

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

«Допущено до захисту»

Зав. кафедри АВП

к.т.н., доцент

_____Дідик О.К.

«__» _____ 2022 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої освіти

на тему

**«Модернізація та дослідження системи керування
процесом магнітної сепарації залізної руди»**

**«Modernization and research of the control system of the
process of magnetic separation of iron ore»**

Виконав здобувач вищої освіти II курсу
групи АК-21М (1,4)

151 «Автоматизація та комп'ютерно-
інтегровані технології»

_____Хлебніков М.В.

«__» _____ 2022 р.

Керівник роботи

к.т.н., доцент

_____Березюк І.А.

«__» _____ 2022 р.

Рецензент

_____ 2022 р.
«__» _____

м. Кропивницький

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень

Вступ

1 Призначення та область застосування системи керування процесом магнітної сепарації

1.1 Опис технологічного процесу магнітної сепарації

1.2 Магнітний сепаратор як технологічний об'єкт керування

1.3 Параметри керування магнітною сепарацією та існуючі системи

1.4 Технічне завдання на створення САК магнітним сепаратором

2 Склад системи автоматичного керування магнітним сепаратором

2.1 Опис структури комплексу технічних засобів АСКТП магнітної сепарації

2.2 Вибір датчиків та первинних перетворювачів

2.2.1 МЕР

2.2.2 Ультразвуковий витратомір рідини US-800

2.3 Вибір та обґрунтування промислового контролера та модулів введення-виведення

3 Проектування та дослідження пристрою аналізу пульпи на вміст магнітного заліза

3.1 Характеристика області використання пристрою

3.2 Конструкція пристрою для визначення вмісту магнітного заліза в пульпі

3.3 Фізичні основи теплового режиму електромагнітної системи

4 Розрахунки та експериментальні матеріали, що підтверджують працездатність виробу

4.1 Побудова функціональної схеми системи

4.2 Структурна схема САР

4.3 Визначення передаточних функцій розімкнутої та замкнутої систем та характеристичного рівняння

4.4 Побудова АФЧХ, ЛАЧХ та ЛФЧХ розімкнутої системи

4.4.1 Побудова АФЧХ розімкнутої системи

4.4.2 Побудова ЛАЧХ розімкнутої системи

4.4.3 Побудова ЛФЧХ розімкнутої системи

4.5 Побудова дійсної частотної характеристики замкнутої системи

4.6 Визначення стійкості замкнутої. Побудова області стійкості

4.7 Оцінка якості регулювання замкнутої САР по ЛАЧХ розімкнутої системи

4.8 Побудова перехідного процесу замкнутої системи

4.9 Визначення прямих показників якості САР за графіком перехідного процесу. Визначення часу регулювання системи як вимоги до САР для її синтезу

4.10 Побудова бажаної ЛАЧХ розімкнутої оптимальної за швидкодією системи по вимогам, які пред'явлені до неї

4.11 Синтез коректуючого пристрою САР за логарифмічними частотними характеристиками

4.12 Побудова кривої перехідного процесу синтезованої САР

4.13 Визначення прямих показників якості синтезованої САР

Висновок.....

Література.....

Додаток А. Охорона праці.....

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АСР – автоматична система регулювання

ВМС – волога магнітна сепарація

ВСБПМ – високоселективний барабанний постійний мокрий

ДБН – державні будівельні норми;

КЗпП – Кодекс законів про працю України;

МС – магнітний сепаратор

НПАОП – нормативно-правові акти про охорону праці;

ОП – охорона праці;

ПУЕ – правила улаштування електроустановок.

САК – система автоматичного керування

СанПіН – санітарні правила і норми;

САР – система автоматичного регулювання

ССБП – система стандартів безпеки праці;

ВСТУП

Актуальність теми. Широке розповсюдження виробів з металу у наші дні сприяє зростанню витрат залізних руд, що, в свою чергу, призводить до зниження середнього вмісту заліза у видобутих рудах. За допомогою технологій глибокого збагачення з'явилася можливість залучити до видобутку родовища бідного залізняку та вироблення якісних залізрудних концентратів. Але незважаючи на це, якість сировини все одно постійно знижується: за останню чверть сторіччя вміст заліза у рудах зменшився у 1,3 рази [1].

В даний час більше 85% видобутих руд підлягає збагаченню. Розвиток цього процесу характеризується підвищенням інтенсивності як основних, так і допоміжних процесів по причині погіршення якості залізних руд, та зростаючими вимогами до якості залізрудних концентратів.

Одним із найпоширеніших методів вирішення цієї проблеми являється технологія мокрої магнітної сепарації. За допомогою найсучасніших сепараторів типу ВСБПМ (високоселективний барабанний постійний мокрий), а також при відповідному управлінні процесами сепарації, можна отримати високоякісні концентрати одночасно знизивши їхню собівартість.

Метою випускної кваліфікаційної роботи є підвищення продуктивності процесу магнітної сепарації шляхом дослідження та модернізації існуючих систем керування подачею води у технологічний агрегат.

Для досягнення цієї **мети** необхідно вирішити такі завдання:

- провести порівняльний аналіз існуючих систем керування;
- розробити структурну та функціональну схеми систем автоматичного керування;
- вибрати та обґрунтувати структури системи управління та комплексу технічних засобів;
- перевірити систему на працездатність.

Об’єктом дослідження є процес вологої магнітної сепарації.

Предметом дослідження є система автоматичного керування процесом магнітної сепарації.

Методи дослідження. У ході роботи над випускною кваліфікаційною роботою використовувалися такі методи досліджень:

- хімічні, магнітні, гравітаційні методи аналізу вихідних матеріалів та продуктів поділу;
- моделювання процесу сепарації в лабораторних та промислових умов;
- дослідження математичних моделей процесів високоселективної магнітної сепарації у сильному полі.

Експериментальні дослідження проводились з використанням сучасної вимірювальної техніки та обладнання з обробкою отриманих результатів за допомогою сучасних засобів ЕОМ. Теоретичні дослідження проводились з використанням сучасних моделюючих та обчислювальних програмних оболонок.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в удосконаленні пристрою визначення вмісту магнітного заліза в пульпі, шляхом оптимального вибору параметрів електромагнітної котушки; підвищенням напруженості магнітного поля; стабілізацією сили струму електромагнітної котушки.

Практичне значення одержаних результатів полягає в обґрунтуванні конструкції пристрою визначення вмісту магнітного заліза та розробці системи керування процесом магнітної сепарації і можливості їх використання в промисловості.

Апробація результатів дослідження. Основні результати роботи доповідалися на LVI науково-технічній конференції здобувачів вищої освіти (Кропивницький, 12 травня 2022р.). За результатами конференції опубліковані тези доповіді «Модернізація та дослідження системи керування процесом магнітної сепарації залізної руди» у збірнику тез доповідей, стор.133-135.

1 Призначення та область застосування системи керування процесом магнітної сепарації

1.1 Опис технологічного процесу магнітної сепарації

Процес магнітної сепарації (ПМС) – це процес розподілу механічних сумішей частинок корисних копалин з різними електромагнітними властивостями під впливом сил електромагнітних полів, створюваних у робочих просторах магнітних сепараторів (МС) [1]. Електромагнітні поля здатні створювати активні сили, які витягують частинки відповідних мінералів із загального масопотоку або утримують їх на певній поверхні, з якою конкуруючими силами F_k видаляються інші частинки, або здатні «пізнавати» ці частинки в процесах автоматичного сортування.

За областями застосування ПМС поділяються на три групи: підготовчі, основні та допоміжні (рис. 1.1).

До підготовчих відносять процеси магнітного уловлювання металобрухту, намагнічування та розмагнічування, процеси управління магнітною агрегацією (селективна флокуляція та ін.). Згущення або зневоднення в магнітному полі тощо належать до допоміжних процесів збагачення. Область застосування цих методів часто виходить за межі гірничої справи. Видалення залізних та інших слабомагнітних домішок магнітними методами проводиться у скляній, абразивній, керамічній, харчовій, фармацевтичній та інших галузях промисловості, при переробці твердих побутових відходів, скрапових металів, будівельних матеріалів, теплоносіїв та ін.



Рисунок 1.1 – Класифікація магнітних методів збагачення.

ПМС та технологічні пристрої, які здійснюють ці процеси, є складними об'єктами управління з безліччю вхідних та вихідних величин або параметрів.

У ПМС **вхідними величинами** являються потоки сировини або енергії, що надходять у апарат, та їх характеристики: крупність матеріалу, що йде на дроблення, вміст корисного компонента в продукті, що проходить збагачення та ін.

Вихідними величинами називаються потоки речовини або енергії, що виходять з апарату, та їх характеристики. У ПМС це може бути крупність матеріалу після дроблення, його кількість, вміст корисного компонента в продуктах збагачення та ін.

Також, для характеристики технологічного апарату або комплексу із сукупності вхідних та вихідних параметрів треба виділити керовані величини, керуючі та збурюючі впливи та перешкоди.

Керована величина – це вихідна фізична величина або параметр керованого об'єкта, які повинні підтримуватись на певному заданому рівні або змінюватись за певним заданим законом під час функціонування об'єкта.

Керуючий вплив – це матеріальний або енергетичний вхідний потік, завдяки змінам якого можна підтримувати керовану величину на заданому рівні або змінювати її за заданим законом. Для МС керуючим впливом може бути кількість руди, що підлягає сепарації, а для ділянки флотаційного процесу збагачення таким керуючим впливом можуть бути витрати реагентів в процес.

Збурюючий вплив – це вхідний матеріальний потік або вхідна фізична величина, що істотно впливають на керовану величину, та які неможливо оперативно контролювати і змінювати. Для ПМС таким впливом може бути вміст корисних компонентів у вхідній сировині.

Перешкоди – це збурюючі впливи, що змінюються випадковим чином у часі, впливають на вихідні показники та не можуть бути проконтрольовані. Вони можуть бути відомими, але врахувати їх у процесі розробки систем керування практично неможливо. У кожному конкретному випадку необхідно уважно проаналізувати характер технологічного процесу та особливості пристрою технологічного апарату, в якому він протікає, щоб знати можливі причини і характер виникнення перешкод.

У табл. 1.1 приведені характеристики деяких технологічних процесів збагачувальних фабрик як керованих об'єктів.

Таблиця 1.1

Характеристика технологічних процесів збагачувальних фабрик як керованих об'єктів

№: п./п.	Тех. процес	Кер. величини	Кер. вплив	Обур. вплив	Перешкоди
1.	Дроблення	Потужність електроприводу, яка споживається при дробленні; рівень матеріалу в пащі дробарки	Продуктивність дробарки за вихідною рудою; частота коливачь рухомого елемента дробарки; ширина розвантажувальної щілини	Гранулометричний склад та фізико-механічні властивості вихідної руди	Знос футерування дробарки
2.	Подрібнення у замкнутому циклі	Густина та гранулометричний склад зливу класифікуючого апарату; потужність, що споживається електроприводом млина; амплітуда і частота шумового сигналу, що виробляється тілами, що мелють, в зоні падіння; величина циркуляційного навантаження циклу; рівень пульпи у зумпфі насоса гідроциклону	Продуктивність циклу за вихідною рудою; витрата води до млина та класифікуючого апарату; зміна частоти обертання насоса гідроциклону	Гранулометричний склад та фізико-механічні властивості вихідної руди	Зношування тіл, що мелють, футерування барабана і піскової насадки гідроциклону
3.	Флотація	Масова частка корисного компонента в концентраті та відходах; вилучення корисного компонента в концентрат	Витрата реагентів на фронті флотації; рівні пульпи та піни у флотаційних машинах; витрата повітря у флотомашини	Об'ємна витрата, щільність та гранулометричний склад пульпи, що надходить на флотацію; масова частка мінералу в руді та його флотоуваність	Зношування робочих органів флотомашин, температура пульпи
4.	Магнітна сепарація	Масова частка заліза в концентраті та відходах	Витрата води у ванну сепаратора; частота обертання барабана	Об'ємна витрата, щільність та гранулометричний склад пульпи, що надходить на сепарацію; масова	

			сепаратора;напр уженість магнітного поля в робочій зоні сепаратора; щільність пульпи, що надходить на сепарацію	частка заліза у руді; ступінь розкриття рудних мінералів	
5.	Згущення	Густина продукту, що згущує; густина зливу; рівні зони осадження	Витрата коагулянту; площа розвантажувальн ого отвору згущувача	Об'ємна витрата пульпи в згущувач, густина пульпи в живленні, її лужність, гранулометрични й склад та температура	Швидкість ферми згущувача
6.	Фільтрація	Продуктивність вакуум-фільтра по кеку та вологість кеку	Швидкість обертання дисків вакуум-фільтру та величина вакууму	Об'ємна витрата пульпи в живленні вакуум-фільтра, її щільність, гранулометрични й склад, температура та в'язкість	Питомий опір фільтрувальн ої тканини
7.	Сушка	Вологість висушеного продукту; температура газів, що відходять; температура в топці та у певному перерізі барабана	Витрати палива; витрати вторинного повітря; витрата матеріалу в сушильний агрегат	Вологість матеріалу, що надходить, його температури, гранулометрични й склад температури первинного і вторинного повітря.	Зміна теплоємності палива та матеріалу

Розглянемо більш детально процес вологої магнітної сепарації (ПВМС). Цей метод сепарації характеризується вилученням або відхиленням магнітних частинок з рухомого потоку матеріалу. Даний спосіб реалізується в сепараторах (барабанних, валкових, роликових та ін.) з нижньою або бічною подачею вихідного матеріалу. Частіше за все використовуються барабанні сепаратори; роликові та валкові сепаратори застосовуються рідше – для збагачення слабомагнітних руд. Під час сепарації, вихідні частинки транспортуються в зону поділу, обмежену областю дії магнітної системи. Немагнітні частинки рухаються під барабаном сепаратора, не змінюючи траєкторію під дією магнітної сили, і потрапляють до свого приймача.

Магнітні частинки витягуються з вихідного потоку матеріалу, притягуються до магнітної системи та транспортуються барабаном до краю магнітної системи, після чого вони відриваються та потрапляють у свій приймач.

На рис. 1.2 та 1.3 представлені принципова схема ПВМС та технологічна схема підприємства, на якому використовується даний метод збагачення.

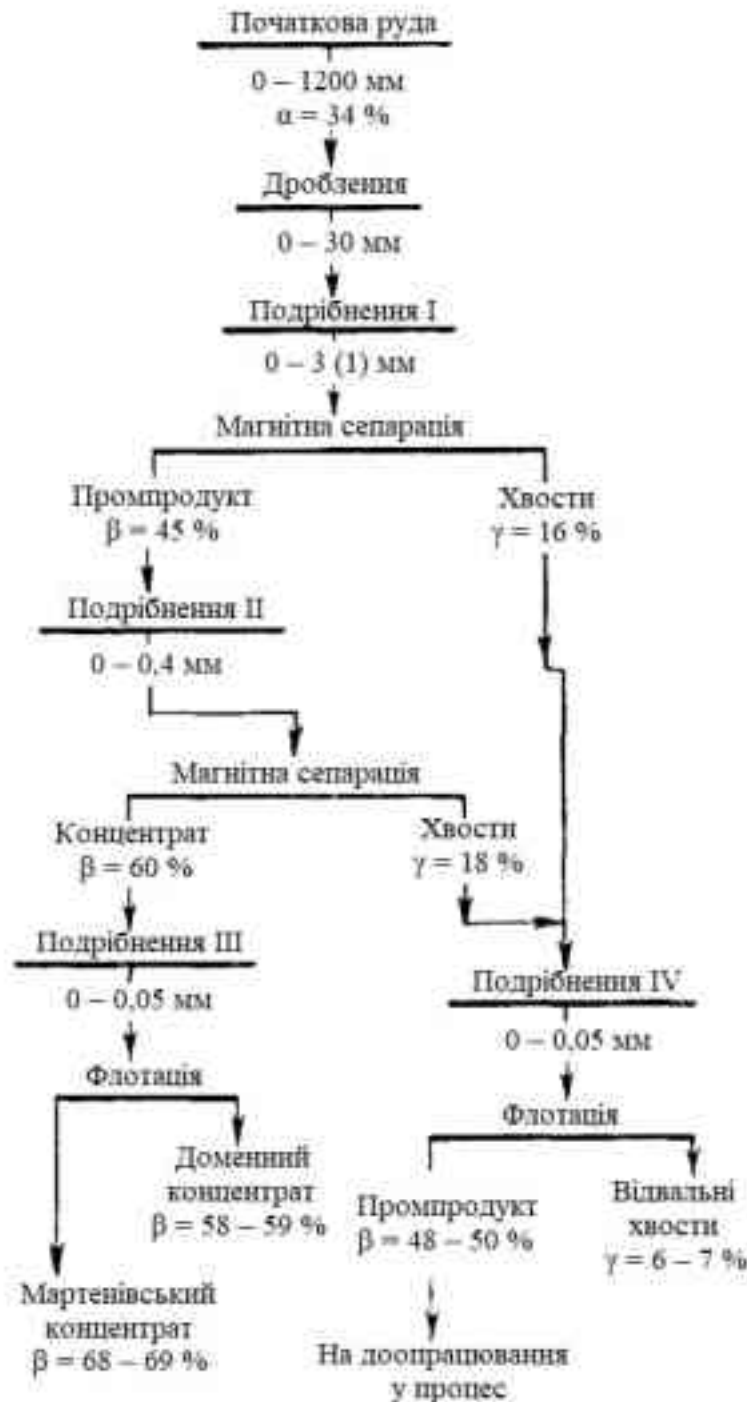


Рисунок 1.2 – Принципова технологічна схема ПВМС.

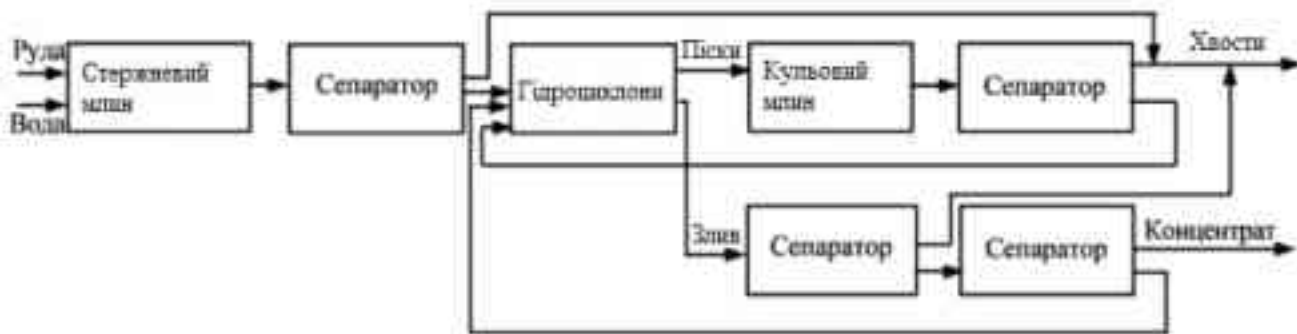


Рисунок 1.3 – Технологічна схема підприємства, яке використовує ПВМС.

Як видно з приведених схем, сировина проходить декілька циклів збагачення під час цього процесу.

1.2 Магнітний сепаратор як технологічний об'єкт керування

Магнітна сепарація заснована на відмінності в магнітних властивостях компонентів вихідної сировини, що підлягають поділу. Сепарація здійснюється у МС, особливістю яких є наявність у їхній робочій зоні поділу магнітного поля. При русі продукту, що розділяється, через магнітне поле сепаратора під впливом магнітної сили частинки з різними магнітними властивостями рухаються по відмінним один від одного траєкторіям, що дозволяє магнітні і немагнітні частинки виділяти у свої продукти. На рис. 1.4 представлено магнітний сепаратор типу ПБМ 90х250, який найчастіше використовується в даному технологічному процесі.

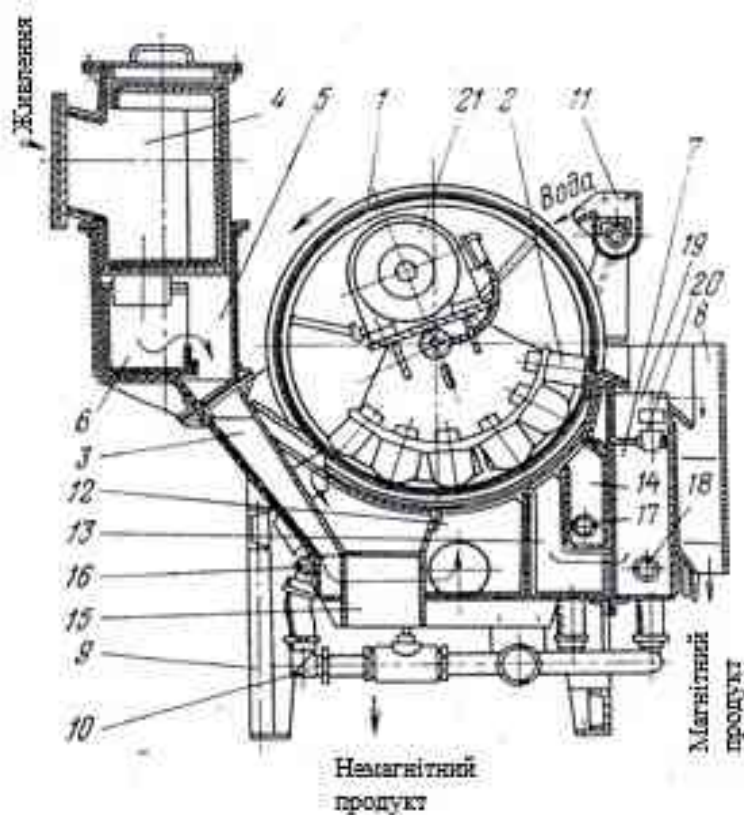


Рисунок 1.4 – Сепаратор типу ПБМ 90х250: 1 – барабан; 2 – магнітна система; 3 – ванна; 4 і 8 – завантажувальна та розвантажувальна коробки відповідно; 5 – розподільна коробка; 6 – заспокійник; 7 – приймальна коробка; 9 – рама; 10 – трубопровід; 11, 16-18 – бризкала; 12-14 – відділення основного збагачення, перечистки та промивки концентрату відповідно; 15 – хвостові патрубки; 19 – відсіки приймальної коробки; 20 – пробки; 21 – привод

Крім магнітної сили на частинки матеріалу, що переміщуються через робочу зону сепаратора, впливають механічні сили, які спільно з магнітною визначають режим поділу. Серед механічних сил виділимо такі.

Розглянемо сили, що діють на частинку руди у вологому магнітному сепараторі (ВМС) з нижньою подачею пульпи, які можуть бути використані при проектуванні системи автоматичного управління (САУ). Сили, що діють на частинку магнітної руди А, залежать від положення щодо полюсів МС (рис. 1.5). У загальному випадку частка руди має горизонтальну складову швидкості, оскільки вона пересувається щодо барабана з потоком пульпи. Щодо потоку пульпи у горизонтальному напрямку частинку руди можна

прийняти нерухомою. Вважатимемо, що частка руди знаходиться безпосередньо під полюсом МС і що в початковий момент часу у вертикальному напрямку вона нерухома. Впливом на неї інших полюсів сепаратора можна в першому наближенні знехтувати.

При обраному напрямі осей координат (рис. 1.5) на частинку А діють:

P – сила ваги частки руди;

$P_{\text{в}}$ – виштовхувальна сила рідини;

F – магнітна сила тяжіння частки полюсом сепаратора;

$F_{\text{с}}$ – сила опору, яка виникає під час руху частинки руди до барабана МС.

При вибраному напрямку осей координат рівняння руху частинки руди:

$$P - P_{\text{в}} + F_{\text{с}} - F = ma , \quad (1)$$

де m – маса частки; a – її прискорення.

Зліва знаходиться рівнодіюча всіх сил, справа – сила інерції.

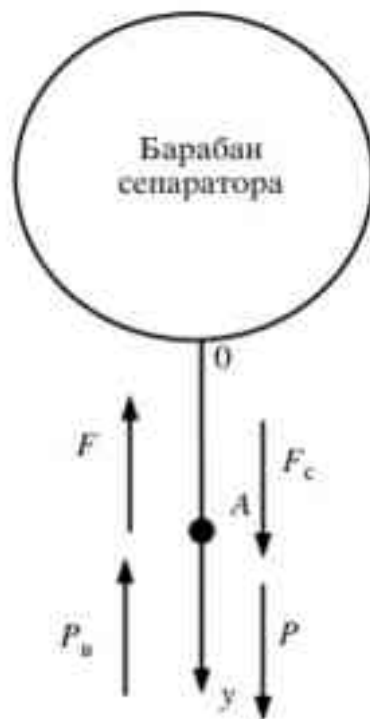


Рисунок 1.5 – Сили, діючі на частинку руди у ВМС.

У процесі сепарації можливо виділити величини, що мають практичну користь: витрата продуктів на вході, у концентраті та хвостах, щільність

пульпи, концентрату та хвостів, вміст заліза у концентраті та хвостах на вході та виході та ін. Однак усі ці складові залежать від трьох основних величин, через які вони можуть бути виражені: кількість магнітного заліза, породи і води на одиницю часу, або витрати відповідного продукту. Тому будемо вважати, що вхідний потік пульпи складається з магнітного заліза, води та породи, не враховуючи, що також наявні зростки магнетиту та породи.

На рис.1.6 та рис.1.7 показані залежності вмісту заліза від частоти оберту барабана сепаратора та щільності живлення сепарації та нормовані автокореляційні функції вмісту магнітного заліза у продуктах збагачення. Залежності отримані аналітично та підтверджені експериментальним шляхом проведення експериментів в умовах ПрАТ «Полтавський ГЗК».

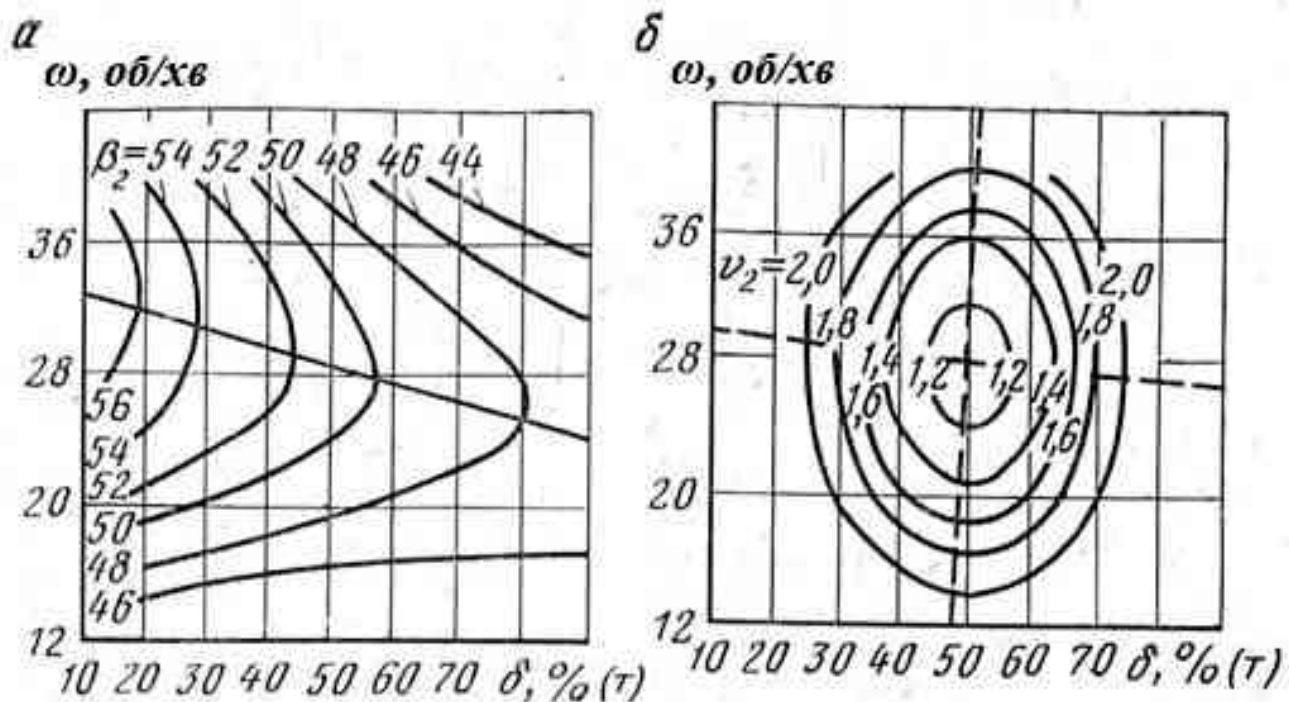


Рисунок 1.6 – Статистичні характеристики вмісту магнітного заліза у промпродуктах (а) та хвостах (б) I стадії ВМС в залежності від частоти оберту барабана сепаратора та щільності живлення сепарації.

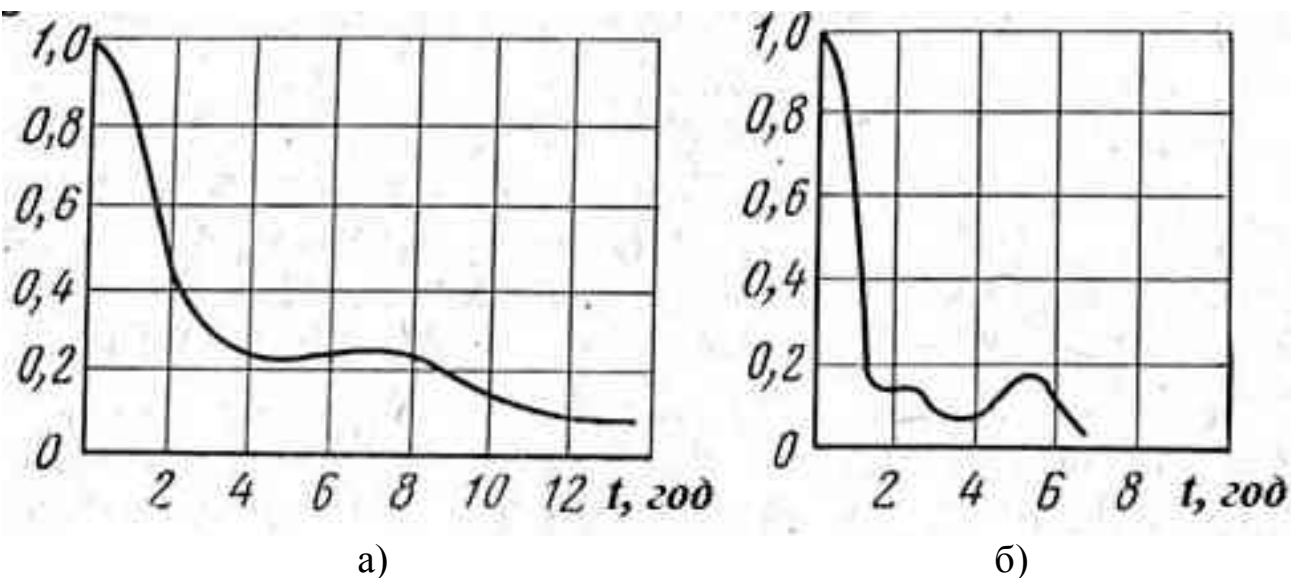


Рисунок 1.7 – Нормовані автокореляційні функції (АКФ) вмісту магнітного заліза у продуктах збагачення у концентраті (а) та хвостах (б).

1.3. Параметри керування магнітною сепарацією та існуючі системи

Мета управління ПМС – забезпечення максимальної продуктивності технологічної лінії при постійній якості концентрату та обмеження на втрати заліза у хвостах:

$$\begin{aligned} Q &\rightarrow \max, \\ \beta_1 &< \beta < \beta_2, \\ \theta &\leq \theta_{\text{доп}}, \end{aligned} \quad (1.1)$$

де Q – продуктивність технологічної лінії магнітного збагачення;

β_1 і β_2 – нижня і верхня межі вмісту заліза в концентраті;

$\theta_{\text{доп}}$ – допустимий вміст заліза у хвостах.

МС як двопродуктовий апарат має два канали управління – якості концентрату та якості хвостів. Тому при виборі впливу, що управляє, необхідно враховувати його вплив на обидві вихідні змінні β і θ .

На рис. 1.8 наведено можливу структуру системи стабілізації роботи магнітного сепаратора.

САУ I за допомогою датчика вмісту заліза в концентраті (2) регулює густину пульпи, змінюючи подачу води класифікуючий апарат.

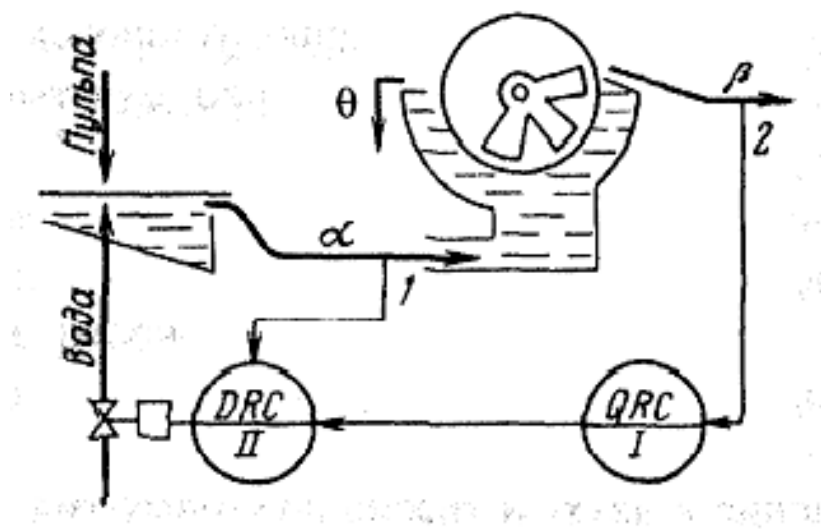


Рисунок 1.8 – Структура системи стабілізації роботи магнітного сепаратора.

САУ II – система регулювання густини пульпи за допомогою датчика густини (I) на зливі класифікатора. При цьому особливості процесу такі, що при збагаченні крупнокраплених руд при погіршенні якості концентрату необхідно для його стабілізації збільшити густину пульпи, а при збагаченні тонкокраплених руд – зменшити її.

Технологічну лінію магнітного збагачення можна подати у вигляді послідовного з'єднання окремих технологічних комплексів (стадій), кожен з яких поєднує процеси подрібнення, класифікації та ПМС. Принцип постадійного управління лінією полягає у стабілізації вмісту заліза у концентраті і максимізації виходу концентрату кожної стадії, тобто:

$$\gamma_i \rightarrow \max; \beta_{1i} \leq \beta_i \leq \beta_{2i}; \theta_i \leq \theta_{i \text{ доп.}} \quad (1.2)$$

Розглянемо існуючі САУ сепараторами.

Винахід [2] являється САУ ПВМС. Принцип роботи відомої система полягає в екстремальному регулюванні продуктивності млина та обліку при регулюванні змінного нелінійного коефіцієнта передачі млина, що залежить від кількості руди в млині, шляхом релейної зміни завдання регулятора продуктивності.

Відома система характеризується низькою якістю регулювання, викликаним неврахуванням динамічних властивостей млина, класифікатора і

всього одностадійного циклу при зміні якості руди, що переробляється, і структурою побудови системи, а релейна зміна завдання викликає додаткові автоколивання в системі, що може вивести млин в область нестійких аварійних режимів.

Недоліком відомої системи є також неможливість досягнення оптимальної продуктивності по вихідному живленню і оптимальної щільності пульпи в млині, внаслідок неврахування при регулюванні витрат води в млин і типу перероблюваної руди по подрібнюваності і вкрапленості.

Винахід [3] являється пристроєм для контролю та оптимізації подачі води у ВМС. Пристрій контролю та оптимізації подачі води в мокру магнітну сепарацію включає групу датчиків температури для контролю температури продуктів сепарації (наприклад, хвостів), вторинний прилад, ЕОМ, групу індикаторів або дисплей. Крім цього, для вирішення задачі визначення відносної частки додаткової води в харчуванні сепараторів пристрій додатково включає датчик температури для контролю температури вихідного живлення сепарації (до додавання води) і датчик температури для контролю температури додаткової води. Крім цього, для цілей автоматичного керування водяними засувками (клапанами) від ЕОМ або контролера включає групу виконавчих механізмів.

Нерівномірний розподіл додаткової води виявляється по різниці значень температури вихідних продуктів (компонентів) по сепараторам, що порівнюються. Для забезпечення більш рівномірного розподілу додаткової води серед сепараторів мокрої магнітної сепарації пропонується регулювати подачу води до мінімізації різниці у значеннях температури апаратів.

1.4 Технічне завдання на створення АСР магнітним сепаратором

Найоптимальнішим методом сепарації для металовмісного матеріалу крупністю не вище 3 мм є мокрий магнітний. Перед магнітною сепарацією

також необхідні підготовчі операції, але процес сепарації ефективний і продуктивний.

Проаналізувавши наявні САУ сепараторів для ПВМС, виявивши недоліки та переваги кожної з них, в роботі буде розроблено систему подачі води у сепаратор за сигналом з датчика вмісту магнітного заліза в пульпі. Ця система матиме ряд переваг перед іншими САУ:

- Простота конструкції.
- Невелика вартість виготовлення.
- Низьке споживання електроенергії.
- Простота обслуговування та ремонту.
- Можливість плавного і точного регулювання параметрів та впливу на ПВМС.

2 Склад системи автоматичного керування магнітним сепаратором

2.1 Опис структури комплексу технічних засобів АСКТП магнітної сепарації

Для відповідності вимогам комплекс технічних засобів АСКТП магнітної сепарації збагачувальної фабрики ВАТ «ПГЗК» повинен містити три рівні та будуватися за ієрархічним принципом.

Фільтрація сигналів витратомірів і блок ідентифікації передбачають застосування цифрової техніки.

Для введення сигналів з датчиків в пристрої обробки (промислові логічні контролери) доцільно обрати перетворювачі аналогових сигналів L64AD4 фірми Mitsubishi Electric.

Для цифрового керування двофазним асинхронним двигуном використаємо безконтактний реверсивний пускач, наприклад ПБР-2.

Регулювальний орган – двосідловий клапан приводиться в дію за допомогою виконавчого механізму, умовам роботи задовольняє виконавчий механізм типу МЕР.

Контроль рівня магнітного заліза в пульпі планується здійснювати за допомогою розроблюваного датчика для експрес-аналізу даного параметра.

Для контролю витрати води доцільно використати витратомір US–800.

Другий рівень АСКТП магнітної сепарації планується реалізувати за допомогою промислового логічного контролера MELSEC L фірми Mitsubishi Electric. Регулювання продуктивності технологічного агрегату здійснюється шляхом видачі сигналу завдання через аналогові вихідні модулі контролера MELSEC L на вхід завдання перетворювача.

Для зв'язку з суміжними системами автоматизації збагачувальної фабрики планується використати промислову мережу стандарту Modbus Plus.

Для зв'язку контролеру з третім рівнем АСКТП планується використати мережу Ethernet.

На третьому рівні системи для забезпечення функції оптимізації технологічного процесу за техніко-економічними показниками, виконання функцій контролю, візуалізації, діагностування та архівування планується використати індустріальні персональні комп'ютери фірми Advantech.

2.2 Вибір датчиків та первинних перетворювачів

2.2.1 МЕР

Виконавчі механізми електричні прямоходні МЕР виробництва НВП "Сибір–Мехатроніка" призначені для забезпечення поступального переміщення елементів машин, механізмів, конструкцій. Об'єкти застосування виконавчих механізмів електричних прямохідних МЕР.

Трубопровідна арматура (шибера, клапани, засувки та ін), ворота розпашні, розсувні, підйомні; дозатори, електричні преси, пробійники та багато іншого. МЕР можуть застосовуватися в різних галузях промисловості замість пневмо – і гідроциліндрів.

Для виконання даної системи автоматичного керування будуть використані регульовані клапани.

Позитивні сторони виконавчих механізмів електричних прямоходних МЕР:

- Непогані масогабаритні показники: так, виконавчий механізм МЕР з номінальним зусиллям 5 кН має масу всього 27 кг, це полегшує монтаж і обслуговування МЕР на об'єкті та дозволяє у багатьох випадках обійтися без вантажопідйомних механізмів;

- Широкі можливості компоновальні;

- Робоче положення виконавчого механізму МЕР у просторі може бути будь-яким;

– Можливість шарнірної установки виконавчих механізмів МЕР на підставі з шарнірним закріпленням кінця штока на робочому органі дозволяє реалізувати як прямолінійне, так і криволінійний переміщення робочого органу;

– Зручність налагодження;

– Можливість і зручність налаштування зони робочих переміщень штока виконавчих механізмів МЕР;

– Економічність застосування виконавчих механізмів МЕР;

– Застосування виконавчих механізмів електричних прямоходних МЕР замість пневмоциліндрів в цілому ряді виробництв дозволяє знизити експлуатаційні витрати, а так само виключити витрати на застосування компресорних станцій, підготовку повітря.

Склад виконавчих механізмів електричних прямоходних МЕР

- Трифазний асинхронний електродвигун;
- Гвинтова передача;
- Редуктор;
- Вузол ручного приводу;
- Блок кінцевих вимикачів;
- Датчик положення з уніфікованим струмовим виходом;

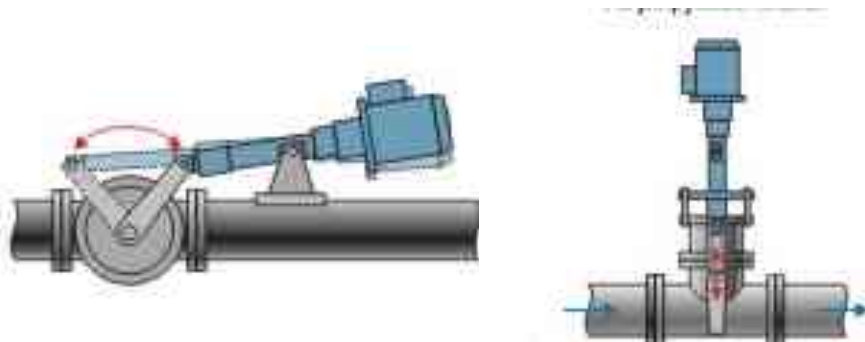


Рисунок 2.1 – Приклади вигляду виконавчих механізмів МЕР

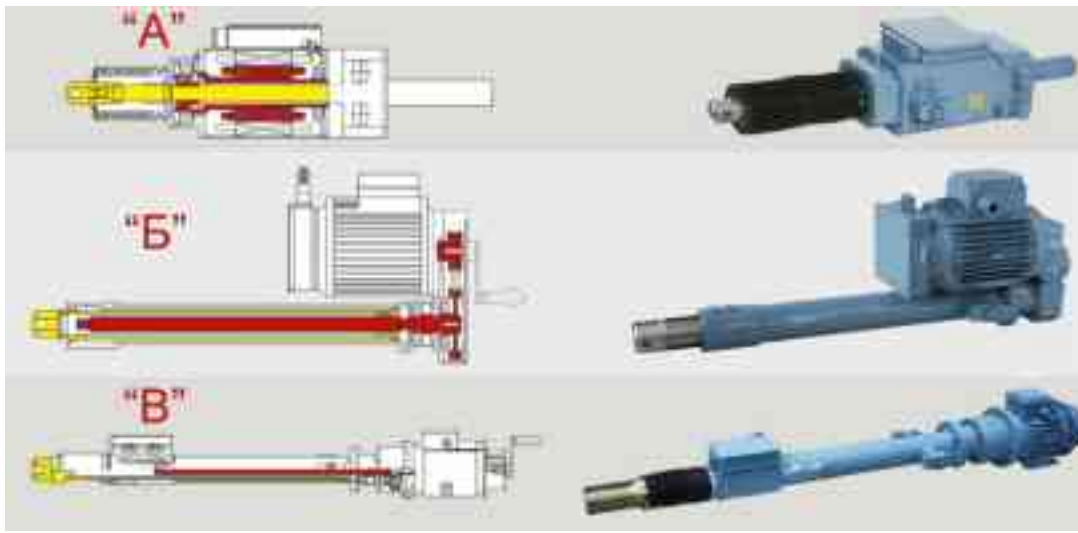


Рисунок 2.2 – Основні конструктивні виконання механізмів електричних прямохідних МЕП

Принцип дії виконавчих механізмів електричних прямохідних МЕП

У МЕП виконання "А" при подачі прямої напруги на електродвигун ротор електродвигуна та скріплена з ним через редуктор гайка гвинтовий передачі приходять в обертання, при цьому гвинт, закріплений своїм кінцем на робочому органі, здійснює поступальний рух. Блок радіально-упорних підшипників сприймає осьові зусилля, які виникають.

У МЕП виконання «Б» при подачі напруги на електродвигун, ротор електродвигуна через редуктор або зубчасто-пасову передачу приводить в обертання гвинт гвинтової пари. При цьому гайка разом зі штоком, в якому вона встановлена, рухається поступально, переміщаючи робочий орган.

У МЕП виконання "В" ротор електродвигуна, через редуктор, приводить в обертання гвинт гвинтової пари. При цьому гайка разом зі штоком, в якому вона встановлена, рухається поступально, переміщуючи робочий орган.

Для обмеження ходу штока МЕП використовуються кінцеві вимикачі. Налаштування кінцевих вимикачів дозволяє зменшити робочий хід на 80 мм від номінального значення робочого ходу з кожного боку (мінімальне та максимальне положення штока).

Ручний привід дозволяє при відсутності електроживлення переміщати робочий орган вручну поворотом рукоятки. При роботі електродвигуна

рукоятка ручного приводу нерухома. Передбачений захист від раптової подачі напруги на електродвигун в режимі роботи ручним приводом.

Виводи від електродвигуна, кінцевих вимикачів і датчика положення, підключені до клемника або штепсельних роз'ємів, розташованих в коробці виводів. На внутрішній стороні кришки коробки виводів закріплена пластина зі схемою внутрішніх з'єднань усіх елементів МЕП.

Для захисту гвинтової передачі від зовнішніх впливів, у механізмах виконання "А" використовуються гумові гофри, у МЕП виконаннях "Б" і "В" сальники. Механічні упори обмежують переміщення штока МЕП при його втягування або висуненні.

Датчик положення формує струмовий сигнал, пропорційний переміщенню штока виконавчого механізму. Цей сигнал може бути використаний як для індикації, так і для замикання зворотного зв'язку в системі автоматичного регулювання.

Всі ці техніко-функціональні особливості пристроїв МЕП повністю відповідають запитам розроблюваної системи автоматичного керування технологічним процесом нейтралізації кислотного середовища.

2.2.2 Ультразвуковий витратомір рідини US–800

Ультразвуковий витратомір рідини US–800 розроблений з урахуванням особливостей експлуатації приладів обліку в Україні, має вбудований захист від перенапруги і перешкод в мережі, первинний перетворювач з нержавіючої сталі.

Застосовується для вимірювання та обліку витрат та обсягу рідин протікають під напором в трубопроводі діаметром від 15 до 2000 мм, а також реєстрації цих параметрів в глибоких архівах, виведення інформації на ПК, по GSM–модему, в системи АСКТП:

- гарячої та холодної води;

- теплофікаційної води;
- забрудненої води;
- напірних промислових і побутових стоків, витратомір стічних вод, для стоків;
- рідких харчових продуктів (крім газованих);
- та інших рідин (по в'язкості близьким до водних розчинів) з вмістом газів не більше 1%;

За погодженням:

- нафтопродуктів (диз. паливо, мазутів, масел, тощо);
- агресивних рідин (кислот, лугів тощо) і хімвідходами;

Робота в комплексі з іншими приладами: обчислювачами, регуляторами, контролерами і т.п., в автоматизованих системах збору даних, контролю та регулювання технологічних процесів.

Гальванічна розв'язка первинного перетворювача (труби) від електронного блоку.

– Висока перешкодозахищеність і безпека в будь-яких, навіть найважчих умовах експлуатації.

– Канали вимірювання витрати також розв'язані гальванічно – це виключає їх взаємовплив (явище спостерігається у двоканальних приладів з мультиплексуванням).

– Успішний досвід експлуатації протягом 5-ти років показав стійкість приладу навіть при ударі блискавки в трубопровід, не кажучи вже про зварювальних роботах.

Інтелектуальна система самодіагностики:

– Неперервне стеження за працездатністю приладу і достовірністю отриманих результатів, фільтрація та нейтралізація перешкод.

Мережевий фільтр:

– Захист від перешкод і імпульсів в напрузі, автоматичний захист від перенапруги, перегріву.

Функція ультразвукової самоочищення п'єзоелектричних перетворювачів.

Вибір режимів обліку потоку: по модулю, з реверсуванням, з вибором лише одного прямого напрямку.

Спеціально підібрана елементна база виробництва провідних зарубіжних фірм – PHILIPS, TOSHIBA, INTEL та ін.

Не створює втрат тиску. Повнопрохідний розтин, не містить механічних / рухомих частин.

Вимірювальні ділянки із нержавіючої сталі.

Високий ступінь захисту від зовнішніх впливів (IP65 / IP67–IP68):

– Можливість установки вимірювальних ділянок в нерегульованих кліматичних умовах, а також в повністю залитих колодязях і на глибині.

Гнучко програмується під будь-які вимоги виробничих об'єктів.

Привабливий зовнішній вигляд:

- Сучасний корпус із захистом від зовнішніх впливів IP 65.
- Надійні військові роз'єми 2PMT18.
- Клавіатура програмування закривається герметичною пломбуються прозорою кришкою.

Відсутність гальванічних джерел живлення в енергонезалежній пам'яті.

Не вимагає обслуговування на весь термін експлуатації (понад 25 років).

Безпролівна методика перевірки.

Міжповірочний інтервал –4 року.

ЕЛЕКТРОННИЙ БЛОК US–800 (рис. 2.3) з великим інформативним сегментним (світлодіодним) індикатором, на який виводяться витрата ($\text{м}^3 / \text{ч}$), обсяг (м^3), час (ч) безвідмовної роботи приладу. Являє собою пластиковий приладовий корпус для настінного монтажу.

1) Аналоговий (струмовий) вихід 4–20 мА.

2) Архів значень витрат і обсягів – часових (2880 записів), добових (120 записів) і місячних (190 записів) виводиться тільки на ПК у вигляді txt файлів, детальніше "опція архів"

3) Можлива передача інформації з приладів (як одиничне так і групове підключення) на єдиний диспетчерський пункт за допомогою GSM-модемів.

УЛЬТРАЗВУКОВИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ВИТРАТИ (УПВ) (рис. 2.4) (з уже встановленими датчиками) являє собою відрізок труби, на торцях якого приварені два фланця, і в середній частині розташовані датчики ПЕП.

УПВ бувають двох видів залежно від кількості вимірювальних променів: однопроменеві і двопроменеві.

Також розрізняються способами приєднання.



Рисунок 2.3 – Зовнішній вигляд електронного блоку US–800



Рисунок 2.4 – Зовнішній вигляд ультразвукового перетворювача витрати

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики ультразвукового витратоміра рідини US–800

Параметр	Значення
Температура рідини, ° С	–40 ... +150
Тиск рідини в трубопроводі, МПа	до 1,6 (до 2.5, 4.0, 6.0, до 25 спецзамовлення)
Температура окр. середовища в місці установки УПР, ° С	–40 ... +60
Температура окр. середовища в місці установки Ел. блоку, ° С	+3 ... +60 (Від –20 спецзамовлення)
Ступінь захисту Ел.блока / УПР	IP65 / IP67 (IP68 спецзамовлення)
Довжина сполучних кабелів, м	до 500 (до 2000–спецзамовлення)
Довжина прямолінійних ділянок (Ду 15–2000 мм)	до ПП –10 / після 3
Довжина прямолінійних ділянок (Двопроменеві виконання Ду 100–2000 мм)	до ПП –5 / після 3
Міжповірочний інтервал, рік	4
Повний середній термін служби, років	25
Число знакомест для індикації	9
Напруга живлення приладу, В	187 ... 242
Максимальна споживана потужність, Вт	до 7
Габарити електронного блоку, не більше мм	200 x 120 x 85
Маса електронного блоку, не більше кг	1,2
Гарантійний термін, мес	24

2.3 Вибір та обґрунтування промислового контролера та модулів введення-виведення

На основі вимог до технічного забезпечення для виконання функцій управління технологічним процесом магнітної сепарації в умовах збагачувальної фабрики на другому рівні АСКТП доцільно використати промисловий логічний контролер MELSEC L фірми Mitsubishi Electric. Перевагами серії контролерів MELSEC L є висока обчислювальна

потужність, висока надійність, можливість створення розподіленої системи введення-виведення та широкий вибір мережних архітектур при відносно невеликій вартості.

Промисловий контролер MELSEC L є модульним, має можливість розширення розміру пам'яті та можливість встановлення комунікаційного модуля. Крім цього він має вбудовані дискретні входи-виходи та рахункові канали.

На основі аналізу вимог до задач системи управління та кількості вхідних та вихідних сигналів системи автоматичного дозування доцільно обрати процесорний блок L02CPU, що встановлюється на DIN-рейку з блоком живлення L61P та кінцевою кришкою L6EC.

Контролер може бути розширений до 10 модулів розширення і спеціальних функціональних модулів, що реалізують додаткові дискретні і аналогові канали введення/виводу, високошвидкісні лічильники, комунікаційні інтерфейси, просте управління рухом, позиціонування і т.д.

Модуль блока живлення L61P забезпечує живлення всіх модулів, встановлених на ПЛК. Вибір блоку живлення здійснюється в залежності від напруги живлення та потужності, що споживається модулями, встановленими на шасі.

Процесор L02CPU системи автоматизації MELSEC L керує всім ПЛК, що складається з модулів дискретного та аналогового введення–виведення, спеціалізованих модулів. Кожний процесор має:

- захищену вбудовану RAM, в яку можна завантажити всі додатки та яка розширюється за допомогою карти пам'яті SD / SDHC;
- можливість зв'язку через вбудований інтерфейс mini USB;
- можливість зв'язку через вбудований порт Ethernet (100 або 10 Мбіт/с).
- 16 вбудованих каналів дискретного входу.
- 8 вбудованих каналів дискретного виводу.

Розробка додатку здійснюється за допомогою програми GX Works2 в середовищі Windows XP. Вона забезпечує наступні можливості:

- відповідність МЕК 61131–3;
- широке використання параметрування замість програмування;
- здатність використовувати глобальні змінні для всього проекту автоматизації.

- розширені функції діагностики контролеру.

В системі, в якості дискретних вхідних модулів доцільно обрати модулі LX42C4 та LX41C4. Модулі включають відповідно 64 та 32 ізольованих вхідних каналів постійного струму 24 В додатної логік.

В АСКТП магнітної сепарації, в якості дискретного вихідного модуля доцільно обрати модуль LY42PT1P. Модуль включає 64 ізольованих вхідних каналів постійного струму 24 В додатної логіки. Кожний вихід модуля має внутрішній захист від перевантаження та коротких замикань (забезпечується струмовим обмежувачем та тепловим переривником), захист від перенапруги (забезпечується стабілітроном) та захист від зміни полярності, яка може бути викликана коротким замиканням в колі живлення (забезпечується діодом). Всі виходи обладнані стабілітронними схемами швидкого розмагнічування, що знижує до мінімуму час переключення ($<0,5$ мс).

В якості аналогового вхідного модуля доцільно використати 6 модулі L64AD4, кожен з яких містить 4 входів високого рівня с загальною точкою. Він забезпечує діапазон 0–20 мА або 4–20 мА для кожного з каналів в залежності від вибору, зробленого під час конфігурації.

Цей вхідний модуль виконує наступні функції:

- сканування вхідних каналів з та збір значень;
- аналогово–цифрове перетворення вхідних вимірювань (16 біт).

В доповнення до цих функцій процесором ПЛК виконується наступна обробка сигналів:

- вхідний контроль перевищення;
- фільтрація вимірювань;
- перетворення вхідних вимірювань до формату користувача для відображення в безпосередньо придатних до використання одиницях.

Модуль L64AD4 дозволяє виконувати наступну вхідну обробку сигналів: вибірка вимірювань, вибір діапазону і поточний контроль перевищення, контроль зв'язку датчика і фільтрація вимірювань.

Вибірка вимірювань залежить від типу задачі, що обирається під час конфігурації. При нормальному задачі час циклу перегляду фіксований (32 мс) та не залежить від кількості каналів, що використовуються. При швидкому циклі переглядаються тільки ті канали, які використовуються, що зменшує час циклу перегляду каналів.

Для діапазону 4–20 мА здійснюється також контроль зв'язку датчика. Помилка зв'язку виявляється, як тільки електричний струм в колі стає меншим, ніж 3,2 мА.

В якості аналогових вихідних модулів використаємо модулі L64DA4, кожний з яких містить 4 виходів з загальною точкою, кожен вихід в діапазоні $\pm 10\text{В}$, без потреби в зовнішньому джерелі живлення, з навантаженням, що найменше 2 кОм.

Для зв'язку з індустріальним ПК та робочими станціями технологічного персоналу дільниці збагачувальної фабрики по мережі Ethernet TCP/IP використовується вбудований мережний порт Ethernet. Цей порт використовує фізичні інтерфейси 10Base-T та 100Base-T та спосіб доступу CSMA-CD зі швидкістю передачі 10 Мбіт/с або 100 Мбіт/с. Містить також вбудований Web-сервер з можливістю розміщення сторінок користувача.

3 Проектування та дослідження пристрою аналізу пульпи на вміст магнітного заліза

3.1 Характеристика області використання пристрою

Корисні копалини – складний комплекс різних мінералів. Цінний компонент в корисних копалинах частіше всього знаходиться у складі відповідних мінералів. Мінерали, які не містять цінного компонента або корисних домішок, являють його пусту породу. Звичайно корисні мінерали вкраплені у вигляді зерен різної крупності в пусту породу. Поняття корисного мінералу і пустої породи є відносним. Один і той же мінерал у вихідній сировині може бути корисним, а в іншій – пустою породою. Все залежить від цілей використання того чи іншого мінералу. Наприклад, кварц у сировині для керамічної промисловості є корисним мінералом, а в руді чорних металів – пустою породою.

Покращення якості корисних копалин при збагаченні досягають виділенням пустої породи і концентрації корисних мінералів у меншому об'ємі. При цьому збільшується вміст цінного компонента, оскільки майже вся його кількість виявляється в концентраті, що займає значно менший об'єм за рахунок видалення пустої породи.

Магнітне збагачення корисних копалин [4] засноване на використанні магнітних сил, за допомогою яких відбувається відділення мінералів з слабким проявом цих властивостей.

Джерелом магнітних сил є магнітне поле, що існує в просторі, яке охоплює магніти та провідники зі струмом. Воно в усіх випадках створюється там, де є рух електричних зарядів, які створюють електричний струм. У магнітних полях діють різні за величиною магнітні сили, які визначаються величиною напруженості H і характером зміни її в просторі.

Величина напруженості магнітного поля в об'ємі частинок в системі СІ виражається відношенням А/м або кА/м.

Магнітні поля бувають однорідними при однаковій величині напруженості поля в усіх точках і неоднорідними при різних значеннях напруженості. При внесенні мінералу в однорідне магнітне поле він буде зазнавати обертання, яке приведе його в положення, що співпадає з напрямками силових ліній поля. При цьому частково зменшиться характеристика мінералу в бік неоднорідності, але цього недостатньо для протягування мінералу до полюса магніту. При внесенні мінералу в неоднорідне магнітне поле, крім обертаючого моменту мінерал буде піддаватися дії сили протягування в напрямку більш інтенсивних ділянок поля. Прояв цієї сили притягування є головною умовою, що визначає можливість відділення магнітних мінералів від немагнітних в неоднорідних магнітних полях.

Неоднорідність магнітного поля досягають відповідним розташуванням і формою полюсів. Магнітні властивості мінералів визначаються величиною, яку називають магнітною сприйнятливістю, що характеризує здібність речовини до намагнічування. Магнітна сприйнятливість, віднесена до одиниці об'єму речовини, називається об'ємною. Магнітна сприйнятливість, віднесена до одиниці ваги, називається питомою магнітною сприйнятливістю.

Відповідно значенню магнітної сприйнятливості мінерали поділяють на три групи: сильномагнітні, слабкомагнітні, немагнітні.

Сильномагнітні мінерали витягуються в магнітні продукти на магнітних сепараторах з слабим магнітним полем напруженістю 80...120 кА/м.

Питома магнітна сприйнятливість мінералів цієї групи змінюється від $3,8 \cdot 10^{-5}$ до $8 \cdot 10^{-5}$ м³/кг. До них належить магнетит та інші.

Слабкомагнітні мінерали витягуються в магнітні продукти на сепараторах з сильним магнітним полем напруженістю 800...1600 кА/м.

Питома магнітна сприйнятливість мінералів цієї групи змінюється від $7,5 \cdot 10^{-6}$ до $1,26 \cdot 10^{-7}$ м³/кг. До цієї групи входять: окисі, гідроокисі і карбонати заліза та марганцю, ільменіт, вольфраміт та інші.

Немагнітні, пара- і діамагнітні мінерали мають питому магнітну сприйнятливість відповідно $1,26 \cdot 10^{-7}$ м³/кг і менше. З рудних мінералів до цієї групи належать: шеєліт, каситерит, молібден та інші, а з нерудних – кварц, польовий шпат, кальцит та інші. Вони не притягуються до полюсів магнітів в магнітних сепараторах.

Притягнуті магнітними полюсами сепараторів магнітні мінерали відділяються від магнітів в зоні ослаблення дії магнітного поля і збираються в приймальних ємкостях магнітних продуктів, а немагнітні мінерали направляються в приймачі немагнітних продуктів. За конструктивним виконанням магнітної системи магнітні сепаратори діляться на два основні типи: сепаратори з низькою напруженістю магнітного поля від 80 до 120 кА/м і з відкритими багатополюсними системами для мокрого або сухого збагачення і сепаратори з сильною напруженістю магнітного поля від 800 до 1600 кА/м і з замкнутими магнітними системами для сухого і мокрого збагачення руд. Сепаратори також розрізняють за способом подачі живлення і за напрямком руху руди і видалення продуктів з зони магнітної сепарації.

3.2 Конструкція пристрою для визначення вмісту магнітного заліза в пульпі

Пристрій, що розробляється, призначений для визначення вмісту магнітного заліза в продуктах збагачення. Необхідно враховувати відносну похибку вимірювання вмісту магнітного заліза та вплив на неї навколишнього середовища – тиску атмосферного повітря, вологи, температури, запиленості повітря.

Феромагнітні включення в породах і частинки, що отримують в подрібнювальних агрегатах, звичайно мають неправильну форму. Для продуктів

подрібнення можливо допустити, що вони мають еліпсоїдну форму. Можливо рахувати наближено, що їх розміри або вкраплини в конкретних ситуаціях майже однакові [5]. Якщо уявити, що частинки подрібненого продукту мають магнетитові вкраплення або розкриті зерна однакового розміру і форму еліпсоїдів, змішані з частинками пустої породи, між якими знаходиться повітря, то дане середовище можливо розглядати як таке, що має осереднені магнітні властивості. Воно являє собою суміш частинок, складених з феромагнітних, діамагнітних і парамагнітних мінералів, які знаходяться упакованими з наповненими повітрям проміжками. Враховуючи, що значення магнітних проникностей діамагнітних і парамагнітних мінералів, які входять до складу твердого, і повітря незначно відрізняються між собою за величиною і значно менше магнітної проникності магнетиту [6], їх суміш можливо розглядати як однорідне середовище з магнітною проникністю, що значно менша показника магнетиту. Тоді суміш можливо рахувати такою, що складається з матеріалу наповнення з магнітною проникністю μ_1 і феромагнітних включень з магнітною проникністю магнетиту μ_2 . В залежності від об'ємного вмісту магнетиту суміш буде приймати значення магнітної проникності μ . Якщо частинки магнетиту будуть мати однакові розміри і форму еліпсоїдів, то магнітна проникність суміші залежно від об'єму в ній магнетиту може бути вираженою залежністю [7]

$$(1 - v) \left(\frac{\mu}{\mu_1} \right)^{\frac{1}{3} 2\beta^{\frac{2}{3}} (1 - \beta)} \left[\frac{(2 - \beta)\mu + (1 + \beta)\mu_2}{(2 - \beta)\mu_1 + (1 + \beta)\mu_2} \right]^{2\beta^2 (1 + \beta)(2 - \beta)} = \frac{\mu_2 - \mu}{\mu_2 - \mu_1}, \quad (3.1)$$

де v – об'єм феромагнітних частинок (в частці одиниці від загального об'єму); β – параметр, що залежить від розміру основних осей еліпсоїда.

Залежність магнітної проникності μ суміші від відносного об'єму v феромагнітних частинок, що визначається рівнянням (3.1), близька до лінійної при будь-яких їх концентраціях.

Реальні значення магнітної проникності при вимірюваннях будуть дещо відрізнятися від знайдених відповідно рівнянню (3.1), оскільки на величину магнітної проникності здійснюють деякий вплив форма, розміри і взаємне розташування феромагнітних частинок [8]. Тому всі методи і пристрої, засновані на використанні магнітної проникності матеріалу, мають певні похибки, що визначаються впливом цих факторів незалежно від їх схемних і інших недоліків чи переваг. Виходячи з виконаного аналізу відомих засобів, доцільно розглянути можливості впливу на покращення характеристик засобу, що реалізує силову взаємодію проби і магнітного поля.

До даних пристроїв в певній мірі можливо застосувати теорію електромагнітів [9]. У випадках, коли невідомий закон розподілу магнітного потоку по поверхні якоря (проби), доцільно використовувати залежності для електромагнітної сили, отримані з енергетичних співвідношень. При цьому сила, що діє на якір або пробу, буде дорівнювати

$$F_E = -\frac{d}{d\delta} \int_0^{\psi\delta} I d\psi, \quad (3.2)$$

де δ – повітряний зазор; I – сила струму; Ψ – потокозчіплення.

З залежності (3.2) слідує, що сила електромагнітного притягування визначається як частинна похідна по переміщенню від перетвореної в енергію магнітного поля роботи зовнішнього джерела струму, що відповідає тому положенню якоря (проби), для якого знаходять силу. Ні від яких попередніх запасів енергії ця сила не залежить.

Величина електромагнітної сили, що діє на рухому систему, залежить від зміни запасу магнітної енергії в усіх частинах магнітного поля електромагніту: в робочих і паразитних повітряних зазорах, в полях потоку розсіяння, в магнітопроводі.

Тому в загальному випадку, для того щоб користуватися рівнянням (3.2), необхідно мати в аналітичному вигляді характеристику намагнічування електромагніту, що враховує як потоки розсіювання, так і опір

магнітопроводу, що зв'язано з громіздкими викладками і дуже великим обсягом обчислюваної роботи.

У ряді випадків задача аналітичного визначення електромагнітної сили, що виникає у електромагніті, може бути спрощеною шляхом виключення з розгляду енергії магнітного поля деяких його частин, вплив яких на величину сили незначний.

Для електромагнітів, у яких потік розсіювання незначний, при визначенні електромагнітної сили достатньо обмежитись лише розглядом магнітної енергії, яка зосереджена у повітряних проміжках, залишаючи поза увагою енергію, зосереджену в матеріалі магнітопроводу і в полі потоку розсіювання.

Використавши рівняння (3.2) і виконавши диференціювання, отримаємо в н'ютонах

$$F_E = \frac{1}{2} (Iw)_\delta^2 \frac{dG_\Sigma}{d\delta}, \quad (3.3)$$

Тут $(Iw)_\delta$ - в амперах і G_Σ - в генрі беруться для того положення, для якого знаходиться сила.

В деяких випадках величина потоку розсіювання порівняна з робочим потоком і з його впливом на величину сили вимушені рахуватись. Це особливо відноситься до випадків, коли при переміщенні якоря відбувається безпосередня зміна провідності шляху потоку розсіювання, як наприклад, для електромагнітів з втяжним якорем. Для броньових електромагнітів можливо отримати спрощений вираз електромагнітної сили в н'ютонах з врахуванням складової від потоків розсіювання, що враховується другим членом, який міститься в квадратних дужках рівняння

$$F_E = -\frac{1}{2} (Iw)_\delta^2 \left[\left| \frac{dG_\Sigma}{d\delta} \right| + g_s \left(\frac{\ell_y}{\ell_k} \right)^2 \right], \quad (3.4)$$

де g_s – питома провідність потоків розсіювання г/м; ℓ_y – довжина якоря, зануреного в котушку, м; ℓ_k – довжина котушки електромагніта, м.

Формула (3.4) для електромагнітів з втяжним якорем, які найбільше відповідають фізичній суті роботи пристрою, не відповідає умовам його роботи, оскільки кювета з пробойою має обмежену довжину порівняно з втяжним якорем. У пристрої для вимірювання магнітної фракції провідність магнітної системи не змінюється, тому залежність (3.4) не буде відповідати умовам роботи і її недоцільно аналізувати.

Виходячи з того, що більш наближених умов до даного пристрою немає, розглянемо загальнотеоретичний підхід визначення сили, що діє на пробу матеріалу. Будемо рахувати, що величину сили притягування визначають між двома паралельними поверхнями, які знаходяться на невеликій відстані одна від одної.

Вираз для електромагнітної сили може бути отриманим на підставі розгляду поля у феромагнітних тілах і оточуючому їх просторі як результат складання поля, що створюється зовнішніми джерелами, і поля, створеного об'ємними і поверхневими молекулярними токами феромагнетика. Використовуючи таку уяву, можливо для викладки виразу сили застосувати формулу Біо

$$F = \oint_V |jB| dV, \quad (3.5)$$

де j – густина струму всередині елемента об'єму; B – індукція всередині цього об'єму, що створюється зовнішніми по відношенню до розглядаємого елемента об'єму джерела поля; F – результуюча сила взаємодії магнітного поля і токів, що знаходяться всередині об'єму.

Шляхом ряду перетворень залежність (3.5) можливо привести до формули Максвелла

$$F = \frac{1}{\mu_0} \oint_S \left[(Bn)_S B - \frac{1}{2} B^2 n \right] dS \quad (3.6)$$

де B – вектор індукції на зовнішньому боці елемента поверхні dS ; μ_0 – магнітна проникність вакууму; n – одинична зовнішня нормаль елемента поверхні S .

Інтегрування тут здійснюється по всій поверхні, що охоплює тіло, на яке діє сила. Ця формула справедлива для тіл з будь-якими магнітними характеристиками. Якщо вектор індукції скрізь нормальний до поверхні, формула Максвелла приймає вигляд

$$F = \frac{1}{2\mu_0} \oint_S B^2 n dS. \quad (3.7)$$

Це справедливо у тих випадках, коли проникність феромагнітного тіла, що розглядається, велика. Отже, у нашому випадку її можливо застосувати.

Формулу Максвелла, звичайно, застосовують тоді, коли розподіл індукції по поверхні, що розглядається, рівномірний. Тому у випадку двох паралельних поверхонь, розташованих на невеликій відстані, можливо застосувати формулу Максвелла. Для даного випадку вона прийме вигляд

$$F_E = B^2 S / 2\mu_0. \quad (3.8)$$

Сила, визначена по (3.8), виходить в н'ютонах, якщо B виражена в теслах, S – в квадратних метрах, а $\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6}$ Г/м.

Враховуючи, що $B = \mu_0 \mu H$ і $Hl = Iw$ [10], залежність (3.8) можливо подати у вигляді

$$F_E = \frac{\mu_0 \mu^2 I^2 w^2 S}{2\ell^2}, \quad (3.9)$$

звідки

$$\mu = \frac{Iw}{\ell} \sqrt{\frac{\mu_0 S}{2}} \sqrt{F_E}, \quad (3.10)$$

де μ – магнітна проникність проби, що визначається вмістом магнітного заліза; Iw – ампер-витки котушки; ℓ – довжина простору, що розглядається; F_E – сила, що діє на пробу.

З залежності (3.10) видно, що при збільшенні вмісту заліза в пробі сила, що на неї діє, зростає. На величину сили можна впливати змінюючи силу струму і параметри w , S , ℓ , тобто можливо змінювати чутливість до вимірюваного параметра μ , що є значною перевагою даного підходу.

Відомо, що магнітна проникність матеріалу μ зв'язана з його магнітною сприйнятністю α . Питома магнітна сприйнятність α суміші залежить від вмісту в ній феромагнітної компоненти. При низькій напруженості магнітного поля H ця залежність нелінійна [11]. З підвищенням напруженості поля нелінійність знятої експериментально характеристики зменшується і при значеннях напруженості вище 600 ерстед вона наближається до лінійної. Даний підхід вимірювання магнітної фракції дозволяє забезпечити лінійність вимірюваної характеристики, оскільки є можливість працювати при великих напруженостях магнітного поля.

Відомий пристрій для силового вимірювання вмісту магнітної фракції живиться від мережі змінного струму через ферорезонансний стабілізатор. Електромагнітна котушка пристрою підключена до мережі через стабілізатор, випрямляч і фільтр, тобто живиться стабілізованою по змінному струму напругою постійного струму. Ферорезонансний стабілізатор постійного струму змінює форму синусоїди, така випрямлена напруга змінюється при незмінній напрузі змінного струму, коливаючи силу постійного струму в електромагнітній котушці. Крім того, в процесі роботи електромагнітна котушка нагрівається, змінює опір обмотки, що при стабілізованій напрузі приводить до зменшення сили струму. Зміна сили постійного струму приводить до зміни параметрів магнітного поля, що вносить суттєву помилку в результати вимірювання. Цього можливо уникнути, застосувавши стабілізацію сили постійного струму в обмотці.

Виходячи зі сказаного, метою кваліфікаційної роботи також є удосконалення пристрою вимірювання магнітної фракції в подрібнених матеріалах шляхом ліквідування виявлених недоліків в його роботі.

3.3 Фізичні основи теплового режиму електромагнітної системи

Як показав аналіз, магнітопровід електричної системи пристрою повинен мати стоп діаметром 30 мм, довжиною 60 мм і зовнішній магнітопровід, виконаний у вигляді двох сталевих дисків і короткого (130 мм) циліндричного елемента товщиною 8 мм і діаметром 360 мм. Її обмотку доцільно виконати дротом діаметром 1,2 мм, яку живити напругою 173 В. Така обмотка вміщує 9116 витків і при 20⁰С має активний опір 51 Ом. Розподіл напруженості магнітного поля вздовж осі електромагнітної системи при живленні обмотки струмом 3,38 А і густині струму 3 А/мм² показано на рис.3.1.

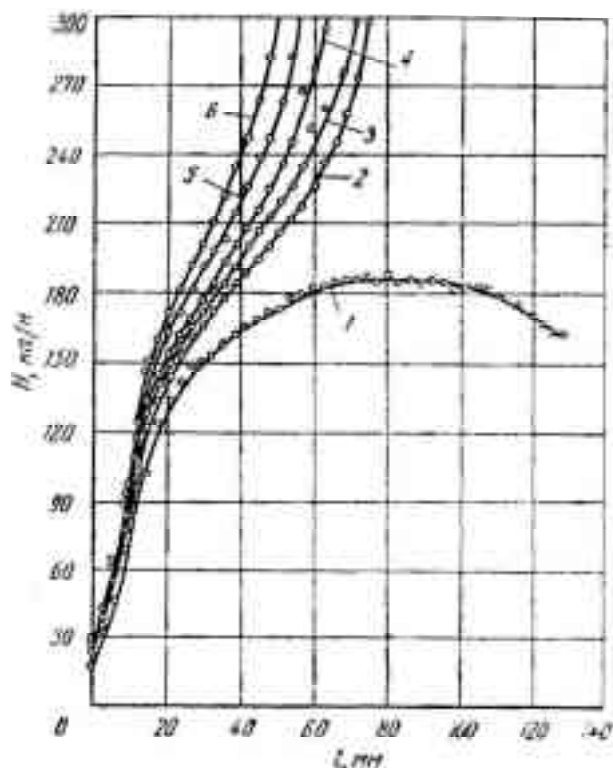


Рисунок 3.1 – Розподіл напруженості магнітного поля вздовж порожнини електромагнітної котушки:

1 – без осердя; 2 – довжина осердя $l_0=20$ мм; 3 – $l_0=30$ мм; 4 – $l_0=40$ мм; 5 – $l_0=50$ мм; 6 – $l_0=60$ мм

Видно, що найкращі характеристики магнітного поля будуть при довжині стопа 60 мм.

Відомо, що ступінь нагріву електромагнітної котушки визначає термін служби ізоляційних матеріалів, що входять до конструкції, і, як наслідок, служби цієї котушки, а часто і усього пристрою в цілому.

При тривалому впливі на ізоляційні матеріали температури, що перевищує допустимі межі, в них відбуваються необоротні фізико-хімічні процеси, які приводять до структурних змін і погіршення їх фізичних, механічних і електричних характеристик. Тому при оцінці оптимальності вибраної конструкції, крім оцінки середнього її нагріву, необхідно оцінити і її температуру найбільш нагрітого місця.

Допустима температура котушки визначається типом і якістю ізоляційних матеріалів, що використовуються для її виготовлення, способом її обробки та умовами експлуатації.

Відомо, що виготовлена з того ж матеріалу, але просочена котушка допускає більшу температуру порівняно з непросоченою. Те ж можливо відмітити і для котушок, що працюють в експлуатації в стаціонарних умовах і не піддаються додатковим механічним впливам, ударам і трясінню. Останнє дає можливість підвищити на 20...25% допустиму температуру котушки, наприклад, порівняно з обмотками електричних машин.

Таким чином, при встановленні допустимої температури котушки апарата повинні бути враховані різні конструктивні, технологічні та експлуатаційні фактори, які відносять до конструктивного виконання та використання цього пристрою.

З викладеного видно, що визначення середньої і особливо максимальної температури по перетину вікна котушки являє практичний інтерес.

Таким чином, при виборі допустимої температури повинні бути враховані різні конструктивні, технологічні та експлуатаційні фактори, які відносять до конкретного виконання і використання даного пристрою. При

виборі допустимої температури, а як наслідок, і типу ізоляції слід враховувати економічні показники її вартості, а також той факт, що збільшення допустимої температури, зменшуючи загальні габарити електромагнітної котушки, в свою чергу підвищують опір матеріалу дроту і в деяких випадках сприяють підвищенню насичення магнітопроводу.

Існуючий досвід проектування електромагнітів дозволив визначити рекомендації по вибору допустимого перевищення температури для різних ізоляційних матеріалів і виконань котушок, наприклад, при температурі навколишнього середовища $\theta_{nc} = 35...40^{\circ}\text{C}$. Як видно з табл.3.1, виділено шість класів нагрівостійкості котушок, кожен з класів має свої особливості [12]. Аналіз показав, що у випадку пристрою, який розробляється, підходить клас Е. Він має наступну характеристику: «Клас Е ($\theta_d=80...85^{\circ}\text{C}$). Ізоляція емальдротів на основі полівінілформальових лаків або котушки, намотані емальдротом класу А, але просочені сумішами, які відносяться до більш високих класів нагрівостійкості. Пластмаси на феноло-формальдегідних смолах, гетинакс, текстоліт і т.п.(в тому числі дроти ПЄВ, ПЄМ)».

Таблиця 3.1 – Класи нагрівостійкості ізоляційних матеріалів електромагнітних котушок

Клас нагрівостійкості	Y	A	E	B	F	H
Допустима робоча температура, $^{\circ}\text{C}$	90	105	120	130	155	180

При роботі пристрою значний вплив здійснює інерційність електромагнітної котушки, яка характеризується сталою часу нагріву. У відповідності з [13] стала часу нагрівання електромагнітної котушки визначається залежністю

$$T_k = \frac{C_k m_k}{h_n S} = \frac{C_k V_k \gamma_k \xi}{\sum_{i=1}^n h_i S_i}, \quad (3.11)$$

де C_k – питома теплоємність матеріалу котушки; m_k – маса обмотки котушки; V_k – об’єм котушки; γ_k – густина матеріалу котушки; ξ – коефіцієнт заповнення; $\sum_{i=1}^n h_i S_i$ – сума добутоків коефіцієнта тепловіддачі з поверхні котушки на площу відповідної поверхні.

Як показує аналіз залежності (3.11), до її складу входять фізичні і конструктивні параметри електромагнітної котушки, які відомі. Невідомим є лише коефіцієнт тепловіддачі. Його необхідно визначити.

При наявності різниці температур між обмоткою котушки і навколишнім середовищем частина теплоти, виділеної в котушці, передається в навколишнє середовище. Цей процес тепловіддачі здійснюється одночасною дією теплопровідності, конвекції та випромінювання. Точне врахування процесів тепловіддачі викликає значні труднощі, оскільки залежить від багатьох факторів, враховуючи і різницю температур поверхні охолодження і навколишнього середовища, розмірів, розташування і форми поверхні котушки, стану і властивостей навколишнього середовища та ін.. Внаслідок цього рекомендації по розрахунку приведенного коефіцієнта тепловіддачі h_n з зовнішньої поверхні котушки можливо дати лише для конкретних її виконань.

Для зразкової котушки прийняті ідеальні умови: вільна тепловіддача при середніх, характерних для пристроїв автоматики габаритах і циліндричних виконаннях котушок, робота котушки в повітряному середовищі на рівні моря і при нормальному атмосферному тиску. Електромагнітна котушка, наближена по виконанню і умовам роботи до зразкової, може розраховуватись по спрощеній методиці. Звичайно приймають середнє значення $h_n = h_0$, яке віднесене до зовнішньої відкритої поверхні і прийнятому критичному значенні перевищення температури θ_0 . Тоді для визначення коефіцієнта тепловіддачі застосовують аналітичну залежність [12]

$$h_0=9,3(1+0,006\theta_0), \text{ Вт/м}^2\cdot\text{град} \quad (3.12)$$

Позначивши $a_1=9,3$, $a_2=0,006$, залежність можливо записати у загальному вигляді

$$h_0=a_1(1+a_2\theta_0). \quad (3.13)$$

При розрахунках слід також враховувати теплообмін між внутрішньою поверхнею електромагнітної котушки і сталлю осердя, втяжного якоря і т.д., що не враховують залежності (3.12) (3.13). Згідно дослідним даним наявність повітряного проміжку між осердям електромагніту постійного струму і внутрішньою поверхнею без каркасних котушок зменшує тепловіддачу на 8% при його величині 0,25 мм і на 11% при зазорі 0,5 мм [12]. Оскільки в пристрої, що розробляється, внутрішня порожнина по осі має порівняно малий розмір, осердя (стоп) – незначну висоту, а якір відсутній, то тепловіддача на даній ділянці буде зовсім малою і нею можна знехтувати. Тоді коефіцієнт тепловіддачі можливо визначити за формулами (3.12) і (3.13).

Визначимо параметри, що входять до залежності (3.11). Питома теплоємність міді дорівнює $C_k=390 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$. Об'єм міді в котушці дорівнює площі поперечного перерізу дроту $S_g=1,13 \text{ мм}^2$, помноженій на довжину дроту 3292 м. Він дорівнює $V_M=0,00372128 \text{ м}^3$. З врахуванням значення густини міді $\rho_M=8930 \text{ кг/м}^3$ її маса в котушці складе $m_k= V_M \rho_M=33,231 \text{ кг}$. Площа теплового випромінювання бокової циліндричної поверхні складає для прийнятих параметрів котушки $0,1413 \text{ м}^2$, а торців – $0,1399 \text{ м}^2$. Всього площа теплового випромінювання складає $S_k=0,2812 \text{ м}^2$. Коефіцієнт тепловіддачі з поверхні котушки визначимо за залежністю (3.12).

Підставивши визначені параметри в залежність (3.11), отримаємо

$$T_k= \frac{12960,09}{2,615 + 0.0157\theta}, \quad (3.13)$$

де T_k – стала часу нагріву котушки, с; θ – перевищення температури магнітопроводу над температурою навколишнього середовища, $^{\circ}\text{C}$.

Змінюючи значення перевищення температури магнітопроводу над температурою навколишнього середовища, визначимо сталі часу нагріву котушки, які приведені в табл.3.2.

Таблиця 3.2 – Залежність сталої часу нагріву електромагнітної котушки від усталеного значення перевищення температури магнітопроводу над температурою навколишнього середовища

$\theta, ^{\circ}\text{C}$	20	40	60	80	100
$T_k, \text{хв}$	73,75	66,60	60,73	55,80	51,61

Враховуючи, що електромагнітна котушка пристрою, що розробляється, має одну сталу часу T_k , то по каналу нагрівання вона є аперіодичною динамічною ланкою, в якій при неперервному режимі вимірювання перехідний процес з моменту ввімкнення триває $(3...4) T_k$. З даних табл. 3.2 видно, що при будь-яких усталених значеннях перевищення температури магнітопроводу над температурою навколишнього середовища перехідний процес триває достатньо довго. Тому в процесі вимірювання при ввімкненні пристрою температура обмотки буде змінюватися від початкової, що відповідає навколишньому середовищу, наприклад 20°C , до повного найвищого значення, яке витікає з усталеного значення перевищення температури магнітопроводу над температурою навколишнього середовища.

4 Розрахунки та експериментальні матеріали, що підтверджують працездатність виробу

4.1 Побудова функціональної схеми системи

При відхиленні співвідношення $K_{(p/в)}$ на вході магнітного сепаратора від заданого задавачем $K_{(p/в)з}$ на виході елемента порівняння формується керуюче діяння $\Delta K_{p/в}$, яке приводить в дію всі наступні елементи автоматичного регулятора (рис. 4.1). В процесі зміни положення регулювального органу витрата води в магістралі її подачі у ванну магнітного сепаратора приймає значення, які приводять у відповідність $K_{(p/в)}$ до заданого значення і, як наслідок, і фактичне значення співвідношення руда/вода $K_{(p/в)ф}$ на вході технологічного агрегату.

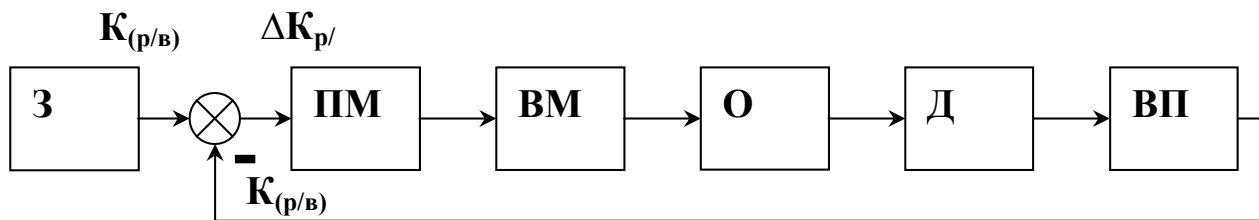


Рисунок 4.1 – Функціональна схема системи автоматичного регулювання витрати води у ванну магнітного сепаратора:

З – задаючий пристрій; П – перетворюючий механізм; ВМ – виконавчий механізм (електродвигун виконавчого механізму, редуктор); О – об'єкт регулювання; Д – датчик; ВП – вимірювальний пристрій

Фільтрація сигналів витратомірів і блок ідентифікації передбачають застосування цифрової техніки. Зважаючи на це, автоматичний регулятор також доцільно виконати цифровим, однак необхідно обґрунтувати його тип. Враховуючи фільтрування сигналів інформаційних засобів впродовж достатньо тривалого часу та можливі різні значення співвідношення руда/вода в окремих циклах, контур компенсації дії збурень буде працювати під впливом ступінчастих сигналів. Компенсацію ступінчастих впливів доцільно здійснювати безінерційним автоматичним регулятором. Тому для даних цілей найкраще підходить релейний регулятор.

Отже, релейний мікропроцесорний автоматичний регулятор буде керувати електродвигуном виконавчого механізму. Інтегральні мікросхеми для такого керування двигунами постійного струму, асинхронними двофазними двигунами та асинхронними трифазними двигунами змінного струму призначені лише для малих потужностей. Тому мікропроцесорна система автоматичного регулювання повинна містити силову частину для безпосереднього керування електричним двигуном. Оскільки момент опору при переміщенні рухомого елемента регулювального органу порівняно невеликий, приймемо в якості двигуна виконавчого механізму двофазний асинхронний двигун змінного струму.

Для цифрового керування двофазним асинхронним двигуном використовують ряд методів. Вони дозволяють здійснити різні закони керування, однак відрізняються значною складністю. Враховуючи це, доцільно реалізувати релейний цифровий регулятор з використанням безконтактного реверсивного пускача, наприклад ПБР-2.

Релейний цифровий регулятор має релейну характеристику. Таку ж характеристику має і безконтактний реверсивний пускач. Їх характеристики можна привести до однієї еквівалентної. Систему автоматичного регулювання при цьому слід розглядати як нелінійну. Оскільки нелінійні системи автоматичного регулювання можливо досліджувати лише з однією (або однією еквівалентною) нелінійністю, всі останні технічні засоби повинні бути лінійними. Це особливо стосується вузла: витратомір води–відрізок магістрального трубопроводу–регулювальний орган, оскільки статичні характеристики останнього часто нелінійні.

Регулювальний орган – двосідловий клапан приводиться в дію за допомогою виконавчого механізму з асинхронним електричним двигуном змінного струму та редуктором. Умовам роботи задовольняє виконавчий механізм типу МЕР. Між вихідним валом виконавчого механізму та регулювальним органом встановлено перетворювальний механізм, статична

характеристика якого – лінійна. Він забезпечує узгодження характеру руху вихідної ланки виконавчого механізму та вхідної регулювального органу.

Система автоматичного регулювання витрати води у ванну магнітного сепаратора включає датчик регульованої величини $K(p/v)$, автоматичний регулятор, який визначає різницю сигналів датчика і задавача співвідношення, формує командний імпульс у випадку їх неспівпадіння та підсилює його за потужністю за допомогою безконтактного реверсивного пускача ПБР-2, виконавчий, перетворювальний механізми та регулювальний орган з відрізком труби і витратоміром.

Цифрові засоби визначення та задавання регульованої величини, порівняння сигналів можна віднести до лінійної частини. Засоби формування порогового рівня, узгоджуючі ланцюги і безконтактний реверсивний пускач ПБР-2 являють собою нелінійний елемент релейного типу. Всі інші ланки є неперервними і лінійними – реверсивний двофазний асинхронний виконавчий двигун, редуктор, перетворювальний механізм, регулювальний орган разом з відрізком труби, по якій подається вода у ванну магнітного сепаратора, і витратоміром. Оскільки процеси, що протікають в агрегаті унеможливають швидку зміну технологічних режимів, а використання швидкодіючої мікропроцесорної техніки для обробки технологічної інформації і вироблення керуючих впливів дозволяють розглядати систему автоматичного регулювання співвідношення руда/вода на вході магнітного сепаратора як лінійну.

Система включає ряд елементів. Визначимо її передавальну функцію. Оскільки в лінійній частині всі динамічні ланки з'єднані послідовно, її результуюча передавальна функція дорівнює добутку передавальних функцій окремих елементів, тобто

$$W_L(p) = W_{ed}(p) \cdot W_P(p) \cdot W_{ПМ}(p) \cdot W_{РО}(p) \cdot W_{ВП}(p), \quad (4.1)$$

де $W_{ed}(p)$, $W_P(p)$, $W_{ПМ}(p)$, $W_{РО}(p)$, $W_{ВП}(p)$ – відповідно передавальні функції електродвигуна виконавчого механізму, редуктора, перетворювального

механізму, регулювального органу з трубою і витратоміром та вимірювального пристрою.

В якості виконавчого механізму в системі автоматичного регулювання співвідношення руда/вода на вході магнітного сепаратора прийнято МЕР. Виконавчий механізм типу МЕР складається з реверсивного електродвигуна та редуктора. Реверсивний електродвигун має два короткозамкнених ротори типу білячого колеса, насаджених на одному валу і два статори, що закріплені в корпусі виконавчого механізму. Напрямок обертання вихідного вала електродвигуна залежить від того, обмотка якого з статорів знаходиться під струмом. Число обертів вала електродвигуна при холостому ході – 1500 об/хв., допустиме ковзання – 11 %. Двигун живиться від мережі змінного струму напругою 220 В і частотою 50 Гц. Редуктор виконавчого механізму складається з шести пар змінних шестірень. Це дозволяє встановлювати час півоберта вихідного вала виконавчого механізму ступінчасто: 10; 30; 60; 90; 120 с. Кут повороту вихідного вала складає 180°.

Асинхронний двофазний електродвигун можна розглядати як дві послідовно з'єднані динамічні ланки – інтегруючу і аперіодичну, якщо вихідною величиною є кут повороту вала ротора. Передавальна функція такого електродвигуна буде

$$W_{ed}(p) = \frac{k_{ed}}{p(T_M p + 1)}, \quad (4.2)$$

де k_{ed} – передавальний коефіцієнт; T_M – електромеханічна стала часу двигуна.

Більш точне значення передавальної функції електродвигуна вміщує у знаменнику ще один множник $(T_E p + 1)$, однак ним на практиці звичайно нехтують, оскільки електромагнітна стала часу T_E значно менша електромеханічної сталої часу T_M .

Стала часу T_M у виразі (4.2) залежить від величини сигналу управління, зростаючи зі зменшенням пускового моменту двигуна. У практичних розрахунках приймають

$$T_M = \frac{J_p \omega_{xx}}{M_{по}}, \quad (4.3)$$

де J_p – момент інерції ротора; $M_{по}$ – пусковий момент двигуна при номінальній напрузі на обмотці керування; ω_{xx} – швидкість обертання двигуна при холостому ході і номінальній напрузі управління в радіанах за секунду.

Величина сталої часу, крім того, залежить від типу ротора і частоти струму в ланцюзі обмотки збудження. Для електродвигуна з обмоткою типу білячого колеса при частоті струму в ланцюзі обмотки збудження 50 Гц стала часу $T_M = 0,1 \div 0,2$ с. Враховуючи напругу живлення 220 В, порівняно малу потужність (60 Вт) виконавчого двигуна, а відповідно і пусковий момент, стали часу приймемо $T_M = 0,2$ с.

Величина коефіцієнта передачі k залежить від способу управління двигуном.

Знижувальний редуктор виконавчого механізму є пропорційною динамічною ланкою. Відповідно даним виконавчого механізму його передавальний коефіцієнт може бути встановлений на наступних дискретних рівнях: 0,02; 0,0067; 0,0033; 0,0022; 0,00167 відповідно для часу півоберту вихідного вала 10; 30; 60; 90; і 120 с.

Перетворювальний механізм обертів руху вихідного вала редуктора перетворює у поступальні його вихідної ланки, тобто у поступальні рухи штока регулювального органу. Він також є пропорційною динамічною ланкою. При повному ході штока 25 мм передавальний коефіцієнт перетворювального механізму складає 0,1389 мм/град.

Регулювальний орган, відрізок труби і датчик витрати води мають передавальний коефіцієнт, що дорівнює одиниці. Отже, даний вузол є пропорційною динамічною ланкою з передавальним коефіцієнтом $k_{yo} = 1$, В/мм.

Вимірювальний пристрій системи (датчик співвідношення $K_{(p/в)}$, порівняльний пристрій і задавач) можна вважати підсилювальною ланкою, що характеризується рівнянням

$$\Delta K_{(p/в)} = k_{ВП} \Delta Q_B, \quad (4.4)$$

де $\Delta K_{(p/в)}$ – зміна співвідношення руда/вода після порівняння сигналів; $k_{ВП}$ – передавальний коефіцієнт вимірювального пристрою; ΔQ_B – зміни витрати води в регульованому об’єкті, подані сигналом витратоміра води. Коефіцієнт $k_{ВП} = 1, 1/В$, оскільки перетворення ΔQ_B в $K_{(p/в)ф}$ здійснюється з коефіцієнтом, що дорівнює $1, 1/В$, а $K_{(p/в)ф}$ в $\Delta K_{(p/в)}$ з безрозмірним коефіцієнтом 1.

Таким чином, для спрощення запису, введемо зміни в позначенням, отримаємо результуючу передавальну функцію системи:

$$W_p(p) = W_n(p) \cdot W_{ем}(p) \cdot W_o(p) \cdot W_d(p) \cdot W_{ес}(p) = \frac{k_0 k_2 k_3 k_4 k_5}{p(T_1 p + 1)(T_0 p + 1)} \quad (4.5)$$

4.2 Структурна схема САР

Для побудови структурної схеми САР були використані диференціальні рівняння елементів схеми. Для отримання передаточних функції елементів схеми застосовано пряме перетворення Лапласа:

Відповідно функціональній схемі складемо структурну схему (рис. 4.2).

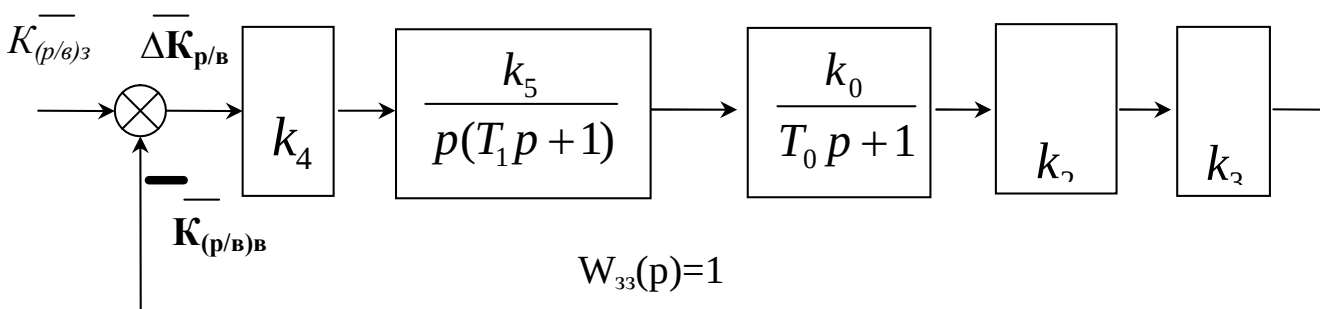


Рисунок 4.2 – Структурна схема системи автоматичного регулювання витрати води у ванну магнітного сепаратора

4.3 Визначення передаточних функцій розімкнутої та замкнутої систем та характеристичного рівняння

Елементи структурної схеми САР розташовані послідовно, тому для отримання передаточної функції розімкнутої системи потрібно перемножити передаточні функції всіх елементів:

$$W_p(p) = W_n(p) \cdot W_{em}(p) \cdot W_o(p) \cdot W_d(p) \cdot W_{ec}(p) = \frac{k_0 k_2 k_3 k_4 k_5}{p(T_1 p + 1)(T_0 p + 1)} \quad (4.6)$$

Для спрощення запису введено позначення:

$$k = k_0 k_2 k_3 k_4 k_5 \quad (4.7)$$

Тоді передаточна функція розімкнутої системи матиме вигляд:

$$W_p(p) = \frac{k}{p(T_1 p + 1)(T_0 p + 1)}. \quad (4.8)$$

Передаточна функція замкнутої системи (за умови одиничного зворотного зв'язку):

$$W_3(p) = \frac{W_p(p)}{1 + W_p(p)} = \frac{k}{p(T_1 p + 1)(T_0 p + 1) + k}. \quad (4.9)$$

Характеристичне рівняння має вигляд:

$$T_1 T_0 p^3 + (T_1 + T_0) p^2 + p + k = 0. \quad (4.10)$$

Підставимо відповідні значення сталих часу та коефіцієнтів підсилення:

$$140 p^3 + 2000,07 p^2 + p + 33 = 0$$

4.4 Побудова АФЧХ, ЛАЧХ та ЛФЧХ розімкнутої системи

4.4.1 Побудова АФЧХ розімкнутої системи

Для побудови амплітудно-фазової частотної характеристики розімкнутої системи необхідно у відповідній передаточній функції провести

заміну $p = j\omega$ ($j = \sqrt{-1}$, ω - частота), виділити дійсну $P(\omega)$ і уявну $Q(\omega)$ частини та, змінюючи частоту від 0 до ∞ , відкласти відповідні значення:

$$W_p(\omega) = \frac{k}{T_1 T_0 (j\omega)^3 + (T_1 + T_0)(j\omega)^2 + j\omega}$$

Провівши певні перетворення та підставивши значення коефіцієнтів і сталих часу, отримаємо:

$$W_p(\omega) = \frac{k}{-jT_1 T_0 \omega^3 - (T_1 + T_0)\omega^2 + j\omega} = \frac{k(-(T_1 + T_0)\omega^2 - j(\omega - T_1 T_0 \omega^3))}{(-(T_1 + T_0)\omega^2)^2 + (\omega - T_1 T_0 \omega^3)^2};$$

$$P(\omega) = \frac{k(-(T_1 + T_0)\omega^2)}{(-(T_1 + T_0)\omega^2)^2 + (\omega - T_1 T_0 \omega^3)^2} = \frac{33(-2000,07\omega^2)}{(-2000,07\omega^2)^2 + (\omega - 140\omega^3)^2};$$

$$Q(\omega) = \frac{k(-(\omega - T_1 T_0 \omega^3))}{(-(T_1 + T_0)\omega^2)^2 + (\omega - T_1 T_0 \omega^3)^2} = \frac{33(-(\omega - 140\omega^3))}{(-2000,07\omega^2)^2 + (\omega - 140\omega^3)^2}$$

Далі, підставляючи значення ω від 0 до (теоретично) ∞ , побудуємо графік АФЧХ (рис. 4.3):

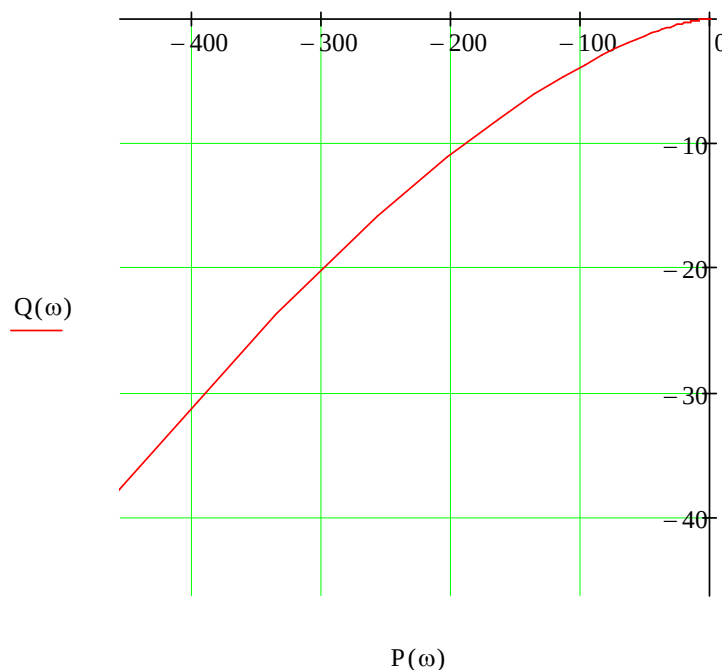


Рисунок 4.3 – АФЧХ розімкнутої системи

4.4.2 Побудова ЛАЧХ розімкнутої системи

Для побудови ЛАЧХ за допомогою асимптотичного методу передусім потрібно знайти спрягаючі частоти за сталими часу динамічних ланок:

$$\omega_0 = \frac{1}{T_0} = \frac{1}{2000} = 0,0005 \text{ с}^{-1}, \text{ належить аперіодичній ланці першого порядку};$$

$$\omega_1 = \frac{1}{T_1} = \frac{1}{0,07} = 14,3 \text{ с}^{-1}, \text{ належить аперіодичній ланці першого порядку}.$$

Знайдені спрягаючі частоти відмічаємо на осі частот в логарифмічному масштабі (рис. 4.4). Низькочастотна асимптота ЛАЧХ при $\omega < \omega_0$ являє собою пряму з нахилом -20 дБ/дек, так як система містить інтегруючу динамічну ланку. Ця пряма або її продовження при $\omega = 1$ повинна мати ординату, яка дорівнює $20 \lg k = 30,4$ дБ ($k = 33$ – коефіцієнт підсилення розімкнутої системи). Після спрягаючих частот ω_0, ω_1 нахил характеристики $L(\omega)$ змінюється порівняно з попереднім значенням на -20 дБ/дек, так як обидві частоти належать аперіодичним динамічним ланкам першого порядку. Високочастотна асимптота ЛАЧХ, тобто її частина при частотах, більших ω_1 , має нахил -60 дБ/дек.

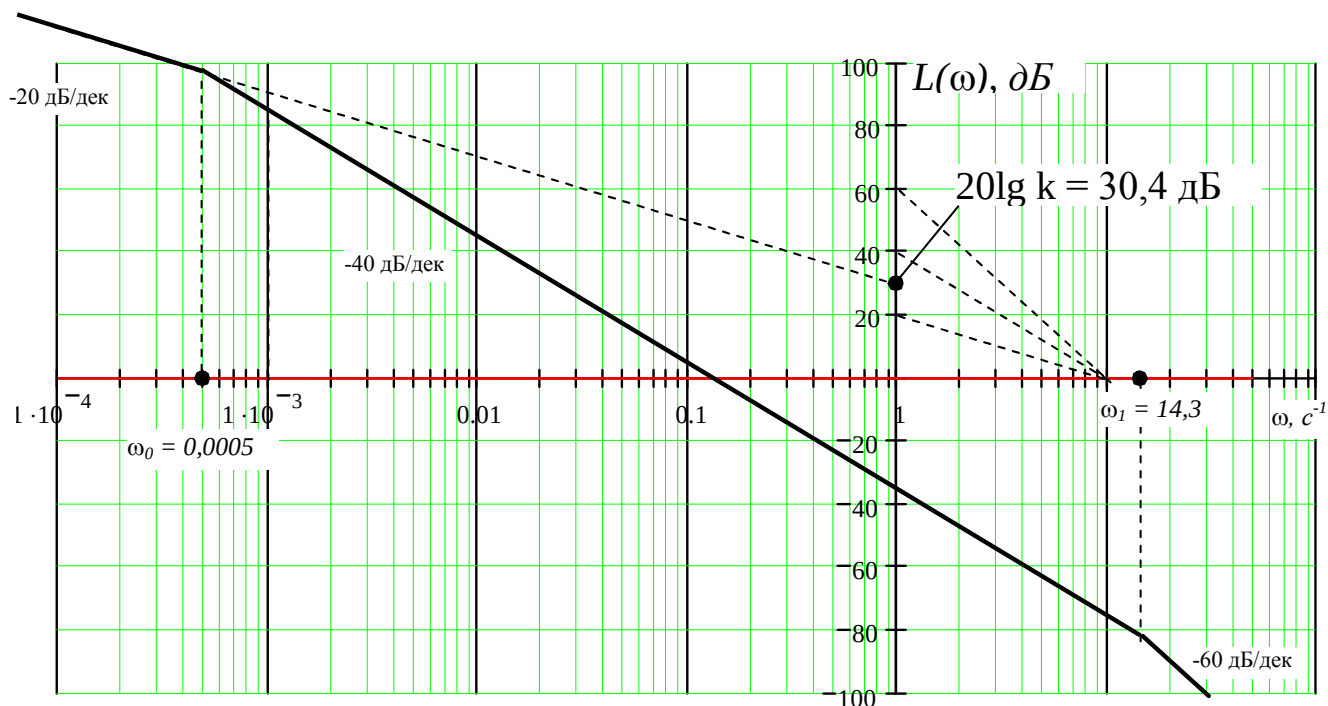


Рисунок 4.4 – ЛАЧХ розімкнутої системи $L(\omega)$

4.4.3 Побудова ЛФЧХ розімкнутої системи

ЛФЧХ одноконтурної розімкнутої системи отримується в результаті простого складання ординат фазових характеристик типових ланок, що входять до складу даної системи:

$$\phi(\omega) = \left(-\arctg(\omega T_0) - \arctg(\omega T_1) - \frac{\pi}{2} \right) \cdot \frac{180}{\pi}. \quad (4.11)$$

Підставивши відповідні значення сталих часу і змінюючи частоту від значень, близьких до нуля до сотень, за допомогою математичного редактора Mathcad отримаємо графік ЛФЧХ (рис. 4.5).

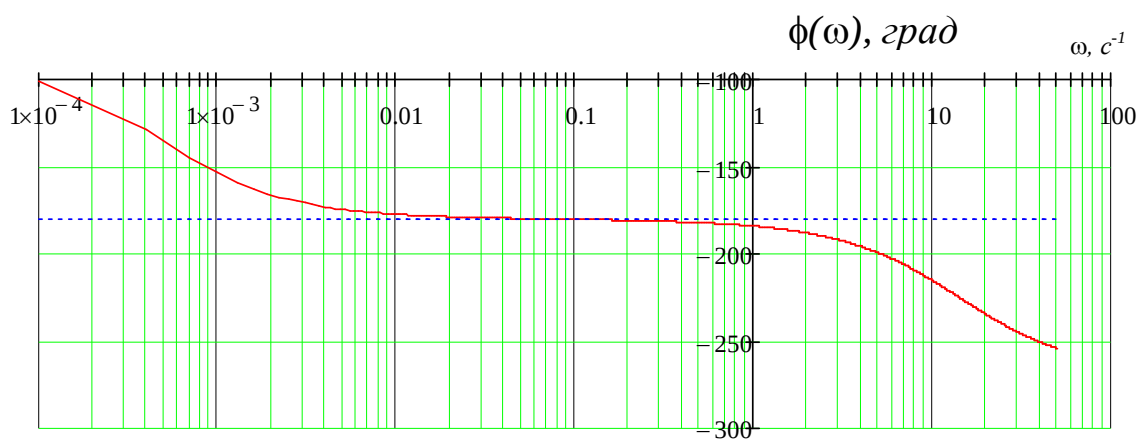


Рисунок 4.5 – ЛФЧХ розімкнутої системи $\phi(\omega)$.

4.5 Побудова дійсної частотної характеристики замкнутої системи

Для побудови дійсної частотної характеристики замкнутої системи необхідно виділити дійсну частину передаточної функції замкнутої системи, провівши заміну $p = j\omega$ ($j = \sqrt{-1}$, ω - частота). Змінюючи частоту від 0 до ∞ , відкласти відповідні значення $P_s(\omega)$:

$$W_s(\omega) = \frac{k}{-jT_1T_0\omega^3 - (T_1 + T_0)\omega^2 + j\omega + k} = \frac{k((k - (T_1 + T_0)\omega^2) - j(\omega - T_1T_0\omega^3))}{(k - (T_1 + T_0)\omega^2)^2 + (\omega - T_1T_0\omega^3)^2}$$

Провівши певні перетворення, отримаємо:

$$P_s(\omega) = \frac{k \cdot (k - (T_1 + T_0) \cdot \omega^2)}{(k - (T_1 + T_0) \cdot \omega^2)^2 + (\omega - T_1 \cdot T_0 \cdot \omega^3)^2}$$

Змінюючи частоту від 0 до ∞ , відкладемо відповідні значення $P_s(\omega)$ (рис. 4.6).

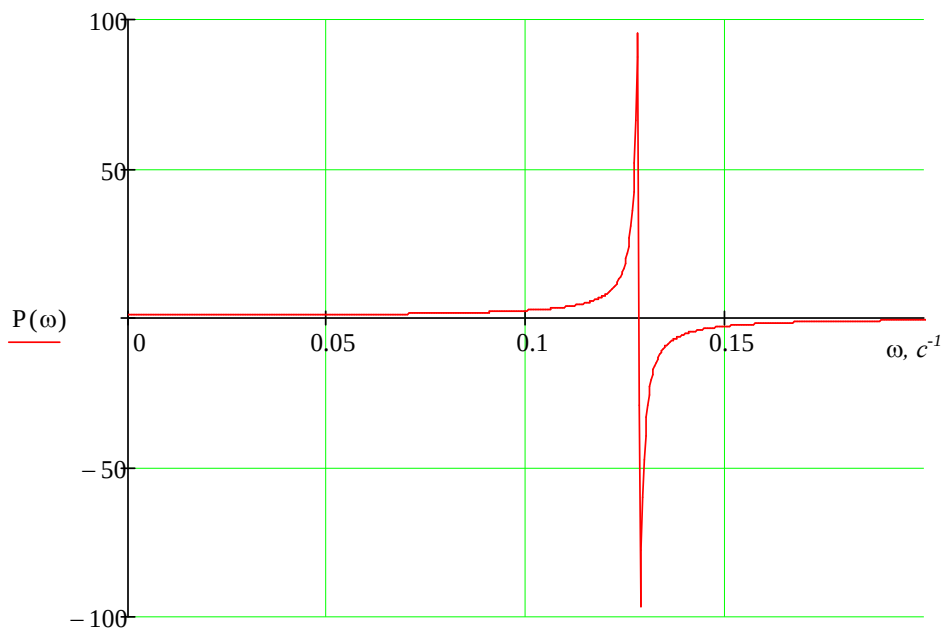


Рисунок 4.6 – Дійсна частотна характеристика замкнутої системи

4.6 Визначення стійкості замкнутої. Побудова області стійкості

Розглянуті вище критерії дають змогу визначити, чи стійка система автоматичного регулювання при певних параметрах її елементів. Практично

критерії не дають відповіді на питання про границі зміни того чи іншого параметра системи при умові збереження або досягнення стійкості. Границі або ділянку зміни одного або кількох параметрів системи можна знайти за допомогою методу D -розбиття.

Побудуємо область стійкості системи в площині параметру k_4 , тому що є можливість його зміни:

Характеристичне рівняння має вигляд:

$$T_1 T_0 p^3 + (T_1 + T_0) p^2 + p + k_0 k_2 k_3 k_4 k_5 = 0.$$

Запишемо характеристичне рівняння відносно k_4 :

$$K(p) = -\frac{T_1 T_0 p^3 + (T_1 + T_0) p^2 + p}{k_0 k_2 k_3 k_5}$$

Підставивши $p = j\omega$ та виділивши дійсну і уявну частини даного виразу, отримаємо:

$$P(\omega) = -\frac{(T_1 + T_0)\omega^2}{k_0 k_2 k_3 k_5}; \quad Q(\omega) = -\frac{\omega - T_1 T_0 \omega^3}{k_0 k_2 k_3 k_5}.$$

Побудуємо криву D -розбиття в площині параметру k_4 при зміні частоти від $-\infty$ до $+\infty$ (рис. 4.7).

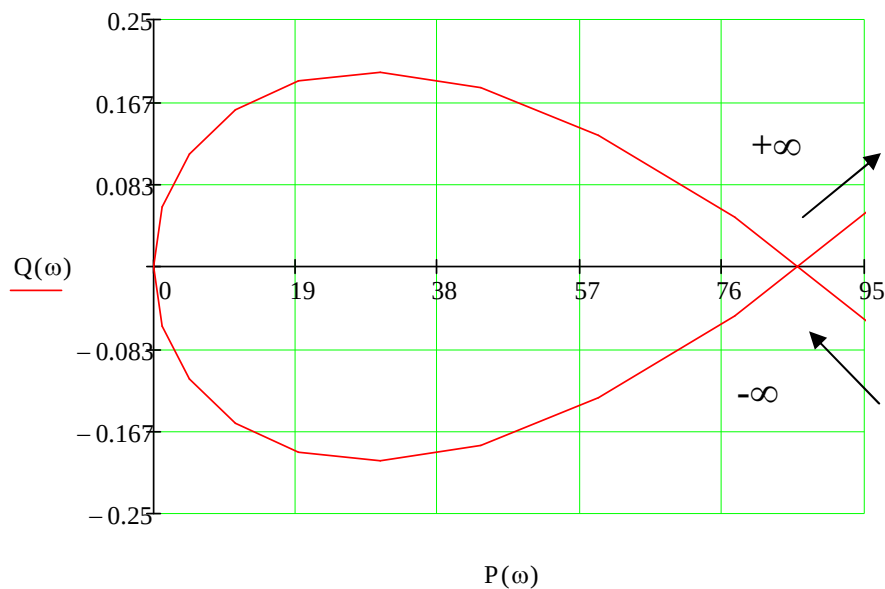


Рисунок 4.7 – D-розбиття в площині параметру k_4 .

З побудованої області стійкості можна визначити критичне значення коефіцієнта k_4 , яке в даному випадку дорівнює $k_{4кр} = 86$. Оскільки у стійкій системі всі корені містяться ліворуч від уявної вісі, при обході її від $-\infty$ до $+\infty$ ділянка стійкості також буде ліворуч від добутої кривої. Для зручності відшукування ділянки стійкості можна нанести на криву (рис. 4.7) штриховку зліва при русі від $-\infty$ до $+\infty$. Як видно, задане значення коефіцієнта підсилення підсилювача $k_4 = 200$ не входить в зону стійкості, а значить для подальших розрахунків слід прийняти k_4 з області стійкості, отже значення цього параметра приймемо $k_4 = 50$.

4.7 Оцінка якості регулювання замкнутої САР по ЛАЧХ розімкнутої системи

системи

В цьому пункті визначимо запас стійкості по модулю і фазі, та частоту зрізу. Для визначення цих величин будемо ЛАЧХ і ЛФЧХ розімкненої системи, при чому виконуємо їх взаємне розміщення (рис. 4.8).

З даної побудови можна визначити: частота зрізу $\omega_z = 0,06 \text{ c}^{-1}$, звідки

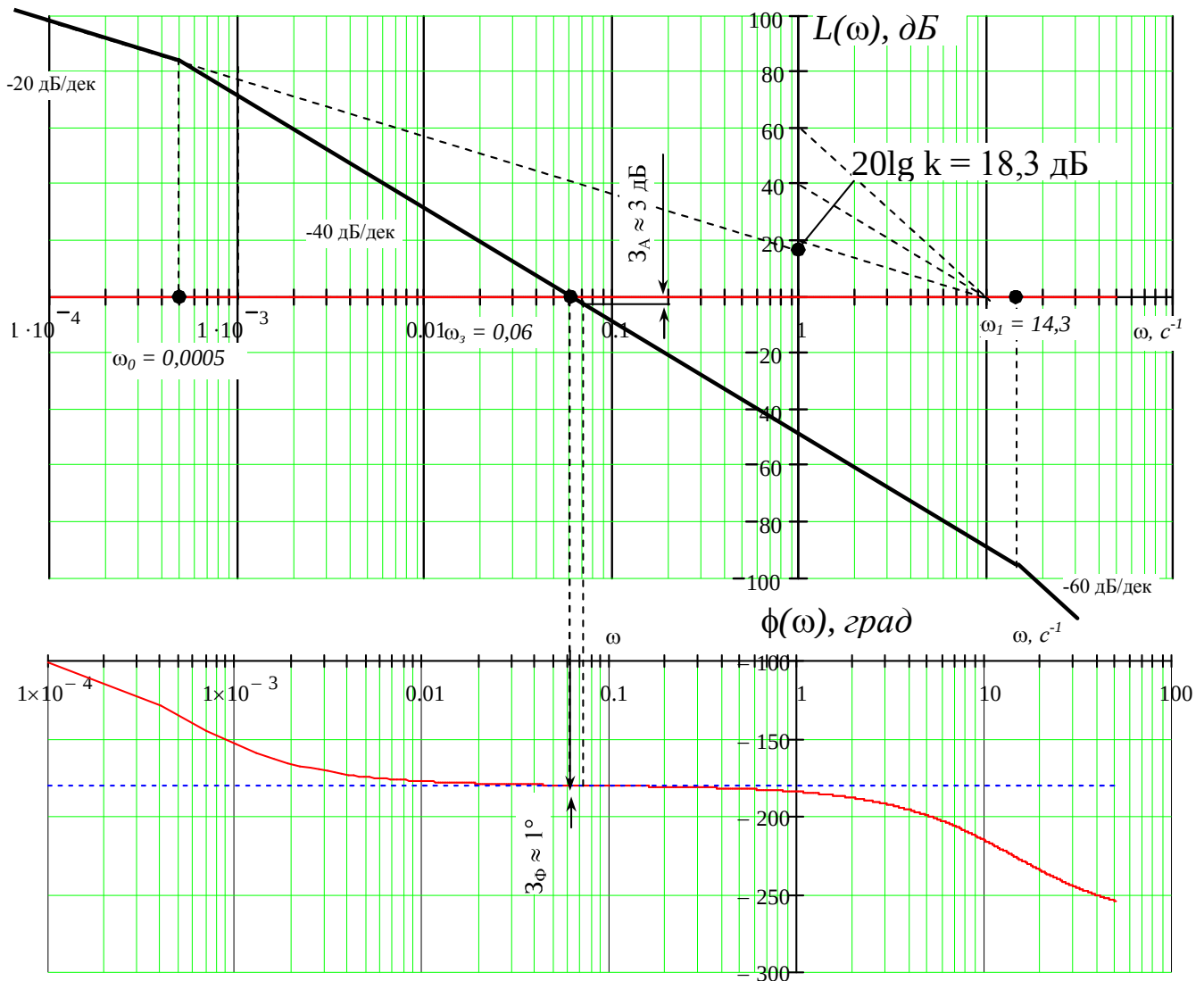


Рисунок 4.8 – Оцінка якості регулювання замкнутої САР по ЛАЧХ розімкнутої системи

можна визначити час регулювання, поставивши систему в жорсткі умови,

$t_p = \frac{2\pi}{\omega_3} = 104,7 \text{ с}$; запас стійкості по амплітуді $z_A \approx 3 \text{ дБ}$, запас стійкості по фазі

$z_\phi \approx 1^\circ$.

4.8 Побудова перехідного процесу замкнутої системи

Регульована величина в часі при подачі на вхід системи одиничного ступінчастого діяння описується залежністю

$$h(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty P_3(\omega) \frac{\sin(\omega t)}{\omega} d\omega \quad (4.12)$$

За даною залежністю за допомогою математичного редактора Mathcad отримаємо графік перехідного процесу даної системи (рис. 4.9).

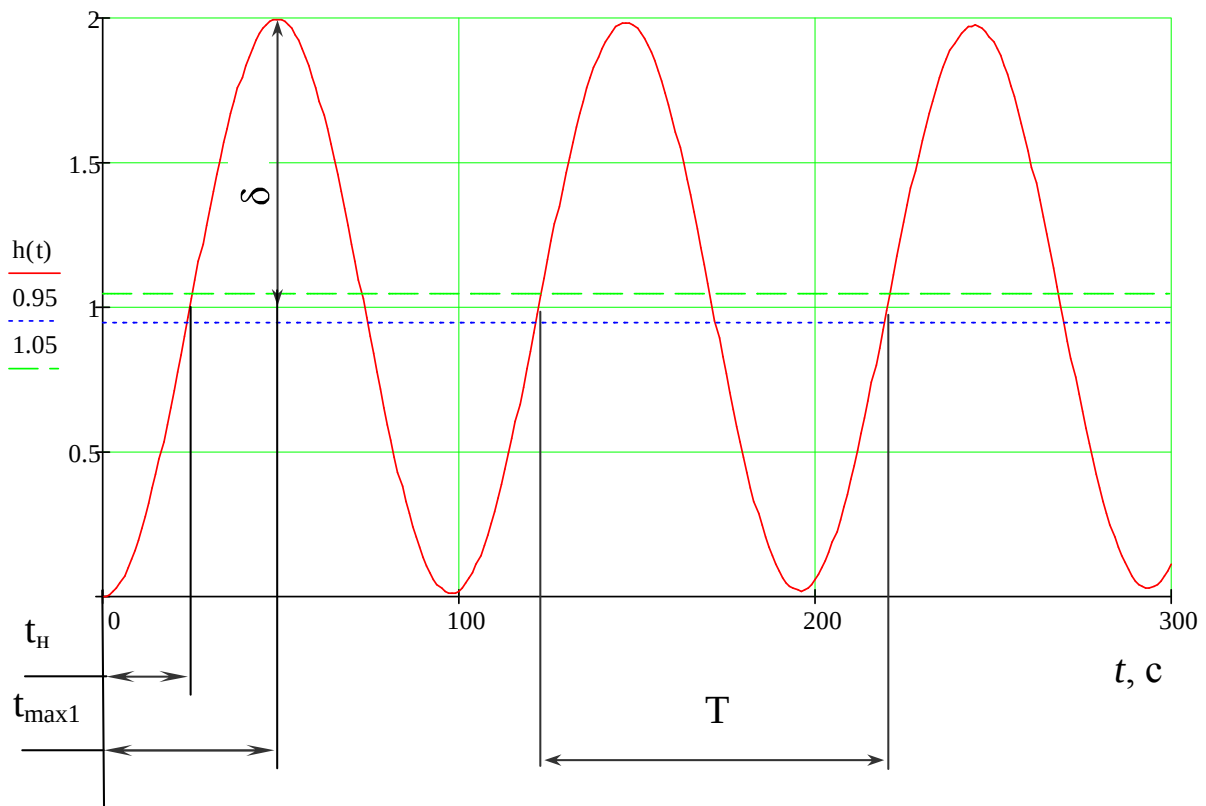


Рисунок 4.9 – Графік перехідного процесу вихідної системи

4.9 Визначення прямих показників якості САР за графіком перехідного процесу. Визначення часу регулювання системи як вимоги до САР для її синтезу

З побудованого перехідного процесу можна визначити наступні прямі показники якості САР:

- час регулювання $t_p \gg 300$ с – це час від початку дії вхідного діяння до входження системи в зону 2Δ , він залежить від швидкодії динамічних ланок та від їх кількості в головному контурі; через те, що до системи ставляться жорсткі вимоги, то даний параметр, як вимога до САР для її аналізу та синтезу, приймається за визначеним по ЛАЧХ значенням, рівним $t_p = 104,7$ с;

- перерегулювання $\delta = 99,6$ %;
- частота коливань $\omega = \frac{2\pi}{T} = 0,063$ с⁻¹, де $T = 100$ с – період коливань;
- кількість коливань перехідного процесу $n \gg 100$;
- час досягнення першого максимуму $t_{\max} = 49$ с ;
- час наростання перехідного процесу $t_n = 25$ с – це час досягнення вихідною величиною усталеного значення;

- декремент затухання перехідного процесу характеризує затухання перехідного процесу, це відношення відхилень сусідніх коливань $d = 1,01$.

Згідно вимог до системи, час регулювання для проведення її аналізу та синтезу приймається зменшеним на 30 % від отриманого, для розрахунків приймемо час регулювання, визначений по ЛАЧХ через ω_s , тобто $t_p = 104,7$ с, зменшимо його на 30 %, отримаємо $t_p = 73,3$ с. Цим ми поставимо ще більш жорсткі умови.

4.10 Побудова бажаної ЛАЧХ розімкнутої оптимальної за швидкодією системи по вимогам, які пред'явлені до неї

Вимоги до синтезуємої САР: час регулювання $t_p = 73,3$ с; максимальне перерегулювання $\delta = 25\%$; запас стійкості за модулем не менше 15 дБ; за фазою не менше 30° . Для синтезу САР необхідно побудувати вихідну ЛАЧХ розімкнутої системи, бажану ЛАЧХ та ЛАЧХ коректуючого пристрою.

Побудова бажаної ЛАЧХ виконується в кілька етапів (рис. 4.10).

Побудова в області низьких частот аналогічна до побудови ЛАЧХ незмінної системи. Тобто проводиться асимптота з нахилом -20 дБ/дек через точку з координатами $20 \lg k = 18,3$ дБ.

Побудова в області середніх частот – це найбільш відповідальна асимптота. В даному діапазоні ЛАЧХ визначається заданими значеннями перегулювання та тривалістю перехідного процесу. З міркувань наближення реального процесу до оптимального (за швидкодією) нахил середньо частотної асимптоти бажаної ЛАЧХ вибирається -20 дБ/дек. Вибір частоти зрізу ω_z (частота, при якій ЛАЧХ перетинає вісь частот) виконують на підставі нерівності $\omega_{z \min} \leq \omega_z \leq \omega_{z \text{opt}}$. Для того, щоб задовольнити вимоги до якості системи, необхідно, щоб ω_z була менше частоти зрізу $\omega_{z \text{opt}}$, яка визначається за максимальним прискоренням координати і величиною керуючого ступінчатого сигналу. Крім того дана частота ω_z повинна бути більше $\omega_{z \min}$, яка вибирається за заданим значенням максимального перегулювання δ_m та тривалістю регулювання t_p . По заданому значенню δ_m за допомогою кривої $\delta = f(P_{z \max})$ номограми визначаємо відповідне значення $P_{z \max}$. Потім по значенню $P_{z \max}$ за допомогою кривої $t_p = f(P_{z \max})$ визначаємо значення $\frac{3\pi}{t_p}$. Цю величину прирівнюємо до заданого значення $t_p = 73,3$ с і з отриманого рівняння визначаємо частоту зрізу $\omega_{z \min} = 0,13 \text{ с}^{-1}$.

Вибрану частоту зрізу $\omega_z = 1,4 \text{ с}^{-1}$ (дещо збільшену), наносимо на графік. Потім будуємо середньочастотну асимптоту, провівши її через точку ω_z на осі абсцис з нахилом -20 дБ/дек .

По відомому значенню $P_{\text{зmax}} = 1,2$ дійсної частотної характеристики знаходимо мінімальне значення $P_{\text{зmin}}$, використовуючи наближене співвідношення для типової дійсної частотної характеристики $P_{\text{зmin}} = 1 - P_{\text{зmax}} = -0,2$.

Для забезпечення необхідного запасу стійкості системи по амплітуді і фазі треба продовжити середньочастотну асимптоту ліворуч і праворуч на певну величину. Запаси стійкості знаходять по номограмам $L(\omega) = f(\varphi)$ при P_z дорівнює константі – це колові діаграми, P_z – значення дійсної частотної характеристики замкнутої системи. Отже по номограмі знаходимо лінії, які відповідають $P_{\text{зmax}} = 1,2$ і $P_{\text{зmin}} = -0,2$. Ці криві симетричні відносно осі абсцис. Запас стійкості по амплітуді знайдемо, провівши до цих кривих

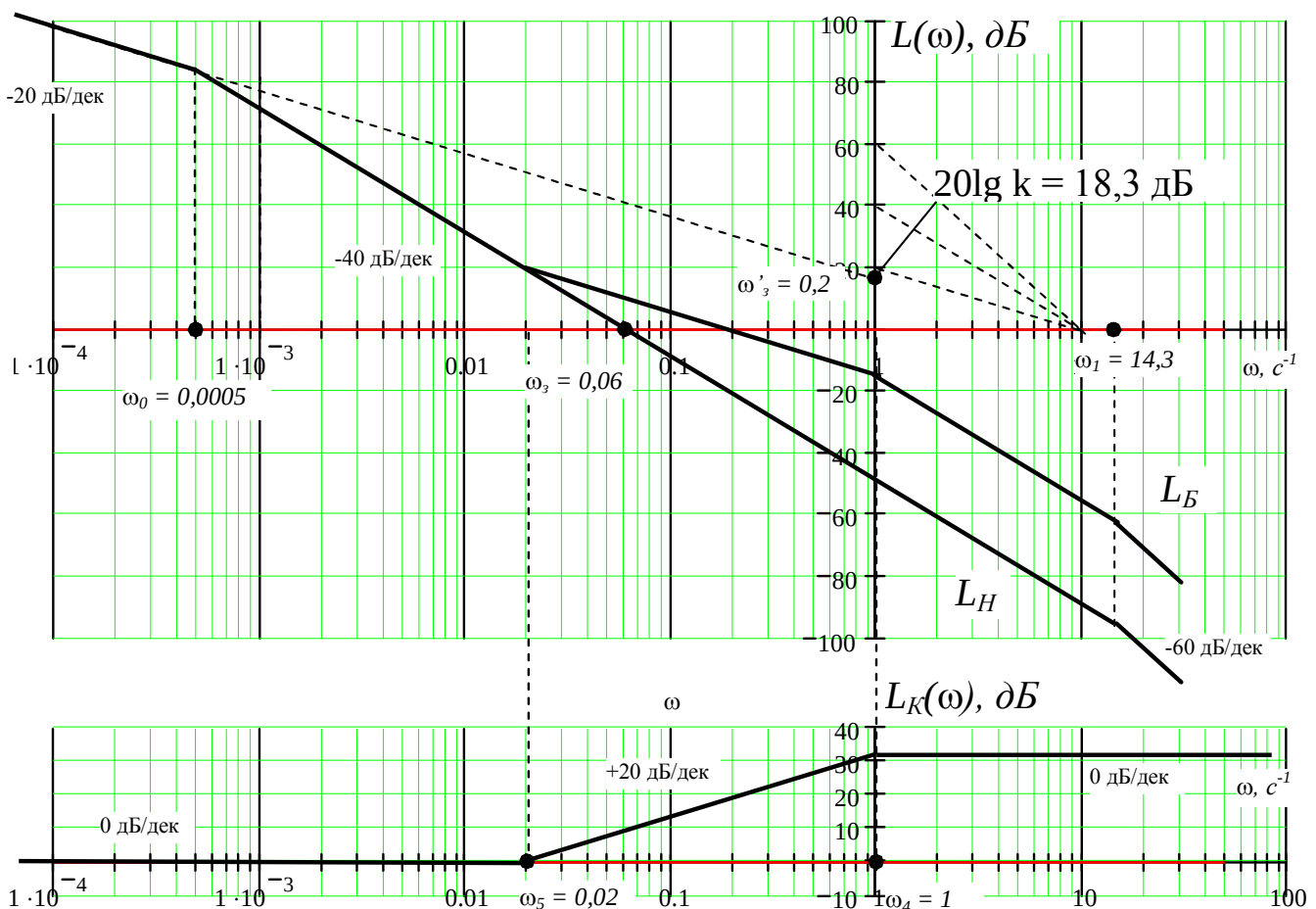


Рисунок 4.10 – Побудова бажаної ЛАЧХ та визначення ЛАЧХ

горизонтальні дотичні і прочитавши відповіді на осі ординат, $L_1 = 15$ дБ, $L_2 = -15$ дБ, тобто середньочастотну асимптоту треба продовжити ліворуч і праворуч до ординат L_1 та L_2 і лише після цього спрягати з сусідніми ділянками.

Запас стійкості по фазі γ знайдемо, провівши вертикальні дотичні до кривих $P_{\text{зmax}} = 1,2$ і $P_{\text{зmin}} = -0,2$ і відрахувавши значення кута в градусах від дотичної до лінії -180° . В даному випадку $\gamma = 45^\circ$.

4.11 Синтез коректуючого пристрою САР за логарифмічними частотними характеристиками

ЛАЧХ коректуючого пристрою визначаємо як різницю бажаної та незмінної ЛАЧХ $L_k(\omega) = L_6(\omega) - L_n(\omega)$ (рис. 4.11). За виглядом ЛАЧХ коректуючого пристрою обираємо схему коректуючої ланки і записуємо її передаточну функцію:

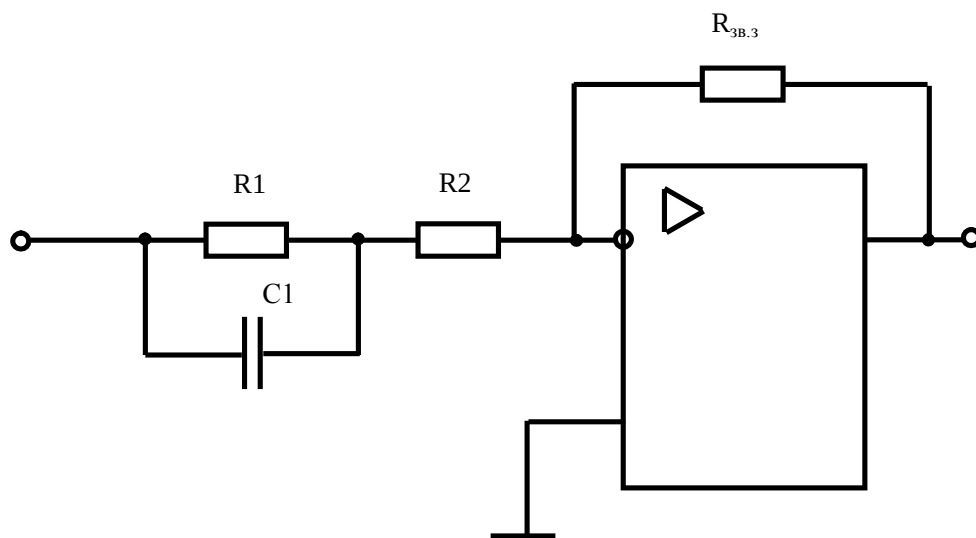


Рисунок 4.11 – Схема коректуючого пристрою

Передаточна функція такого чотирьохполюсника у загальному вигляді:

$$W_{kn}(p) = \frac{k(T_5 p + 1)}{(T_4 p + 1)}$$

де $T_4 = 1/\omega_4 = 1/1 = 1$ с;

$$T_5 = 1/\omega_5 = 1/0,02 = 50 \text{ с}$$

Підставивши у рівняння загального виду сталі часу, матимемо передаточну функцію коректуючого пристрою:

$$W_{\text{кп}}(p) = \frac{1 \cdot (50p + 1)}{(1p + 1)}$$

Обчислюємо параметри R_1 , R_2 , C схеми коректуючої ланки за допомогою формул:

$$k = \frac{R_2}{R_2 + R_1}; T_5 = R_1 C; T_4 = k \cdot T_5 = \frac{R_1 R_2 C}{R_1 + R_2}$$

Для отримання номіналів елементів коректуючого пристрою задавшись $C = 2 \times 10^{-6} = 2 \text{ мкФ}$, отримано такі значення опорів:

$$R_1 = T_5 / C = 50 / 2 \times 10^{-6} = 25 \times 10^6 = 25 \text{ МОм.}$$

$$\text{Далі, через те, що } k = T_4 / T_5 = 1/50 = 0,02 \text{ і } k = \frac{R_2}{R_2 + R_1},$$

$$R_2 = \frac{k R_1}{1 - k} = \frac{0,02 \cdot 25 \times 10^6}{1 - 0,02} = 510,2 \times 10^3 \approx 510 \text{ кОм.}$$

Вибираємо номінали резисторів зі стандартного ряду опорів $R_1 = 24 \text{ МОм}$, $R_2 = 510 \text{ кОм}$.

Вибрана коректуюча ланка є активним чотириполіусником. Для забезпечення $k = 1$ необхідно прийняти $R_{\text{зв.3}} = R_1 + R_2 \approx 24,5 \text{ МОм}$. Зі стандартного ряду опорів приймаємо $R_{\text{зв.3}}$ номіналом 24 МОм .

4.12 Побудова кривої перехідного процесу синтезованої САР

Запишемо передаточну функцію замкнутої скорегованої системи

$$W_{\text{зк}}(p) = \frac{k(T_5 p + 1)}{p(T_1 p + 1)(T_0 p + 1) \cdot (T_4 p + 1) + k \cdot (T_5 p + 1)} \quad (4.13)$$

Провівши заміну $p = j\omega$, виділимо дійсну частину передаточної функції замкнутої скорегованої системи для побудови дійсної частотної характеристики. Дану операцію доцільно здійснити засобами математичного

редектора Matcad, для чого слід записавши значення коефіцієнтів підсилення, сталих часу динамічних ланок та вираз передаточної функції в робочій області екрана, ввести наступний вираз:

$$P(\omega) := \text{Re}(W(\omega)).$$

Це дасть змогу побудувати дійсну частотну характеристику скоректованої системи (рис. 4.12).

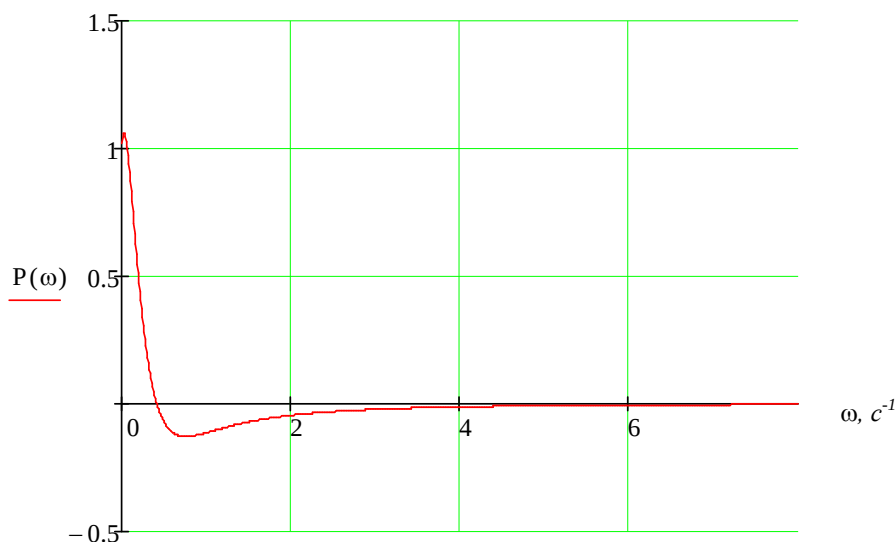


Рисунок 4.12 – Дійсна частотна характеристика замкнутої скорегованої системи

Побудуємо криву перехідного процесу синтезованої САР (рис. 4.13).

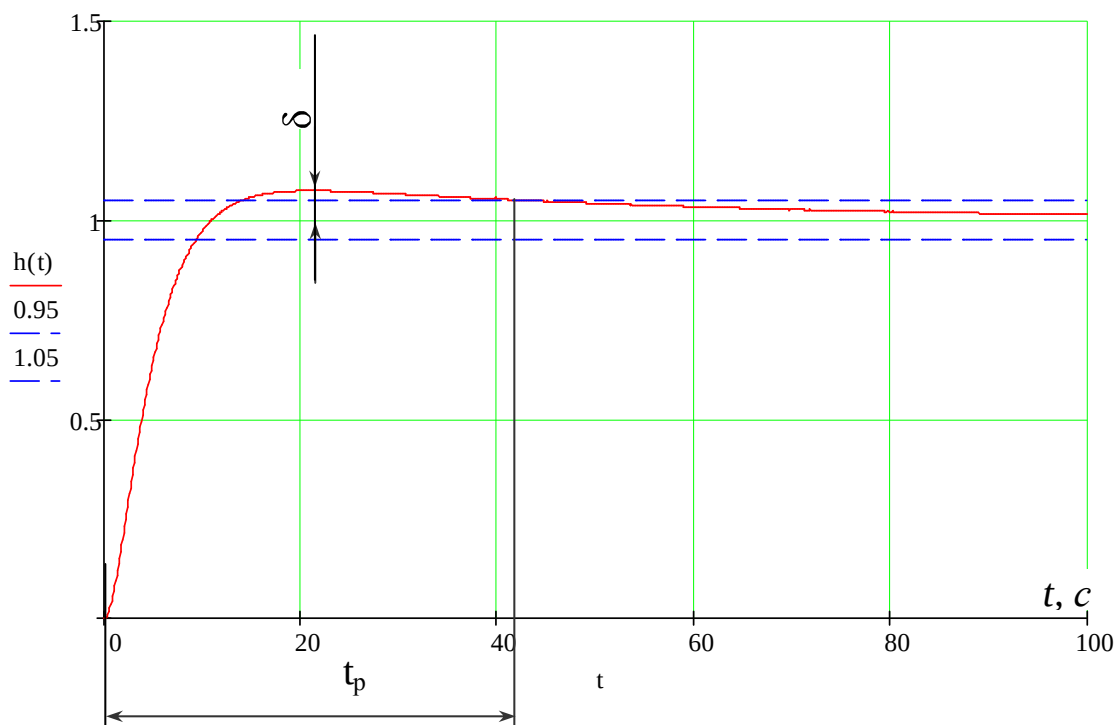


Рисунок 4.13 – Графік перехідного процесу системи, розробленої шляхом синтезу

4.13 Визначення прямих показників якості синтезованої САР

З побудованого перехідного процесу можна визначити наступні прямі показники якості САР:

- час регулювання $t_p = 42,8$ с;
- перерегулювання $\delta = 7,5$ %;
- час досягнення першого максимуму (на рис. 4.13 не наведено)

$t_{\max} = 21,6$ с;

- час наростання перехідного процесу (на рис. 4.13 не наведено)

$t_n = 10,6$ с;

- перехідний процес аперіодичний з перерегулюванням (на відміну від перехідного процесу вихідної системи).

Таким чином, реалізація отриманого виразу передаточної функції коректуючого пристрою задовольнить задані вимоги по якості системи.

ВИСНОВОК

Метою даної випускної кваліфікаційної роботи було підвищення продуктивності процесу магнітної сепарації шляхом дослідження та модернізації існуючих систем керування подачею води у технологічний агрегат

Виходячи з аналізу регульованого об'єкта здійснюється система керування точного дозування води в магнітний сепаратор.

Здійснено аналіз існуючих САК даним технологічним процесом та обґрунтовано вимоги до розроблюваної системи та її складових

В роботі було розроблено структурні та функціональні схеми системи керування.

Комплекс технічних засобів АСКТП магнітної сепарації збагачувальної фабрики містить три рівні та побудований за ієрархічним принципом.

Розроблено пристрій визначення вмісту магнітного заліза в пульпі, що дозволить точно подавати воду у агрегат. Визначено вплив теплового режиму на роботу електромагнітної котушки. Дослідженнями встановлено, що температура обмотки зростає в процесі неперервної роботи закономірно. Нагрівання до 100°C відповідає сталій часу нагріву 51,61 хвилин. Тобто, керований об'єкт є достатньо інертним. З даних дослідження видно, що в наслідок зміни температури змінюється активний опір обмотки, а як наслідок – сила струму і напруженість магнітного поля. Зміни сили струму можуть сягати 24,8...33,9%, що може викликати значні похибки вимірювання. Ліквідувати їх можливо автоматичним керуванням струмовим режимом електромагнітної обмотки.

Проведено аналіз та синтез розробленої в роботі системи.

В розділі охорони праці було розраховано захисне заземлення магнітного сепаратора.

ЛІТЕРАТУРА

1. Богданов О.С. Справочник по обогащению руд. Обоганительные фабрики.- М.: Недра.- 1984, 360 с.
2. А.с. №1018106А, G05B 13/02. Самонастраивающаяся система автоматического управления процессом мокрого измельчения. 27.05.1981.
3. А.с. 62037 U1. B02C 25/00. Устройство для контроля и оптимизации подачи воды в мокрую магнитную сепарацию. 23.10.2006.
4. Кармазин В.И. Магнитные методы обогащения /В.И.Кармазин, В.В.Кармазин.–М.:Недра, 1984.–416 с.
5. Власов А.Я. Магнитная анизотропия осадочных пород / А.Я.Власов, Г.В.Коваленко // Известия АН СССР. Серия геофизическая. – 1964. - № 12. – С.68-71.
6. Ржевский В.В. Основы физики горных пород / В.В. Ржевский, Г.Я.Новик. – М.: Недра, 1967. – 288 с.
7. Вейнберг А.К. Магнитная проницаемость, электропроводность, диэлектрическая проницаемость и теплопроводность среды, содержащей сферические и эллипсоидальные включения / А.К.Вайнберг // ДАН СССР. – 1966. – Т.169, № 3. – С.543-546.
8. Нагата Т. Магнетизм горных пород / Нагата Т. – М.: Изд-во иностр. лит., 1956. – 188 с.
9. Сливинская А.Г. Электромагниты и постоянные магниты / Сливинская А.Г. – М.: Энергия, 1972. – 248 с.
10. Основы теории цепей: уч. для вузов / [Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В.]. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.
11. Гребнев С.К. Удельная магнитная восприимчивость порошков с различным содержанием магнетита / С.К.Гребнев, Н.А.Васютинский // Обогащение руд. – 1962. – № 1. – С.25-28.
12. Любчик М.А. Силовые электромагниты аппаратов и устройств

автоматики постоянного тока. Расчет и элементы проектирования /Любчик М.А. – М.: Энергия, 1968. – 152 с. – (Библиотека по автоматике, вып. 287).

13. Любчик М.А. Оптимальное проектирование силовых электромагнитных механизмов /Любчик М.А. – М.: Энергия, 1974. – 392 с.

14. Білецький В.С., Олійник Т.А., Смирнов В.О., Скляр Л.В. Техніка та технологія збагачення корисних копалин. Частина І. Підготовчі процеси. – Кривий Ріг: Видавець ФОП Чернявський Д.О., 2019. –200 с.

15. Смирнов В.О., Білецький В.С. Проектування збагачувальних фабрик. [навчальний посібник] – Донецьк: Східний видавничий дім, 2002. – 296 с.

16. Самилін В., Білецький В. Спеціальні методи збагачення корисних копалин (курс лекцій). — Донецьк: Східний видавничий дім, 2003. — 116 с.

17. Зайцев Г.Ф. Теорія автоматичного управління / Зайцев Г.Ф., Стеклов В.К., Бріцький О.І.; за ред. проф. Г.Ф. Зайцева. - К.: Техніка, 2002.- 688с.

18. Попович М.Г. Теорія автоматичного керування: [підручник] /Попович М.Г., Ковальчук О.В. - К.: Либідь, 1997. - 544 с.

19. Техническая кибернетика. Устройства и элементы систем автоматического регулирования и управления. Кн. 2. Усилительные устройства, корректирующие элементы и устройства /[Алекперов В.П., Бартольд Э.Е., Бекешко Н.А. и др.]; под. ред. В.В. Солодовникова. - М.: Машиностроение, 1975. - 687 с.

20. Теория автоматического управления. Ч.І. Теория линейных систем автоматического управления: [учебн. пособ.] /[Бабаков Н.А., Воронов А.А., Воронова А.А. и др.]; под. ред. А.А. Воронова. - М.: Высшая школа, 1977.-303с.

21. Теория автоматического управления. Ч.ІІ. Теория нелинейных и специальных систем автоматического управления: [учебн. пособ.] /[Бабаков Н.А., Воронов А.А., Воронова А.А. и др.]; под. ред. А.А. Воронова. - М.: Высшая школа, 1977.-288с.

22. Воронов А.А. Основы теории автоматического управления:

Автоматическое регулирование непрерывных линейных систем /Воронов А.А. - М.: Энергия, 1980.-312с.

23. Иващенко Н.Н. Автоматическое регулирование. Теория и элементы систем: [учебник для вузов] /Иващенко Н.Н. - М.: Машиностроение, 1978. - 736 с.

24. Сборник задач по теории автоматического регулирования и управления /[Бесекерский В.А., Герасимов А.Н., Лучко С.В. и др.]; под. ред. В.А. Бесекерского. - М.: Наука, 1978. - 510 с.

25. Бесекерский В.А. Теория систем автоматического регулирования /В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. – М.: Наука, 1972. – 768 с.

26. Воронов А.А. Основы теории автоматического регулирования и управления /Воронов А.А., Титов В.К., Новогранов Б.Н. - М.: Высшая шк., 1977.- 519 с.

27. Основы теории автоматического регулирования: [учебник для вузов] /[Крутов В.И., Данилов Ф.М., Кузьмик П.К. и др.]; под ред. В.И. Крутова. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1984. - 368 с.

27. Бородин И.Ф. Технические средства автоматики. - М.: Колос, 1982. - 303 с.

28. Цикерман Л.Я., Шимкович В.В. Проектирование, монтаж и эксплуатация систем автоматики. Учеб. Пособие. М.:”Высш. школа” 1971. – 312 с.

29. Танатар А.И. Элементы промышленной автоматики и их динамические свойства, К.: Техника, 1975. – 232 с.

30. Жидецкий В. Ц. Основи охорони праці : Підручник, вид. 6-е, стереотипне. Львів : Афіша, 2005. 352 с.

31. Про охорону праці. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12#Text> (дата звернення 28.11.2022).

32. Конституція України : офіц. текст. Київ. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/254%D0%BA/96-%D0%B2%D1%80#Text> (дата звернення 28.11.2022).

33. Основи законодавства України про охорону здоров'я. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2801-12#Text> (дата звернення 28.11.2022).

- 34 Закон України «Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/39/95-%D0%B2%D1%80#Text> (дата звернення 28.11.2022).
35. Закон України «Про забезпечення санітарного та епідемічного благополуччя населення». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/4004-12#Text> (дата звернення 28.11.2022).
36. Закон України «Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1105-14#Text> (дата звернення 28.11.2022).
37. Кодекс цивільного захисту України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/5403-17#Text> (дата звернення 28.11.2022).
38. Кодекс законів про працю України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/322-08#Text> (дата звернення 28.11.2022).
39. Система стандартів безпеки праці. URL: https://www.minregion.gov.ua/wp-content/uploads/2016/04/32_2_2009.pdf (дата звернення 28.11.2022).
40. Державні будівельні норми і правила. URL: <https://diam.gov.ua/normativno-pravovi-akti/derzhavni-budivelni-normi> (дата звернення 28.11.2022).
41. Санітарні правила і норми. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0011488-98#Text> (дата звернення 28.11.2022).
42. Правила улаштування електроустановок. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1143-06#Text> (дата звернення 28.11.2022).
43. Про затвердження Положення про розробку інструкцій з охорони праці. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0226-98> (дата звернення 28.11.2022).
44. Жидецький В. Ц., Джигирей В. С., Сторожук В. М та ін. Практикум із охорони праці : Навчальний посібник, за ред. канд. техн. наук, доцента В. Ц. Жидецького. Львів : Афіша, 2000. 352 с.

Додаток А

Охорона праці

А.1 Законодавчі та нормативні акти з питань охорони праці в Україні

Охорона праці (ОП) – це система правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних та лікувально-профілактичних заходів і засобів, спрямованих на збереження здоров'я та працездатності людини в процесі праці.

Основну мету ОП можна виразити наступною формулою:

$$\text{ОП} = \text{ЗТПЗ} + \text{СБНУП} + \text{ЗЗП} + \text{ППП} + \text{ПАС}, \quad (\text{А.1})$$

де ЗТПЗ – запобігання травматизму та професійних захворювань; СБНУП – створення безпечних і нешкідливих умов праці; ЗЗП – збереження здоров'я та працездатності; ППП – підвищення продуктивності праці; ПАС – попередження аварійних ситуацій.

Законодавчими актами, що визначають основні положення про ОП, є загальні закони України, а також спеціальні юридичні акти. До загальних законів, що визначають основні положення про ОП, належать: Конституція України, Закони України «Про охорону праці», «Основи законодавства України про охорону здоров'я», «Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку», «Про забезпечення санітарного та епідемічного благополуччя населення», «Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування від нещасного випадку на виробництві та професійного захворювання, які спричинили втрату працездатності», Кодекс цивільного захисту України, Кодекс законів про працю України (КЗпП). Спеціальними законодавчими актами в галузі ОП є Нормативно-правові акти про охорону праці (НПАОП), Система стандартів безпеки праці (ССБП), Державні будівельні норми (ДБН), Санітарні правила і норми (СанПіН), Правила улаштування електроустановок (ПУЕ) та інші нормативні документи [30, 31].

В основному законі України – Конституції, питанням ОП присвячені ст. 43, 45 та 46 [32].

В ст. 43 Конституції України записано: «Кожен має право на працю, що включає можливість заробляти собі на життя працею, яку він вільно обирає, або на яку вільно погоджується». «Кожен має право на належні, безпечні і здорові умови праці, на заробітну плату, не нижчу від визначеної законом». «Використання праці жінок і неповнолітніх на небезпечних для їхнього здоров'я роботах забороняється» [32].

Кожен, хто працює, має право на відпочинок (ст. 45 Конституції України). Це право забезпечується наданням днів щотижневого відпочинку, а також оплачуваної щорічної відпустки, встановленням скороченого робочого дня щодо окремих професій і виробництв, скороченої тривалості роботи у нічний час [30, 32].

У тексті ст. 46 Конституції України вказано на те, що громадяни мають право на соціальний захист, що включає право на забезпечення їх у разі повної, часткової або тимчасової втрати працездатності, втрати годувальника, безробіття з незалежних від них обставин, а також у старості та в інших випадках, передбачених законом [30, 32].

Основоположним законодавчим документом у галузі ОП є Закон України «Про охорону праці» [31], дія якого поширюється на всі підприємства, установи і організації, незалежно від форм власності та видів їх діяльності, на усіх громадян, які працюють, а також залучені до праці на них підприємствах. Цей закон визначає основні положення щодо реалізації конституційного права громадян про охорону їх життя і здоров'я в процесі трудової діяльності, регулює за участю відповідних державних органів відносини між власником підприємства, установи і організації (або уповноваженим ним органом) і працівником з питань безпеки, гігієни праці та виробничого середовища і встановлює єдиний порядок організації ОП в Україні.

В Законі України «Про охорону праці» задекларовані основні принципи державної політики в галузі ОП:

- пріоритет життя і здоров'я працівників по відношенню до результатів виробничої діяльності підприємства;

- повна відповідальність роботодавця за створення безпечних і нешкідливих умов праці;

- обов'язковий соціальний захист працівників, повне відшкодування шкоди особам, які потерпіли від нещасних випадків на виробництві і професійних захворювань;

- використання економічних методів управління ОП, проведення політики пільгового оподаткування, що сприяє створенню безпечних і нешкідливих умов праці;

- комплексне розв'язання завдань ОП на основі національних програм з цих питань та з урахуванням інших напрямків економічної та соціальної політики, досягнень у галузі науки і техніки та охорони навколишнього середовища;

- встановлення єдиних нормативів з ОП для всіх підприємств, незалежно від форм власності і видів їх діяльності;

- здійснення навчання населення, професійної підготовки і підвищення кваліфікації працівників з ОП;

- співробітництво і проведення консультацій між роботодавцями та профспілками (представниками трудових колективів) при прийнятті рішень з ОП;

- міжнародне співробітництво в галузі ОП, використання світового досвіду організації роботи щодо покращення умов і підвищення безпеки праці.

Закон України «Основи законодавства України про охорону здоров'я» визначає правові, організаційні, економічні та соціальні засади охорони здоров'я в Україні, регулює суспільні відносини у цій сфері з метою забезпечення гармонійного розвитку фізичних і духовних сил, високої

працездатності і довголітнього активного життя громадян, усунення факторів, що шкідливо впливають на їх здоров'я, попередження і зниження захворюваності, інвалідності та смертності, поліпшення спадковості [33].

Закон України «Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку» є основоположним у ядерному законодавстві України. Він встановлює пріоритет безпеки людини та навколишнього природного середовища, права і обов'язки громадян у сфері використання ядерної енергії, регулює діяльність, пов'язану з використанням ядерних установок та джерел іонізуючого випромінювання, встановлює також правові основи міжнародних зобов'язань України щодо використання ядерної енергії [34].

Закон України «Про забезпечення санітарного та епідемічного благополуччя населення» регулює суспільні відносини, які виникають у сфері забезпечення санітарного та епідемічного благополуччя, визначає відповідні права і обов'язки державних органів, підприємств, установ, організацій та громадян, встановлює порядок організації державної санітарно-епідеміологічної служби і здійснення державного санітарно-епідеміологічного нагляду в Україні [35].

Закон України «Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування від нещасного випадку на виробництві та професійного захворювання, які спричинили втрату працездатності» визначає правові, фінансові та організаційні засади загальнообов'язкового державного соціального страхування, гарантії працюючих громадян щодо їх соціального захисту у зв'язку з тимчасовою втратою працездатності, вагітністю та пологами, від нещасного випадку на виробництві та професійного захворювання, охорони життя та здоров'я [36].

Кодекс цивільного захисту України регулює відносини, пов'язані із захистом населення, територій, навколишнього природного середовища та майна від надзвичайних ситуацій, реагуванням на них, функціонуванням єдиної державної системи цивільного захисту, та визначає повноваження органів державної влади, Ради міністрів Автономної Республіки Крим,

органів місцевого самоврядування, права та обов'язки громадян України, іноземців та осіб без громадянства, підприємств, установ та організацій незалежно від форми власності [37].

КЗпП регулює трудові відносини всіх працівників, сприяючи зростанню продуктивності праці, поліпшенню якості роботи, підвищенню ефективності суспільного виробництва і піднесенню на цій основі матеріального і культурного рівня життя працівників, зміцненню трудової дисципліни і поступовому перетворенню праці на благо суспільства в першу життєву потребу кожної працездатної людини [38].

ССБП – це комплекс взаємозв'язаних стандартів, спрямованих на забезпечення безпеки праці, збереження здоров'я та працездатності людини в процесі праці. ССБП поділяються на міждержавні (ГОСТ), державні (ДСТУ), міжгалузеві (ГСТУ), галузеві (ОСТ) та стандарти підприємств по безпеці праці (СПпБП). Державні стандарти ОП – це норми і правила, що поширюються на всі галузі господарства незалежно від форми власності та виду діяльності: будівельні, санітарні норми й правила; правила розміщення електроустановок споживачів; правила дорожнього руху; положення «Про розслідування та облік нещасних випадків» тощо. Міжгалузеві норми і правила – це такі норми й правила, що регламентують ОП в кількох галузях або в окремих видах виробництва. Галузеві норми і правила розробляються на основі загальнодержавних, міжгалузевих законодавчих актів, норм та правил з урахуванням специфіки виробництва для певної галузі господарства. Вони поширюються лише на підприємства й установи даної галузі [39].

ДБН – нормативний акт технічного характеру, що встановлює обов'язкові вимоги до об'єкта нормування у будівництві. Об'єктами нормування у будівництві є: планування та забудова території, об'єкт будівництва, містобудування та архітектури і його складові частини, склад і зміст документації об'єктів будівництва, містобудування та архітектури [40].

СанПіН – обов'язкові для виконання нормативні документи, що визначають критерії безпеки та (або) нешкідливості для людини факторів

довкілля і вимоги щодо забезпечення оптимальних чи допустимих умов життєдіяльності людини [41].

ПУЕ – визначають будову, принципи улаштування, особливі вимоги до окремих систем, їх елементів, вузлів і комунікацій електроустановок. ПУЕ встановлюють вимоги до електроустановок загального призначення змінного струму напругою до 750 кВ та постійного струму напругою до 1,5 кВ [42].

НПАОП – це правила, стандарти, норми, положення, інструкції та інші документи, яким надано чинність правових норм, обов'язкових для виконання. Законодавством передбачено, що залежно від сфери дії ДНАОП можуть бути міжгалузевими або галузевими [30].

Державний міжгалузевий нормативно-правовий акт про ОП – це НПАОП загальнодержавного користування, дія якого поширюється на всі підприємства, установи, організації народного господарства України незалежно від їх відомчої (галузевої) належності та форм власності.

Державний галузевий нормативно-правовий акт про ОП – це НПАОП, дія якого поширюється на підприємства, установи і організації незалежно від форм власності, що відносяться до певної галузі.

Інструкції з ОП – це нормативний акт, що містить обов'язкові для дотримання працівниками вимоги з ОП при виконанні ними робіт певного виду або за певною професією на робочих місцях, у виробничих приміщеннях, на території підприємства, або в інших місцях, де за дорученням роботодавця виконуються ці роботи, трудові чи службові обов'язки. Інструкції з ОП поділяються на:

- інструкції, що належать до державних міжгалузевих нормативних актів про ОП;
- примірні інструкції;
- інструкції, що діють на підприємстві.

Інструкції, що належать до державних міжгалузевих нормативних актів про ОП розробляються для персоналу, який проводить вибухові роботи, обслуговує електричні установки та пристрої, вантажопідіймальні машини та

ліфти, котельні установки, посудини, що працюють під тиском, і для інших працівників, правила безпеки праці яких установлені міжгалузевими нормативними актами про ОП, затвердженими Держнаглядом охорони праці. Їх дотримання є обов'язковим для працівників відповідних професій на всіх підприємствах незалежно від їх підпорядкованості, форми власності та виду діяльності. Примірні інструкції затверджуються міністерствами чи виробничими, науково-виробничими та іншими об'єднаннями підприємств, які мають відповідну компетенцію, за узгодженням з Держпраці та Національним НДІ охорони праці. Дані інструкції використовуються як основа для розробки інструкцій, що діють на підприємстві. Останні ж розробляються з урахуванням конкретних умов виробництва та вимог безпеки, викладених у експлуатаційній і ремонтній документації підприємств-виготовлювачів обладнання, що використовується на даному підприємстві.

Власники підприємств, установ, організацій або уповноважені ними органи розробляють, на основі НПАОП, і затверджують власні положення, інструкції або інші нормативні акти про ОП, що діють у межах підприємства, установи, організації. До основних нормативних актів підприємства належать:

- Положення про систему управління ОП на підприємстві;
- Положення про службу ОП підприємства;
- Положення про комісію з питань ОП підприємства;
- Положення про роботу уповноважених трудового колективу з питань ОП;
- Положення про навчання, інструктаж і перевірку знань працівників з питань ОП;
- Положення про організацію і проведення первинного та повторного інструктажів, а також пожежно-технічного мінімуму;
- Наказ про порядок атестації робочих місць щодо їх відповідності до нормативних актів про ОП;

- Положення про організацію попереднього і періодичного медичних оглядів працівників;
- Положення про санітарну лабораторію підприємства;
- Інструкції з ОП для працюючих за професіями і видами робіт;
- Інструкція про порядок зварювання і проведення інших вогневих робіт на підприємстві;
- Загальнооб'єктові та цехові інструкції про заходи пожежної безпеки;
- Перелік робіт з підвищеною небезпекою;
- Перелік посад посадових осіб підприємства, які зобов'язані проходити попередню і періодичну перевірку знань з ОП;
- Наказ про організацію безкоштовної видачі працівникам певних категорій лікувально-профілактичного харчування;
- Наказ про організацію безкоштовної видачі молока або інших рівноцінних харчових продуктів працівникам підприємства, зайнятим на роботах з шкідливими умовами;
- Наказ про порядок забезпечення працівників підприємства спецодягом, спец-взуттям та іншими засобами індивідуального захисту.

Виходячи із специфіки виробництва та вимог чинного законодавства, власник затверджує нормативні акти із вищезазначеного списку та інші, що регламентують питання ОП.

Інструкції, що діють на підприємстві розробляються (переглядаються) керівниками робіт (начальник виробництва, цеху, дільниці, відділу і т. д.) і затверджуються роботодавцем. Служба ОП реєструє в спеціальному журналі всі інструкції, які вводяться в дію на даному підприємстві. Безпосередній керівник робіт видає працівникам на руки інструкції з ОП (під розписку) під час проведення первинного інструктажу, або вивішує на їх робочих місцях.

Перегляд інструкцій, що належать до державних міжгалузевих нормативних актів про ОП та примірних інструкцій, проводиться в міру потреби, але не рідше одного разу на 10 років, а інструкцій, що діють на

підприємстві – не рідше одного разу на 5 років, причому для професій або видів робіт з підвищеною небезпекою – не рідше одного разу на 3 роки [43].

Кожній інструкції з ОП присвоюється назва та скорочене позначення (код, порядковий номер) і вона повинна містити такі розділи: загальні положення; вимоги безпеки перед початком роботи; вимоги безпеки під час виконання роботи; вимоги безпеки після закінчення роботи; вимоги безпеки в аварійних ситуаціях. Інструкції містять тільки ті вимоги щодо ОП, дотримання яких є обов'язкове самими працівниками. Порухення працівником цих вимог розглядається як порушення трудової дисципліни. Контроль за дотриманням вимог інструкцій покладається на роботодавця.

А.2 Шкідливі та небезпечні чинники виробництва при експлуатації магнітних сепараторів

Шкідливий виробничий чинник – виробничий чинник, вплив якого за певних умов може призвести до захворювання, зниження працездатності і (або) негативного впливу на здоров'я нащадків [30].

Небезпечний виробничий чинник – виробничий чинник, вплив якого на працівника в певних умовах призводить до травм, отруєння, іншого раптового різкого погіршення здоров'я або до смерті [30].

Згідно з ГОСТ 12.0.003-74, шкідливі та небезпечні чинники за своєю природою дії діляться на: фізичні, хімічні, біологічні та психофізіологічні.

До фізичних шкідливих та небезпечних чинників, що можуть виникати при експлуатації магнітних сепараторів, належать: рухомі машини та механізми; пересувні частини виробничого устаткування; підвищена запиленість повітря робочої зони; підвищений рівень шуму, вібрацій, статичної електрики, електромагнітних випромінювань; небезпечне значення напруги в електричному колі; підвищена напруженість електричного чи магнітного полів, а також недостатня освітленість робочої зони.

До хімічних шкідливих та небезпечних чинників, що можуть виникати при експлуатації магнітних сепараторів, належать хімічні речовини, що виділяються у повітря робочої зони, а також ті, що можуть бути загальнотоксичними та подразнювальними.

До біологічних шкідливих та небезпечних чинників, що виникають при експлуатації магнітних сепараторів, належать патогенні мікроорганізми, а саме віруси і бактерії та продукти їх життєдіяльності.

До психофізіологічних шкідливих та небезпечних чинників, що можуть виникати при експлуатації магнітних сепараторів, належать фізичні перевантаження, які можуть бути статичними та динамічними, а також нервово-психічні перевантаження, до яких відносяться розумове перенапруження, монотонність праці, перенапруження органів чуття, емоційні перевантаження.

Один і той же шкідливий і небезпечний чинник за своєю природою може належати одночасно до різних груп.

А.3 Заходи з усунення чи зменшення впливу шкідливих та небезпечних чинників при експлуатації магнітних сепараторів

Однією з найважливіших задач ОП є розробка та введення на підприємстві заходів та засобів щодо усунення шкідливих і небезпечних виробничих чинників, а також створення здорових і безпечних умов праці.

Проаналізувавши можливі шкідливі та небезпечні чинники, пропонуються заходи з їх усунення або зменшення впливу, представлені нижче.

Для фізичних чинників: огородити усі рухомі машини, механізми та пересувні частини виробничого устаткування, видати респіратори та встановити потужну вентиляцію та кондиціонери для усунення запиленості повітря та покращення мікроклімату, встановити захисні екрани навколо сепараторів для зменшення рівня шуму та вібрацій, встановити систему

захисного занулення для захисту від ураження током при пошкодженні ізоляції, та встановити систему освітлення на виробничому устаткуванні, комфортного для очей працівників.

Для хімічних чинників: видавати працівникам робочу уніформу, яка захистить шкіру від потрапляння на неї хімічних речовин. До неї належать засоби індивідуального захисту органів дихання, захисні окулярі, захисний одяг та перчатки. Також від запилення приміщень може допомогти вентиляція приміщень.

Для біологічних чинників: проводити санітарно-епідеміологічні заходи, регулярне вологе прибирання в приміщеннях, встановлювати масочний режим праці під час епідемій вірусів, а також надавати додаткове харчування за наявності робіт, небезпечних для здоров'я.

Для психофізіологічних чинників: для запобігання фізичних перенавантажень необхідно своєчасно надавати працівникам щотижневі вихідні дні, щорічні оплачувані відпустки, а також скорочені робочі дні перед великими святами та скорочені робочі зміни вночі. Для запобігання розумового та емоційного перенапруження також необхідне дотримання вихідних та відпусток, а також надання своєчасної психологічної допомоги працівникам та запобігання прилюдного осуду або будь-якого приниження честі та гідності працівника.

А.4 Розрахунок захисного занулення магнітного сепаратора

Захисне занулення в електроустановках полягає в приєднанні до багаторазового заземленого нульового проводу електричної мережі корпусів та інших конструктивних металевих частин електрообладнання, котрі не знаходяться під напругою, але внаслідок пошкодження ізоляції можуть опинитися під нею.

Призначення занулення – усунення небезпеки ураження електричним струмом при порушенні ізоляції і появі на корпусах обладнання небезпечної напруги.

Проведемо розрахунок за методикою, викладеною у [44]. При розрахунках системи захисного занулення для магнітного сепаратора використовувалися такі вхідні дані:

- потужність трансформатора – 630 кВА;
- з'єднання обмоток трансформатора – зіркою;
- електродвигун асинхронної серії 4А, типу 4А1602;
- напруга $U = 380$ В;
- частота обертання двигуна $n = 3000 \text{ хв}^{-1}$;

Маємо такі умови забезпечення вимикальної спроможності занулення:

$$I_{\text{кз.}} \geq 3 * I_{\text{пл.вст.}}^{\text{н}} \quad (2)$$

$$I_{\text{кз.}} = \frac{U_{\text{ф}}}{\frac{Z_{\text{т}}}{3 + Z_{\text{п}}}} + I_{\text{пл.вст.}}^{\text{н}},$$

де $U_{\text{ф}}$ – фазова напруга, В;

$Z_{\text{т}}$ – опір трансформатора, Ом;

$Z_{\text{п}}$ – опір петлі фаза-нуль, котрий визначається за залежністю:

$$Z_{\text{п}} = \sqrt{(R_{\text{ф}} + R_{\text{н}})^2 + (X_{\text{ф}} + X_{\text{н}} + X_{\text{л}})^2}, \quad (3)$$

де $R_{\text{ф}}$, $R_{\text{н}}$ – активні опори фазового та нульового провідників, Ом;

$X_{\text{н}}$, $X_{\text{ф}}$ – внутрішні індуктивні опори фазового та нульового провідників, Ом;

$X_{\text{л}}$ – зовнішній індуктивний опір петлі фаза-нуль, Ом.

Розрахунковий повний опір трансформатора $Z_{\text{т}} = 0,129$ Ом.

Визначаємо номінальний струм електродвигуна:

$$I_{\text{едв.}}^{\text{н}} = \frac{1000 * P}{\sqrt{3} * U_{\text{н}} * \cos \alpha}, \quad (4)$$

де P – номінальна потужність двигуна, кВт;

$U_{\text{н}}$ – номінальна напруга, В;

$\cos \alpha$ – коефіцієнт потужності.

Підставивши значення, одержимо:

$$I_{\text{ел.дв.}}^{\text{н}} = \frac{1000 * 15}{\sqrt{3} * 380 * 0,91} = 25,04 \text{ А.}$$

Опір провідників, виготовлених з кольорових металів визначаємо за формулою:

$$R = \frac{\rho * l}{S}, \quad (5)$$

де ρ – питомий опір мідного провідника, $\rho = 0,018 \text{ Ом} * \text{мм}^2 / \text{м}$;

l – довжина провідника, м;

S – площа поперечного перетину провідника, мм^2 .

Зовнішній індуктивний опір петлі фаза-нуль – 0,6 Ом/км.

Основні технічні характеристики електродвигуна:

$$N = 15 \text{ кВт};$$

$$\cos \alpha = 0,91;$$

$$I_{\text{ел.дв.}}^{\text{пус.}} / I_{\text{н}} = 7,5.$$

Пусковий струм двигуна:

$$I_{\text{ел.дв.}}^{\text{пус.}} = 7,5 * 25,04 = 187,8 \text{ А}.$$

Розраховуємо номінальний струм плавкої вставки:

$$I_{\text{плавст.}}^{\text{н}} = \frac{I_{\text{ел.дв.}}^{\text{пус.}}}{\alpha} = \frac{187,8}{1,6} = 117,38 \text{ А},$$

де α – коефіцієнт режиму роботи двигуна з частим ввімкненням,

$$\alpha = 1,6.$$

Визначаємо очікуване значення струму короткого замикання:

$$I_{\text{кз.}} \geq 3 * I_{\text{плавст.}}^{\text{н}} = 3 * 117,38 = 352,14 \text{ А}.$$

Вибираємо стандартне значення перетину нульового проводу 4*60 мм і розраховуємо густину струму δ :

$$\delta = \frac{I_{\text{кз.}}}{S} = \frac{352,14}{4 * 60} = 1,47 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2}.$$

Активний r опір сталевого провідника при щільності струму 1,47 А/мм² – 2,08 Ом/км.

Індуктивний X_{ω} опір сталевих провідників при щільності струму 1,47 А/мм² – 1,25 Ом/км.

Задаємось перетином і довжиною нульового l_n і фазового l_{ϕ} сталевих провідників:

довжина нульового $l_n = 50$ м, перетин 4*60 мм, S = 240 мм²,

довжина фазового $l_{\phi} = 50$ м, перетин $\Phi = 10$ мм, S = 78,54 мм².

Визначаємо опір фазового провода:

$$R_{\phi} = r * l_{\phi} = 4,2 * 0,05 = 0,21 \text{ Ом}.$$

Визначаємо опір нульового провода:

$$R_n = r * l_n = 2,08 * 0,05 = 0,1 \text{ Ом}.$$

Визначаємо внутрішні індуктивні опори фазового та нульового провідників X_{ϕ} та X_n :

$$X_{\phi} = X * l_{\phi} = 2,52 * 0,05 = 0,13 \text{ Ом},$$

$$X_n = X * l_n = 1,25 * 0,05 = 0,06 \text{ Ом},$$

де X_{ω} – індуктивний опір провідників, Ом;

l – довжина провідника, км.

Зовнішній індуктивний опір петлі фаза-нуль $X_l = 0,6$ Ом/км.

Загальна довжина петлі фаза-нуль – 1,5 * 100 = 150 м = 0,15 км.

Тоді,

$$X_l = 0,6 * 0,15 = 0,09 \text{ Ом}.$$

На підставі отриманих даних розраховуємо Z_n і визначаємо значення струму короткого замикання:

$$Z_n = \sqrt{(R_{\phi} + R_n)^2 + (X_{\phi} + X_n + X_l)^2} = \\ = \sqrt{(0,21 + 0,1)^2 + (0,13 + 0,06 + 0,09)^2} = 0,85 \text{ Ом},$$

$$I_{кз} = \frac{U_{\phi}}{\frac{Z_l}{3} + Z_n} = \frac{380}{\frac{0,129}{3} + 0,85} = 425,53 \text{ А}.$$

Виконуємо перевірку умови надійного спрацювання захисту:

$$I_{кз} \geq 3 * I_{пневт.}^H; 425,53 > 3 * 117,38 \text{ А}.$$

Струм $I_{\text{к.з.}}$ більш ніж у три рази перевищує величину струму плавкої вставки, тому при замиканні на корпус плавка вставка перегорить протягом 5-7 сек. Завдяки цьому відбудеться вимикання пошкодженої фази.

За значенням номінального струму вибираємо плавку вставку серії ПН2-100 з номінальним струмом 80 А при напрузі мережі 380 В – запобіжник ПН2-600 [44].