

ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ БУДІВНИЦТВА, ТРАНСПОРТУ ТА ЕНЕРГЕТИКИ
КАФЕДРА АВТОМАТИЗАЦІЇ ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСІВ

“Допущено до захисту”

Зав. кафедрою АВП

к.т.н., доцент

_____ О.К. Дідик

“ ____ ” _____ 2025 р.

ВИПУСКНА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої освіти
на тему:

**«Розробка пристрою експрес-аналізу сипких
матеріалів на вміст магнітного заліза»**

**«Development of a device for rapid analysis of bulk
materials for magnetic iron content»**

Виконав здобувач вищої освіти
II курсу, групи АК-24 М
спеціальності 174 «Автоматизація,
комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка»

_____ М.В. Перевалов

« ____ » _____ 2025 р.

Керівник роботи
доц, канд.техн.наук

_____ О.М. Сербул

« ____ » _____ 2025 р.

Рецензент

доц. каф. ЕТС та ЕМ, к.т.н

_____ 2025 р.

м. Кропивницький

ЗМІСТ

Вступ.....	3
1 Характеристика області використання пристрою експрес-аналізу сипких дрібнозернистих матеріалів на вміст магнітного заліза	5
2 Огляд існуючих рішень та обґрунтування вибору прийнятого принципу побудови пристрою.....	16
2.1 Огляд існуючих пристроїв для визначення вмісту магнітного заліза в матеріалах.....	16
2.2 Аналіз існуючих рішень побудови пристроїв для визначення вмісту магнітного заліза в матеріалах.....	23
2.3 Обґрунтування шляхів удосконалення пристрою експрес-аналізу сипких дрібнозернистих матеріалів на вміст магнітного заліза.....	26
3 Дослідження теплового режиму електромагнітної котушки як керованого об'єкта по каналу електричного опору обмотки.....	34
3.1 Фізичні основи теплового режиму електромагнітної котушки.....	34
3.2 Математичне моделювання теплового режиму електромагнітної котушки.....	41
4 Розробка та дослідження системи автоматичного керування силою струму в електромагнітній котушці пристрою.....	48
4.1 Аналіз регульованого об'єкта та розробка функціональної і принципової схем системи автоматичного керування силою струму в електромагнітній котушці пристрою.....	48
4.2 Дослідження динаміки системи автоматичного керування силою струму в електромагнітній котушці пристрою	61
5 Особливості застосування пристрою експрес-аналізу сипких дрібнозернистих матеріалів на вміст магнітного заліза.....	70
Висновки.....	74
Список літератури.....	76
Додатки.....	79

ВСТУП

Сировинний потенціал України ґрунтується на значних запасах руд чорних і кольорових металів. У структурі експортної продукції провідне місце посідають чорні метали, а чорна металургія є одним із ключових секторів національної економіки. Водночас сьогодні виробничі потужності галузі використовуються майже на 40% менше від можливого рівня, переважно через нестачу залізорудної сировини. Це зумовлено поступовим виснаженням запасів багатих залізних руд, зниженням якості рудної сировини та ускладненням умов видобутку бідних руд, зокрема через збільшення глибини кар'єрів. У зв'язку з цим дедалі більша частина залізних руд проходить процес збагачення, включаючи й руди, видобуті підземним способом. Таким чином, технологіям збагачення залізних руд за сучасних умов надається особливого значення, що сприяє розширенню їх застосування в гірничо-металургійному комплексі України. Наразі магнетитові концентрати становлять понад половину загального обсягу залізорудної сировини, забезпечуючи нижчу собівартість металу порівняно з його виплавною з багатих руд.

У даний час визначена економічна ефективність глибини збагачення бідних залізних руд. Вміст заліза в концентраті 64...66% визнано оптимальним у загальному комплексі видобуток – збагачення – металургійний переділ. Вартість концентрату наближено в 1,5 рази вища вартості руд підземного видобутку. У випадку підвищення вмісту заліза в концентраті до 64...66% можливо відмовитись від будівництва або експлуатації кожної шостої доменної печі при збереженні загального виробництва та зниження собівартості металу на 6...8% [1]. Це зв'язано з тим, що використання багатого залізом шихти приводить до зменшення витрати сировини і палива на одну тону чавуну і до значного зростання продуктивності доменної печі. Відомо, що з підвищенням вмісту заліза в доменній шихті на 7% продуктивність зростає на 2,5...3% і майже на стільки ж

зменшується витрата коксу. Тому, мабуть, тенденцію до збільшення вмісту заліза в концентраті в майбутньому слід зберігати.

Збагачення магнетитових кварцитів на збагачувальних фабриках здійснюють способом магнітної сепарації. Високоякісні концентрати виробляють шляхом використання багатостадійних схем подрібнення та збагачення. В останній час з метою отримання високого вмісту заліза в концентраті підвищують стадійність технологічних процесів.

Випробування показують, що якісний склад руди на збагачувальних фабриках змінюється від зміни до зміни, а інколи різко навіть впродовж однієї зміни. Коливання крупності, подрібнюваності руди і вмісту заліза в ній приводить до коливань всього процесу збагачення і, як наслідок, до коливань кінцевих показників – вмісту заліза в концентраті та хвостах, виходу заліза в концентрат. Це приводить до втрат заліза, недоотримання готової продукції, зменшення вмісту заліза в концентраті, втрат в металургії і, як наслідок, до значних економічних збитків і негосподарського використання родовищ корисних копалин.

Ці резерви можливо використати, якщо організувати процес контролю вмісту магнітного заліза на всьому етапі переділу від кар'єру до виходу концентрату з організацією керування технологічними процесами. Тому тема магістерської роботи, присвяченої розробці пристрою експрес-аналізу сипкого матеріалу на вміст магнітного заліза, є актуальною.

1 ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЛАСТІ ВИКОРИСТАННЯ ПРИСТРОЮ ЕКСПРЕС-АНАЛІЗУ СИПКИХ ДРІБНОЗЕРНИСТИХ МАТЕРІАЛІВ НА ВМІСТ МАГНІТНОГО ЗАЛІЗА

Україна має великі запаси корисних копалин у вигляді руд чорних та кольорових металів. Руди чорних металів видобувають підземним і відкритим способом. Вони є сировинною базою чорної металургії України. Більшість з них необхідно збагачувати.

Корисні копалини являють собою складне поєднання різноманітних мінералів. Цінні компоненти зазвичай містяться у складі певних мінералів, тоді як мінерали, що не містять корисних елементів або промислово важливих домішок, утворюють пусту породу. Як правило, корисні мінерали розподілені в пустій породі у вигляді зерен різного розміру. При цьому розмежування між корисними мінералами та пустою породою має відносний характер: один і той самий мінерал у різних видах сировини може відігравати різну роль. Його значення визначається конкретними напрямками використання. Так, кварц є цінним компонентом у сировині для керамічної промисловості, тоді як у рудах чорних металів він вважається пустою породою.

Збагачення корисних копалин являє собою процес їх механічної обробки, що не супроводжується хімічними перетвореннями. Хімічний склад мінералів до та після збагачення залишається незмінним. Підвищення якості корисних копалин досягається шляхом розділення мінералів. У продукти, які називають концентратами, переходить основна частина корисних мінералів і цінних домішок, тоді як у так звані хвости потрапляє переважна кількість мінералів пустої породи та шкідливих домішок. Хвости виводяться з процесу збагачення та накопичуються у хвостосховищах, а концентрати спрямовуються на подальшу переробку і практичне використання. Окрім того, виділяють проміжні продукти збагачення, у яких вміст цінного мінералу є нижчим, ніж у концентраті, проте вищим порівняно з вихідною рудою.

Підвищення якості корисних копалин у процесі збагачення досягається шляхом відокремлення пустої породи та зосередження корисних мінералів у меншому об'ємі. Унаслідок цього зростає вміст цінного компонента, адже майже вся його кількість переходить до концентрату, об'єм якого істотно зменшується за рахунок вилучення пустої породи.

Під час збагачення використовують відмінності у фізико-хімічних властивостях мінералів, що підлягають розділенню. Кожній сукупності властивостей мінералів відповідають певні способи збагачення, які, у свою чергу, об'єднуються в окремі процеси збагачення.

Процес збагачення – це виділення одних мінералів від інших на підставі певним чином використаної відмінності у властивостях мінералів [2].

Процеси збагачення здійснюються на збагачувальних фабриках. Під збагачувальними фабриками розуміють промислові підприємства, основним призначенням яких є механічна переробка корисних копалин з метою отримання одного або кількох товарних продуктів із підвищеною концентрацією корисних мінералів або зі зниженим вмістом шкідливих домішок. Класифікація збагачувальних фабрик може здійснюватися залежно від видів збагачувальних процесів, що застосовуються на підприємстві, або відповідно до типу корисних копалин, які підлягають переробці [3].

Розрізняють наступні методи збагачення корисних копалин: гравітаційні, магнітні, електричні та флотацію [4].

Гравітаційні методи збагачення [5] засновані на використанні різних густин мінералів і різної швидкості їх падіння у водяному чи повітряному середовищі. Для розділення мінералів використовують також важкі суспензії і рідини. До гравітаційних методів збагачення відносять: відсадку, концентрацію на столах, збагачення в жолобах, на шлюзах і гвинтових сепараторах, промивку і розділення у важких середовищах. Процеси гравітації використовують для збагачення різних руд, в яких густина корисних мінералів відрізняється від густини мінералів пустих порід порівняно крупної вкрапленості корисних

мінералів або їх зростків (від 0,2 до 50 мм). Методами гравітації збагачуються залізні та марганцеві руди, руди кольорових, благородних і рідких металів, руди і розсипи, що містять мінерали титану, цирконію та інших мінералів важких металів. Їх часто використовують в поєднанні з методами флотації, магнітної та електричної сепарації.

Магнітне збагачення корисних копалин [6] 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 слабким 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: шееліт, 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 багатополіусними 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.

Розділення зерен мінералів в неоднорідному електричному полі виконується в зв'язку з різною поведінкою в ньому різних мінералів. При вивченні поведінки мінералів в електростатичному полі встановлено, що одні мінерали при зміні полярності електродів завжди відхиляються в бік лише одного електрода, інші на зміну полярності не реагують. Ті мінерали, які в електричному полі однаково відштовхуються від позитивного і негативного електродів називаються необоротними. Мінерали, що відштовхуються на більш велику відстань від електрода з від'ємним зарядом, називаються негативно оборотними, а мінерали, що відштовхуються від позитивно зарядженого електрода, називаються позитивно оборотними. Знаючи поведінку мінералів при різній полярності електродів, можливо судити про можливість їх розділення в електричному полі. Однак при цьому слід враховувати, що оборотність деяких мінералів інколи змінюється в залежності від часу електризації, температури нагріву, прикладеної напруги, матеріалу заземленого електрода, по якому переміщуються мінерали, та від інших факторів.

Успішне розділення мінералів електричним способом збагачення залежить від мінералогічного складу руди, що сепарується, крупності зерен мінералів, вологості і запиленості, в зв'язку з чим матеріал піддають попередній підготовці. Однією з підготовчих операцій є сушіння матеріалу. Допустимий вміст води визначають дослідним шляхом. Для деяких мінералів вміст води в залежності від крупності коливається від 0,5...1 до 2...3%. В інших випадках сепарація сухого матеріалу виконується при нагріванні до 40⁰...120⁰С.

Флотацією називають процес збагачення корисних копалин, заснований на використанні різних фізико-хімічних властивостей тонкоподрібнених частинок мінералів, які розділяють [7]. При цьому одні мінерали при впливі на них флотаційних реагентів прилипають до бульбашок повітря, спливають на поверхню пульпи у вигляді мінералізованої піни, а інші залишаються в пульпі. Шар мінералізованої піни, що являє собою концентрат корисного мінералу,

прибирається з машин в наступній операції обробки. Мінерали пустої породи виводяться з процесу у вигляді відвальних хвостів або відходів.

Флотація являє собою складний фізико-хімічний процес, заснований на різниці змочування поверхонь мінералів водою, що зв'язано з взаємодією сил в поверхневих шарах мінеральних частинок, води і повітря. Відомо, що між молекулами рідини діють сили тяжіння. Молекули внутрішніх шарів рідини оточені з усіх боків такими ж молекулами, як наслідок, сили тяжіння, які діють на будь-яку молекулу з різних сторін, взаємно врівноважуються. Молекули поверхневого шару випробують тяжіння нижніх шарів рідини, а молекули верхнього шару дію молекулярних сил повітря, які порівняно з внутрішніми силами незначні. Неврівноваженість молекулярних сил у поверхневому шарі рідини на межі двох контактуючих тіл створюють надлишок вільної енергії, який називають поверхневою енергією, що може виконати деяку роботу. Поверхнева енергія чисельно дорівнює поверхневому натяженню.

Поверхневою енергією володіють також і тверді тіла, у яких її величина різна. Будь-яке тіло або система тіл володіє прагненням до найменшої кількості вільної енергії. Тому при дотику тіл з молекулярною будовою, що дозволяє зменшити запас вільної енергії усіх тіл, відбувається їх взаємне притягування, а при відсутності зменшення вільної енергії притягування між тілами при дотику відсутнє. Під дією вільної енергії в місці дотику мінералу і води відбувається взаємне притягування молекул. Випадок змочування поверхні мінералу пояснюється тим, що сили притягування між молекулами поверхні мінералу і води більші сил притягування між молекулами води. У випадку незмочуваності поверхні мінералу водою сили притягування між молекулами поверхні мінералу і води менші сил притягування між молекулами води. У цьому випадку крапля води не розтікається по поверхні мінералу, а зберігає кулеподібну або близьку до неї форму.

При вивченні явищ змочування встановлено, що з добре змочуваних поверхонь мінералів вода легко і швидко витісняє повітря, в наслідок чого крапля

розтікається по таким поверхням. З поверхонь мінералів, які погано змочуються водою або зовсім не змочуються, навпаки, повітря легко витісняє воду.

Явище прилипання повітряних бульбашок до поверхонь мінералів відбувається у тих випадках, коли вага мінералів значно більша тієї сили, з якою бульбашка повітря прагне на поверхню води. Якщо ж частинка мінералу володіє невеликими розмірами, порівняно з розмірами повітряних бульбашок, то мінерал буде закріплюватись на бульбашці і разом з нею впливати на поверхню води, або флотувати. При наближенні бульбашки повітря у водяному середовищі до таких мінералів як кварц, кальцит та інші, повітря не витісняє воду з поверхонь і повітряна бульбашка до мінералів не прилипає. Отже, ті мінерали, до поверхні яких повітря не прилипає, не можуть піднятися на поверхню води, а будуть залишатися у воді навіть у тих випадках, коли частинки володіють малими розмірами. В процесі флотації до повітряної бульбашки прилипає велика кількість мінеральних частинок, тобто у флотаційній пульпі відбувається мінералізація бульбашок повітря, яка полягає в закріпленні частинок флотаційного мінералу на нижній сфері бульбашок у формі корки. Флотація здійснюється у флотаційних машинах, куди подається пульпа, відповідні реагенти і в якій створюються повітряні бульбашки та здійснюється ефективне переміщення цього середовища.

Перед збагаченням здійснюють рудопідготовку, до якої відносять дроблення, грохочення і здрібнення корисних копалин [8].

Видобута руда з кар'єра на збагачувальну фабрику може надходити у шматках крупністю до 1500 мм і крупніше. Корисні мінерали в руді знаходяться у тісному проростанні між собою і нерудними мінералами. Тому шматки руди необхідно довести до стану, який дозволяє відділити корисні мінерали від пустої породи. З цією метою руду піддають дробленню, здрібненню та класифікації.

На дроблення та здрібнення витрачається біля половини електроенергії, що споживається при збагаченні. Тому надлишкове дроблення і особливо перездрібнення приводить до марних витрат електроенергії і матеріалів. Крім

того, переподрібнення корисних копалин веде до погіршення технологічних показників у наступних операціях, оскільки переподрібнений матеріал складніше збагачується. Виходячи з цього при дробленні та здрібненні необхідно притримуватись принципу: «Не подрібнювати нічого зайвого». З цією метою операції дроблення та здрібнення виконують в кілька прийомів (стадій) з виділенням готових продуктів після кожного прийому. В залежності від максимального розміру шматків руди, що піддається руйнуванню, розрізняють наступні основні стадії дроблення та здрібнення: крупне дроблення 400...500 мм; середнє дроблення до 100...200 мм; дрібне дроблення до 20...5 мм; грубе здрібнення до 3...1мм; тонке здрібнення до 0,074мм і тонкіше.

Відношення середнього діаметра максимальних шматків або зерен вихідної руди перед дробленням або здрібненням до середнього діаметра максимальних шматків або зерен дробленого чи здрібненого продукту називають ступеню дроблення або здрібнення. Ступінь дроблення або здрібнення показує, у скільки разів зменшується розмір шматків або зерен руди в процесі. Для здійснення процесів дроблення або здрібнення використовують різні типи дробарок, в яких подолання внутрішніх сил зчеплення частинок в шматок руди виконується шляхом роздавлювання, удару, розколювання та зтирання, а в деяких випадках і злому. В залежності від способів дроблення та здрібнення дробільно-здрібнюючі машини підрозділяють на вісім основних типів, з яких п'ять відносять до дробарок і три – до млинів. Застосовують щокові, конусні, валкові, молоткові та стержневі дробарки. Серед млинів розрізняють барабанні, кільцеві роликові та бігунні. Нині в практиці збагачення руд найширше застосування отримали: для крупного дроблення руд щокові та конусні дробарки; для середнього дроблення конусні дробарки особливої конструкції; для дрібного дроблення коротко конусні, рідше валкові та інші види дробарок. Для здрібнення руд в основному використовують барабанні млини.

Грохочення – це процес розділу суміші шматків або частинок корисних копалин різних розмірів на класи за крупністю просіювання через одне або кілька

сит. При збагаченні корисних копалин розрізняють наступні види процесів грохочення: самостійне, підготовче, попереднє, контрольне, вибіркоче. Грохочення буває сухим і мокрим. Оцінку процесу грохочення здійснюють за його ефективністю – це відношення ваги підрешетного продукту до його ваги у вихідній руді. Повнота відділення дрібних зерен від крупних при грохоченні залежить від форми і розмірів зерен у вихідній руді та інших умов. Більш дрібні матеріали розділяють за розміром в процесі класифікації. Класифікація – це процес розділення матеріалів на класи крупності у водяному або газоподібному середовищі. Найбільш успішно розділення рудних зерен на класи здійснюється у водяному середовищі, тобто шляхом гідравлічної класифікації. Для гідравлічної класифікації використовують в основному механічні спіральні класифікатори та гідроциклони, для грохочення – грохоти.

Не дивлячись на те, що теорія і практика рудопідготовки в основному давно розроблені і створені, нині проводиться значна робота по удосконаленню рудопідготовки [9]. Значна увага приділяється удосконаленню млинів як найбільш енергоємних агрегатів [10].

Залізородною базою чорної металургії України є Криворізький залізородний басейн, залізородне родовище в м. Комсомольськ-на-Дніпрі та деякі інші менш потужні родовища.

Традиційно в якості сировини використовувалися бідні магнетитові руди та руда підземного способу видобутку. В останні десятиріччя стоїть задача підвищення якості залізородних концентратів та видобутої залізної руди [11]. Покращити якість залізородної сировини можливо двома способами: підвищити вміст заліза в концентратах з магнетитових кварцитів до 67...69% і збагатити руди шахтного видобутку до 62...63% заліза. При цьому збагачення повинно забезпечити не лише високу якість концентратів, але і високий витяг металу, необхідний для покриття додаткових експлуатаційних витрат.

Основним джерелом отримання високоякісних концентратів є бідні магнетитові кварцити. Промисловий досвід і теоретичні нароби показали, що ці

руди вигідно піддавати глибокому збагаченню [12], отримуючи товарні концентрати з вмістом заліза 65...67% і вище.

Витрати при виробництві високоякісних концентратів в основному підвищуються зі збільшенням питомих витрат металу, енергії, води, за рахунок зменшення продуктивності збагачувальних фабрик, виходу і витягування заліза в концентрат, підвищення амортизаційних відрахувань та інших витрат. На кожний відсоток зростання вмісту заліза в товарному концентраті питомі витрати металу, енергії, води підвищується відповідно на 3,5; 2,5 і 14,5%; продуктивність фабрики, вихід і витяг зменшуються на 2,5...3,5; 0,9 і 0,6...1,0%.

Здається, підвищувати якість залізородних концентратів на гірничо-збагачувальних комбінатах економічно не вигідно. Однак якщо врахувати зменшення питомих витрат на 1т чавуну рудної та інших складових у металургійному переділі (як результат підвищення якості концентратів), то по галузі загальна економія засобів значно більша додаткових витрат на гірничо-збагачувальних комбінатах.

Однією з найбільш важливих проблем залізородної промисловості є розробка раціональної, найбільш дешевої технології збагачення окислених руд попутного і шахтного видобутку.

Експлуатація запасів окислених залізних руд, потенціальний резерв яких за технологічними властивостями і кількості не поступається магнетитовим, ускладнена складністю комбінованих схем.

Технологія збагачення окислених залізних руд нині розвивається в наступних основних напрямках: випалмагнітне збагачення [13], пряме відновлення, флотація, використання комбінованих багатостадійних схем з магнітними, флотаційними, гравітаційними та іншими методами. В останні роки в зарубіжній та вітчизняній практиці посилені темпами розвивається новий напрям збагачення окислених руд в магнітних полях великої інтенсивності.

Підвищення якості металургійної сировини збагаченням бідних залізних руд і удосконаленням підготовки багатих руд шахтного видобутку повинно

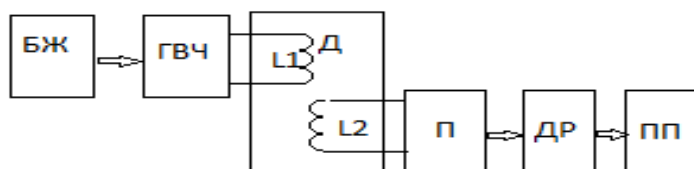
відповідати максимальній економічній ефективності в межах усього технологічного циклу переділу.

Оптимальний вміст металу в металургійній сировині, а це означає і ефективність збагачення, повинні відповідати максимальному прибутку з врахуванням усіх витрат на видобуток, збагачення і металургійний переділ.

2 ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ПРИЙНЯТОГО ПРИНЦИПУ ПОБУДОВИ ПРИСТРОЮ

2.1 Огляд існуючих пристроїв для визначення вмісту магнітного заліза в матеріалах

Один з ферометрів запропонував Уралмеханобр [14]. Він використовує властивості резонансного контура, в якому індуктивний опір котушки датчика і добротність контура залежать від магнітної проникності проби (рис.2.1).



БЖ - блок живлення; ГВЧ – генератор високої частоти; Д – датчик; П – підсилювач; ДР – детектор; ПП – показуючий пристрій

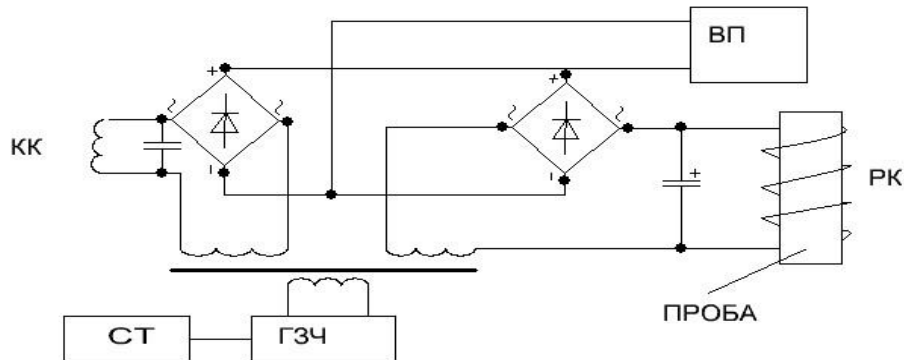
Рисунок 2.1 – Блок-схема пристрою, що реалізує резонансний метод контролю вмісту магнетиту

Зміна концентрації магнетиту приводить до зміни напруги на резонансному контурі, що фіксується вимірювальним пристроєм, шкала якого проградуйована в процентах вмісту магнетиту.

Коливальний контур генератора високої частоти ГВЧ вміщує котушку індуктивності L_1 , яка розміщується в датчику Д пристрою. Зміна об'ємної концентрації магнетиту в вимірювальному стакані приводить до зміни амплітуди напруги коливального контура. За допомогою додаткової обмотки L_2 , розташованої поруч з основною, сигнал подається на підсилювач П, де підсилюється, детектується детектором ДР і відмічається стрілочним приладом ПП.

В Інституті абразивів і шліфування розроблено пристрій для контролю за вмістом заліза в абразивних порошках шляхом періодичного або неперервного вимірювання [15].

Пристрій (рис.2.2) призначений для вимірювання вмісту заліза в сипких дрібноподрібнених матеріалах і має шкали 0-5, 0-10 і 0-20% вмісту заліза. Він складається з диференціально-вимірювальної схеми, генератора ГЗЧ звукової частоти 5кГц і джерела живлення (стабілізатор СТ). В диференціально – вимірювальну схему ввімкнені дві котушки – робоча РК і компенсаційна котушка КК.



СТ – стабілізатор; ГЗЧ – генератор звукової частоти; ВП – вимірювальний прилад; РК – робоча котушка

Рисунок 2.2 – Схема пристрою для вимірювання вмісту заліза в сипких тонкоздрібнених матеріалах

В робочу котушку РК вставляється стаканчик з вимірювальною пробєю. При внесенні проби в котушку змінюється повний опір плеча схеми, в яке вона ввімкнена, що приводить до зміни сили струму в діагоналі схеми. Відхилення стрілки пристрою ВП пропорціональне процентному вмісту магнітного матеріалу в пробі.

Модифікація пристрою для неперервного вимірювання аналогічна розглянутій, лише з тією різницею, що подача матеріалу в робочу котушку виконується автоматично порційно. Цей пристрій може використовуватись на збагачувальних фабриках чорної металургії для визначення вмісту заліза в хвостах.

Фірмою Отанмакі для контролю вмісту магнетиту в хвостах магнітного збагачення використовується мостова схема, опір плеч якої залежить від вмісту магнетиту в досліджуваному матеріалі та еталонній пробі [16].

Датчик має осердя з трансформаторного заліза з п'ятьма обмотками, які ввімкнуті відповідно рис.2.3.

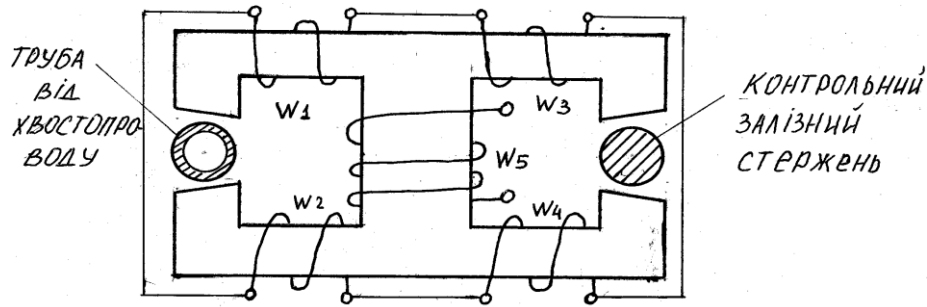


Рисунок 2.3 – Конструкція датчика контролю вмісту магнетиту

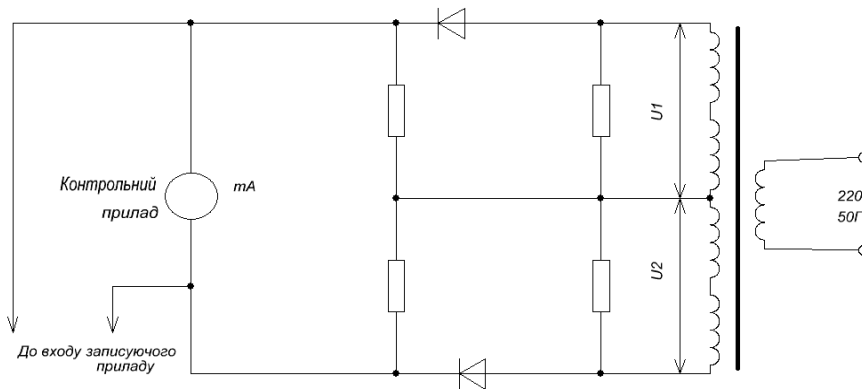


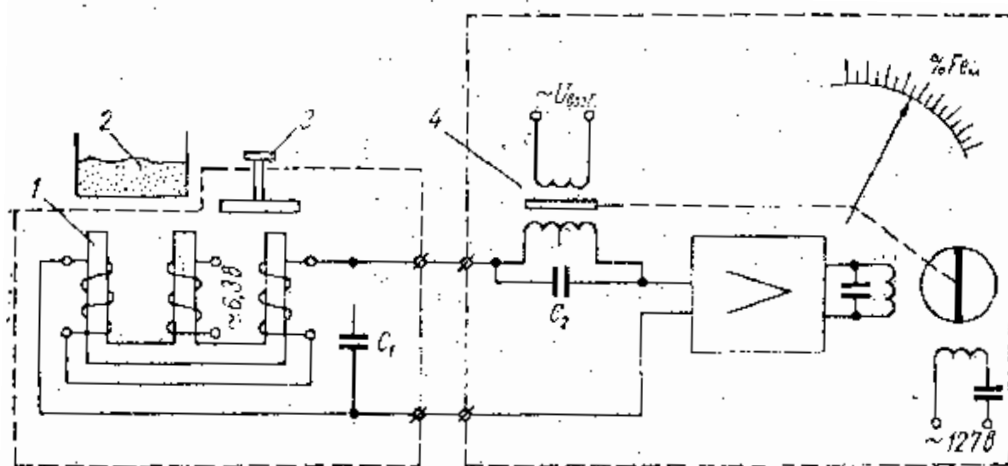
Рисунок. 2.4 – Принципова схема датчика контролю вмісту магнетиту

Осердя має два повітряних проміжка, в один з яких входить трубка з немагнітного матеріалу, а в інший – сталонний залізний стержень. По трубці протікає пульпа, що містить магнетит. При відсутності магнетиту в пульпі переміщенням сталонного стержня добиваються рівності напруг в обмотках $U_1=U_2$. Поява магнетиту приводить до порушення рівноваги, що фіксується індикатором нуля (μA), в якості якого використовують мікроамперметр. Площа поперечного перетину середнього стержня магнітопроводу 10 см^2 , крайніх стержней – по 5 см^2 . Обмоточні дані катушок $w_1=w_2=w_3=w_4=300$ витків, $w_5=1200$ витків. При цих параметрах датчик відмічає мінімальний вміст магнетиту $0,4\%$ з похибкою біля $0,1\%$ абсолютних одиниць вмісту магнетиту.

Показання пристрою залежать від об'ємної концентрації магнетиту в пульпі, тобто визначається як абсолютним вмістом магнетиту, так і густиною

пульпи. Тому пристрій зручний лише як індикатор максимальної кількості магнетиту в хвостах, оскільки при збільшенні вмісту магнітної фракції похибка вимірювання стає значною.

Для прискорення аналізу вмісту магнітної фракції в продуктах збагачення НІИАчермет спільно з хімічною лабораторією НКГЗК розроблені пристрої типу ИМФ і ИМФ-1 (вимірювач магнітної фракції) [17]. ИМФ сконструйований на базі стандартного вторинного пристрою типу ЭПИД, ИМФ -1- на базі вторинного напівпровідникового пристрою типу ВМД. Вторинні пристрої використовуються з незначними змінами схем. В якості датчика в обох пристроях використано диференційний трансформатор на Ш-подібному осерді 1 з розімкнутою магнітного системного (рис.2.5). На середньому стержні осердя розміщена обмотка збудження датчика, на периферійних – дві однакові обмотки, які ввімкнуті між собою зустрічно. Одна з цих обмоток вимірювальна, інша-компенсаційна. Результируючий сигнал вимірювальної і компенсаційної обмоток направлений зустрічно сигналу робочої котушки 4 вторинного приладу.



1-стальне осердя; 2-вимірювана проба; 3-магнітний шунт;
4-робоча котушка вторинного пристрою

Рисунок 2.5 – Принципова електрична схема вимірювача магнітної фракції типу ИМФ

У верхній частині датчика над стержнем з вимірювальною обмоткою виконано паз для фіксованого встановлення кювети 2 з пробою. У випадку

відсутності кювети з пробою за допомогою гвинта 3, що являє собою магнітний шунт, встановлюється нульове показання стрілки пристрою. Узгодження фаз вихідного сигналу датчика і сигналу робочої котушки вторинного приладу здійснюється за допомогою конденсаторів С1 і С2.

Якщо над стержнем з вимірювальною обмоткою встановити кювету з пробою, то на виході датчика з'явиться сигнал, величина якого пропорційна вмісту заліза магнетиту в пробі. Показання вторинного приладу при цьому будуть пропорційні кількості заліза магнетиту в пробі

$$S=kPF_{em}, \quad (2.1)$$

де k - сталий коефіцієнт;

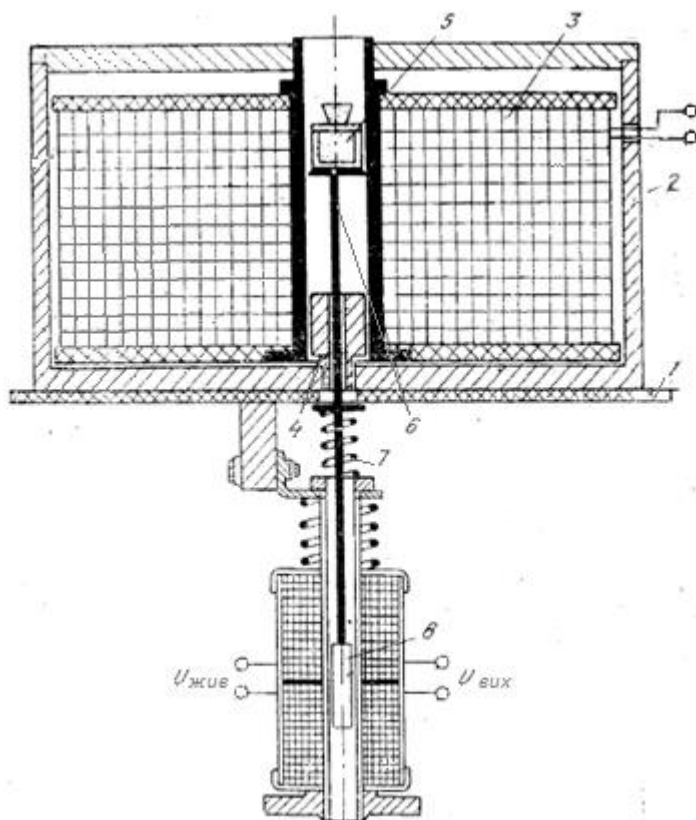
P – вага проби;

F_{em} – вміст заліза магнетиту в пробі.

З залежності (2.1) витікає, що процентний вміст заліза магнетиту в пробі можливо знайти як відношення показань приладу до ваги проби. Шляхом перетирання проби хвостів від початкової крупності – 1,0+0,074 мм до крупності 90% класу – 0,074мм з одночасним проведенням проміжних вимірювань на приладі було встановлено, що при зменшенні крупності вага проби і показання пристрою зменшується, а відношення S/P - залишається незмінним. Оскільки крупність частинок здрібненого матеріалу в пульпі вихідного живлення або хвостів магнітної сепарації на рудозбагачувальних фабриках знаходиться в основному в межах від 0 до 1,0 мм, то при вагомому дозуванні додаткового здрібнення проби матеріалу до крупності 90% класу-0,074мм не потребується. Це дозволяє значно скоротити тривалість аналізу (не більше 3хв.). Вага вимірюваної проби може бути в межах від 5 до 15 г. Пристрої ИМФ мають три границі вимірювання (0...10), (0...40) і (0...65)%. Зміна межі вимірювання здійснюється шляхом зміни напруги живлення робочої котушки вторинного пристрою. Середньоквадратична відносна похибка показань приладу на всіх межах вимірювання дорівнює 2%. Живлення пристроїв здійснюється від мережі

змінного струму напругою 220В (або 127В) промислової частоти [18].

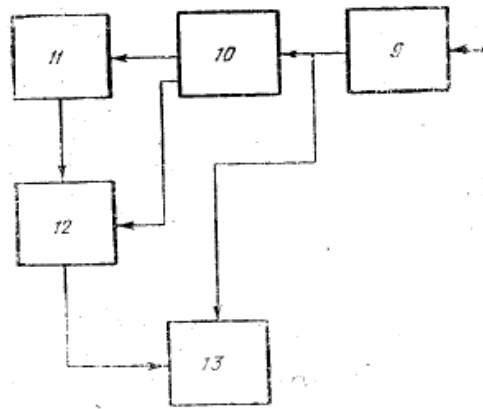
Відомий також магнітний аналізатор, в якому проба, що містить деяку кількість феромагнітних частинок, намагнічується в неоднорідному магнітному полі з постійним градієнтом до межі насичення. Для отримання магнітного поля з постійним градієнтом використовують гіперболічно-циліндричні наконечники полюсів з магнітом'якого заліза. Магнітна сила, що діє на пробу, пропорційна кількості феромагнітного матеріалу в ній. Магнітна сила і вага проби вимірюється електродинамічними вагами. Схема електрична пристрою дозволяє отримати співвідношення магнітної сили до сили тяжіння, величина якого відраховується по шкалі потенціометра.



1 – основа; 2 – магнітний екран; 3 – котушка; 4 – стальне осердя котушки; 5 – кювети з феромагнітним матеріалом; 6 – рухомий шток; 7 – пружина; 8 – осердя
Рисунок 2.6 – Конструкція пристрою для визначення вмісту феромагнітного матеріалу

Відомий також пристрій, описаний в [19]. Його конструкція приведена на рис.2.6, а блок-схема – на рис.2.7. Пристрій містить основу 1, магнітний екран 2, котушку 3, стальне осердя 4, кювету з феромагнітним матеріалом 5,

рухомий шток 6, пружину 7, осердя 8, стабілізатор напруги 9, блок живлення 10, електромагнітну котушку 11, лінійний диференціальний трансформатор 12, вимірювальний прилад 13.



9 – стабілізатор напруги; 10 – блок живлення; 11 – електромагнітна котушка; 12 – лінійний диференціальний трансформатор; 13 – вимірювальний прилад

Рисунок 2.7 – Блок-схема пристрою для визначення вмісту феромагнітного матеріалу

На нерухомій основі 1 у магнітному екрані 2 змонтована циліндрична котушка 3, при цьому її екран виконує функцію магнітопроводу. У нижній частині внутрішньої порожнини котушки розміщене осердя 4, виготовлене з магнітного матеріалу.

Кювета 5 з феромагнітним матеріалом встановлюється в порожнині котушки на площадці рухомого штока 6. Шток впирається опорним кінцем в сталеву циліндричну пружину 7, у якої нижній кінець закріплено нерухомо. Нижня частина штока закінчується осердям 8 з магнітом'якого матеріалу, який входить у порожнину котушки стандартного датчика переміщення, що являє собою лінійний диференціальний трансформатор. Вторинна обмотка датчика переміщення ввімкнута у вимірювальну схему. Каркас котушки, шток і кювета з кришкою виготовлені з немагнітного матеріалу.

При подачі напруги на котушку соленоїда в порожнині останнього виникає магнітне поле, в яке розміщують кювету з феромагнітним матеріалом. Кювету розташовують в тій частині порожнини соленоїда, де забезпечується постійність

прирошення величини напруженості магнітного поля по довжині, тобто в зоні постійного градієнта магнітного поля.

Наявність феромагнітного матеріалу в магнітному полі котушки викликає появу додаткового магнітного потоку, який перпендикулярний основному магнітному потоку, що спрямований по осі котушки. Взаємодія цих потоків викликає появу тягового зусилля, величина якого пропорціональна ваговому вмісту феромагнітного матеріалу в пробі. Величина переміщення кювети пропорційна величині тягового зусилля.

Датчик переміщення перетворює величину лінійного переміщення кювети з феромагнітним матеріалом в напругу, яка подається на вимірювальний пристрій або вимірювальну компенсаційну схему.

2.2 Аналіз існуючих рішень побудови пристроїв для визначення вмісту магнітного заліза в матеріалах

Пристрій, що розробляється, призначений для визначення вмісту магнітного заліза в рудах кар'єрів, шахт, матеріалів на дробарних фабриках та продуктів збагачення, включаючи відвальні хвости та проміжні продукти. Тому огляд існуючих рішень пристроїв необхідно проводити з врахуванням вмісту магнітного заліза в названих продуктах. В хвостах вміст магнітного заліза може бути в межах 0,5...5,0%, у вихідній руді збагачувальних фабрик, рудах кар'єрів і шахт – 6,8...35% і більше. У промпродуктах збагачувальних фабрик вміст магнітного заліза може знаходитись практично в межах 35...60%. Отже, бажано щоб прилад, який розробляється, міг вимірювати вміст магнітної фракції в межах 0,5...60%.

Крім того, необхідно враховувати відносну похибку вимірювання вмісту магнітного заліза та вплив на неї навколишнього середовища – тиску атмосферного повітря, вологи, температури, запиленості повітря.

Розглянемо відповідність існуючих засобів контролю вмісту магнітної фракції в матеріалах розглянутим умовам.

Перш за все необхідно відмітити, що всі розглянуті засоби потребують підготовки проб перед вимірюванням або подрібнення і скорочення, або висушування і скорочення.

У ферометрі Уралмеханобру використана властивість резонансного контура, в якому індуктивний опір котушки датчика і добротність контура залежать від магнітної проникності матеріалу проби. Ферометр працює на високій частоті, котушка датчика включена в коливальний контур генератора. Зміна амплітуди напруги коливального контура є вихідним сигналом пристрою.

Індуктивність котушки датчика прямо пропорційно буде змінюватися з вмістом магнітного заліза в пробі [20], що приведе до зміни резонансної частоти генератора і, як наслідок, до зміни напруги на контурі – вихідного сигналу пристрою. Збільшення магнітної проникності проби при збільшенні вмісту феромагнітної компоненти викличе зростання індуктивності котушки і опору втрат в ній. Відповідно залежності [21]

$$Q = \frac{\omega_0 L}{r}, \quad (2.2)$$

де Q – добротність контура;

ω_0 – резонансна частота;

L – індуктивність котушки;

r – опір втрат в контурі,

добротність контура може сильно не змінитись, враховуючи, що діє механізм компенсації – зростає величина і в чисельнику, і в знаменнику.

Якщо добротність контура сильно змінюватися не буде, то вимірювання можуть здійснюватися більш-менш точно. Однак повної компенсації Q при змін L і r від вмісту магнетиту, звичайно, досягти не можливо, тому у результати вимірювання буде вноситись похибка. Похибка збільшиться і в наслідок того, що

при зростанні вмісту магнетиту в пробі буде зростати її провідність [22]. На провідність проби сильний вплив також буде здійснювати зміна вологовмісту і температури. При зміні добротності контура його резонансна крива міняє положення [21], що приводить до неоднозначності показань. Крім того, резонансна крива нелінійна і це також викликає неоднозначність навіть при незмінній добротності. Тому даний засіб не зможе забезпечувати достатню точність вимірювання. Проблематично використовувати такі високочастотні пристрої і в умовах сильної вологості навколишнього середовища відмічених підприємств.

Пристрій, що розроблено в Інституті абразивів і шліфування, містить робочу і компенсаційну котушки і живиться від генератора звукової частоти 5 кГц. При внесенні проби в робочу котушку змінюється її повний опір. Перевагою тут є використання пониженої частоти диференціально-вимірювальної схеми, де компенсуються певні похибки. Повний опір робочої котушки складається з індуктивної та активної складових, які зростають при збільшенні вмісту феромагнітної фракції, однак активна складова втрат буде визначатися і провідністю, залежною від вологості та інших факторів. Крім того, недоліком пристрою є і те, що він визначає вміст магнітного заліза лише до 20%.

Пристрій фірми Отанмакі призначений для індикації мінімальних втрат магнітного заліза в хвостах збагачувальних фабрик, тобто придатний для вимірювання вмісту магнітного продукту в потоках пульпи. Як показує аналіз конструкції даного пристрою, його можна використати і для вимірювання сипких матеріалів, замінивши трубопровід стаканчиком з пробєю. Без зміни конструкції пристрою проби будуть достатньо великими, що незручно і буде приводити до значних енерговитрат. Зменшення розміру магнітопроводу і використання промислової частоти 50 Гц взагалі може не дати ефекту. При прийнятих параметрах магнітопроводу пристрій відмічав мінімальний вміст магнітної фракції 0,4% з похибкою 0,1% абсолютних одиниць вмісту магнетиту, що складає 25% відносного значення. Враховуючи низьку точність і визначення

лише малих вмістів магнетиту, даний пристрій не можливо розглядати як базовий при реалізації приладу, який розробляється.

Пристрої типу ИМФ добре себе зарекомендували на виробництві у хімічних лабораторіях комбінатів. Кожен з них має диференціальну схему первинного перетворення, яка компенсує виникаючі похибки під впливом різних факторів, компенсаційну схему вимірювання вихідної величини, працює на низькій промисловій частоті 50 Гц. Порівняно мала вага проби 5...15г і велика абсолютна похибка вимірювань при підвищених значеннях вмісту магнітного заліза у вимірюваному матеріалі не дозволяють обрати їх як прототипи при розробці пристрою для аналізу більш широкого спектру руд і продуктів збагачення.

Магнітний аналізатор, в якому проба намагнічується в неоднорідному магнітному полі до межі насичення, дозволяє вимірювати матеріали з підвищеним вмістом магнетитової фракції, однак він відрізняється складністю і не пристосований до умов підприємств гірничорудної промисловості.

Пристрій з магнітним полем з постійним градієнтом позбавлений ряду вад, притаманних аналізаторам з намагнічуванням проби в неоднорідному магнітному полі до межі насичення. Тому його можливо прийняти як базовий при розробці аналізатора вмісту магнітного заліза для виконання експрес-аналізу руд і продуктів гірничорудної галузі.

2.3 Обґрунтування шляхів удосконалення пристрою експрес-аналізу сипких дрібнозернистих матеріалів на вміст магнітного заліза

Кількість матеріалу в пробі при вимірюванні дозується по вазі. Широкі межі і зони з постійним градієнтом магнітного поля дозволяють прийняти порівняно велику вагу проби 20 г, що підвищує представництво результатів вимірювання.

Феромагнітні включення в породах і частинки, що отримують в подрібнювальних агрегатах, звичайно мають неправильну форму. Для гірських порід і продуктів здрібнення можливо допустити, що вони мають еліпсоїдну форму. Можливо рахувати наближено, що їх розміри або вкраплини в конкретних ситуаціях майже однакові [23]. 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 [24], 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 [22]

$$(1 - \nu) \left(\frac{\mu}{\mu_1} \right)^{\frac{1}{3} 2\beta^3 (1 - \beta)} \left[\frac{(2 - \beta)\mu + (1 + \beta)\mu_2}{(2 - \beta)\mu_1 + (1 + \beta)\mu_2} \right]^{2\beta^2 (1 + \beta)(2 - \beta)} = \frac{\mu_2 - \mu}{\mu_2 - \mu_1}, \quad (2.3)$$

де ν – 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 ν ферромагнітних частинок, що визначається рівнянням (2.3), близька до лінійної при будь-яких їх концентраціях.

Реальні значення магнітної проникності проби будуть дещо відрізнятися від знайдених відповідно рівнянню (2.3), оскільки на величину магнітної проникності здійснюють деякий вплив форма, розміри і взаємне розташування ферромагнітних частинок [25]. Тому всі методи і пристрої, засновані на використанні магнітної проникності суміші, 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 [26]. 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 якорь або пробу, буде дорівнювати

$$F_E = - \frac{d}{d\delta} \int_0^{\psi\delta} I d\psi, \quad (2.4)$$

де δ – повітряний зазор ;

I – сила струму;

Ψ – потікочіплення.

З залежності (2.4) 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 розсіювання, в магнітопроводі.

Тому в загальному випадку, для того щоб користуватися рівнянням (2.4), 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 (2.4) і виконавши диференціювання, отримаємо в н'ютонах

$$F_E = \frac{1}{2} (Iw)_{\delta}^2 \frac{dG_{\delta\Sigma}}{d\delta}, \quad (2.5)$$

Тут $(Iw)_{\delta}$ - в амперах і $G_{\delta\Sigma}$ - 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

$$F_E = -\frac{1}{2}(Iw)_\delta^2 \left[\left| \frac{dG\delta}{d\delta} \right| + g_s \left(\frac{\ell_{\text{я}}}{\ell_{\text{к}}} \right)^2 \right], \quad (2.6)$$

де g_s – питома провідність потоків розсіювання Г/м;

$\ell_{\text{я}}$ – довжина якоря, зануреного в котушку, м;

$\ell_{\text{к}}$ – довжина котушки електромагніта, м.

Формула (2.6) для електромагнітів з втяжним якорем, які найбільше відповідають фізичній суті роботи пристрою, не відповідає умовам його роботи, оскільки кювета з пробєю має обмежену довжину порівняно з втяжним якорем. У пристрої для вимірювання магнітної фракції провідність магнітної системи не змінюється, тому залежність (2.6) 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 їм 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

$$F = \oint_V |jB| dV, \quad (2.7)$$

де j – густина току 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 (2.7) можливо привести до формули Максвелла

$$F = \frac{1}{\mu_0} \oint_S \left[(Bn)_S B - \frac{1}{2} B^2 n \right] dS \quad (2.8)$$

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

$$F = \frac{1}{2\mu_0} \oint_S B^2 n dS. \quad (2.9)$$

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

$$F_E = B^2 S / 2\mu_0. \quad (2.10)$$

Сила, визначена по (2.10), 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 $Hl = Iw$ [27], залежність (2.10) можливо подати у вигляді

$$F_E = \frac{\mu_0 \mu^2 I^2 w^2 S}{2\ell^2}, \quad (2.11)$$

звідки

$$\mu = \frac{Iw}{\ell} \sqrt{\frac{\mu_0 S}{2}} \sqrt{F_E}, \quad (2.12)$$

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 (2.11) 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 χ . Питома магнітна сприйнятність χ суміші залежить від вмісту в ній феромагнітної компоненти. При низькій напруженості магнітного поля H ця залежність нелінійна [28]. 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 даної роботи є удосконалення пристрою вимірювання магнітної фракції в подрібнених матеріалах шляхом ліквідування виявлених недоліків в його роботі.

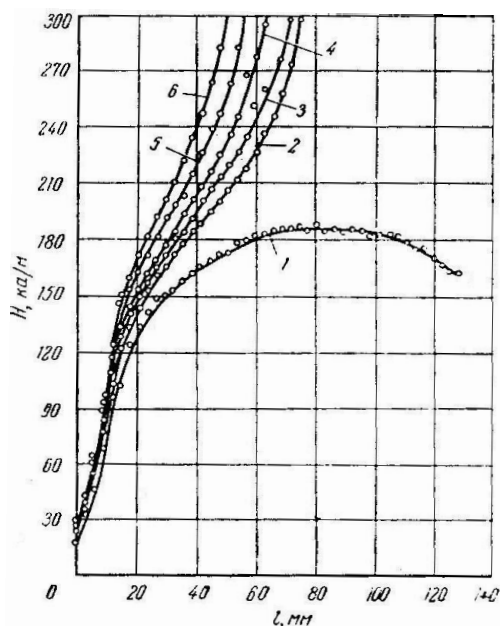
Дана мета роботи обумовлює необхідність розв'язання наступних задач:

1. Обґрунтувати конструкцію і параметри електромагнітної системи пристрою.
2. Теоретично дослідити тепловий режим електромагнітної котушки як керованого об'єкта по каналу електричного опору обмотки.
3. Розробити і дослідити систему автоматичного регулювання струмового режиму живлення пристрою.
4. Розробити особливості використання пристрою, заходи охорони праці та техніки безпеки, техніко-економічні показники.

3 ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ КОТУШКИ ЯК КЕРОВАНОГО ОБ'ЄКТА ПО КАНАЛУ ЕЛЕКТРИЧНОГО ОПОРУ ОБМОТКИ

3.1 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.



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

Рисунок 3.1 – Розподіл напруженості магнітного поля вздовж порожнини електромагнітної котушки

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.

Недовикористання по нагріву котушки приводить до завищеної витрати активних матеріалів, вартості, ваги та габаритів апарата. Надмірний нагрів зменшує термін її використання.

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.

Співставлення розрахункових і нормованих величин температури визначає можливість при використанні нагрівостійкої ізоляції виготовляти котушки, у яких створено запас по нагріву, і таким чином підвищити їх надійність. Останнє особливо важливо для електрообладнання, що забезпечує

роботу відповідальних дільниць, навіть тимчасовий вихід яких з ладу може привести до збитків, що набагато перевищують вартість обслуговуючого їх обладнання.

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

Визначення максимальної температури θ_m , а відповідно, розрахунок поля всередині котушки за реальних умов її нагріву і охолодження є досить складною задачею. Пристрій працює наступним чином. У порожнину електромагнітної котушки вставляється кювета з магнітним матеріалом. Після цього подається живлення на електромагнітну котушку і виконується вимірювання. Зафіксувавши вміст магнітного заліза в пробі, обезточуємо електромагнітну котушку, заповнюємо нову кювету матеріалом, подаємо її в порожнину котушки і здійснюємо вимірювання. Шпаруватість цього процесу складає $\varepsilon=0,5$. Середня теплова потужність у неперервному режимі роботи складе $P = \varepsilon P_T$, де P_T – теплова потужність в неперервному режимі. З умов роботи пристрою витікає, що має місце режим нестационарної теплопередачі, що описується рівнянням [29]

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \alpha \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right) + \frac{q_v}{\rho c}, \quad (3.1)$$

де θ – поточна температура;

t – поточний час;

α – коефіцієнт температуропровідності;

x, y, z – координати декартової системи;

ρ – густина;

q_v – потужність внутрішніх джерел теплоти;

c – питома теплоємність.

Причому для рівняння (3.1) задані відповідні умови однозначності, граничні та початкові умови. Для циклу роботи $q_v \neq 0$, а для циклу відпочинку

$q_v=0$. Очевидно, що розв'язати це рівняння для $q_v \neq 0$ є достатньо складною задачею, складність прямого розв'язання якої не виправдовується отриманою точністю. Однак в [28] розроблена можлива методика розв'язання такої задачі, де визначення максимального θ_m і середнього θ_{cp} перевищення температури обмотки по відношенню до осередненої температури на її поверхні θ_n для ряду виконань котушок виконано, виходячи з передумови, що спрощують математичний аналіз проблеми.

Якщо позначити $\theta_B, \theta_3, \theta_{T1}, \theta_{T2}$ – відповідно середня по даній поверхні температура внутрішньої і зовнішньої поверхні, верхнього і нижнього торця обмотки; q, q_0 – питома продуктивність внутрішніх джерел нагріву, тобто кількість теплоти, що виділяється в одиниці об'єму за одиницю часу, відповідно при температурі одиничного об'єму, яка дорівнює θ і 0°C , то при цьому розв'язання задачі по визначенню температурного поля у даному перерізі обмотки постійного струму можливо при різних виділених умовах охолодження і розподілу джерел нагріву. Всього можливо виокремити вісім умов. Даний випадок відповідає першій умові, яка полягає у наступному [20]: «Температура на внутрішній, зовнішній поверхні і торцях обмотки прийнята наближено постійною, що дорівнює температурі поверхні, тобто $\theta_B=\theta_3=\theta_{T1}=\theta_{T2}=\theta_n=\text{const}$. Розподіл джерел нагріву нерівномірний по перерізу обмотки, враховується зміна опору дроту, а як наслідок, і втрат в одиниці об'єму завдяки різному нагріву в різних місцях перетину, тобто $q=q(\theta)=\text{var}$.».

Відмічені раніше умови для реальних випадків експлуатації в деякій мірі є ідеальними в частині припущень:

- незмінності температури по тепловіддаючим поверхням і особливо рівності температур на різних поверхнях;
- повної відсутності тепловіддачі з теплоізоляційних поверхонь.

Однак порівняння експериментально отриманих картин температурного поля в перетинах ряду електричних котушок, що працюють в реальних умовах і

теоретично можливих в умовах, що відмічені раніше, а також порівняння значень максимального і середнього перевищення температури випробуваних котушок зі значеннями, отриманими за аналітичними залежностями в наслідок розв'язання загального рівняння нагрівання з прийнятними граничними умовами, дають право рахувати, що з практично допустимим наближенням вказані граничні умови можливо рахувати справедливими у наступних випадках, що реально зустрічаються на практиці.

Котушки магнітних систем постійного струму з добре розвинутою поверхнею торців, що не мають додаткової теплоізоляції, при відносно великих допустимих температурах нагріву ізоляційних матеріалів котушок, зі значними (більше $8...10^0\text{C}$) перепадам між максимальною температурою і температурою поверхні, а також котушки закритих соленоїдів, що мають добрий тепловий контакт з металевими частинами (корпус та інше) по всій тепловіддаючій поверхні, можуть бути віднесеними до умов 1 даної методики. Оскільки електромагнітна система пристрою, що розробляється, містить електромагнітну котушку циліндричного типу з зовнішнім магнітопроводом, залиту компаундом, то вона підлягає розрахунку і аналізу за даною методикою.

При визначенні відповідних значень температури і перевищення температури приймають також подані нижче загальні додаткові умови:

1. Температурне поле в різних радіальних перетинах обмотки приймають однаковим. Як показали експерименти, навіть для випадків різних умов тепловіддачі по зовнішній поверхні обмотки (опір котушки з арматурою апарата та ін.) завдяки великій теплопровідності міді дроту намотки в усталеному режимі температурні поля в різних радіальних перетинах незначно ($2...3\%$) відрізняються один від одного.

2. Складна конструкція обмотки, що складається з металу та ізоляції дроту, просочувального матеріалу компаунду, прокладок та ін., розглядається як однорідне тіло з еквівалентним коефіцієнтом теплопровідності, який не залежить від зміни температури по перетину котушки.

3. Умови нагріву обмотки при відсутності тепловіддачі з торців $\text{grad}\theta=0$ замінені в подальшому аналогічними умовами нагріву обмотки при нескінченій висоті, $H_k \rightarrow \infty$.

4. При виводі розрахункових формул використовується загальне диференціальне рівняння для усталеного режиму нагріву, застосоване до умов нагріву котушки

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} = \frac{q}{\lambda_{\kappa}^*} \quad (3.2)$$

Тут позначено: x, y – координати, що визначають по перетину (вікну) котушки положення одиничного об'єму з температурою θ ; λ_{κ}^* – еквівалентний коефіцієнт теплопровідності.

Розв'язок диференціального рівняння (3.2) може бути поданим у вигляді

$$\theta = \theta_{\Pi} + \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} B_{ij} \sin P_i x \cdot \cos S_j y, \quad (3.3)$$

де B_{ij}, P_i, S_j – сталі, що підлягають визначенню.

Аналіз показав [20], що для умов нагріву і охолодження котушки у розглянутих випадках, можливо визначити максимальне і середнє перевищення температури при нерівномірному розподілі джерел нагріву [$q=q(\theta)=\text{var.}$] відносно просто лише при $I=\text{const}$. При $U=\text{const}$ розрахунок сильно ускладнюється. Оскільки у випадку створення пристрою для експрес-аналізу дрібнозернистих матеріалів на вміст магнітного заліза і дослідження електромагнітної котушки як регульованого об'єкта приймається умова $U=\text{const}$, вести інженерні розрахунки значень температури за (3.3) практично не можливо. Тому доцільно обмежитись розглядом допущеної температури електромагнітної котушки.

Допустима температура нагріву котушки θ_g або її перевищення над температурою навколишнього середовища $\theta'_g = \theta_g - \theta_{\text{нс.}}$, визначається типом і

якістю використаних для її виготовлення матеріалів, способом обробки котушки (просочування, компаундування та ін.), а також умовами її експлуатації. Визначальним при виборі допустимої температури котушки є клас нагрівостійкості ізоляційних матеріалів, що входять до конструкції котушки (табл.3.1) [20].

Таблиця 3.1 – Класи нагрівостійкості ізоляційних матеріалів електромагнітних котушок

Клас нагрівостійкості	Y	A	E	B	F	H
Допустима робоча температура, °C	90	105	120	130	155	180

Однак виготовлена з того ж матеріалу, але просочена котушка допускає більшу температуру порівняно з непросоченою. Те ж можливо відмітити і для котушок, що працюють у стаціонарних умовах і не піддаються додатковим механічним впливам – ударам, трясці та ін. 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 $\theta_{нс} = 35...40^{\circ}\text{C}$. Як видно з табл.3.1, виділено шість класів нагрівостійкості котушок, кожен з класів має свої особливості [20]. Аналіз показав, що у випадку пристрою, який розробляється, підходить клас E. Він має наступну характеристику: «Клас E ($\theta_{д}=80...85^{\circ}\text{C}$). Ізоляція емальдротів на основі

полівінілформальових лаків або котушки, намотані емальдротом класу А, але просочені сумішами, які відносяться до більш високих класів нагрівостійкості. Пласмаси на феноло-формальдегідних смолах, гетинакс, текстоліт і т.п.(в тому числі дроти ПЄВ, ПЄМ)».

3.2 Математичне моделювання теплового режиму електромагнітної котушки

Наведені рекомендації по допустимій температурі звичайно передбачають необмежений термін служби котушки, такий, що, наприклад, дорівнює 10...100 рокам ($T=85000$ годин). Якщо передбачений час знаходження котушки в нагрітому стані в деякому конкретному використанні незначний, допустима температура ізоляції може бути підвищена з врахуванням зменшення її терміну служби. Перерахунок допустимої температури $\theta_{д2}$ відповідно даному терміну служби T_2 може бути виконаний за залежностями

$$T_2 = T_1 e^{-\epsilon(\theta_{д2} - \theta_{д1})}, \quad (3.4)$$

де T_1 і $\theta_{д1}$ – параметри, що відносяться до номінальних умов.

Допустима температура у інтенсивному режимі

$$\theta_{д2} = \theta_{д1} + \frac{1}{b} \ln \frac{T_1}{T_2}, \quad (3.5)$$

де b – коефіцієнт, що визначається типом ізоляції, наприклад $b=0,086$ для паперу і бавовни в маслі; $b=0,07$ – для паперу і бавовни в повітрі і т.п.

Тобто, допустима робоча температура електромагнітної котушки пристрою, що розробляється, може складати 120°C .

При роботі пристрою значний вплив здійснює інерційність електромагнітної котушки, яка характеризується сталого часу нагріву. У відповідності з [21] стала часу нагрівання електромагнітної котушки

визначається залежністю

$$T_k = \frac{C_k m_k}{h_n S} = \frac{C_k V_k \gamma_k \xi}{\sum_{i=1}^n h_i S_i}, \quad (3.6)$$

де C_k – питома теплоємність матеріалу котушки;

V_k - об'єм котушки;

ξ – коефіцієнт заповнення;

m_k – маса обмотки котушки;

γ_k - густина матеріалу котушки;

$\sum_{i=1}^n h_i S_i$ – сума добутків коефіцієнта тепловіддачі з поверхні котушки на

площу відповідної поверхні.

Як показує аналіз залежності (3.6), 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 еталонної котушки приймаються ідеалізовані умови експлуатації: вільний теплообмін за середніх габаритів, характерних для пристроїв автоматики, циліндрична форма котушки, робота в повітряному середовищі на рівні моря та за нормального атмосферного тиску. Електромагнітну котушку, яка за конструкцією

та умовами роботи наближена до еталонної, можна розраховувати із застосуванням спрощеної методики. 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 [20]

$$h_0 = 9,3(1 + 0,006\theta_0), \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град} \quad (3.7)$$

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

$$h_0 = a_1(1 + a_2\theta_0). \quad (3.8)$$

При розрахунках слід також враховувати теплообмін між внутрішньою поверхнею електромагнітної котушки і сталлю осердя, втяжного якоря і т.д., що не враховують залежності (3.7) (3.8). 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 [20]. 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 (3.7) і (3.8).

Визначимо параметри, що входять до залежності (3.6). 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 (3.7).

Підставивши визначені параметри в залежність (3.6), отримаємо

$$T_k = \frac{12960,09}{2,615 + 0.0157\theta}, \quad (3.9)$$

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.

Усталений режим в системі досягається у тому випадку, коли вся теплова потужність, що виділяється в електромагнітній котушці, розсіюється в навколишнє середовище, тобто усталене перевищення температури визначається залежністю

$$\theta = \frac{\varepsilon P_T}{\sum_{i=1}^n h_i S_i}, \quad (3.10)$$

де P_T – теплова потужність в неперервному режимі;

ε – шпаруватість процесу, що складає $\varepsilon \cong 0,5$.

Враховуючи, що коефіцієнт тепловіддачі з усіх поверхонь електромагнітної котушки однаковий, і рівняння (3.7), (3.8) та $S_k=0,2812\text{м}^2$, знаменник виразу (3.10) можна подати у вигляді

$$\sum_{i=1}^n h_i S_i = 9,3(1+0,006\theta)0,2812 = 2,6152(1+0,006\theta), \quad (3.11)$$

де $a_1^1 = 2,6152$, $a_2^1 = a_2 = 0,006$.

З врахуванням (3.11) вираз (3.10) прийме вигляд

$$\theta = \frac{\varepsilon P_T}{a_1^1(1 + a_2^1\theta)}$$

або

$$a_1^1 a_2^1 \theta^2 + a_1^1 \theta - \varepsilon P_T = 0, \quad (3.12)$$

звідки

$$\theta = \frac{1}{2a_2^1} \pm \frac{\sqrt{(a_1^1)^2 + 4a_1^1 a_2^1 \varepsilon P_T}}{2a_1^1 a_2^1}. \quad (3.13)$$

У рівнянні (3.13) всі параметри відомі, $P_T=IU=3,39 \cdot 173= 586,5\text{Вт}$. Підставимо в (3.13) відомі значення параметрів і визначимо усталене значення перевищення температури котушки над температурою навколишнього середовища. При цьому отримуємо $\theta_1=76,77 \approx 77^\circ\text{C}$ і $\theta_2=243,43^\circ\text{C}$. Друге значення θ_2 не має змісту, тому усталене значення перевищення температури магнітопроводу над температурою навколишнього середовища у пристрої, що розробляється, буде дорівнювати $\theta=77^\circ\text{C}$. Температура обмотки може бути набагато вищою цього значення. За прийнятими конструктивними рішеннями вона може досягати 120°C і це буде нормальним режимом роботи пристрою.

Зміна температури електромагнітної котушки буде приводити до зміни активного опору обмотки, оскільки з підвищенням температури опір металів зростає. Характер зміни визначається температурним коефіцієнтом опору. Температурним коефіцієнтом опору називають відношення величини зміни опору провідника при нагріванні на 1° до величини його опору при 0°C [22]

$$\alpha = \frac{R_\theta - R_0}{R_0 \theta}, \quad (3.14)$$

де θ – температура;

R_θ – опір провідника при температурі θ ;

R_0 – опір провідника при температурі 0°C .

У загальному випадку α залежить від температури. Для мідного дроту в межах нагріву $10 \dots 100^\circ\text{C}$ приймають температурний коефіцієнт металу дроту незмінним, який дорівнює $\alpha_0=0,00425$ 1/град, а питомий опір при 0°C на рівні $\rho_0=1,62 \cdot 10^{-8}\text{Ом}\cdot\text{м}$ [20].

Дещо більш точніше питомий опір дроту можливо визначити відповідно залежності [20]

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha_0\theta + \beta_0\theta^2), \quad (3.15)$$

де для міді $\beta_0=0,453 \cdot 10^{-6}\text{град}^{-2}$.

Знайшовши ρ_t при різних температурах по залежності $R_t = \rho_t \frac{\ell}{F}$, де ℓ - довжина, а F - площа поперечного перерізу провідника, можливо визначити опір обмотки електромагнітної котушки. Розрахунки показали, що при $\theta=77^\circ\text{C}$ опір $R_{77}=67,83\text{Ом}$, а при $\theta=120^\circ\text{C}$ $R_{120}=77,34\text{ Ом}$. Відносно початкового опору обмотки 51 Ом ці величині складають відносне відхилення відповідно 33% і $51,65\%$. Це приводить до зміни сили струму відносно початкового значення відповідно на $24,8\%$ і $33,9\%$. Зміна струму в обмотці в таких широких межах приводить до зміни напруженості магнітного поля у порожнині електромагнітної котушки, що викликає надзвичайно великі похибки і унеможлиблює визначення вмісту магнітного компонента у досліджуваних сумішах.

4 РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ СИЛОЮ СТРУМУ В ЕЛЕКТРОМАГНІТНІЙ КОТУШЦІ ПРИСТРОЮ

4.1 Аналіз регульованого об'єкта та розробка функціональної і принципової схеми системи автоматичного керування силою струму в електромагнітній котушці пристрою

Із наведеного вище випливає, що розробка пристрою експрес-аналізу сипких матеріалів на вміст магнітного заліза суттєво відстає />, оскільки промисловість уже тривалий час відчуває потребу в сортуванні матеріалів у кар'єрах, шахтах і на дробильних фабриках. Через відсутність такого приладу збагачувальні фабрики позбавлені можливості ефективно впливати на вибір і підтримання оптимального технологічного режиму. З урахуванням того, що організація випуску навіть невеликої серії подібних приладів потребує значного часу, а за сучасних умов України є практично недосяжною, доцільно зосередитися на виготовленні пристрою експрес-аналізу сипких матеріалів на вміст магнітного заліза безпосередньо на діючих підприємствах, які мають відповідний досвід, накопичений у попередні роки. Тому під час розробки слід орієнтуватися на технічні засоби, що у великій кількості наявні на залізорудних підприємствах і дають змогу прискорити та здешевити створення цих засобів контролю.

Тягове зусилля, що діє на пробу феромагнітного матеріалу, можливо описати залежністю

$$F = K\chi\rho H \text{grad}H,$$

де F – зусилля, що діє на пробу;

χ – питома магнітна сприйнятливості суміші, що аналізується і залежить від вмісту магнітного заліза;

P – вага проби матеріалу;

H – напруженість магнітного поля;

$\text{grad}H$ – градієнт магнітного поля – це вектор напруженості магнітного поля H , спрямований уздовж осі порожнини котушки X , чисельно рівний швидкості зміни напруженості поля в цьому напрямку dH/dX ;

K – сталий коефіцієнт.

Дану залежність реалізує засіб, що розробляється. Для незмінності H необхідна сталість сили струму в електромагнітній котушці пристрою.

Електромагнітна котушка пристрою для експрес-аналізу сипких матеріалів на вміст магнітного заліза має обмотку, яка живиться постійним струмом великої величини. Через значну сталу часу нагрівання електромагнітної системи спостерігається тривалий період стабілізації температури обмотки та сили струму, що призводить до втрат часу, затримки початку експрес-аналізу та додаткового споживання електроенергії. При переривчасто-відновлювальному режимі роботи пристрою не підтримується стабільний температурний стан обмотки, через що змінюється її активний опір i , відповідно, величина струму. Коливання сили струму в обмотці електромагнітної системи викликають зміни напруженості магнітного поля, що призводить до значних похибок під час вимірювань.

Усунення додаткових похибок, зменшення споживання електричної енергії та забезпечення миттєвої готовності пристрою до роботи можливе шляхом застосування системи автоматичного регулювання сили струму в електромагнітній котушці. Водночас необхідно вирішити задачу живлення обмотки електромагнітної системи постійним струмом від мережі змінного струму.

У даному пристрої доцільно використати двопівперіодне випрямлення змінного струму. Слід використати мостову схему випрямлення, оскільки її переваги перевершують недоліки. Вона перед схемами з нульовим виводом має наступні переваги:

- менша зворотна напруга, що діє на вентиль у непровідну частину періоду;
- меншу розрахункову потужність трансформатора;
- можливість здійснювати випрямлення без використання випрямного трансформатора, з безпосереднім підведенням змінної мережевої напруги до випрямного мосту [24].

Однак в даному випадку необхідно застосувати трансформатор для узгодження величини напруги живлення електромагнітної системи з заданою напругою змінного струму мережі. Враховуючи, що може змінюватися напруга мережі живлення і активний опір електромагнітної системи, необхідно застосувати, крім того, поворотний автотрансформатор. Випрямлену напругу необхідно згладжувати, оскільки вона має хвильовий характер – містить пульсації. Найбільшою амплітудою володіє основна гармонічна складова. Відношення амплітуди цієї гармонічної U_{nm} до величини випрямленого значення U_d складає коефіцієнт пульсацій, який дорівнює

$$K_{\Pi} = \frac{U_{nm}}{U_d} . \quad (4.1)$$

Допустима величина коефіцієнта пульсацій визначається характером навантаження. Наприклад, при живленні каскадів підсилення низької частоти величина K_{Π} не повинна перевищувати 0,01...0,05, при живленні двотактних підсилювачів потужності низької частоти 0,5...2,0% [22]. У даному випадку K_{Π} доцільно прийняти менше 0,04.

Розрізняють ємнісні, індуктивні, Г-подібні змішані фільтри, П-подібні та транзисторні фільтри [24]. Г-подібні змішані фільтри вміщують поєднання ємність-індуктивність або ємність-активний опір. Лише при занадто малих значеннях випрямленого струму (менше 20мА), а також при високих випрямлених напругах (що перевищують 5...10кВ) замість індуктивності у фільтр включають активний опір [22]. В даному випадку, коли струм значно більший 20мА, а напруга є низькою, необхідно у фільтрі використати дросель (індуктивність).

Якщо прийняти ємнісний фільтр, то при $C_{\phi}R_{H}=(4\dots 8)/f_{ог}$ (де $f_{ог}$ - частота основної гармоніки 100Гц), коефіцієнт пульсацій не перевищує 0,04. Тому необхідно прийняти більш складний фільтр – П – подібний з індуктивністю. Обмотку дроселя слід виконувати тим же проводом, що і обмотку електромагнітної системи, тобто, $d=1,2$ мм. Індуктивність котушки з замкнутим стальним осердям дорівнює [21]

$$L = \frac{1,26 \mu S_c w^2}{\ell_c} \cdot 10^{-8}, \text{ гн.} \quad (4.2)$$

де μ – магнітна проникність матеріалу осердя;

w – число витків котушки;

S_c – поперечний перетин осердя, см^2 ;

ℓ_c - середня довжина магнітного шляху, см.

Параметри фільтра можливо визначити з наступних міркувань. Для ємнісного фільтра коефіцієнт пульсацій не перевищує 0,04 за умови

$$K_{\Pi} = \frac{1}{2\pi f_{ог} \cdot C_{\phi} R_{H}}, \quad (4.3)$$

де C_{ϕ} – ємність фільтра;

R_{H} – активний опір навантаження фільтра.

Підставивши $K_{\Pi}=0,04$, $f_{ог} = 100$ Гц, $R_{H}=51$ Ом визначаємо ємність ємнісного фільтра, яка буде дорівнювати $C_{\phi} \cong 800$ мк Ф.

Г–подібний LC – фільтр повинен дещо покращити коефіцієнт пульсацій щоб вийти на заданий рівень менше 0,04. Оскільки коефіцієнт згладжування багатоланкового фільтра визначається добутком коефіцієнтів ланок, дана умова виконується. Тому необхідно задовольнити лише додаткові умови Г–подібного фільтра. Вони стосуються уникнення резонансу в фільтрі. Для цього власна

частота фільтра $\omega_{\phi} = 1/\sqrt{L_{\phi}C_{\phi}}$ має бути дещо меншою за частоту основної гармоніки пульсацій $\omega_{ог}$ і не кратна їй. Для цього достатньо, щоб

$$\omega_{ог}L_{\phi}=(5\dots10)R_{н}; \quad (4.4)$$

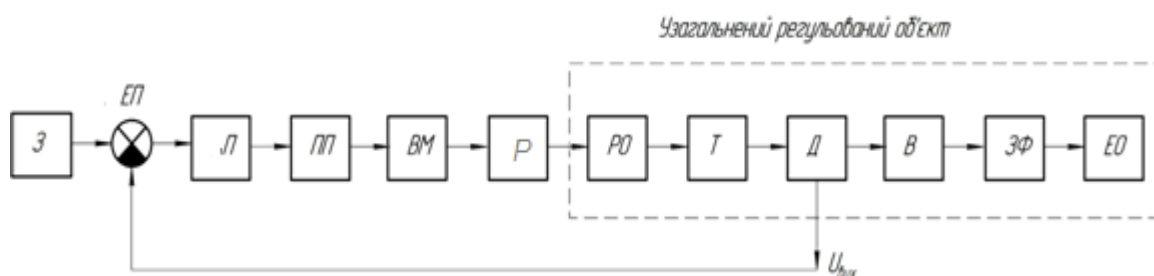
$$\frac{1}{\omega_{ог}C_{\phi}} = (0,1\dots0,2)R_{н}. \quad (4.5)$$

За цих умов при визначеному $R_{н}$ і прийнятому значенні L_{ϕ} та коловій частоті $\omega_{ог}=2\pi f_{ог}=2\pi 100\text{Гц}=200\pi\text{с}^{-1}$ легко знайти ємність Г-подібного фільтра.

Показники фільтрації ще більше будуть покращеними з врахуванням того, що електромагнітна система – це індуктивність значної величини, яка чинить великий опір змінним складовим струму.

Електромагнітна система разом із фільтром, випрямлячем, трансформатором та автотрансформатором утворює регульований об'єкт системи автоматичного керування струмом. Вхідним параметром цього об'єкта є кут обертання рухомого контакту автотрансформатора, тоді як вихідною величиною виступає сила струму або величина падіння напруги на еталонному опорі.

За умови використання принципу автоматичного регулювання за відхиленням побудуємо функціональну схему системи автоматичного регулювання (рис. 4.1), у якій відображено лише елементи регульованого об'єкта.



З – задавач; ЗФ – згладжувальний фільтр; ЕП – елемент порівняння; П – підсилювач; ПП – підсилювач потужності; Т – трансформатор; ВМ – виконавчий механізм; Р – редуктор; РО – регульовальний орган; ЕО – електромагнітна обмотка; В – випрямляч; Д - датчик

Рисунок 4.1 – Функціональна схема системи автоматичного регулювання сили струму в електромагнітній обмотці

Серед них в якості регулювального органа слугує поворотний автотрансформатор, а також конкретні принципові елементи – трансформатор Т, випрямляч В, згладжувальний фільтр ЗФ, електромагнітна система ЕС. Датчик Д, як складова частина узагальненого регульованого об'єкта, не конкретизовано.

Під час розроблення принципової схеми системи автоматичного регулювання насамперед необхідно визначитися з вибором виконавчого механізму (ВМ), який є найбільш відповідальною та дорогою складовою цієї системи. Оскільки перестановочні зусилля регульованого органа (РО) у даному випадку є незначними, доцільно застосувати як виконавчий механізм реверсивний асинхронний двигун змінного струму типу РД-09.

Ротор конденсаторного двигуна РД-09 типу «біляче колесо». Статор конденсаторного двигуна типу РД-09 має дві обмотки (управління та збудження), кожна з яких створює по дві пари явно виражених полюсів. Живлення обмотки управління здійснюється від електричного підсилювача напругою U_y , а збудження – від мережі змінного струму U_m через конденсатор С2 (рис.4.2), який забезпечує зсув по фазі між магнітними потоками обмоток на 90° .

Струм, що протікає по обмотці збудження, створює магнітний потік Φ_3 , сталий за амплітудою. Магнітний потік Φ_y , створюваний обмоткою управління, може змінюватися за величиною та по фазі (на 180°) в залежності від величини та знаку сигналу.

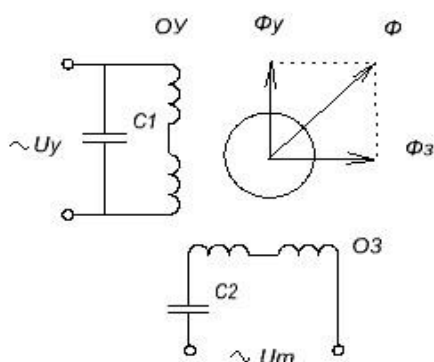


Рисунок 4.2 – Живлення реверсивного асинхронного

Миттєве значення магнітного потоку обмотки управління

$$\Phi_y = \Phi_{my} \sin \omega t \quad (4.6)$$

і обмотки збудження

$$\Phi_3 = \Phi_{m3} \cos \omega t, \quad (4.7)$$

де Φ_{my} і Φ_{m3} – амплітудні значення відповідних магнітних потоків.

Сумарний магнітний потік дорівнює

електродвигуна змінного струму

$$\Phi = \sqrt{\Phi_{my}^2 \sin^2 \omega t + \Phi_{mz}^2 \cos^2 \omega t} . \quad (4.8)$$

Положення вектора сумарного потоку в просторі визначається кутом α між додатим напрямом осі абсцис і цим вектором. Тангенс кута α дорівнює

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\Phi_y}{\Phi_z} = \frac{\Phi_{my} \sin \omega t}{\Phi_{mz} \cos \omega t} = \frac{\Phi_{my}}{\Phi_{mz}} \operatorname{tg} \omega t . \quad (4.9)$$

При рівності амплітуд потоків Φ_z і Φ_y

$$\Phi_{my} = \Phi_{mz} = \Phi_m , \quad \alpha = \omega t , \quad (4.10)$$

тобто вектор Φ обертається в просторі з кутовою частотою

$$\omega = 2\pi f \quad (4.11)$$

Якщо прийняти $f=50$ Гц і число пар полюсів однієї обмотки $P = 2$, то швидкість обертання сумарного магнітного потоку визначається формулою

$$n = \frac{60 f}{P} = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1500 \text{ об/хв} . \quad (4.12)$$

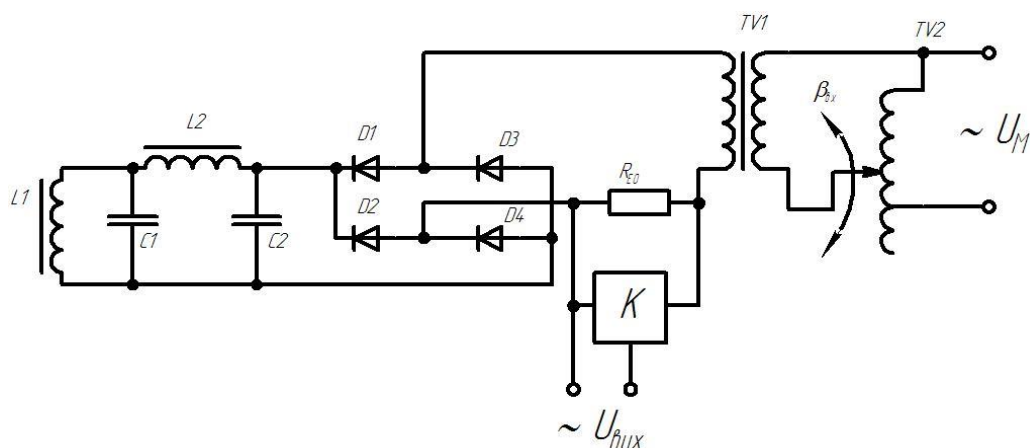
Обертний магнітний потік Φ індукуює струми в короткозамкненому роторі, які формують власне магнітне поле, що взаємодіє з полем статора. У результаті взаємодії цих полів виникає обертовий момент, який забезпечує обертання ротора. При цьому частота обертання ротора є меншою за синхронну швидкість на величину ковзання.

Для двигуна РД-09 при номінальних напругах на обмотках швидкість обертання ротора складає 1200 об/хв. Швидкість обертання двигуна залежить від напруг на обмотках статора. Швидкість обертання двигуна залежить також від навантажувального моменту на валу двигуна. Обмотка збудження живиться від мережі через фазозсуваючий конденсатор в 1 мкФ.

До реверсивного двигуна РД-09 приєднується понижуючий редуктор, який може мати коефіцієнт редукції 15,62; 39,06; 75,56; 137. Споживана двигуном

потужність складає 10 Вт. Активний опір кожної обмотки біля 500 Ом. Номінальна напруга живлення для обох обмоток 127В змінного струму частотою 50 Гц. Електромеханічна стала часу двигуна складає $T_g = 0,02$ с. Напруга трогання, при якій ротор починає обертання, дорівнює 3...6В [25].

Враховуючи те, що в якості виконавчого механізму обрано двигун змінного струму, систему автоматичного регулювання доцільно будувати як систему змінного струму. При цьому датчик Д (рис.4.1), задавач З, підсилювач П,



$U_{вх}$ – вихідна величина – змінна напруга, що відповідає силі змінного струму; $\beta_{вх}$ – вхідна величина – кут повороту рухомого контакту автотрансформатора; R_{EO} – еталонний опір; K – підсилювач змінного підсилювач потужності ПП повинні бути пристроями змінного струму.

Зважаючи на те, що сила змінного і постійного струму у випрямлячі зв’язані функціонально, а саме $I_a = 0,5I_d$ [22], за вихідну величину можливо прийняти падіння напруги змінного струму на еталонному опорі, встановленому за вторинною обмоткою трансформатора. З врахуванням цього узагальнений регульований об’єкт можливо подати у вигляді рис.4.3.

Рисунок 4.3 – Принципова схема узагальненого регульованого об’єкта

У цьому регульованому об’єкті котушка L1 є електромагнітною обмоткою, що живиться постійним струмом. Вхідним параметром слугує кут повороту $\beta_{вх}$

повзунка автотрансформатора, тоді як вихідною величиною є напруга змінного струму на виході підсилувача.

Характерною рисою цього регульованого об'єкта є те, що його навантаженням виступає сила струму, яка одночасно є фізичною величиною, що підлягає регулюванню. Значення струму визначається активним опором електромагнітної котушки, який повільно змінюється внаслідок нагрівання, а також швидкими коливаннями напруги живлення. Повільні зміни активного опору зумовлюють необхідність забезпечення високої статичної точності системи автоматичного регулювання, тобто нульової статичної похибки. Водночас для ефективної компенсації швидких змін напруги живлення система повинна мати високу швидкодію. Розрахунки показують, що час регулювання не має перевищувати 0,04 с. За такої швидкодії струм у котушці практично не зазнає змін під час коливань напруги живлення, що унеможливує появу додаткових похибок під час визначення магнітної фракції зразка. При цьому запаси стійкості системи можуть залишатися на рівні, що відповідає вимогам промислової експлуатації.

Задавальний пристрій у системі також має працювати зі змінним струмом. Оскільки стабілізація змінних струмів і напруг є ускладненою, задавальний сигнал доцільно формувати у вигляді постійної напруги з подальшим її перетворенням у змінну напругу. За такого підходу схема задавача сили струму матиме вигляд, наведений на рис. 4.4.

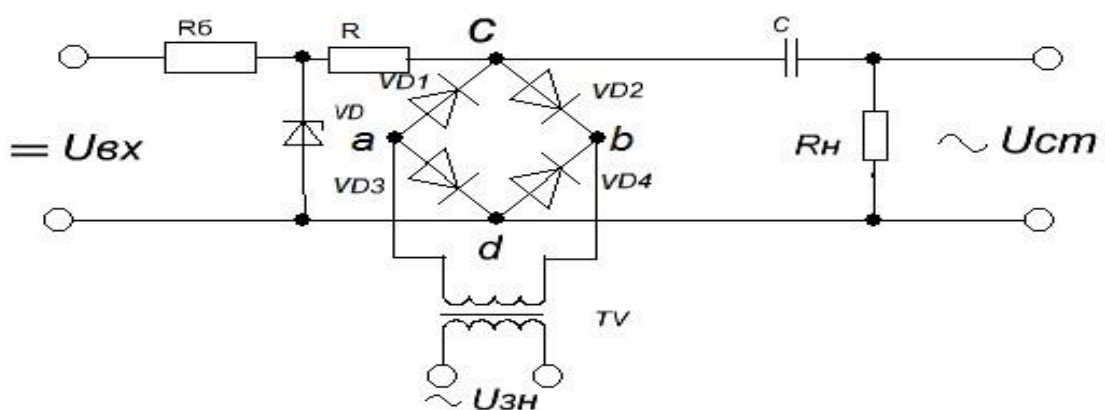


Рисунок 4.4 – Принципова схема задавача сили струму

Параметричний стабілізатор напруги постійного струму складається з стабілізатора VD з баластним резистором R_b , що забезпечує вибір режиму його роботи. Навантаженням стабілітрона слугує міст VD1...VD4 і резистор R_n . Міст VD1...VD4 з включенням відповідно рис.4.4 слугує діодним перетворювачем постійної напруги у змінну.

До діагоналі *ав* цього моста підключена вторинна обмотка трансформатора TV, яка є джерелом змінної напруги U_{zn} , що визначає частоту перетворення.

В ту половину періоду зміни напруги U_{zn} , при якій потенціал точки *a* вище потенціалу точки *b*, всі діоди моста відкриті і струм від трансформатора протікає по двом паралельним гілкам, створеним діодами VD1VD2 і VD3VD4. Точки *c* і *d* моста при цьому з'єднані через внутрішній прямиий опір діодів, що має незначну величину. Через гілки моста протікають струми від джерела сигналу і розрядний струм конденсатора С, що розряжається через міст і вихідний ланцюг.

Струми, що протікають від вторинної обмотки трансформатора, перевищують за величиною суму зустрічних струмів – струму джерела сигналу і розрядного. Тому результуючий струм в діодах протікає в провідному напрямку і діоди не запираються.

У частину періоду, що розглядається, міст, який має малий опір порівняно з R , закорочує джерело сигналу і майже вся напруга U_{cx} виявляється прикладеною до опору R .

Напруга між точками *c* і *d* U_{cd} практично дорівнює нулю. У другу половину періоду зміни напруги U_{zn} , коли потенціал точок *a* нижче потенціалу точки *b*, всі діоди моста заперті. Конденсатор заряджається від джерела сигналу через опір R . Падіння напруги на цьому опорі дуже мале і напруга U_{cd} практично дорівнює вхідній.

Таким чином, діодний міст діє подібно ключу, що періодично з'єднує ланцюг вхідного сигналу, завдяки чому напруга U_{cd} має характер прямокутних

імпульсів тривалістю в $1/2$ періоду, які розділені напівперіодними паузами. Частота відтворення цих імпульсів дорівнює частоті напруги $U_{\text{зн}}$.

Постійна складова напруги U_{cd} не пропускається конденсатором. На опорі $R_{\text{н}}$ отримують чисто змінну напругу. Фаза цієї напруги змінюється на 180° при зміні полярності вхідної напруги.

При використанні кремнієвих діодів схема може працювати з дрейфом, що не перевищує $2,5 \dots 5$ мВ за добу.

Оскільки вольт-амперні характеристики напівпровідникових діодів не проходять через початок координат, діодні перетворювачі починають функціонувати лише за наявності достатньо великої мінімальної вхідної напруги, тобто характеризуються підвищеним порогом чутливості. Проте в даній системі робота перетворювача за малих значень напруги не є необхідною.

Зіставлення задавального сигналу з вихідною величиною доцільно виконувати за допомогою трансформатора з двома первинними обмотками, які підключені відповідно до вихідного сигналу та задавача, і однією вторинною обмоткою, на якій формується керуючий вплив. При цьому сигнали на первинних обмотках увімкнені у зустрічному напрямку.

Підвищення рівня керуючого сигналу може бути реалізоване із застосуванням напівпровідникових амплітудних підсилювачів та підсилювачів потужності змінного струму, які здатні працювати з виконавчим двигуном типу РД-09. Транзисторний підсилювач із схемою ввімкнення за загальним емітером забезпечує високий коефіцієнт підсилення як за напругою, так і за струмом, у зв'язку з чим така схема є найбільш розповсюдженою. На її основі побудуємо амплітудний підсилювач із зазначеним способом вмикання транзистора (рис. 4.5).

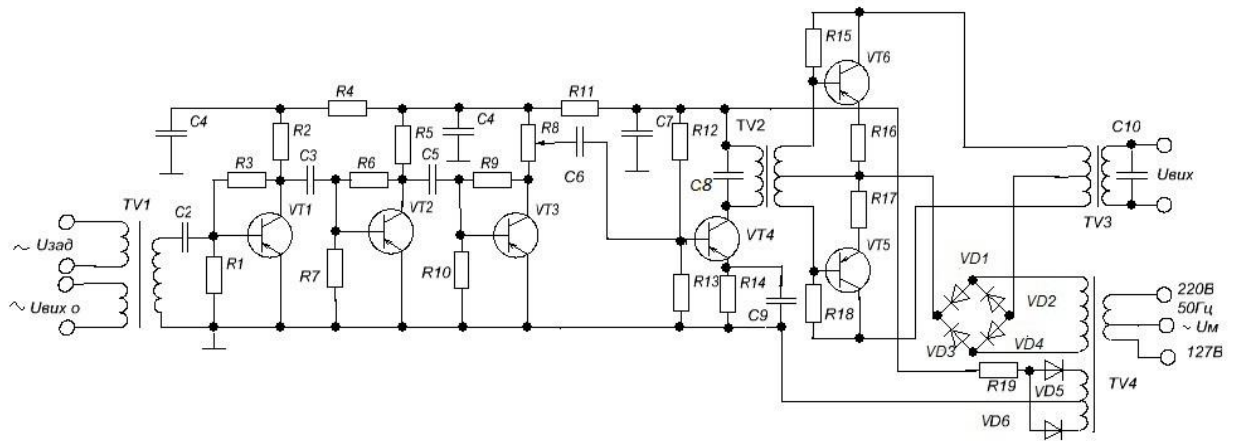


Рисунок 4.5 – Принципова схема реверсивного напівпровідникового підсилювача змінного струму системи автоматичного регулювання сили постійного струму в електромагнітній системі

Підсилювач (рис. 4.5) складається з п'яти каскадів підсилення. Перші три каскади виконують функцію попереднього підсилення, четвертий – кінцевий, а п'ятий каскад на транзисторах VT5 і VT6 є вихідним і реалізований за двотактною схемою. Вхід двотактного каскаду здійснюється через трансформатор TV2. Опори R1, R7 і R10, підключені між базами та емітерами транзисторів TV1, TV2 і TV3, підвищують стійкість роботи підсилювача. Опори, що підключені між базами та колекторами цих транзисторів, покращують форму вихідної напруги при малих сигналах. Регулювання коефіцієнта підсилення здійснюється змінним опором R8, підключеним між колектором транзистора TV3 і базою транзистора TV4 кінцевого каскаду.

Для забезпечення максимальної чутливості підсилювача необхідно, щоб фаза вихідної напруги сигналу збігалася з фазою напруги живлення. Узгодження фаз вихідної напруги здійснюється шляхом добору конденсатора C8, який шунтує первинну обмотку трансформатора TV2. Обмотка керування виконавчого двигуна підключається до підсилювача через вихідний трансформатор TV3.

На вході підсилювача встановлено трансформатор TV1, до однієї з його первинних обмоток підводиться змінна напруга задавального сигналу, а до другої

— змінна напруга вихідного сигналу регульованого об'єкта, увімкнена у протифазі.

Живлення попередніх каскадів підсилювача здійснюється від двопівперіодного випрямляча, виконаного на діодах VD5 і VD6. Живлення вихідного каскаду здійснюється від мостового випрямляча виконаного на діодах VD1...VD4 без згладжувального фільтру. Живлення підсилювача і всієї системи здійснюється від мережі 220В, 50 Гц.

Аналіз показує, що стабільна робота підсилювача забезпечується в діапазоні температур навколишнього середовища 0...60⁰С. Він володіє чутливістю у кілька мікрвольт при вхідному опорі близько 1000 Ом. Зміна напруги живлення на $\pm 10\%$ і частоти на $\pm 5\%$ відносно номінальних значень практично не впливає на якість роботи підсилювача. Споживана підсилювачем потужність не перевищує 7 Вт.

Підсилювач здійснює керування роботою виконавчого механізму системи автоматичного регулювання. За умови рівності напруг на первинних обмотках трансформатора TV1 ротор електродвигуна залишається загальмованим, а струм в електромагнітній системі відповідає встановленому значенню. Зменшення вихідної напруги $U_{вих}$ викликає переміщення виконавчого механізму.

Зокрема, у разі зростання вихідного сигналу регульованого об'єкта фаза напруги вторинної обмотки вхідного трансформатора, що виконує функцію елемента порівняння, змінюється на 180⁰, що, своєю чергою, спричиняє таку саму зміну фази напруги на виході підсилювача потужності. Унаслідок цього ротор реверсивного електродвигуна змінює напрям обертання, знижуючи напругу живлення змінного струму та величину постійного струму в електромагнітній системі до заданого рівня.

4.2 Дослідження динаміки системи автоматичного керування силою струму в електромагнітній котушці пристрою

Вибравши всі принципові елементи системи автоматичного керування, побудуємо її структурну схему. Задавач з елементом порівняння разом складають підсилювальну динамічну ланку з коефіцієнтом підсилення $K_{еп}$. Підсилювальними ланками також є напівпровідниковий підсилювач змінного струму з $K_{п}$, редуктор з $K_{р}$, регулювальний орган з $K_{ро}$ та датчик вихідної величини з $K_{д}$. Реверсивний асинхронний двофазний електродвигун, якщо вихідною величиною вважати кут повороту ротора, може бути поданий у вигляді двох послідовно з'єднаних динамічних ланок — інтегральної та аперіодичної [26]. Однак повна передавальна функція такого двигуна за кутом повороту має складніший вигляд і визначається відповідним аналітичним виразом [26].

$$W_{\text{вм}}(p) = \frac{K_{\text{вм}}}{p(T_E p + 1)(T_{\text{вм}} p + 1)}, \quad (4.13)$$

де $K_{\text{вм}}$ — передавальний коефіцієнт виконавчого елемента;

p — оператор Лапласа;

T_E — електромагнітна стала часу;

$T_{\text{вм}}$ — електромеханічна стала часу.

У виконавчих електродвигунах такого типу електромагнітна стала часу T_E , що визначається коловою частотою, активним та індуктивним опором обмотки керування, є значно меншою порівняно з електромеханічною сталою часу $T_{\text{вм}}$. Електромеханічна стала часу, у свою чергу, залежить від моменту інерції ротора, колової частоти обертання вала в режимі холостого ходу, номінальної напруги керування та пускового моменту двигуна за номінальної напруги на обмотці керування. Окрім цього, величина електромагнітної сталої часу визначається також типом ротора і частотою струму в колі збудження.

Як зазначалося раніше, для електродвигуна РД-09 електромеханічна стала часу дорівнює $T_{\text{ВМ}} = 0,02$ с, а стала часу інтегрувальної ланки становить $T_i = 1$ с. З урахуванням наведеного передавальної функції електродвигуна РД-09 можна подати у наближеному вигляді

$$W_{\text{ВМ}}(p) = \frac{K_{\text{ВМ}}}{T_i p (T_{\text{ВМ}} p + 1)} \quad (4.14)$$

або

$$W_{\text{ВМ}}(p) = \frac{K_{\text{ВМ}}}{p(0,02p + 1)} \quad (4.15)$$

Величина коефіцієнта передачі $K_{\text{ВМ}}$ залежить від способу управління двигуном. Враховуючи, що використано амплітудне управління, передаточний коефіцієнт буде дорівнювати [27]

$$K_{\text{ВМ}} = \frac{\omega_{\text{х.х}}}{U_{\text{у.ном}}} \quad (4.16)$$

З врахуванням того, що вал двигуна без навантаження здійснює близько 1500 об/хв., а номінальна напруга на обмотках складає близько 12В, передавальний коефіцієнт РД-09 прийме значення

$$K_{\text{ВМ}} = \frac{1500 \cdot 2\pi}{60 \cdot 125} = 1,24 \frac{\text{град}}{\text{с} \cdot \text{В}} \quad \text{або} \quad K_{\text{ВМ}} = \frac{1500 \cdot 360}{60 \cdot 125} = 70 \frac{\text{град}}{\text{с} \cdot \text{В}}$$

Перетворювальний механізм (редуктор) є підсилювальною ланкою з передаточною функцією $W_{\text{ПМ}}(p) = K_{\text{ПМ}}$.

У відповідності зі сказаним та враховуючи, що узагальнений регульований об'єкт тут є підсилювальною динамічною ланкою з передавальною функцією $W_{\text{УО}}(p) = k_{\text{УО}}$, структурна схема САК прийме вигляд, що показано на рис. 4.6.

Передавальна функція розімкненої системи дорівнює

$$W_P(p) = W_{\text{ЕП}}(p) \cdot W_{\text{П}}(p) \cdot W_{\text{ВМ}}(p) \cdot W_{\text{ПМ}}(p) \cdot W_{\text{УО}}(p) \quad (4.17)$$

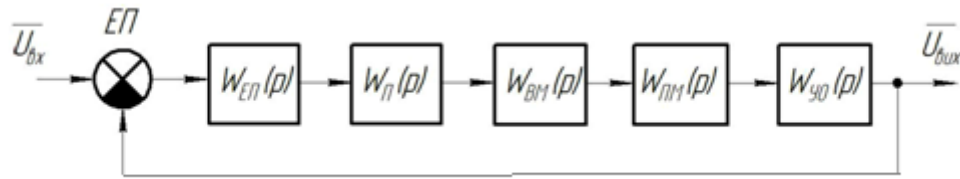


Рисунок 4.6 – Структурна схема системи автоматичного керування струмовим режимом електромагнітної обмотки

З урахуванням значень передавальних функцій динамічних елементів вона набуде наступного вигляду

$$W_P(p) = \frac{k_{\text{ЕП}} \cdot k_{\text{П}} \cdot k_{\text{ВМ}} \cdot k_{\text{ПМ}} \cdot k_{\text{УО}}}{T_i p (T_{\text{ВМ}} p + 1)} = \frac{\bar{U}_{\text{вух}}}{\bar{U}_{\text{вх}}} \quad (4.18)$$

або

$$W_P(p) = \frac{k_P}{T_i p (T_{\text{ВМ}} p + 1)} = \frac{\bar{U}_{\text{вух}}}{\bar{U}_{\text{вх}}}, \quad (4.19)$$

де $k_P = k_{\text{ЕП}} \cdot k_{\text{П}} \cdot k_{\text{ВМ}} \cdot k_{\text{ПМ}} \cdot k_{\text{УО}}$ - коефіцієнт підсилення розімкнутої системи.

Передавальна функція замкненої системи наступна

$$W_3(p) = \frac{\bar{U}_{\text{вух}}}{\bar{U}_{\text{вх}}} = \frac{k_P}{T_i p (T_{\text{ВМ}} p + 1) + k_P} = \frac{k_P}{T_i T_{\text{ВМ}} p^2 + T_i p + k_P}, \quad (4.20)$$

звідки у лапласівській формі рівняння динаміки замкненої системи

$$[T_i T_{\text{ВМ}} p^2 + T_i p + k_P] \bar{U}_{\text{вух}} = k_P \bar{U}_{\text{вх}}. \quad (4.21)$$

САК містить інтегральну ланку, яка забезпечує високу статичну точність та підтримує задану силу струму навіть при зміні активного опору обмотки під час її нагрівання. На основі залежностей (4.20) та (4.21) можна скласти характеристичне рівняння замкненої системи.

$$T_i T_{\text{ВМ}} p^2 + T_i p + k_P = 0. \quad (4.22)$$

Прирівнявши у (4.22) $p = j\omega$, отримаємо

$$K_P = T_i T_{BM} \omega^2 - j T_i \omega, \quad (4.23)$$

де $P(\omega) = T_i T_{BM} \omega^2$, $Q(\omega) = -T_i \omega$ - відповідно дійсна і уявна частини виразу.

Згідно з залежністю (4.23) визначимо область стійкості системи за коефіцієнтом підсилення розімкнутої системи (рис. 4.7), варіюючи частоту ω від $-\infty$ до ∞ . Як видно з рис. 4.7, САК залишається стійкою для будь-яких значень цього коефіцієнта.

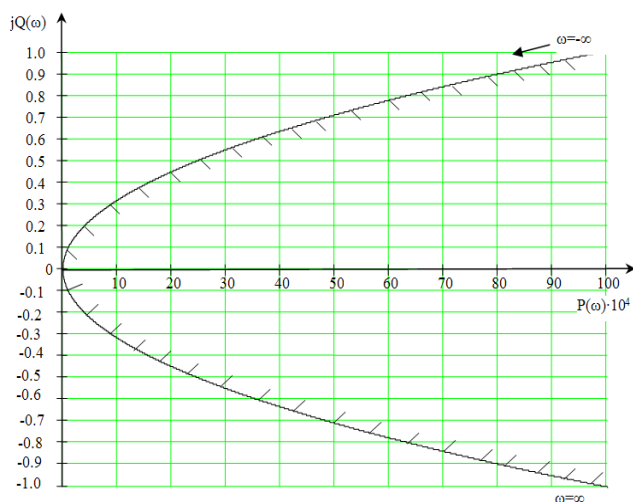


Рисунок 4.7 - Виділення області стійкості за коефіцієнтом підсилення розімкнутої системи

На основі структурної схеми САК (рис. 4.6) та виразу (4.19) побудуємо асимптотичні логарифмічні частотні характеристики розімкнутої системи для заданих значеннях $k_p = 10$, $k_p = 100$, $k_p = 1000$ (рис. 4.8). З графіків на рис. 4.8 видно, що для малих коефіцієнтів підсилення розімкнутої системи середньочастотна асимптота має нахил -20 дБ/дек, що відповідає оптимальній швидкодії системи [28].

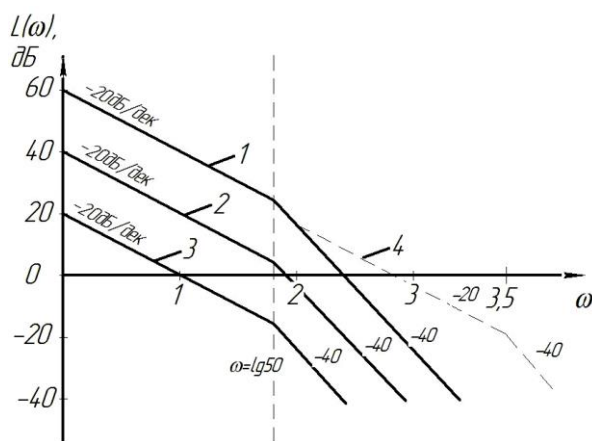
При значеннях коефіцієнта k_p , більших за 100, середньочастотні асимптоти набувають нахилу -40 дБ/дек, що свідчить про невідповідність системи оптимальній швидкодії та наявність значного перерегулювання [28].

Перехідні характеристики $h(t)$, побудовані для цієї САК при різних значеннях коефіцієнта підсилення k_p , представлені на рис. 4.9.

З графіків 4.9 видно, що при малих коефіцієнтах підсилення розімкнутої системи k_p перехідні процеси будуть монотонними (крива 1). Вони характеризуються значним часом регулювання, що наближено дорівнює $0,4$ с. З

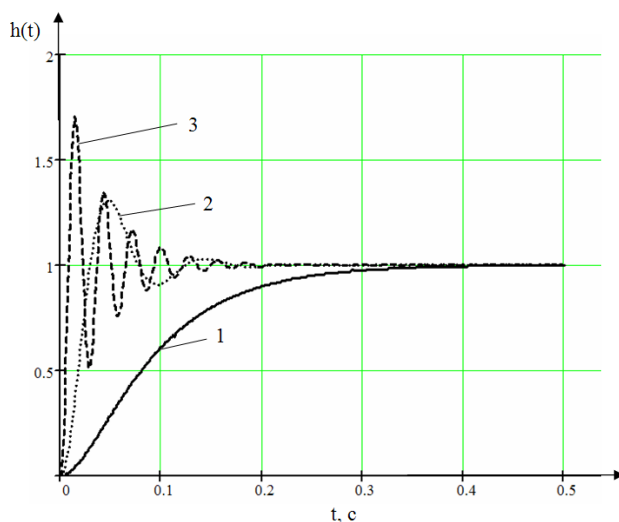
підвищенням коефіцієнта підсилення розімкнутої системи до $k_p = 100$ перехідний процес стає коливальним і скорочується час регулювання до 0,22 с (крива 2).

З графіків на рис. 4.9 видно, що при малих значеннях коефіцієнта підсилення розімкнутої системи k_p перехідні процеси є монотонними (крива 1) та характеризуються тривалим часом регулювання, приблизно 0,4 с. При збільшенні коефіцієнта підсилення розімкнутої системи до $k_p = 100$ перехідний процес стає коливальним, а час регулювання зменшується до 0,22 с (крива 2).



1 – $k_p=1000$; 2 – $k_p=100$; 3 – $k_p=10$; 4 – $k_p=1000$ з корекцією

Рисунок 4.8 - Асимптотичні ЛАЧ розімкнутої системи з різними коефіцієнтами підсилення



1 – $k_p=10$; 2 – $k_p=100$; 3 – $k_p=1000$
Рисунок 4.9 - Перехідні характеристики САК при різних значеннях коефіцієнта підсилення розімкнутої системи

При подальшому збільшенні коефіцієнта підсилення до $k_p = 1000$ коливальність перехідного процесу зберігається, зростає частота коливань (крива 3), проте час регулювання вже не зменшується. Таким чином, змінюючи коефіцієнт підсилення переважно в межах від 10 до 100, можна впливати на тривалість перехідного процесу системи в певних межах, але показник якості залишається високим і не відповідає встановленим вимогам.

Беручи до уваги, що в цій системі не можуть з'являтися високочастотні перешкоди і вони не проходять через електромагнітну обмотку завдяки її великому індуктивному опору,

та залежність часу регулювання від частоти зрізу ω_3 при коливальних перехідних процесах відповідно виразу $t_p \cong (1...2) \frac{2\pi}{\omega_3}$ [28], час регулювання можна зменшити шляхом збільшення частоти зрізу ω_3 . Підвищити цю частоту можна за допомогою корекції системи. При цьому середньочастотну асимптоту логарифмічної амплітудної частотної характеристики слід змістити праворуч (ломана 1, рис. 4.8) і надати їй нахил -20 дБ/дек для забезпечення оптимальної швидкодії системи, тобто отримати ломану 4 на рис. 4.8. Це можливо досягти шляхом зміни нахилу асимптоти, наприклад, при спряженій частоті $\omega=100\text{с}^{-1}$ у додатному напрямі. Для цього у чисельник передавальної функції розімкнутої системи вводиться множник (T_1p+1) при $T_1=0,01\text{с}$. Високочастотну асимптоту ЛАЧХ можна провести з відносним нахилом -40 дБ/дек, здійснивши спряження при частоті $\omega = 3160\text{с}^{-1}$, що відповідає введенню множника (T_2p+1) до знаменника передавальної функції розімкнутої системи при $T_2=0,00032\text{с}$. Таку корекцію слід виконувати без зміни коефіцієнта підсилення розімкнутої системи. Коректуючий пристрій має працювати від змінного струму. Серед доступних змінноточкових коректуючих пристроїв [27], які не відрізняються різноманітністю, такий пристрій є, а його передавальна функція має вигляд

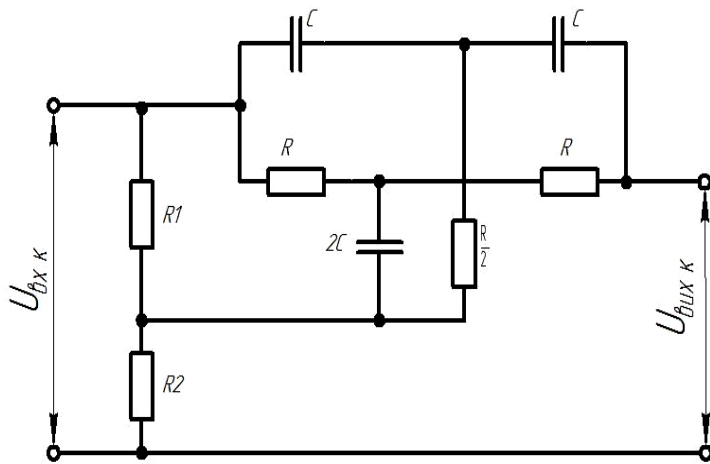
$$W_K(p) = k \frac{(T_1p+1)}{(T_2p+1)}, \quad (4.24)$$

а принципова схема приведена на рис.4.10 [27].

Для побудови коректуючого пристрою за відомими аналітичними залежностями та сталими часу T_1 і T_2 потрібно визначити номінальні значення елементів – C , R , R_1 і R_2 . З відповідної залежності

$$T_2 = \frac{RC}{2} \quad (4.25)$$

знаходимо $RC=0,000633\text{с}$. Задаючись значенням $C=10000\text{ ммФ}$, знаходимо $R=63\text{ кОм}$.



$R, C, R1, R2$ – номінальні позначення опорів і ємностей

Рисунок 4.10 – Принципова схема коректуючого пристрою

З залежності

$$T_1 = T_2 \frac{R_1 + R_2}{R_2} \quad (4.26)$$

отримуємо наступне співвідношення

$$R_2 = \frac{T_2}{T_1 - T_2} R_1 \quad (4.27)$$

або з врахуванням значень конкретних сталих часу $R_2 = 0,033R_1$. Задаючись значенням $R_1 = 100$ кОм, знаходимо $R_2 = 3,3$ кОм.

Передавальний коефіцієнт коректуючого пристрою наступний

$$K = \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 0,032 \cdot \quad (4.28)$$

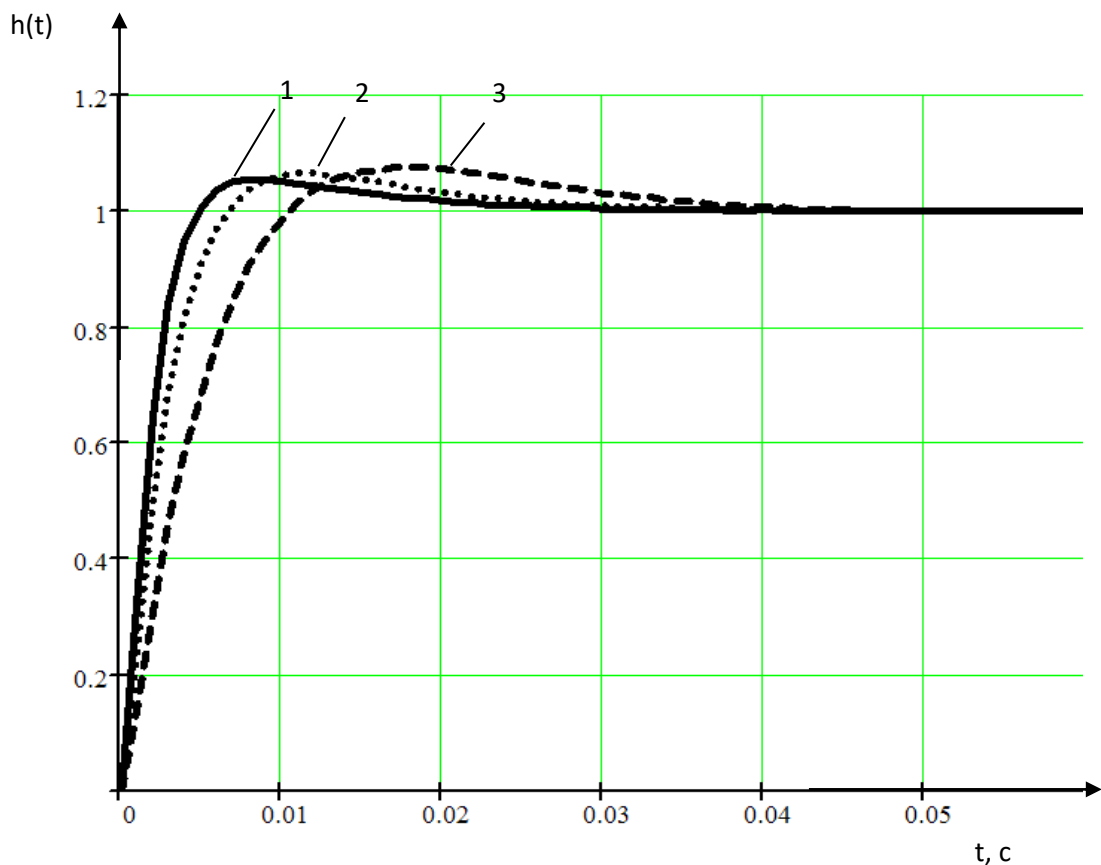
Коректуючий пристрій значно ослаблює сигнал і має високий вихідний опір, тому перед ним слід встановити попередній підсилювач із коефіцієнтом передачі близько 30, а після нього – емітерний повторювач. Це дозволяє здійснити корекцію без зміни коефіцієнта підсилення розімкненої системи.

З урахуванням коректуючого пристрою передавальна функція замкнутої системи описується рівнянням

$$W_3(p) = \frac{\bar{X}_{вих}}{\bar{X}_{вх}} = \frac{k_P(T_1 p + 1)}{T_i T_{BM} T_2 p^3 + T_i(T_2 + T_{BM})p^2 + (T_i + k_P T_1)p + k_P}. \quad (4.29)$$

Перехідні процеси, що відповідають передавальній функції (4.29) при різних значеннях коефіцієнта підсилення розімкнутої системи, показані на рис. 4.11. З рис. 4.11 видно, що час регулювання скоректованої системи значно зменшився і задовольняє встановлені вимоги. Система може ефективно працювати при різних заданих значеннях коефіцієнта підсилення розімкнутої системи в діапазоні від 400 до 1000.

У скоректованої системи (рис. 4.11) перехідні процеси аперіодичні і характеризуються незначним перерегулюванням, що не перевищує 10%. Зі



1 – $k_p=1000$; 2 – $k_p=700$; 3 – $k_p=400$

Рисунок 4.11 - Перехідні характеристики скорегованої системи при різних значеннях коефіцієнта підсилення розімкнутої системи

збільшенням коефіцієнта підсилення розімкнутої системи перерегулювання зменшується.

Аналіз логарифмічних частотних характеристик розімкнутої скоректованої системи демонструє, що її запаси стійкості в розглянутому діапазоні зміни коефіцієнта підсилення становлять не менше 100° за фазою та 100 дБ за модулем, що забезпечує надійну експлуатацію системи в промислових умовах.

Отже, дослідження розробленої системи автоматичного керування струмовим режимом електромагнітної обмотки при визначенні вмісту магнітного заліза в пробах сипких матеріалів підтвердили можливість створення такої САК. Вона характеризується високою статичною точністю, аперіодичним перехідним процесом, часом регулювання до 0,04 с, максимальним відносним перерегулюванням до 10%, а також запасами стійкості за модулем понад 100 дБ і за фазою більше 100° . Це забезпечує її надійну роботу в промислових умовах і суттєве підвищення точності визначення вмісту магнітного заліза в подрібнених сипких матеріалах.

5 ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ПРИСТРОЮ ЕКСПРЕС-АНАЛІЗУ СИПКИХ ДРІБНОЗЕРНИСТИХ МАТЕРІАЛІВ НА ВМІСТ МАГНІТНОГО ЗАЛІЗА

Перед використанням пристрою для експрес-аналізу сипких дрібнозернистих матеріалів на вміст магнітного заліза його необхідно налаштувати. Для цього вручну подають напругу на електромагнітну обмотку з автотрансформатора, починаючи з пониженого значення 150 В, і витримують цей режим протягом 10 хв. Якщо обмотка працює справно, процедуру повторюють при напругах 160 В, 170 В, 180 В, 190 В і 200 В. Під час перевірки контролюють як правильність електричних режимів роботи обмотки, так і наявність та рівень напруженості магнітного поля за допомогою гаусметра.

Після цього в роботу вводять систему автоматичного керування струмовим режимом електромагнітної обмотки. Пристрій живлять від мережі через автотрансформатор, аналогічний тому, що використовується у вимірювачі магнітної фракції. Напругу живлення поступово змінюють, при цьому фіксують силу струму, що проходить через електромагнітну обмотку, або напруженість магнітного поля в її робочій порожнині. Стабільність струму або напруженості магнітного поля при коливаннях напруги живлення свідчить про нормальну роботу системи автоматичного керування. У разі порушення підтримки струмового режиму необхідно усунути несправності в системі керування.

Вмикаємо пристрій в мережу живлення без додаткового автотрансформатора і вимірюємо значення напруг на характерних вузлах відповідно принциповій схемі. Якщо будуть відхилення, необхідно встановити їх причини з подальшим усуненням. Особливо це стосується напруг живлення, стабілізованих напруг, напруг на лінійному диференціальному трансформаторі. Вимірювати напруги найбільш доцільно електронним приладом.

Відключивши вторинні обмотки лінійного диференціального трансформатора та встановивши кювету з матеріалом у порожнину електромагнітної обмотки у її обезструмленому стані, переміщенням лінійного диференціального трансформатора досягаємо нуля на виході зустрічно ввімкннутих обмоток вторинного перетворювача. Після цього виводи вторинних обмоток лінійного диференціального трансформатора приєднуємо у відповідності з принциповою схемою.

Для налагодження пристрою використовують три еталонні кювети із вимірюваним матеріалом, які за вмістом феромагнітної фракції відповідають початку вимірюваного діапазону, середині та кінцю. Здійснюючи пробні вимірювання цих відомих за вмістом феромагнітної фракції матеріалів, впевнюємося у правильності положення вторинного перетворювача – лінійного диференціального трансформатора. Крім того, вимірюємо напругу на виході схеми, що визначає відношення вхідних напруг, і порівнюємо її з вмістом магнітної фракції та фактичним відношенням величин. Після цього знімаємо характеристику схеми перетворення імпульсної напруги в неперервну. Якщо вони функціонують нормально, можливо перевірити роботу схеми цифрової індикації вмісту магнітного заліза в пробі. Вона повинна функціонувати нормально, якщо зібрана без помилок. Схема цифрової індикації відразу висвічує вміст магнітного заліза в еталонних пробах.

Налагоджений пристрій необхідно проградувати. Найкраще градувати пристрій в умовах конкретного родовища, оскільки руди ведуть себе при вимірюванні дещо специфічно. Для цього необхідно мати пробу з мінімальним вмістом магнітної фракції, середнім і найбільшим її вмістом. Якщо це, наприклад, збагачувальна фабрика, то це необхідно виконувати на найбільш поширеному типі руди, взявши матеріал хвостів, вихідної руди та проміжного продукту. При градуванні вміст магнітного заліза в пробах необхідно визначити хімічним аналізом.

Пристрій призначений для використання в стаціонарних умовах з наявністю мережі змінного струму 220 В, 50 Гц і заземлення. Блок електромагнітної обмотки з перетворювачем положення необхідно встановлювати на робочому столі. Тут же слід розташовувати і аналітичні ваги. Вага проби в кюветі повинна дорівнювати 25 г. Матеріал повинен не перевищувати в розмірі 0,5 мм. Блок регулювання й індикації результатів вимірювання також найбільш зручно встановити на робочому столі або поряд, щоб зручно було користуватися кнопками схеми управління та спостерігати показання цифрового індикатора.

Визначення вмісту магнітної фракції в пробі сипкого матеріалу здійснюють наступним чином. З відібраної проби матеріалу шляхом її скорочення відбирають 25 г. Для цього пусту кювету встановлюють на терези аналітичних вагів, зрівноважують їх (якщо пусті кювети мають різну вагу) і встановлюють ваги 25 г. Поступовим наповненням кювети доводять вагу матеріалу в ній до 25 г, зрівноважуючи аналітичні ваги. Після цього кювету встановлюють у порожнину електромагнітної обмотки і натискають кнопку «Пуск». Після того, як вміст зафіксовано і внесено до робочого журналу, натискають кнопку «Стоп». Прилад вимикається.

Як вже відмічалось, дослідження можуть виконуватися в умовах збагачувальних фабрик, дробильних фабрик, кар'єрів і шахт. На збагачувальних фабриках вихідна руда знаходиться в межах крупності 0...25 мм, тому її необхідно подрібнювати. Далі в технологічному процесі збагачувальної фабрики продукти будуть дрібними, придатними для безпосереднього використання.

На дробильних фабриках матеріал може бути крупним – від 1 м до 25 мм. Тому його можливо відбирати зменшеним до крупності 25 мм. Такий матеріал потребує подрібнення до встановлених розмірів.

У кар'єрах матеріал достатньо крупний, але він має конкретно виражену особливість. Тут можливо відбирати характерні його шматки і подрібнювати до необхідних розмірів.

У шахтах матеріал також має досить конкретно виражені особливості, тому можливо відбирати певні шматки для визначення вмісту магнітного заліза, які необхідно подрібнювати до певного стану.

Враховуючи сказане, ті чи інші робочі місця необхідно обладнувати певним чином. Можуть знадобитися лабораторна дробарка, лабораторній кульовий млин та засоби ручного чи механічного скорочення проб. Дану роботу, включаючи вимірювання, можуть виконувати представники профільних служб – це працівники відділу технічного та технологічного контролю або інших споріднених служб.

Проби матеріалу для визначення вмісту магнітного заліза необхідно відбирати відповідно Правилам відбору проб, де визначаючим фактором виступає розмір шматків. Подрібнені проби скорочують відповідно правилам скорочення проб вручну або механічними пристроями. З скорочених проб відбирають матеріал для визначення вмісту магнітного заліза.

На підставі проведених експрес-аналізів матеріалу на вміст магнітного заліза в кар'єрах можливо сортувати руди за їх типами, відкидати некондиційні продукти. У шахтах можливо отримувати відразу вміст магнітного заліза в рудах, які направляються у доменне виробництво, в рудах, які необхідно піддавати збагаченню. На підставі вимірювань можливо ефективно вибраковувати некондиційний матеріал. На дробильних фабриках можливо здійснювати ефективне складування руд в накопичувальних бункерах за їх типами. Збагачувальні фабрики отримують можливість оперативного визначення типів руд перед початком їх переробки та прийняття рішення при виборі технологічного процесу. Налагоджений технологічний процес можливо оперативно контролювати за втратами магнітного заліза у хвостах і його виходом у проміжні продукти.

ВИСНОВКИ

За матеріалами розробки пристрою експрес-аналізу сипких дрібнозернистих матеріалів на вміст магнітного заліза можна зробити наступні висновки:

1. Пристрій призначений для застосування в технологічних процесах залізорудних кар'єрів і шахт, на дробарних фабриках збагачувальних комбінатів та залізорудних збагачувальних фабрик.

2. Пристрій призначений для експрес-аналізу вмісту магнітного заліза в рудах та продуктах їх збагачення. Для визначення вмісту магнітного заліза необхідно відібрати пробу руди або матеріалу у потрібній кількості. Руду слід подрібнити та скоротити пробу так, щоб максимальний розмір частинок складав 1–2 мм або менше. У технологічних процесах збагачувальних фабрик частинки матеріалу вже відповідають цим вимогам. Відібрані проби слід лише висушити і довести до певного заданого об'єму.

3. Аналіз існуючих пристроїв для визначення вмісту магнітного заліза в подрібнених матеріалах показав, що на сьогодні існує шість типів ферометрів. У ході порівняння виявлено, що пристрій з магнітним полем постійного градієнта не має ряду недоліків, притаманних аналізаторам інших типів. Тому його доцільно використовувати як базовий при створенні аналізатора для експрес-визначення вмісту магнітного заліза в рудах і продуктах гірничорудної промисловості.

4. Аналіз можливих шляхів удосконалення ферометра показав, що його характеристики можна покращити у чотирьох напрямках: збільшенням маси проби; оптимізацією параметрів електромагнітної котушки; підвищенням напруженості магнітного поля; стабілізацією сили струму в електромагнітній котушці.

5. Електромагнітна котушка намотана дротом ПЕВ-2 діаметром 1,2 мм. Вона розрахована на живлення напругою 173 В і має опір 51 Ом при температурі

20°C. При зміні температури опір котушки значно коливається. Через обмотку проходить струм силою 3,38 А з густиною 3 А/мм².

6. Допустима робоча температура електромагнітної котушки становить 120 °С, при цьому усталене перевищення температури магнітопроводу над температурою навколишнього середовища дорівнює 77 °С, що відповідає часу нагріву $T_k = 55$ хв. У неперервному режимі вимірювань тепловий перехідний процес після ввімкнення приладу триває протягом 3–4 T_k . Опір обмотки змінюється від 51 Ом до 67,83 Ом (відхилення 33 %), що призводить до значної зміни сили струму та напруженості магнітного поля.

7. Електромагнітна котушка з магнітопроводом, фільтр, випрямляч, трансформатор і автотрансформатор утворюють регульований об'єкт системи автоматичного керування струмом в обмотці, де вхідним параметром є кут повороту рухомого контакту автотрансформатора, а вихідним – сила струму (падіння напруги на еталонному опорі). Поступова зміна активного опору котушки потребує високої статичної точності системи, тоді як компенсація швидких коливань напруги живлення вимагає високої швидкодії, причому час регулювання не повинен перевищувати 0,04 с. Розроблена система змінного струму з коректуючим пристроєм повністю задовольняє цим вимогам.

8. Пристрій розрахований на стаціонарне використання. Він потребує заземлення та попереднього налагодження, живиться від мережі змінного струму 220 В, 50 Гц. Для вимірювань застосовується проба подрібненого матеріалу вагою 25 г із розміром частинок до 0,5 мм. Пристрій може експлуатуватися в шахтах, кар'єрах, на дробильних та збагачувальних фабриках.

9. Проаналізовано законодавчі та нормативні акти України щодо охорони праці, визначено шкідливі та небезпечні фактори, що впливають на обслуговуючий персонал, запропоновано заходи для зменшення їхнього впливу та проведено розрахунок припливно-витяжної вентиляції.

Список літератури

1. Верховлюк А.М., Нарівський А.В., Могилатенко В.Г. Технології одержання металів та сплавів для ливарного виробництва Навчальний посібник. — За ред. академіка НАН України В.Л. Найдека. — К.: Вініченко, 2016. — 224 с.
2. Червоний І.Ф. (ред.) Сировинні матеріали та їх підготовка до металургійних процесів Запоріжжя: ЗДІА, 2013. — 408 с.
3. Смирнов В.О., Білецький В.С. Проектування збагачувальних фабрик Навчальний посібник. -Донецьк: Східний видавничий дім, 2002. - 269 с.
4. Білецький В.С., Олійник Т.А., Смирнов В.О., Скляр Л.В. Техніка та технологія збагачення корисних копалин. Частина 1. Підготовчі процеси Навчальний посібник. — Кривий Ріг : ФОП Чернявський Д. О., 2019. — 199 с.
5. Кравець В.Г., Білецький В.С., Смирнов В.О. Техніка і технологія збагачення корисних копалин авчальний посібник. — Київ: Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (КПІ ім. Ігоря Сікорського), 2019. — 286 с.
6. Білецький В.С., Смирнов В.О. Моделювання процесів збагачення корисних копалин Донецьк: Східний видавничий дім, 2013. — 304 с.
7. Самилін В., Білецький В. Спеціальні методи збагачення корисних копалин Донецьк, 2003. — 116 с.
8. Пілов П.І. Гравітаційні методи збагачення корисних копалин Навчальний підручник. — Дніпро: Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» (НТУ “ДП”), 2021. — 152 с.
9. Папушин Ю.Л., Смірнов В.О., Білецький В.С. Дослідження корисних копалин на збагачуваність Донецьк, 2006. — 344 с.
10. Пілов П.І., Анісімов М.Т., Анісімов В.М. Методи математичної статистики та теорії ймовірностей в збагаченні корисних копалин Навчальний посібник. — Дніпропетровськ: НГУ, 2012. — 126 с.

11. Смирнов В.О., Білецький В.С. Проектування збагачувальних фабрик Навчальний посібник. -Донецьк: Східний видавничий дім, 2002. - 269 с.
12. Папушин Ю.Л., Білецький В.С. Основи автоматизації гірничого виробництва Донецьк: Східний видавничий дім, 2007. – 168 с.
13. Кравець В.Г. та ін. Техніка і технологія переробки гірських порід Навчальний посібник. — Київ: Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського (КПІ ім. Ігоря Сікорського), 2019. — 315 с.
14. Бизов В.Ф. Основи технології гірничого виробництва. Том IV Виробничі процеси Підручник для студентів вищих навчальних закладів за напрямком «Гірництво» Кривий Ріг: Мінерал. 2000. - 247 с.
15. Червоний І.Ф. (ред.) Сировинні матеріали та їх підготовка до металургійних процесів Запоріжжя: ЗДІА, 2013. — 408 с.
16. Автоматизация процессов обогащения руд / [Морюта А.Н., Давидкович А.С., Гуленко Т.И., Кондратец В.А.] . – К.: Техніка, 1972. – 140 с.
17. Нестеренко А.Д. Введение в теоретическую электротехнику/ Нестеренко А.Д. – К.: Наукова думка, 1969. – 352 с.
18. Терещук Р.М. Справочник радиолюбителя / Терещук Р.М., Домбругов Р.М., Босый Н.Д. – К.: Госиздат техн. лит. УССР, 1961. – 840 с.
19. Лободюк В.А. Справочник по элементарной физике / В.А.Лободюк, К.П.Рябошапка, О.И.Шулишова. – К.: Наукова думка, 1978. – 448 с.
20. Гончаренко Б.М. Електроніка та мікросхемо техніка /Б.М.Гончаренко, К.В.Коновалов. – К.: НУХТ, 2006. – 565 с.
21. Автоматика и автоматизация мобильных сельскохозяйственных машин / [Носов Г.Р., Кондратец В.А., Сакало Л.Г., Серета Л.И.]; под ред. Г.Р. Носова. – К.: Вища школа, 1984. – 248 с.
22. Танатар А.И. Элементы промышленной автоматизации и их динамические свойства /Танатар А.И. – К.: Техніка, 1975. – 232 с.

23. Попович М.Г. Теорія автоматичного керування: [підручник для студ. вищ. техн. навч. закл. освіти] /М.Г.Попович, О.В.Ковальчук. – К.: Либідь, 1997. – 544 с.
24. Дипломне проектування. Розділ з охорони праці: Навч.посібник /С.О.Буракова [та інші]; За ред.. С.О.Буракової. – Кам'янець-Подільський: ПП. «Медобори-2006», 2010. – 360 с.
25. Державний реєстр нормативно-правових актів з охорони праці: Показчик. – Харків: Форт, 2007. – 123 с.
26. Яковенко Р.В. Основи теорії економіки для технічних спеціальностей: Навч. посібник /Р.В.Яковенко. – Кіровоград: Поліграф- Сервіс, 2009. – 120 с.
27. Саленко Ю.С. Обладнання для подрібнення матеріалів: дробарки та млини Навч. посібник. — Кременчук: КДПУ, 2008. — 100 с.
28. Сівко В.Й. Механічне устаткування підприємств будівельних виробів. -К.: ДТУБА, 1994.
29. Жомирук Р.В., Маланчук Є.З. Основи автоматизації гірничого виробництва: Навч. посібник.- Рівне: НУВГП, 2009.-373 с.

Додатки

Охорона праці

Д.1. Законодавча та нормативна база України про охорону праці

Правовою основою законодавства щодо охорони праці є Конституція України, Закони України: "Про охорону праці", "Про охорону здоров'я", "Про пожежну безпеку", "Про використання ядерної енергії та радіаційний захист", "Про забезпечення санітарного та епідеміологічного благополуччя населення", а також Кодекс законів про працю України (КЗпП).

В основному законі України – Конституції, питанням охорони праці присвячено статті 43, 45 та 46.

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 їх здоров'я роботах забороняється".

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.

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.

Основоположним законодавчим документом в галузі охорони праці є Закон України "Про охорону праці" (прийнятий Верховною Радою України 14

жовтня 1992 року), 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 цих підприємствах.

Державні нормативні акти про охорону праці (ДНАОП) 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.

Державний галузевий нормативний акт про охорону праці це ДНАОП, дія якого поширюється на підприємства, установи організації незалежно від форм власності, що відносяться до певної галузі.

В системі законодавства щодо гігієни праці ключове місце займає Закон України “Про забезпечення санітарного та епідеміологічного благополуччя населення”. Складовою частиною права в галузі гігієни праці є постанови та положення (норми) затверджені Міністерством охорони здоров'я України (наприклад “Положення про медичний огляд працівників певних категорій”, “Перелік важких робіт і робіт з шкідливими і небезпечними умовами праці, на яких забороняється застосування праці неповнолітніх”), санітарні правила і норми (Сан ПіН) стосовно окремих факторів виробничого середовища, певних технологічних процесів і конкретних виробництв та інші нормативні документи.

Державні стандарти Системи стандартів безпеки праці (ТОСТ ССБТ) застосовуються на території України до їх заміни іншими нормативними документами, якщо вони не суперечать чинному законодавству України.

Вимоги щодо охорони праці регламентуються також державними стандартами України з питань безпеки праці, будівельними та санітарними нормами і правилами, правилами улаштування електроустановок (ПУЕ), нормами технічного проектування та іншими нормативними актами, виходячи із сфери їх дії.

В системі законодавства щодо охорони здоров'я та гігієни праці ключове місце займає Закон України “Про охорону здоров'я”. Він передбачає розробку та здійснення адміністрацією підприємств санітарних та протиепідемічних заходів;

здійснення в необхідних випадках лабораторного контролю за дотриманням вимог санітарних норм стосовно рівнів шкідливих факторів виробничого середовища; формування органів та установ державної санепідеміологічної служби при надзвичайній події та ситуації, що становлять небезпеку для здоров'я населення; відшкодування в установленому порядку працівникам громадянам збитків, яких завдано їх здоров'ю в результаті порушення санітарного законодавства.

Закон України “Про пожежну безпеку” визначає загальні правові, економічні та соціальні основи забезпечення пожежної безпеки на території України, регулює відносини державних органів, юридичних і фізичних осіб у цій галузі незалежно від виду їх діяльності та форм власності.

Забезпечення пожежної безпеки підприємств, установ та організацій покладається на їх власників і уповноважених ними осіб, якщо інше не передбачено відповідними договорами.

Для реалізації цих Законів та норм було створено Національну раду з питань безпечної життєдіяльності при Кабінеті Міністрів України, Держнагляд охорони праці, Національний науково-дослідний інститут охорони праці, навчально-методичний центр Держнагляд охорони праці. Розроблені та реалізуються національна, галузеві, регіональні та виробничі програми покращення стану безпеки, гігієни праці виробничого середовища до 2000 р. В обласних районних, міських органах виконавчої влади функціонують служби охорони праці.

Держава виступає гарантом створення безпечних та нешкідливих умов праці для працівників підприємств, установ, організацій усіх форм власності.

Д.2. Перелік шкідливих та небезпечних факторів, що впливають на обслуговуючий персонал

На здоров'я людини, її життєдіяльність і життєздатність великий вплив мають небезпечні та шкідливі фактори

Небезпека – це наслідок такої дії певних факторів на людину, яка при їх невідповідності фізіологічним характеристикам людини зумовлює феномен самої небезпеки.

Шкідливий виробничий фактор – виробничий фактор, вплив якого може призвести до погіршення стану здоров'я, зниження працездатності працівника.

Небезпечний виробничий фактор – виробничий фактор, дія якого за певних умов може привести до травм або іншого раптового погіршення здоров'я працівника.

До визначаючих ознак небезпечних і шкідливих факторів відносяться: можливість безпосередньої негативної дії на організм людини; ускладнення нормального функціонування органів людини; можливість порушення нормального стану елементів виробничого процесу, в результаті якого можуть виникнути аварії, вибухи, пожежі, травми.

Обслуговуючий персонал під час роботи може піддаватися впливу шкідливих факторів.

Внаслідок виробничої діяльності в повітряному середовищі приміщень можуть надходити найрізноманітніші шкідливі речовини, що використовуються в технологічних процесах. Шкідливими вважаються речовини, що при контакті з організмом людини, за умов порушення вимог безпеки, можуть призвести до виробничої травми, професійного захворювання або розладів у стані здоров'я.

Шкідливі речовини можуть проникати в організм людини через органи дихання, органи травлення, а також через шкіру та слизові оболонки. Через дихальні шляхи потрапляють пари, газо- та пилоподібні речовини, через шкіру переважно рідкі речовини. Через шлунково-кишечні шляхи потрапляють речовини під час ковтання або при внесенні їх в рот забрудненими руками.

До факторів, що погіршують гігієнічні умови відносяться шум і вібрації.

Дія шуму і вібрацій на людину виявляється в порушенні нервових процесів: з'являються головні болі і болі в зоні контакту з вібруючими тілами, підвищується, послабляється увага. При більш тривалому впливі інтенсивних шумів і вібрацій відзначаються порушення діяльності серцево-судинної системи і нервово-м'язового апарата, що можуть привести до захворювань окремих органів і систем.

Великий вплив на умови і продуктивність праці робить раціональне освітлення виробничих приміщень і робочих місць.

При поганому освітленні очі стомлюються, з'являються болючі відчуття в очниці. Сприятливі умови зорової роботи повинні задовольняти ряду вимог:

1. Освітлення повинне мати потрібну інтенсивність;
2. Освітлення повинне бути досить рівномірним;
3. Освітлення повинне бути придатним по якості, тобто по спектральному складі.

Д.3. Заходи по зменшенню або виключенню небезпечних факторів

ДЗагальні заходи та засоби попередження забруднення повітряного середовища на виробництві та захисту працюючих включають:

- вилучення шкідливих речовин в технологічних процесах, заміна шкідливих речовин менш шкідливими і т. п.;
- удосконалення технологічних процесів та устаткування (замкнутих технологічних циклів, неперервних технологічних процесів, мокрих способів переробки пиломатеріалів тощо);
- автоматизація і дистанційне управління технологічними процесами та обладнанням, що виключає безпосередній контакт працюючих з шкідливими речовинами;
- герметизація виробничого устаткування, робота технологічного обладнання під розрідженням, локалізація шкідливих виділень за рахунок

місцевої вентиляції, аспіраційних укриттів;

- нормальне функціонування систем опалення, загально обмінної вентиляції, кондиціонування повітря, очистка викидів у атмосферу;
- попередні та періодичні медичні огляди робітників, які працюють у шкідливих умовах, профілактичне харчування, дотримання правил особистої гігієни;
- контроль за вмістом шкідливих речовин в повітрі робочої зони;
- використання засобів індивідуального захисту.

Боротьба із шумом і вібраціями повинна починатися з раціонального конструювання верстатів і устаткування. До конструктивних і технологічних заходів відносяться:

Зменшення вібрацій і шуму в джерелі їх утворення шляхом зрівноважування обертових мас; застосування матеріалів, що володіють здатністю поглинати коливальну енергію тощо.

Зменшення вібрацій і шуму по шляху поширення засобами віброізоляції і вібропоглинання шляхом застосування гумових амортизаторів, прокладок, а також шумо- і віброгасителів.

Сумарний час контакту з вібруючими поверхнями не повинен перевищувати 2/3 тривалості робочого дня.

Для захисту персоналу від впливу електромагнітних полів використовують різноманітні способи та засоби: зменшують напруженість та густину потоку електромагнітного випромінювання; екранують робочі місця; раціонально розміщують в робочому приміщенні обладнання, що випромінюють електромагнітну енергію; встановлюють раціональні режими роботи обладнання та обслуговуючого персоналу; застосовують засоби попереджувальної сигналізації; засоби індивідуального захисту.

Захист від шуму налічує декілька способів. Найбільш дієвий спосіб-це боротьба з шуму в джерелі його виникнення. Шум знижують також за допомогою звукопоглинання та звукоізоляції. Цей спосіб передбачає використання кожуха з звукопоглинаючим матеріалом, яким відділяють джерело шуму. Зниження шуму

акустичною обробкою приміщення передбачає вкривання стелі та верхньої частини стін звукопоглинаючим матеріалом.

Одним з основних заходів по оптимізації параметрів мікроклімату та складу повітря в виробничих приміщеннях є забезпечення належного обміну повітря.

Загально обмінна вентиляція повинна розроблятися таким чином, щоб виключалася можливість надходження повітря із приміщення з більшим пилоутворенням в приміщення з меншим виділенням пилу.

Д.4. Розрахунок припливно-витяжної вентиляції

Припливно-витяжна вентиляція призначена для повітрообміну, що забезпечує видалення з приміщення повітря не придатного для подиху.

Припливно-витяжна вентиляція застосовується у приміщеннях, коли необхідно забезпечити підвищений і надійний обмін повітря.

При розрахунку керуємося наступними вихідними даними:

Параметри приміщення: 11×8×2,5 м;

Припустима швидкість руху повітря на ділянці мережі повітроводу не більш 3 м/с;

Довжина ділянки повітроводу 11 м;

Припустима концентрація вуглекислого газу: не більш 5%;

Час установаження припустимої концентрації вуглекислого газу в приміщенні: не більш 5 хв. з моменту включення вентиляції.

Розрахунок вентиляційної системи починається з визначення обсягу повітря, яке проходить через систему. Розрахунок вентиляційної мережі проводиться без домішок, які знаходяться у повітрі, оскільки їх вагові концентрації не перевищують 0,002.

Відповідно обсяг дорівнює:

$$V_{pг} = A * B * H$$

$$V_{pг} = 8 * 11 * 2.5 = 220 \text{ м}^3$$

Виходячи з технічних вимог час необхідного повітрообміну для досягнення припустимих концентрацій вуглекислого газу повинний складати не більш 5 хвилин, відповідно система вентиляції повинна забезпечити 100% заміну повітря протягом зазначеного часу .

Розрахуємо потрібну кількість замінного повітря G для зазначеного приміщення, м³/год по формулі:

$$G = \frac{V_{pr}}{t}$$

$$G = \frac{220 * 60}{5} = 2640 \text{ м}^3 / \text{год}$$

Визначення поперечних розмірів повітроводу

Вихідними даними для визначення поперечних розмірів повітроводу є витрати повітря (Q) і припустимі швидкості його руху на ділянці мережі (V). Необхідна площа повітроводу f (м²), визначається по формулі:

$$f = G / (3600 * V)$$

$$V = 3 \text{ м/с}$$

$$f = 2640 / (3600 * 3) = 0,244 \text{ м}^2$$

Для подальших розрахунків (при визначенні опору мережі, підборі вентилятора й електродвигуна) площа повітроводу приймається рівній найближчій більшій стандартній величині, тобто $f=0,246 \text{ м}^2$. По довіднику знаходимо, що для площі $f=0,246 \text{ м}^2$ умовний діаметр повітроводу $d=560 \text{ мм}$.

Визначення опору мережі

Визначимо втрати тиску у вентиляційній мережі. При розрахунку мережі необхідно врахувати втрати тиску у вентиляційному устаткуванні. Для забезпечення запасу вентилятор повинний створювати у повітроводу тиск, що перевищує не менш чим на 10% розрахунковий тиск.

Для розрахунку опору ділянки мережі використовується формула:

$$P = R * L + E_i * V^2 * Y / 2$$

де R – питомі втрати тиску на тертя на ділянках мережі; L -довжина ділянки повітропроводу; E_i – сума коефіцієнтів місцевих втрат на ділянці повітропроводу; V – швидкість повітря на ділянці повітропроводу; γ – щільність повітря (приймаємо 1,2 кг/м).

Значення R , визначаються по довіднику (R - за значенням* діаметра повітропроводу на ділянці $d=560$ мм і $V=3$ м/с), E_i - у залежності від типу місцевого опору.

Результати розрахунку повітропроводу й опору мережі приведені в таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 – Розрахунок повітропроводу мережі

№ діл.	$G, \text{ м}^3/\text{год}$	$L, \text{ м}$	$V, \text{ м/с}$	$d, \text{ мм}$	$M, \text{ Па}$	$R, \text{ Па/м}$	$R*L, \text{ Па}$	E_i	$W, \text{ Па}$	$P,$
1-1	660	4	3,0	560	5,4	0,018	0,072	2,1	11,34	11,4
1-2	660	4	3,0	560	5,4	0,018	0,072	2,1	11,34	11,4
1-3	660	4	3,0	560	5,4	0,018	0,072	2,1	11,34	11,4
1-4	660	4	3,0	560	5,4	0,018	0,072	2,1	11,34	11,4
1-5	2640	11	4,0	630	9,6	0,077	0,847	1,8	1728	17,3

де $M=V^2 * \gamma / 2, \ V = M * E,$

$$P_{max} = P1 + P2 + P3 + P4 + P5$$

$$P_{max} = 11,412 + 11,412 + 11,412 + 11,412 + 17,357 = 63,005. \text{ Па}$$

Підбір вентилятора та електродвигуна.

Необхідний тиск, створюваний вентилятором з урахуванням запасу на непередбачений опір у мережі в розмірі 10% складе:

$$P_{mp} = 1,1 * P_{max}; P_{mp} = 1,1 * 63,005 = 69,305 \text{ Па}$$

У вентиляційній установці для даного приміщення необхідно застосувати вентилятор низького тиску, тому що $P_{тр}$ менше 1 кПа.

Вибираємо осьовий вентилятор (для опорів мережі до 200 Па) по аеродинамічних характеристиках тобто залежностям між повним тиском $P_{тр}$, (Па), створюваним вентилятором і продуктивністю $V_{тр}$ (м³/г).

З обліком можливих додаткових втрат у повітроводі необхідна продуктивність вентилятора збільшується на 10%.

$$V_{TP} = 1.1 \cdot G$$

$$V_{TP} = 1.1 \cdot 2640 = 2904 \text{ м}^3 / \text{с}$$

По довіднику вибираємо осьовий вентилятор типу 06-300 N4 із ККД $\eta_B=0,65$ першого виконання. ККД пасової передачі вентилятора $\eta_{pn}=1,0$.

Потужність електродвигуна розраховується по формулі:

$$N = \frac{V_{TP} * P_{TP}}{3.6 * \eta_e * \eta_{pn}} * 10^{-6}, \text{ Вт}$$

По потужності вибираємо електродвигун АОЛ-22-2 з потужністю $N=0,6$ кВт та частотою обертання 2830 об/хв.