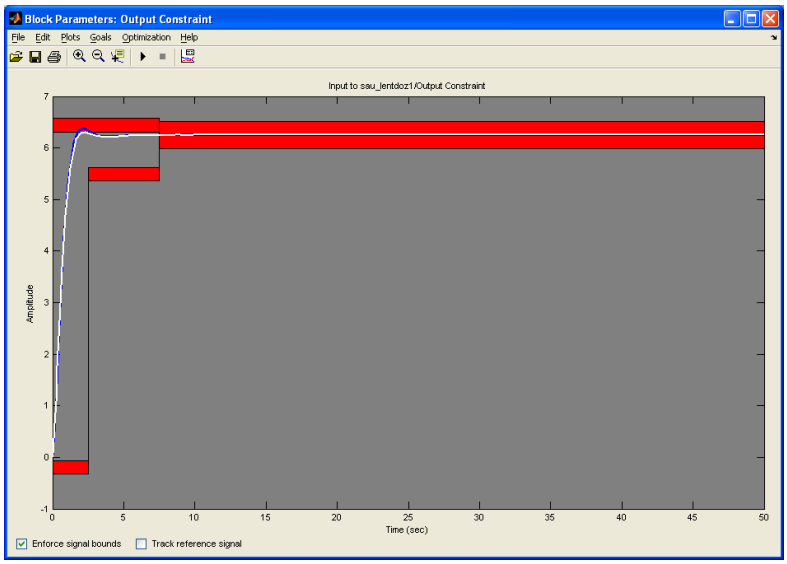


Рисунок 4.5 – Оптимізація відгуку САУ продуктивністю при вказаних обмеженнях

На рис.4.6 представлено криву перехідного процесу модернізованої системи автоматизованого дозування концентрату. Отриманий графік відображає динамічні характеристики системи після внесення коригувань до її структури та параметрів налаштування, що дає змогу оцінити якість регулювання й ефективність роботи контуру керування в перехідному режимі.

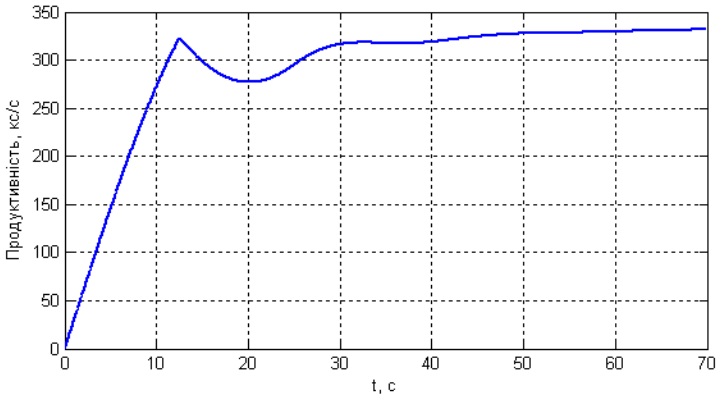


Рисунок 4.6 – Графік перехідного процесу в скорегованій САД концентрату на основі групового дозатору

Аналіз отриманого графіка свідчить, що динаміка системи характеризується аперіодичним перехідним процесом без коливань, при цьому усталена похибка відсутня, що вказує на точне відпрацювання заданого значення регульованої величини.

Дозування аглоруди

Подача аглоруди здійснюється за допомогою двох стрічкових дозаторів типу ДНЛ-1, гранична продуктивність кожного з яких становить 240 т/год. Обладнання встановлене під двома приймальними бункерами аглоруди та розташоване на відстані 5 м одне від одного. Структура автоматизованої системи керування дозатором ДНЛ-1 представлена схемою, наведеною на рисунку 4.7. У цій схемі $W_{сжа}(p)$ описує динамічні властивості стрічкового живильника під час регулювання подачі шляхом зміни швидкості руху стрічки, $W_{кш}(p)$ характеризує контур керування швидкістю приводу живильника, $W_{свв}(p)$ відображає роботу ваговимірювального пристрою, а $W_{рпа}(p)$ визначає функціонування регулятора продуктивності, який забезпечує підтримання необхідної витрати матеріалу.

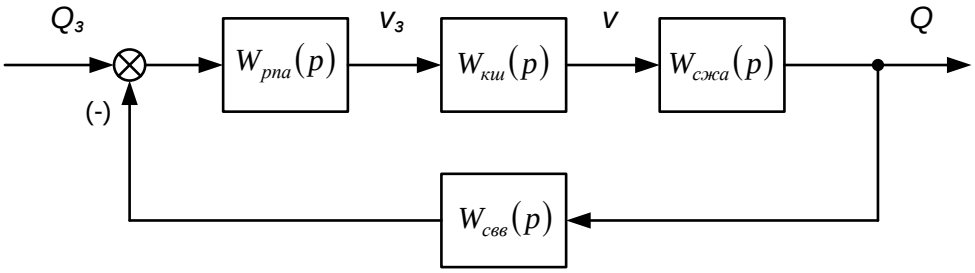


Рисунок 4.7 – Структурна схема системи автоматичного керування стрічковим дозатором ДНЛ-1

Отже, передаточну функцію замкненого контуру автоматичного регулювання продуктивності стрічкового дозатора аглоруди можна подати у такому вигляді. Вона відображає взаємозв'язок між вхідним керуючим сигналом і вихідною величиною системи з урахуванням дії зворотного зв'язку. Отримана математична модель дає змогу оцінити динамічні характеристики процесу дозування, проаналізувати якість регулювання та визначити ефективність функціонування системи керування в робочих режимах

$$W_{зсжа}(p)=\frac{W_{рпа}(p)\cdot W_{км}(p)\cdot W_{сжа}(p)}{1+W_{рпа}(p)\cdot W_{км}(p)\cdot W_{сжа}(p)\cdot W_{свв}(p)}. \quad (4.21)$$

Продуктивність стрічкового живильника дорівнює

$$Q_{ж}=k_{ж}\cdot h_{ж}\cdot v_{тр}, \quad (4.22)$$

де $k_{ж}$, $h_{ж}$ – величини, аналогічні параметрам дискового живильника; $v_{тр}$ – лінійна швидкість руху конвеєрної стрічки.

Передаточна функція стрічкового живильника за умови керування його продуктивністю шляхом зміни швидкості переміщення стрічки характеризує залежність між керуючим впливом і витратою матеріалу. Такий спосіб регулювання забезпечує плавне коригування подачі сипкої сировини, дозволяє підтримувати необхідний режим роботи технологічного обладнання та підвищує точність дозування матеріалу в процесі транспортування

$$W_{сжа}(p)=k_{ж}\cdot h_{ж}. \quad (4.23)$$

Згідно з виразом (4.22), коефіцієнт передачі стрічкового живильника під час керування його продуктивністю шляхом зміни лінійної швидкості переміщення стрічки визначається залежністю між витратою матеріалу та швидкістю руху транспортуючого елемента. Такий спосіб регулювання забезпечує пропорційну зміну подачі сипкого матеріалу та широко застосовується в автоматизованих системах дозування

$$K_{сжа}=\frac{Q_{\max}}{v_{\max}}=\frac{240000}{3600\cdot 2}=33{,}3.$$

Отже передаточна функція (2.26) матиме вигляд

$$W_{сжа}(p) = 33{,}3 \quad (4.24)$$

Передаточна функція контуру регулювання швидкості стрічкового живильника при застосуванні електропривода на базі асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором і частотного перетворювача, який забезпечує зміну частоти та напруги живлення для керування режимами роботи двигуна, може бути представлена у такому вигляді. Така структура привода дає можливість плавно змінювати швидкість переміщення стрічки, підвищувати точність дозування матеріалу та забезпечувати стабільність технологічного процесу за різних умов експлуатації

$$W_{кш}(p) = \frac{k_д}{T_м \cdot p + 1}, \quad (4.25)$$

де $k_д$ – коефіцієнт передачі двигуна; $T_м$ – електромеханічна стала часу електроприводу.

Коефіцієнт підсилення системи керування швидкістю стрічкового транспортера визначає рівень впливу регулятора на об’єкт керування та характеризує ефективність формування керуючого сигналу. Значення цього параметра обирається з урахуванням динамічних властивостей приводу, необхідної точності підтримання швидкості та вимог до стійкості роботи системи. Правильний вибір коефіцієнта підсилення забезпечує швидке відпрацювання заданого режиму без виникнення значних коливань і перевищення допустимих відхилень швидкості транспортування матеріалу

$$k_д = \frac{v_{\max}}{I_{1\max}}, \quad (4.26)$$

де v_{max} – максимальна швидкість транспортеру, м/с; I_{1max} – максимальне значення сигналу завдання швидкості перетворювача частоти асинхронного двигуна приводу транспортеру, I_{1max} = 20 мА. Отже,

$$k_д = \frac{2}{0{,}02} = 100.$$

Електромагнітна постійна часу електропривода є одним із ключових параметрів, що характеризує швидкість протікання перехідних процесів у системі

керування швидкістю стрічкового транспортера [12]. Використання сучасних частотних перетворювачів для регулювання частоти обертання електродвигуна дає змогу задавати необхідну динаміку роботи привода та коригувати час виходу системи на встановлений режим. Для забезпечення стабільної та плавної роботи стрічкового дозатора раціонально прийняти значення електромагнітної сталої часу на рівні $T_м$=1,4) с.

Отже передаточна функція (4.25) контуру швидкості матиме вигляд

$$W_{кш}(p) = \frac{100}{1{,}4 \cdot p + 1}. \tag{4.27}$$

Передаточна функція стрічкового вагового вимірювача з паралельним зміщенням характеризує динамічний зв'язок між зміною витрати сипкого матеріалу та вихідним сигналом вимірювальної системи. Такий тип вимірювача забезпечує перетворення навантаження, що створюється матеріалом на стрічці конвеєра, у відповідний електричний сигнал. Передаточна функція дозволяє оцінити реакцію системи на зміну продуктивності потоку та визначити її динамічні властивості в процесі безперервного контролю масової витрати

$$W_{свв}(p) = K \cdot \frac{1 - e^{-\frac{l}{v} \cdot p}}{p}, \tag{4.28}$$

де l – довжина робочої ділянки стрічки; v – лінійна швидкість руху конвеєрної стрічки; K – коефіцієнт підсилення.

За паспортними даними довжина стрічкового транспортеру l = 0,8 м, швидкість v = 2 м/с, коефіцієнт підсилення

$$K = \frac{I_{\max}}{m_{\max}}, \tag{4.29}$$

де I_{max} – максимальне значення токового сигналу на виході вторинного перетворювача стрічкового вимірювача ваги, I_{max} = 20 мА; m_{max} – максимальне миттєве значення маси аглоруди на стрічці, що вимірюється;

$$m_{\max} = Q_{\max} \cdot t = Q_{\max} \cdot \frac{l}{v} = \frac{240000}{3600} \cdot \frac{0{,}8}{2} = 26{,}6 \text{ кг},$$

$$K = \frac{0,02}{26,6} \approx 7,5 \cdot 10^{-4}.$$

Отже, передаточна функція стрічкового вимірювача ваги дорівнює

$$W_{свв}(p) = 7,5 \cdot 10^{-4} \cdot \left(\frac{1 - e^{-0,4 \cdot p}}{p} \right). \quad (4.30)$$

Оскільки передатна функція містить елемент чистого запізнення, для спрощення подальшого дослідження системи та виконання розрахунків його доцільно замінити еквівалентною моделлю, що складається з двох послідовно з'єднаних аперіодичних ланок однакової структури. Така апроксимація базується на використанні розкладу Паде, при якому враховуються два початкові члени ряду, що найбільшою мірою відображають динамічні властивості об'єкта [8]. У цьому випадку значення сталих часу для обох аперіодичних ланок приймаються однаковими і становлять

$$T_1 = \frac{\tau}{2} = \frac{0,4}{2} = 0,2.$$

Тоді передаточна функція (4.30) матиме вигляд

$$W_{свв}(p) = \frac{7,5 \cdot 10^{-4}}{p} \cdot \left(1 - \frac{1}{(0,2 \cdot p + 1)^2} \right). \quad (4.31)$$

Підставивши вирази (4.23), (4.27) і (4.31) у співвідношення (2.25), визначимо передаточну функцію замкненої системи автоматичного керування продуктивністю стрічкового дозатора агломераційної руди за умови відсутності регулюючого пристрою. Отримана залежність дає змогу оцінити динамічні властивості системи та проаналізувати її поведінку під час зміни вхідних впливів

$$W_{зсжа}(p) = \frac{68 \cdot p^2 + 672 \cdot p + 1657}{0,029 \cdot p^3 + 0,302 \cdot p^2 + 0,95 \cdot p + 1}. \quad (4.32)$$

На підставі передаточної функції (4.32) проведено аналіз динамічних властивостей нескорегованої системи автоматичного керування продуктивністю стрічкового дозатора аглоруди за умови подачі на вхід частотного перетворювача сигналу завдання величиною 20 мА (рис.4.8).

Дослідження графіка перехідної характеристики свідчить про плавний перебіг процесу без коливань і перевищення встановленого значення. Разом із тим спостерігається суттєве відхилення усталеного значення від заданого, що вказує на наявність значної статичної похибки. Це пояснюється тим, що при надходженні керуючого сигналу 20 мА система повинна забезпечувати відповідний рівень продуктивності дозатора, однак фактичне значення не досягає необхідної величини

$$Q_{\max} = \frac{240000}{3600} = 66{,}6 \text{ кг/с},$$

натомість усталене значення продуктивності складає лише 33,14 кг/с.

Для налаштування системи автоматичного керування доцільним є застосування ПІ-регулятора, який забезпечує необхідну точність підтримання заданої продуктивності дозатора. Підбір оптимальних параметрів регулятора, що гарантують задані показники якості перехідного процесу та стійку роботу системи керування подачею аглоруди, виконано із використанням інструменту Simulink Response Optimization.

У результаті проведеної оптимізації отримано значення коефіцієнтів ПІ-регулятора, за яких забезпечується необхідний рівень якості функціонування системи керування продуктивністю стрічкового дозатора аглоруди та покращуються динамічні характеристики процесу дозування

$$W_{рпа}(p) = K_{па}\left(1 + \frac{1}{T_{іа} \cdot p}\right) = 0{,}05 \cdot \left(1 + \frac{1}{0{,}2 \cdot p}\right).$$

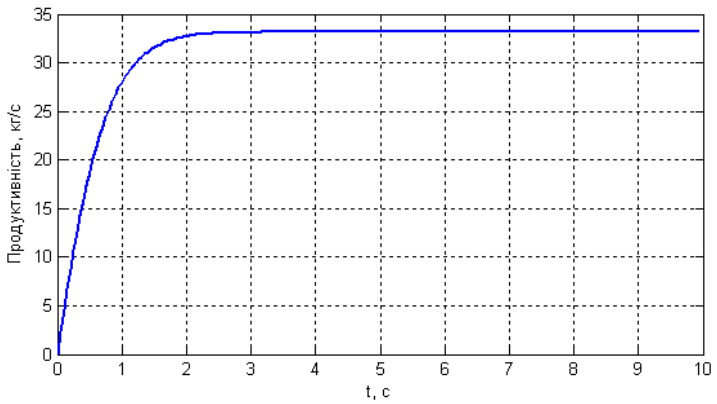


Рисунок 4.8 – Графік перехідного процесу в нескорегованій САК продуктивністю стрічкового дозатору аглоруди

Відтак математичний опис модернізованої системи автоматичного керування стрічковим дозатором аглоруди, до складу якої входить регулятор продуктивності, можна подати у вигляді відповідної передаточної функції. Така функція відображає динамічні властивості системи, враховує вплив коригувального пристрою на процес регулювання та характеризує взаємозв'язок між вхідними і вихідними параметрами об'єкта керування. З урахуванням внесених змін передаточна функція системи набуває такого вигляду

$$W_{зжга}(p)=\frac{135\cdot p^2+1332\cdot p+3287}{1{,}135\cdot p^3+6{,}352\cdot p^2+4{,}053\cdot p+1}. \quad (4.33).$$

На підставі визначеної передаточної функції виконано аналіз динамічних властивостей скоригованої системи автоматичного керування продуктивністю дозатора аглоруди (рис. 4.9).

З графічної залежності, наведеної на рисунку 4.9, видно, що система характеризується аперіодичним перебігом перехідного процесу та незначним перерегулюванням, величина якого становить σ = 1,2 %. Час встановлення режиму дорівнює 8 с, при цьому усталена похибка відсутня, що свідчить про достатню точність регулювання.

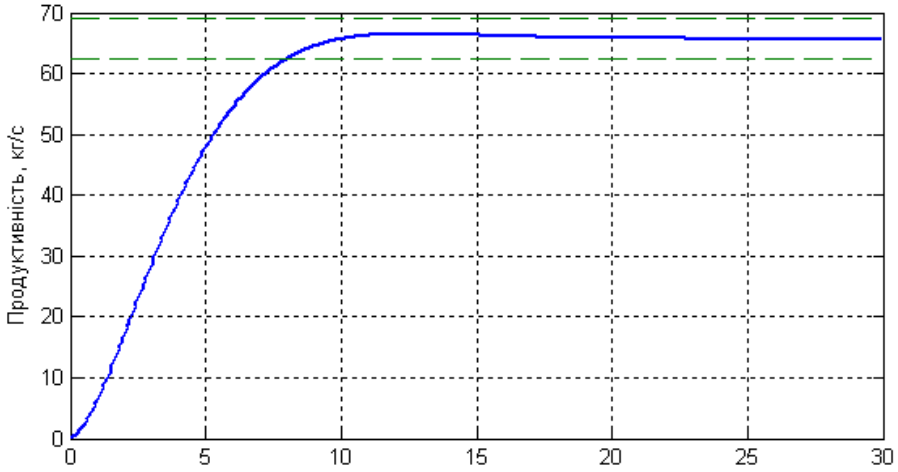


Рисунок 4.9 – Графік перехідного процесу в скорегованій САК продуктивністю стрічкового дозатору аглоруди

Дозування вапняку

Подача вапняку здійснюється за допомогою двох стрічкових дозаторів типу 7422 ДН 100-150-3, кожен із яких забезпечує продуктивність до 100 т/год.

Обладнання встановлене під двома бункерами для зберігання матеріалу, розташованими на відстані 5 м один від одного. Структурна схема автоматизованої системи керування стрічковим дозатором 7422 ДН 100-150-3 представлена на рис.4.10. У цій схемі $W_{сжв}(p)$ характеризує динаміку стрічкового живильника під час зміни продуктивності шляхом регулювання швидкості руху стрічки, $W_{киш}(p)$ описує контур керування швидкістю, $W_{свв}(p)$ відображає властивості вагового вимірювача, а $W_{рпв}(p)$ визначає динамічні характеристики регулятора продуктивності.

Отже, передаточну функцію замкненого контуру автоматичного регулювання продуктивності стрічкового дозатора вапняку можна подати у відповідному математичному вигляді. Вона відображає взаємозв'язок між вхідним керуючим сигналом і вихідною величиною системи з урахуванням дії зворотного зв'язку. Отриманий вираз дає можливість оцінити динамічні характеристики об'єкта керування, дослідити його стійкість та проаналізувати якість регулювання під час зміни режимів роботи дозатора

$$W_{зсжв}(p)=\frac{W_{рпв}(p)\cdot W_{киш}(p)\cdot W_{сжв}(p)}{1+W_{рпв}(p)\cdot W_{киш}(p)\cdot W_{сжв}(p)\cdot W_{свв}(p)}. \qquad (4.34)$$

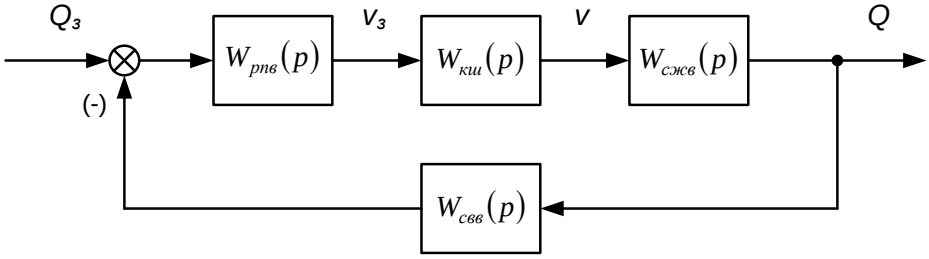


Рисунок 4.10 – Структурна схема системи автоматичного керування стрічковим дозатором 7422 ДН 100-150-3

Виконаємо визначення передаточної функції замкненої системи автоматичного керування продуктивністю стрічкового дозатора вапняку за умови відсутності регулятора. Отримана математична модель дає змогу дослідити динамічні характеристики системи, оцінити її реакцію на зміну вхідних впливів та проаналізувати особливості функціонування об'єкта керування в замкненому контурі без застосування коригувальних пристроїв

$$W_{зсжв}(p)=\frac{307\cdot p^2+922\cdot p+692{,}62}{0{,}309\cdot p^3+1{,}15\cdot p^2+1{,}53\cdot p+1}. \quad (4.35)$$

На підставі передаточної функції (4.35) проведено аналіз динамічних характеристик нескоригованої системи автоматичного керування продуктивністю стрічкового дозатора вапняку за умови подачі на вхід частотного перетворювача струмового сигналу завдання величиною 20 мА (рис.4.11).

Дослідження графіка перехідного процесу свідчить, що реакція системи має аперіодичний характер і супроводжується перерегулюванням. Крім того, спостерігається суттєва статична похибка, оскільки при надходженні сигналу завдання 20 мА система повинна підтримувати задане значення продуктивності, проте фактичний усталений режим не повністю відповідає необхідному рівню. Це вказує на недостатню точність роботи нескоригованої САК та необхідність подальшого вдосконалення її параметрів

$$Q_{max}=\frac{100000}{3600}=27{,}78 \text{ кг/с},$$

натомість усталене значення продуктивності складає лише 13,87 кг/с.

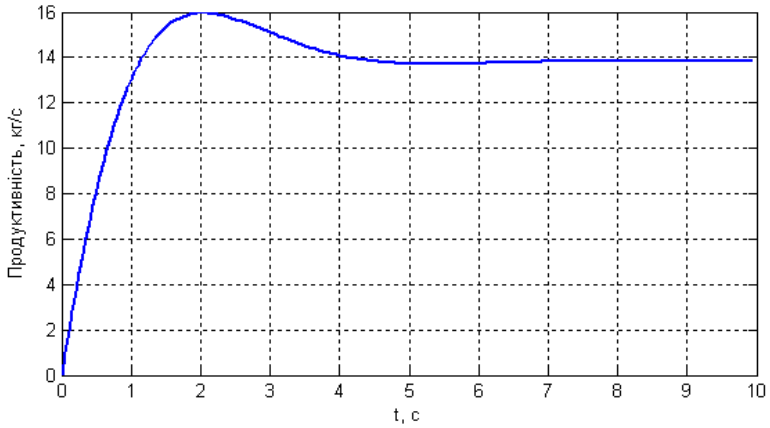


Рисунок 4.11 – Графік перехідного процесу нескорегованої САК продуктивністю стрічкового дозатору вапняку

Для налаштування системи автоматичного керування доцільно застосувати ПІ-регулятор, який забезпечує необхідну точність підтримання заданої продуктивності. Визначення раціональних параметрів регулятора, що гарантують належні показники якості перехідних процесів у системі керування дозатором вапняку, виконано з використанням інструменту Simulink Response Optimization.

У процесі проведення оптимізаційних розрахунків було отримано значення коефіцієнтів ПІ-регулятора, за яких система керування продуктивністю стрічкового дозатора вапняку характеризується стійкою роботою, достатньою швидкодією та мінімальним відхиленням від заданого режиму

$$W_{рпв}(p) = K_{пв}\left(1 + \frac{1}{T_{ів} \cdot p}\right) = 0{,}05 \cdot \left(1 + \frac{1}{0{,}2 \cdot p}\right).$$

Отже, передаточна функція модернізованої системи автоматичного керування стрічковим дозатором вапняку, до складу якої входить регулятор продуктивності, може бути подана у такому вигляді

$$W_{зсже}(p) = \frac{122 \cdot p^3 + 980 \cdot p^2 + 2116 \cdot p + 1382}{2{,}47 \cdot p^4 + 9{,}16 \cdot p^3 + 10{,}96 \cdot p^2 + 4{,}502 \cdot p + 1}. \quad (4.36).$$

На підставі визначеної передаточної функції проведено аналіз динамічних характеристик скоригованої системи автоматичного керування продуктивністю дозатора вапняку (рис. 4.12).

З графічної залежності, наведеної на рис.4.12, видно, що система характеризується аперіодичним перебігом перехідного процесу та незначним перерегулюванням, величина якого становить 7 %. Час встановлення вихідного параметра дорівнює 12 с, при цьому усталена похибка відсутня, що свідчить про достатню точність роботи системи в сталому режимі.

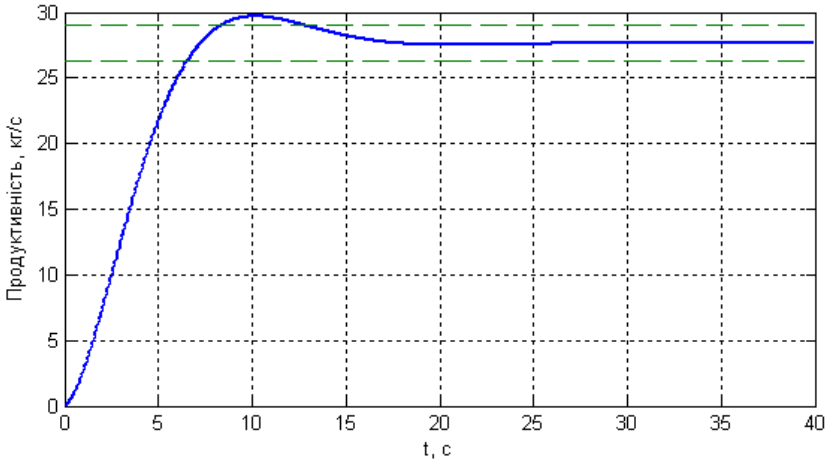


Рисунок 4.12 – Графік перехідного процесу скорегованої САК продуктивністю стрічкового дозатору вапняку

Дозування коксу

Для подачі коксу до технологічного процесу застосовуються два стрічкові дозатори типу 7422 ДН 100-50-3, кожен із яких забезпечує продуктивність до 50 т/год. Обладнання встановлене під двома коксозавантажувальними бункерами, що розташовані на відстані близько 5 м один від одного. Узагальнену структурну схему автоматизованої системи керування стрічковим дозатором 7422 ДН 100-50-3 наведено на рис. 4.13. У цій схемі $W_{сжк}(p)$ характеризує динамічні властивості стрічкового живильника під час зміни подачі матеріалу шляхом регулювання швидкості руху стрічки, $W_{киш}(p)$ описує контур керування швидкістю її переміщення, $W_{свв}(p)$ відображає передаточні властивості ваговимірювального пристрою стрічкового типу, а $W_{рпк}(p)$ визначає роботу регулятора, який підтримує задану продуктивність дозування.

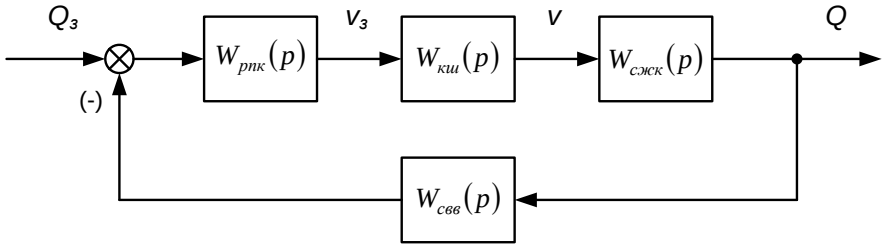


Рисунок 4.13 – Структурна схема системи автоматичного керування стрічковим дозатором 7422 ДН 100-50-3

Отже, передатна функція замкненої автоматизованої системи регулювання продуктивності стрічкового дозатора коксу може бути подана у відповідному математичному вигляді. Вона відображає взаємозв’язок між керуючим впливом і вихідним параметром об’єкта, враховуючи дію зворотного зв’язку. Така функція дає можливість оцінити динамічні характеристики системи, дослідити її стійкість та визначити якість процесу керування в різних режимах роботи

$$W_{зсжкс}(p)=\frac{W_{рпк}(p)\cdot W_{киш}(p)\cdot W_{сжк}(p)}{1+W_{рпк}(p)\cdot W_{киш}(p)\cdot W_{сжк}(p)\cdot W_{свв}(p)}. \qquad (4.37)$$

Визначимо передаточну функцію замкненої системи автоматичного керування продуктивністю стрічкового дозатора коксу за умови відсутності регулятора. Такий розрахунок дає можливість оцінити динамічні властивості системи, дослідити її стійкість і проаналізувати вплив основних елементів на процес дозування матеріалу.

$$W_{зсжкс}(p)=\frac{279\cdot p^2+839\cdot p+630{,}91}{0{,}56\cdot p^3+2{,}09\cdot p^2+2{,}51\cdot p+1}. \qquad (4.38)$$

Використовуючи отриману передаточну функцію, виконано аналіз динамічних властивостей нескоригованої системи автоматичного керування продуктивністю стрічкового дозатора коксу за умови подачі на вхід частотного перетворювача сигналу завдання величиною 20 мА (рис.4.14).

З наведеного на рис.4.14 графіка видно, що система характеризується аперіодичним перехідним процесом без виникнення коливань і перевищення заданого значення. Час встановлення вихідного параметра становить близько 6 с. Після завершення перехідного режиму відхилення від заданої продуктивності не спостерігається, що свідчить про відсутність статичної похибки та забезпечення необхідного значення продуктивності при сигналі завдання 20 мА

$$Q_{\max}=\frac{50000}{3600}=13{,}88 \text{ кг/с},$$

тобто система в цілому задовольняє вимоги, що висуваються до систем автоматичного дозування коксу в умовах агломераційних фабрик.

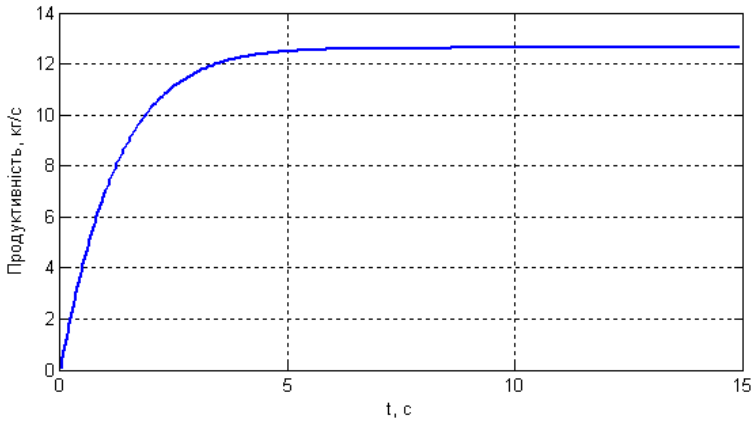


Рисунок 4.14 – Графік перехідного процесу САУ продуктивністю стрічкового дозатору коксу

4.3 Синтез системи керування процесом дозування шихтових матеріалів

Аналіз особливостей процесу дозування складових шихтової суміші на агломераційній фабриці гірничо-збагачувального комбінату свідчить про ефективність застосування автоматизованої системи дозування, у якій дозувальні

пристрої працюють за паралельною схемою. Такий підхід забезпечує підвищення точності подачі матеріалів і стабільність технологічного процесу. Структурна схема автоматичного керування дозуванням з урахуванням часових затримок, що виникають під час переміщення компонентів транспортними засобами, наведена на рис. 4.15.

Для подачі аглоруди використовується груповий дозувальний вузол, до складу якого входять два стрічкові дозатори типу ДНЛ-1. Вони встановлені на відстані близько 5 м один від одного та забезпечують завантаження двох окремих бункерів із рудною сировиною. Після налаштування системи регулювання продуктивності кожного стрічкового дозатора математичну модель групового дозатора вапняку можна подати у вигляді відповідної передаточної функції

$$W_{сжа}(p) = 3330 \cdot \frac{1 - e^{-10 \cdot p}}{p} . \qquad (4.39)$$

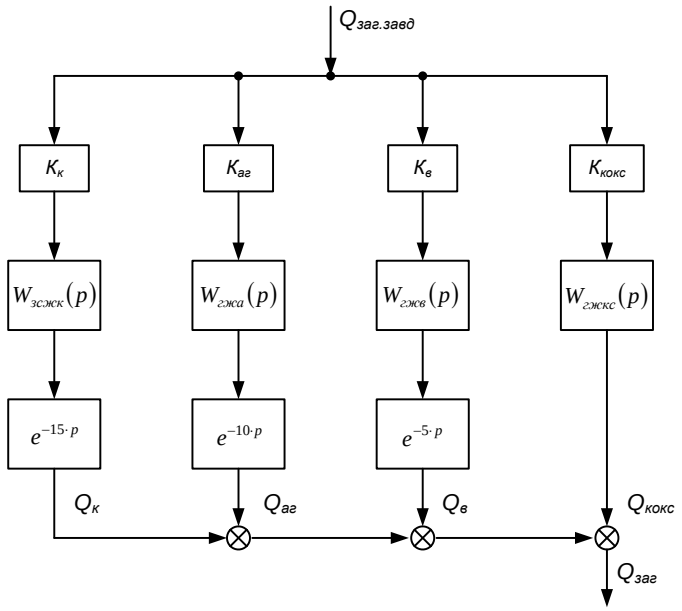


Рисунок 4.15 – Структурна схема системи автоматичного дозування компонентів шихти: $W_{зсжк}(p)$ – передаточна функція САК груповим дозатором концентрату, $W_{гжа}(p)$, $W_{зсжв}(p)$, $W_{зсжкс}(p)$ – передаточні функції групових дозаторів аглоруди, вапняку та коксу відповідно.

Для подачі вапняку застосовується груповий дозатор, до складу якого входять два стрічкові дозатори типу 7422 ДН 100-150-3. Вони встановлені з інтервалом 5 м один від одного та забезпечують вивантаження матеріалу з двох

бункерів. Після налаштування та коригування системи автоматичного регулювання продуктивності кожного стрічкового дозатора роботу групового дозатора вапняку доцільно описувати за допомогою відповідної передаточної функції, яка відображає його динамічні властивості та особливості функціонування в складі технологічного комплексу

$$W_{сжв}(p) = 1390 \cdot \frac{1 - e^{-10 \cdot p}}{p} . \quad (4.40)$$

Для подачі коксу застосовується груповий дозувальний вузол, до складу якого входять два електровібраційні живильники типу 7422 ДН 100-50-3. Обладнання встановлене з інтервалом 5 м між окремими дозаторами, що забезпечує рівномірне надходження матеріалу до технологічної лінії. Після налаштування та коригування системи регулювання продуктивності кожного стрічкового дозатора динамічні властивості групового дозатора коксу можуть бути описані за допомогою відповідної передаточної функції

$$W_{сжкс}(p) = 694 \cdot \frac{1 - e^{-5 \cdot p}}{p} . \quad (4.41)$$

4.4 Комп’ютерне моделювання системи керування процесом дозування шихтових матеріалів

Для проведення комп’ютерного дослідження складових автоматизованої системи дозування шихтових компонентів на агломераційному виробництві доцільно застосувати середовище Simulink, яке входить до програмного комплексу MATLAB R2007b. Побудова моделі системи здійснюється на основі результатів розрахунків, виконаних у попередніх розділах роботи, а також визначених математичних залежностей і передаточних функцій окремих елементів. Такий підхід дає змогу оцінити динамічні характеристики системи та перевірити правильність прийнятих технічних рішень.

Для подачі концентрату з п’яти витратних бункерів на збірний конвеєр №47 використовується груповий дозувальний пристрій, до складу якого входять п’ять дискових дозаторів типу ДТ-200. Кожен із них забезпечує регулювання

витрати матеріалу відповідно до заданих параметрів технологічного процесу. Структурна модель одного дискового дозатора представлена на рис.4.16.

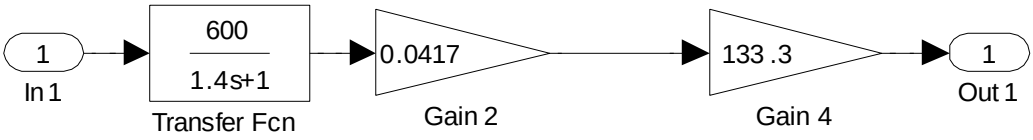


Рисунок 4.16 – Модель дискового дозатору концентрату

Для дослідження роботи групового дозатора концентрату на основі моделі, поданої на рис.4.16, сформуємо окрему підсистему за допомогою блоку Subsystem. Вплив затримки, що виникає під час переміщення матеріалу між витратними бункерами, врахуємо шляхом використання блоків Transport Delay, які дають змогу адекватно відтворити часові характеристики транспортного процесу. Після внесення зазначених елементів структурна схема групового дозатора набуває вигляду, показаного на рис.4.17.

На рис.4.18 представлено залежність зміни вихідних параметрів у перехідному режимі для групового дозатора концентрату, до складу якого входять п’ять дискових дозаторів типу ДТ-200. Обладнання розміщене з інтервалом 5 м між сусідніми дозаторами. Моделювання виконувалося за умови подачі на перетворювачі частоти приводів дозаторів керуючого сигналу величиною 20 мА, що дозволило оцінити динамічні властивості системи та характер її реакції на заданий вплив.

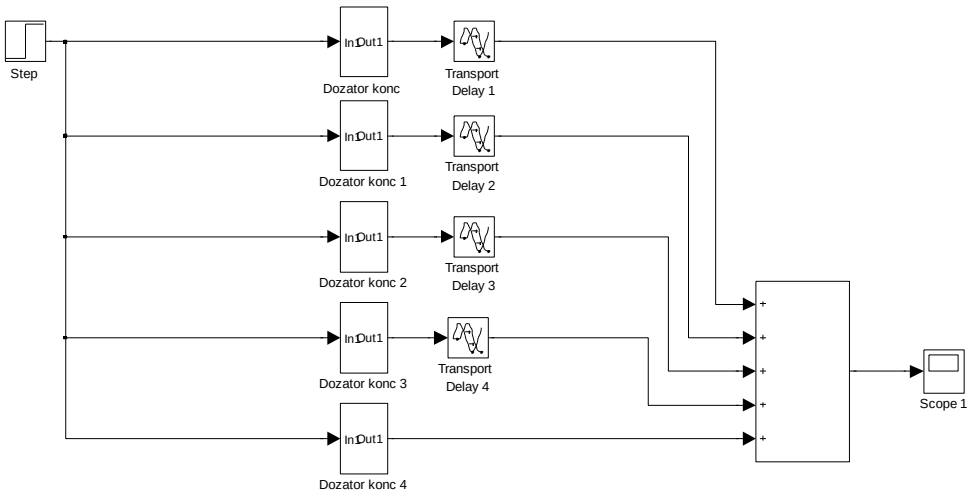


Рисунок 4.17 – Модель групового дозатору концентрату

Аналіз залежності, наведеної на рис.4.18, свідчить про адекватність апроксимації передаточної характеристики групового дозатора, виконаної в попередньому розділі. Отримані результати підтверджують, що обрана математична функція достатньо точно відображає динамічні властивості досліджуваного об’єкта та може бути використана для подальшого аналізу його роботи.

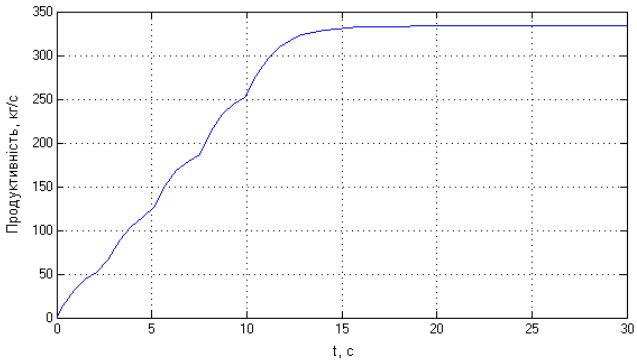


Рисунок 4.18 – Графік перехідного процесу в груповому дозаторі концентрату

Використовуючи структурну схему замкненої системи регулювання продуктивності групового дозатора концентрату, а також визначені передаточні функції та налаштовані параметри ПІ-регулятора, було розроблено імітаційну модель системи автоматичного дозування концентрату, яку подано на рис.4.19.

Характер зміни вихідної величини та динамічні властивості розробленої системи автоматичного керування концентратом відображено на графіку перехідного процесу, наведеному на рис.4.20.

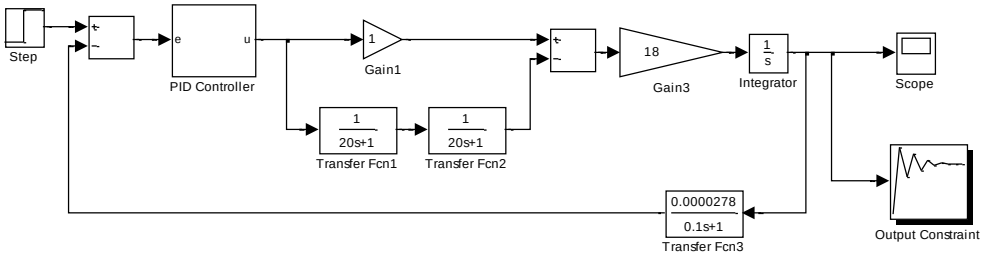


Рисунок 4.19 – Модель замкненої скорегованої САД концентрату на основі групового дозатору

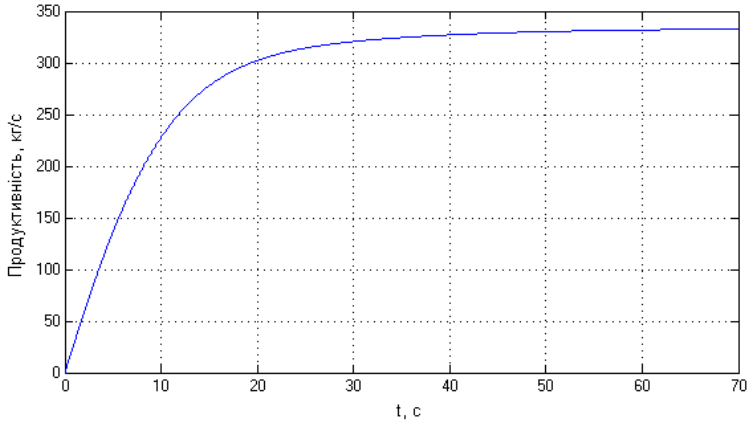


Рисунок 4.20 – Графік перехідного процесу в скорегованій САД концентрату

Для подачі аглоруди з двох витратних бункерів на збірний конвеєр №47 застосовується груповий дозувальний комплекс, до складу якого входять два стрічкові дозатори типу ДНЛ-1. Кожен із них обладнаний окремою системою регулювання продуктивності, що забезпечує підтримання заданої витрати матеріалу та стабільність технологічного процесу. Структурну модель автоматизованої системи керування продуктивністю одного стрічкового дозатора аглоруди, у якій використовується ПІ-регулятор для коригування режиму роботи, подано на рис.4.21.

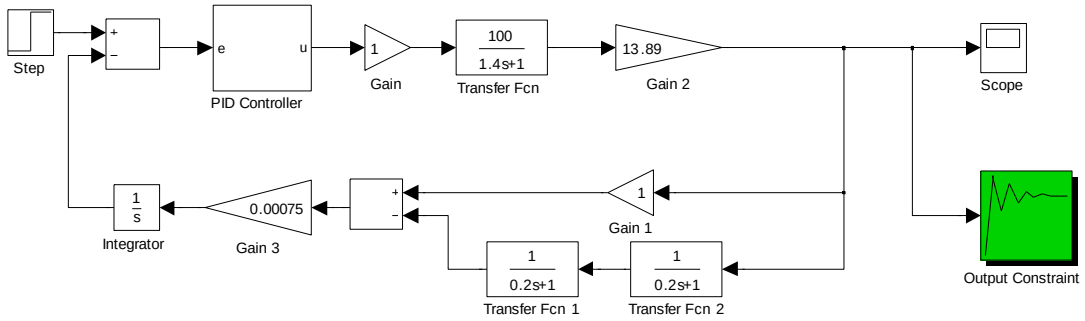


Рисунок 4.21 – Модель скорегованої САК продуктивністю дозатору аглоруди

Графік зміни вихідної величини в перехідному режимі, сформований за допомогою блоку Scope, представлено на рис.4.22. Для визначення раціональних налаштувань ПІ-регулятора під час синтезу системи автоматичного керування дозатором було застосовано елемент Output Constraint, який дав змогу підібрати параметри регулятора відповідно до заданих вимог.

Аналіз кривої, отриманої в результаті моделювання, та графіка, побудованого на основі аналітичного розрахунку системи автоматичного керування продуктивністю, підтверджує коректність виконаного синтезу. Досліджувана система забезпечує точне підтримання заданого значення миттєвої

витрати аглоруди на рівні 66,6 кг/с, а перехідний процес характеризується стійким аперіодичним перебігом і незначним перевищенням усталеного значення.

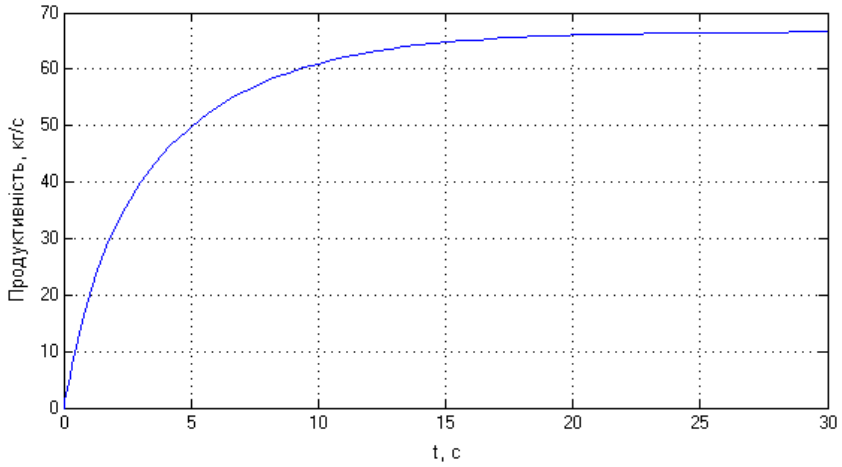


Рисунок 4.22 – Графік перехідного процесу в скорегованій САД аглоруди

Для дослідження роботи групового дозатора аглоруди на основі моделі, поданої на рис.4.20, сформуємо окрему підсистему шляхом використання блоку Subsystem. Вплив затримки, що виникає під час переміщення матеріалу від витратних бункерів до зони дозування, врахуємо за допомогою блоків Transport Delay, які дозволяють адекватно відтворити часові характеристики транспортного процесу. У результаті побудови підсистеми буде отримано модель групового дозатора, структура якої наведена на рис.4.23.

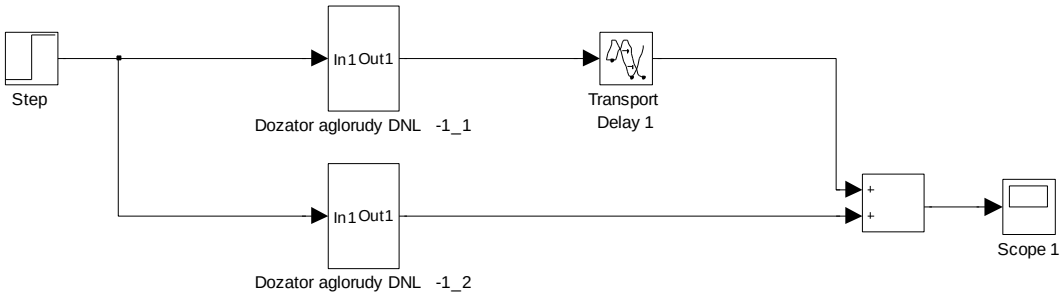


Рисунок 4.23 – Модель групового дозатору аглоруди

На рис.4.24 представлено криву перехідного процесу, отриману під час дослідження роботи групового дозатора аглоруди. До його складу входять два стрічкові дозатори типу ДНЛ-1, встановлені послідовно на відстані 5 м між собою. Дослідження проводилося за умови подачі на перетворювачі частоти електроприводів дозаторів керуючого сигналу величиною 20 мА, що забезпечує

заданий режим роботи обладнання та дає змогу оцінити динамічні характеристики системи дозування.

Для подачі вапняку із двох витратних бункерів на збірний конвеєр №47 застосовується груповий дозувальний комплекс, до складу якого входять два стрічкові дозатори моделі 7422 ДН 100-150-3. Кожен із них оснащений окремою системою автоматичного регулювання продуктивності, що дозволяє підтримувати необхідну витрату матеріалу та забезпечувати стабільність процесу дозування в умовах зміни технологічного навантаження.

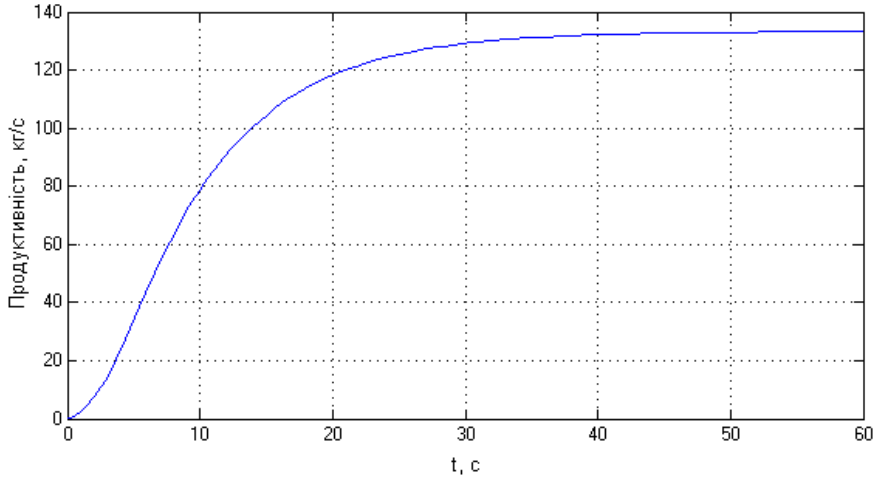


Рисунок 4.24 – Графік перехідного процесу в груповому дозаторі аглоруди

Модель автоматизованої системи регулювання продуктивності стрічкового дозатора вапняку 7422 ДН 100-150-3, у складі якої використано ПІ-регулятор, представлена на рис.4.25. Дана модель дає можливість дослідити динамічні характеристики системи та оцінити якість підтримання заданої витрати матеріалу. Графічне відображення перехідного процесу, отримане під час моделювання системи автоматичного дозування вапняку, наведено на рис.4.26.

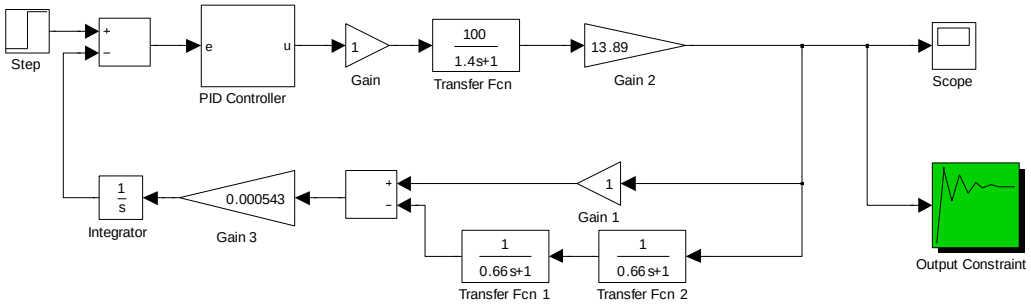


Рисунок 4.25 – Модель скорегованої системи автоматичного дозування вапняку

Порівняння побудованого графіка з аналогічною залежністю, отриманою за результатами аналітичних розрахунків (рис.4.12), свідчить про повний збіг їхньої форми та характеру зміни параметрів. Це підтверджує коректність виконаного моделювання і достовірність одержаних результатів.

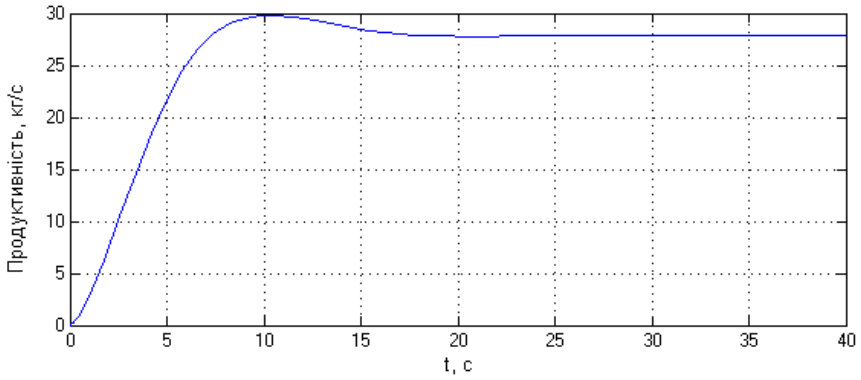


Рисунок 4.26 – Графік перехідного процесу в САД вапняку

Для відтворення роботи групового дозатора вапняку на основі моделі, представленої на рис.4.25, було сформовано окрему підсистему із застосуванням блоку Subsystem. Затримку, що виникає під час переміщення матеріалу між двома витратними бункерами та обумовлена тривалістю його транспортування, реалізовано за допомогою елемента Transport Delay. У результаті побудована модель групового дозатора набула структури, наведеної на рис.4.27.

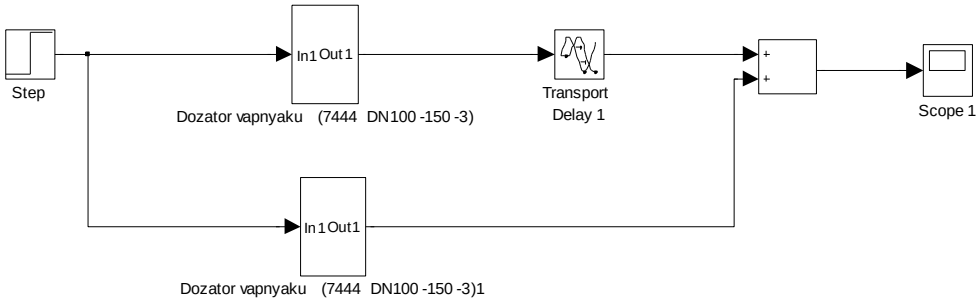


Рисунок 4.27 – Модель групового дозатору вапняку

На рис.4.28 представлено криву зміни параметрів перехідного режиму роботи групового дозатора вапняку, до складу якого входять два стрічкові дозатори типу 7422 ДН 100-150-3, встановлені з інтервалом 5 м. Дослідження виконувалося за умови подачі на частотні перетворювачі приводів дозаторів керуючого сигналу величиною 20 мА. Отримані результати дають змогу оцінити динамічні характеристики системи та якість регулювання подачі матеріалу.

Для подавання коксу з двох витратних бункерів на збірний конвеєр №47 застосовується груповий дозувальний комплекс, сформований із двох стрічкових дозаторів моделі 7422 ДН 100-50-3. Кожен із них обладнаний автономною системою регулювання продуктивності, що забезпечує підтримання необхідної витрати матеріалу та стабільність технологічного процесу.

Структурну модель автоматизованої системи керування продуктивністю окремого стрічкового дозатора коксу з використанням ПІ-регулятора наведено на рис.4.29. Вона відображає взаємодію основних елементів контуру регулювання та принцип формування керуючого впливу. Результати моделювання динаміки роботи системи у вигляді графіка перехідного процесу подано на рис.4.30.

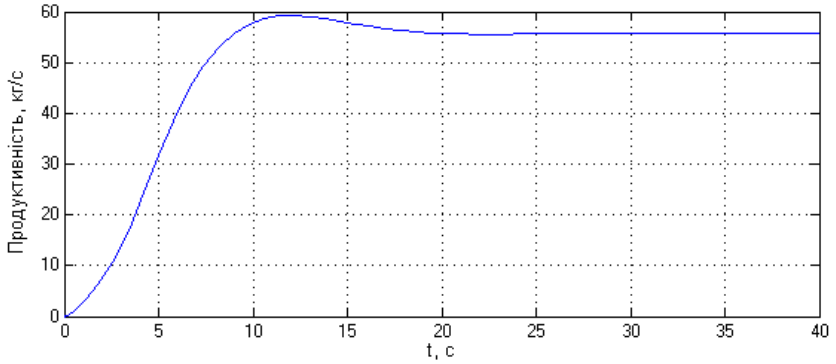


Рисунок 4.28 – Графік перехідного процесу в груповому дозаторі вапняку

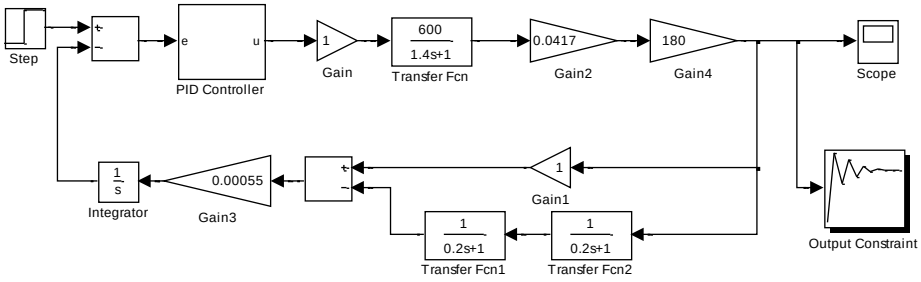


Рисунок 4.29 – Модель скорегованої системи автоматичного дозування коксу

Порівняння побудованої графічної залежності з результатами, отриманими за допомогою аналітичного методу, свідчить про повний збіг їх характеристик. Це підтверджує коректність проведених обчислень і достовірність математичної моделі замкненої системи автоматизованого дозування коксу, а також засвідчує правильність визначення її динамічних параметрів.

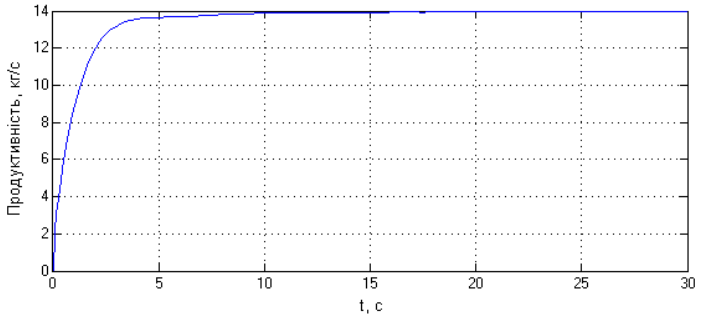


Рисунок 4.30 – Графік перехідного процесу в САД коксу

Оскільки подача коксу виконується за допомогою двох стрічкових дозаторів типу 7422 ДН 100-50-3, для відтворення їх спільної роботи в моделі доцільно сформувати окрему підсистему на базі блоку Subsystem. Затримку, що виникає під час переміщення матеріалу між витратними бункерами, враховано шляхом використання елемента Transport Delay, який дає змогу адекватно описати динаміку транспортного процесу. У результаті побудована модель групового дозатора коксу набуває структури, представленої на рис.4.31.

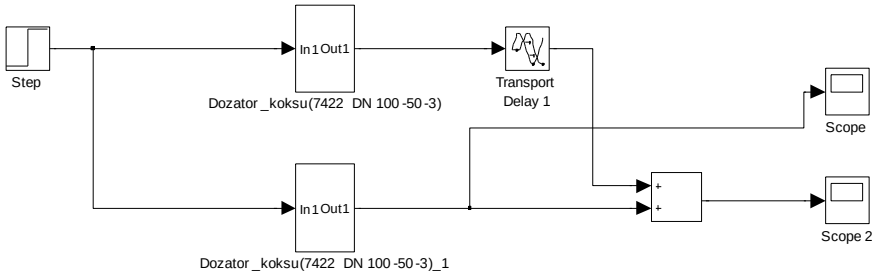


Рисунок 4.31 – Модель групового дозатору коксу

Графічне відображення динаміки перехідного режиму роботи групового дозатора коксу, до складу якого входять два стрічкові дозатори типу 7422 ДН 100-50-3, встановлені з інтервалом 5 м, при надходженні на перетворювачі частоти електроприводів керуючого сигналу величиною 20 мА, представлено на рис.4.32.

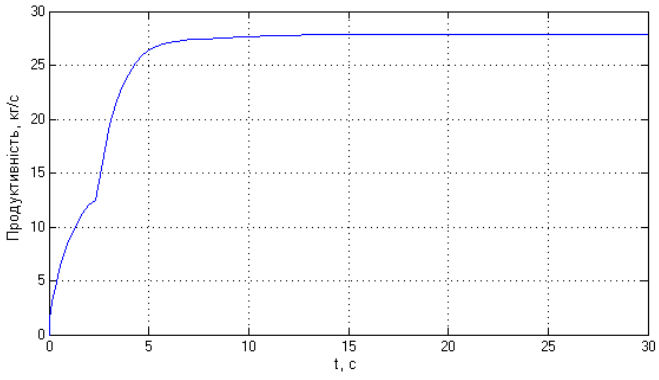


Рисунок 4.32 – Графік перехідного процесу в груповому дозаторі коксу

На підставі результатів аналізу, наведених у попередньому підрозділі, структурну модель розробленої системи автоматизованого дозування складових шихти доцільно представити у вигляді схеми, показаної на рис.4.33.

У запропонованій моделі блок «Grup dozator koncentrata» реалізує математичний опис, наведений на рис.4.19, тоді як блоку «Grup dozator aglorudy» відповідає модель, представлена на рис.4.23. Блоки «Grup dozator vapnyaka» та «Grup dozator koksu» відтворюють роботу систем дозування вапняку і коксу відповідно до схем, зображених на рис.4.27 та 4.29. Елементи «Transport Delay», «Transport Delay 1» і «Transport Delay 2» призначені для врахування часових затримок, що виникають під час транспортування концентрату, аглоруди та вапняку від точок їх вивантаження на збірний конвеєр №47 до місця встановлення конвеєрних ваг, де здійснюється контроль подачі матеріалів.

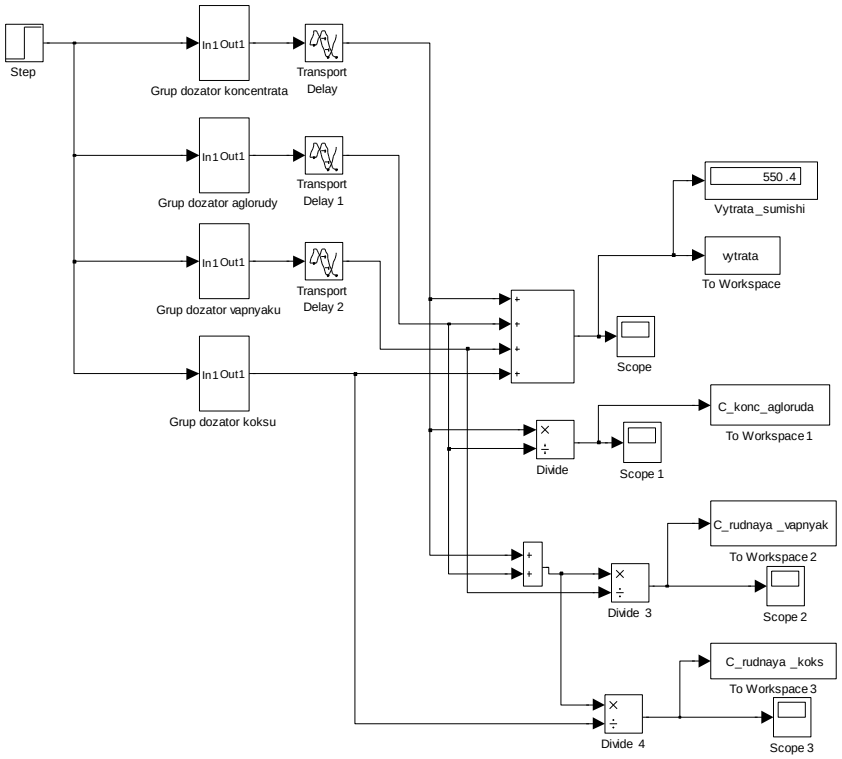


Рисунок 4.33 – Модель системи керування дозаторами на аглофабриці ГЗК

Для визначення ефективності функціонування системи автоматизованого дозування складових шихти необхідно дослідити характеристики перехідних процесів, які відображають зміну співвідношень між потоками матеріалів, що подаються в технологічний процес. На рис.4.34 представлено залежність співвідношення витрат концентрату та аглоруди, на рис.4.35 показано зміну

співвідношення між рудною складовою шихти (концентрат і аглоруда) та вапняком, а на рис.4.36 наведено перехідний процес для співвідношення витрат рудної частини суміші й коксу.

На рис.4.37 відображено перехідний процес подачі всіх основних компонентів шихти, а саме концентрату, аглоруди, вапняку та коксу, для розробленої системи автоматизованого дозування, адаптованої до умов роботи агломераційного виробництва ГЗК ФОК. Аналіз наведених залежностей дозволяє оцінити динамічні властивості системи та її здатність забезпечувати необхідну точність підтримання заданих співвідношень компонентів.

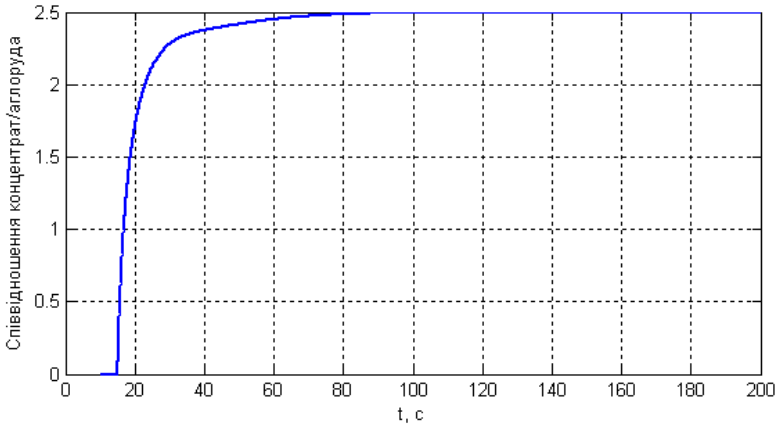


Рисунок 4.34 – Графік перехідного процесу співвідношення між витратою концентрату та аглоруди

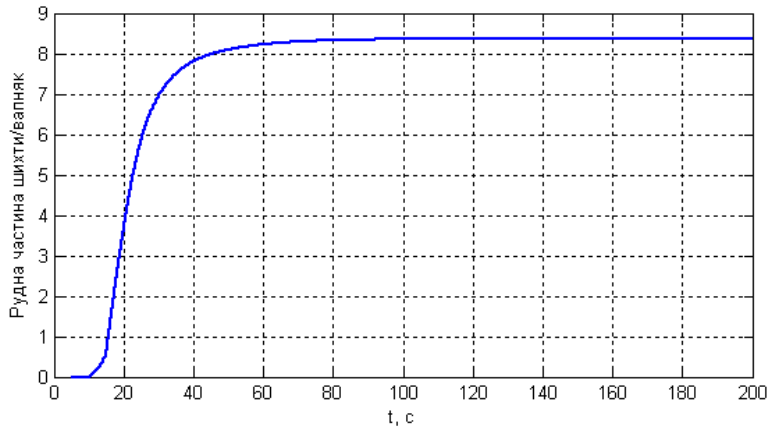


Рисунок 4.35 – Графік перехідного процесу співвідношення між витратою рудної частини шихти та вапняком

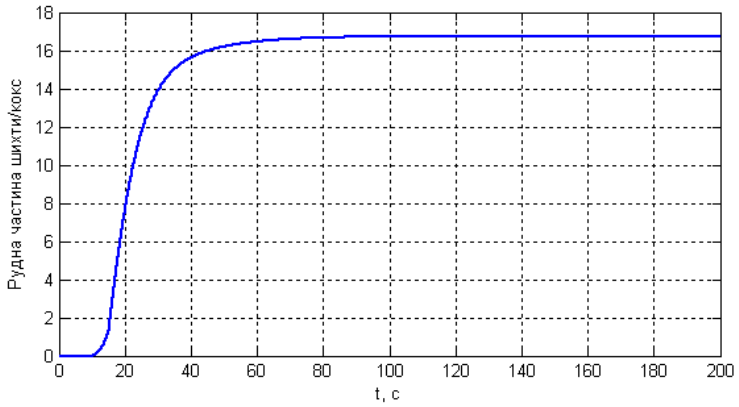


Рисунок 4.36 – Графік перехідного процесу співвідношення між витратою рудної частини шихти та коксом

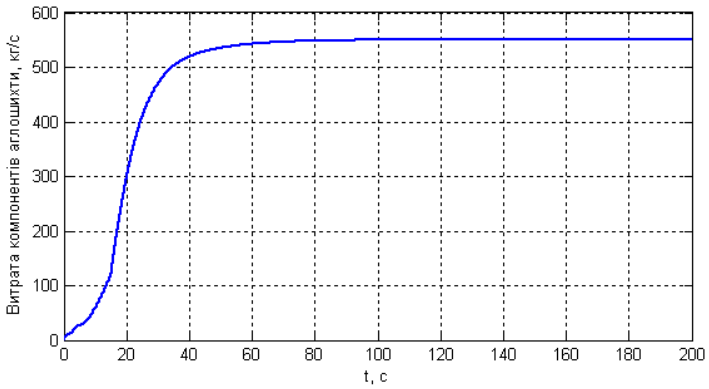


Рисунок 4.37 – Графік перехідного процесу за витратою компонентів агломераційної шихти

За результатами аналізу графічних залежностей, наведених на рис.4.34–4.37, встановлено, що спроєктована та досліджена методом комп'ютерного моделювання система автоматизованого дозування шихтових матеріалів для аглофабрики гірничо-збагачувального комбінату забезпечує високу точність підтримання необхідних пропорцій між окремими компонентами. Функціонування системи дає змогу стабільно витримувати задані співвідношення витрат концентрату й аглоруди (2,5:1), рудної складової та вапняку (8,4:1), а також рудної частини шихти й коксового дріб'язку (16,7:1).

Дослідження динамічних характеристик показало, що час встановлення режиму як за співвідношеннями витрат матеріалів, так і за сумарною продуктивністю становить приблизно 60 с. У роботі системи спостерігається незначна затримка транспортування тривалістю близько 10 с, яка обумовлена переміщенням концентрату від вагового обладнання до точки розвантаження

конвеєрної стрічки. Таким чином, результати проведеного моделювання підтверджують відповідність розробленої системи автоматизації основним технологічним вимогам до процесів дозування шихти та свідчать про доцільність її практичного застосування на аглофабриці ГЗК.

ВИСНОВКИ

Випускна кваліфікаційна робота присвячена створенню автоматизованої системи керування процесом дозування компонентів шихти. Основною метою дослідження є підвищення точності подачі матеріалів шляхом зменшення різниці між фактичною та заданою масою дозування, а також підтримання необхідного співвідношення складових суміші, що сприяє покращенню якісних характеристик агломерату.

У процесі виконання роботи проведено дослідження технології дозування, проаналізовано наявне обладнання та сучасні засоби автоматизації. На основі отриманих результатів розроблено технічне завдання для створення автоматизованої системи керування технологічним процесом дозування, а також визначено вимоги до математичних моделей, технічного оснащення та програмного забезпечення системи.

Розроблена система повинна забезпечувати необхідну продуктивність дільниці дозування, підтримувати стабільний вміст заліза в шихті за рахунок регулювання подачі аглоруди відповідно до витрати концентрату, а також контролювати показник основності суміші шляхом зміни витрат вапняку і коксу залежно від кількості рудної складової. Для подачі концентрату запропоновано використання групового дозатора на базі дискових живильників ДТ-200, тоді як для аглоруди, вапняку та коксу рекомендовано застосовувати індивідуальні дозувальні пристрої, оснащені контуром зворотного зв’язку за продуктивністю.

Для оцінювання ефективності функціонування окремого дозатора в автоматизованій системі керування процесом дозування доцільно застосовувати показник середньоквадратичного відхилення його продуктивності. Водночас якість роботи всієї системи автоматизованого дозування найбільш об’єктивно характеризується середньоквадратичним відхиленням коефіцієнта співвідношення витрат компонентів, що дозволяє враховувати точність формування заданого складу шихти.

У ході виконання роботи було розроблено та досліджено систему координованого керування процесом подачі всіх складових шихти, що забезпечує стабільність технологічного процесу та підвищує точність дозування матеріалів.

Проведено вибір і технічне обґрунтування комплексу засобів автоматизації дільниці дозування. Для реалізації алгоритмів керування обрано промисловий програмований контролер TSX Premium виробництва Schneider Electric, який характеризується високою надійністю та широкими функціональними можливостями. Під час модернізації дільниці запропоновано замінити конвеєрні ваги «Єрмак», що використовуються для контролю загальної витрати концентрату та рудної складової шихти, на сучасні вагові системи Milltronics MSI компанії Siemens, які відзначаються підвищеною точністю вимірювання та кращими експлуатаційними характеристиками.

З використанням пакета Simulink середовища MATLAB виконано моделювання роботи окремих дозаторів і всієї системи автоматичного дозування компонентів шихти. Отримані результати підтвердили коректність прийнятих технічних рішень та адекватність проведених розрахунків.

Таким чином, розроблена система автоматизованого керування дозаторами відповідає сучасним вимогам до засобів промислової автоматизації, забезпечує необхідні показники точності та надійності роботи і може бути рекомендована до впровадження на аглофабриках гірничо-збагачувальних комбінатів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Білецький В. С., Олійник Т. А., Смирнов В. О., Скляр Л. В. Основи техніки та технології збагачення корисних копалин : навч. посіб. Київ : Ліра-К, 2020. 634 с.

2. Білецький В. С., Смирнов В. О. Технологія збагачення корисних копалин : навч. посіб. Донецьк : Східний видавничий дім, 2009. 296 с. Розділи з підготовки та окускування залізорудної сировини.

3. Руденко М. Р. Металургія чорних металів. Розділ 1. Агломерація залізорудної сировини : навч. посіб. Кам'янське : ДДТУ, 2018. 126 с.

4. Коротич В. І. Агломерація рудних матеріалів : підручник. Дніпропетровськ : НМетАУ, 2009. 476 с.

5. Коротич В. І., Фролов Ю. А., Бездежський Г. Н. Теорія і технологія агломераційного виробництва : монографія. Дніпропетровськ : Системні технології, 2007. 498 с.

6. Момот В.Ю. Автоматизований електропривод типових виробничих механізмів. Частина 1. Автоматизований електропривод механізмів безперервної дії: Навчальний посібник / В.Ю. Момот, А.А. Видмиш. – Вінниця: ВДТУ, 1998. – 129 с.

7. Бойко М. М., Мудренко В. В. Окускування залізних руд для доменного виробництва : навч. посіб. Дніпро : НМетАУ, 2018. 210 с.

8. Попович М.Г. Теорія автоматичного керування: Підручник / М.Г. Попович, О.В. Ковальчук. – К.: Либідь, 1997. – 544 с.

9. Цюцюра С. В., Цюцюра М. І. Автоматизовані системи керування технологічними процесами : навч. посіб. Київ : КНУБА, 2020. 344 с.

10. Сигов А.А. Агломерационный процесс / А.А. Сигов, В.А. Шурхал. – К.: Техніка, 1969. – 232 с.

11. Теория и практика автоматизации агломерационного производства : [сб. науч. трудов / науч. ред. Н.В. Федоровский]. – К. : Институт автоматики, 1971. – 216 с.

12. Бойко В. С., Ковальчук О. В. Автоматизація технологічних процесів і виробництв : навч. посіб. Київ : Ліра-К, 2021. 392 с.

13. Бендера І. М. Автоматизація технологічних процесів у промисловості : навч. посіб. Київ : Центр учбової літератури, 2019. 304 с.

14. Каплун В. В., Коваленко Ю. О. Мікропроцесорні засоби автоматизації : навч. посіб. Київ : Центр учбової літератури, 2021. 352 с.

15. Попович М. Г., Лозинський О. Ю. Теорія електропривода : підручник. Київ : Либідь, 2005. 680 с.

16. Клочко В. В., Кривенко О. В. Автоматизований електропривод машин та установок : навч. посіб. Вінниця : ВНТУ, 2015. 180 с.

17. Садовий О. В., Сохіна Ю. В., Бражник М. М. Частотно-регульований електропривод : навч. посіб. Кременчук : КрНУ, 2020. 242 с.