МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКИ

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ

студента другого (магістерського) рівня вищої освіти
за освітньо-професійною програмою
«Електромеханічне обладнання енергоємних виробництв»
спеціальності
141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Тема роботи:
«ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ІМПУЛЬСНИХ РОЗМАГНІЧУВАЛЬНИХ АПАРАТІВ ДЛЯ ВИКОРИСТАННЯ В ТЕХНОЛОГІЧНОМУ ПРОЦЕСІ ПЕРЕРОБКИ ПРОДУКТІВ РУД ЧОРНИХ МЕТАЛІВ»

Виконав: магістрант групи ЕМО-23М _____ Павло ЛЕОНТЬЄВ
Керівник магістерської роботи _____ Станіслав ТОЛМАЧОВ
Нормоконтроль _____ Валерій ТИТЮК
_____ Олег ДАНИЛЕЙКО
Завідувач кафедри _____ Станіслав ТОЛМАЧОВ

Кривий Ріг
2024 р.

РЕФЕРАТ 3
ВСТУП 4
1. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА 5
1.1 Проблема флокуляції при магнітному збагачені залізовмісних руд 5
1.2 Використання розмагнічування в технологічному процесі збагачення руд чорних металів 8
1.3 Аналіз електромагнітних процесів при розмагнічуванні феромагнітної пульпи 11
1.4 Основні фактори, що впливають на розмагнічування продуктів магнітного збагачення. 18
1.5 Критерії ефективності процесу розмагнічування та визначення параметрів розмагнічувальних апаратів для їх забезпечення 23
1.6Порівняльний аналіз існуючих систем імпульсних розмагнічувальних апаратів 25
1.7 Особливості імпульсного РА – КТУ 28

2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА 31
2.1 Розробка математичної моделі та програмного забезпечення для розрахунку магнітного поля у пульпопроводі в широкому спектрі вхідних параметрів 32
2.2 Оптимізація параметрів імпульсного розмагнічувального апарата з урахуванням комплексу технологічних та конструктивних вимог та обмежень 37
ВИСНОВКИ 41
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ 42
ДОДАТОК А. 44
ДОДАТОК Б Акт впровадження роботи

РЕФЕРАТ

52 стор., 24 рис., 8табл., 16 літ. джерел.

Об'єктом дослідження кваліфікаційної магістерської роботи є процес розмагнічування феромагнітної пульпи імпульсним магнітним полем.

Предметом дослідження кваліфікаційної магістерської роботи є оптимізація параметрів імпульсних розмагнічувальних апаратів для підвищення ефективності переробки феромагнітної пульпи.

Метою кваліфікаційної магістерської роботи є викладення процесу розмагнічування феромагнітної пульпи, визначення показників ефективності розмагнічування, розробка та програмна реалізація програми для визначення параметрів імпульсного розмагнічувального апарату.

Наукова новизна кваліфікаційної магістерської роботи – обґрунтування можливості успішного використання імпульсного методу розмагнічування та використання математичного моделювання для визначенням оптимальних параметрів РА відповідно до технологічних умов

Галузь застосування – електромеханічне обладнання енергоємних виробництв.

Отримані результати: встановлені однозначні залежності між необхідними параметрами експоненціально згасаючого розмагнічуючого поля та числом витків циліндричної котушки з довільними геометричними параметрами. На основі комплексного використання коло-польового підходу, точних аналітичних залежностей та сучасних можливостей математичного моделювання розроблена універсальна обчислювальна програма з широким спектром функціональних можливостей як в частині технологічних вимог та обмежень, так і в частині табличного, графічного та візуального відображення результатів розрахунків. Розрахунками підтверджена адекватність запропонованої математичної моделі та висока функціональність її програмної реалізації. Великий обсяг розрахункової інформації дозволяє ефективно за параметрами часу і точності проводити комплекс обчислювальних експериментів щодо проектування та оптимізації параметрів котушки як основного елемента РА.

РОЗМАГНІЧУВАЛЬНИЙ АПАРАТ, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ, ФЛОКУЛЯЦІЯ, ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ЗАЛІЗОРУДНОГО КОНЦЕНТРАТУ

ВСТУП

Вплив розмагнічування на показники якості продуктів збагачення залізних руд активно досліджувався протягом декількох десятиліть в наукових публікаціях, а також в лабораторних і напівпромислових умовах [2-6]. На базі досягнень силової електроніки був розроблений ряд високочастотних імпульсних розмагнічуючих апаратів (РА), які при задовільному ступені розмагнічування не повністю задовольняли вимогам універсальності, надійності та оптимальності. До того ж їх параметри в значній мірі визначалися на базі емпіричних залежностей з обмеженим діапазоном використання. Тому розробка РА з використанням класичних аналітичних співвідношень та сучасних можливостей інформаційних технологій є актуальним завданням підвищення якості РА.

В останні десятиліття в умовах зростаючої конкуренції на світовому ринку сировини суттєво загострилася проблема підвищення якості залізорудних концентратів [8]. Позитивний напрямок вирішення даної проблеми пов’язаний з впровадженням магнітно-флотаційного доведення концентратів, при якому ультразвукове опромінювання пульпи та її розмагнічування забезпечують ефективну дезінтеграцію рудних флокулоутворень [9, 10]. За цих умов додатково актуалізується завдання розробки гнучкого й універсального методу проектування РА у широкому спектрі технологічних вимог і обмежень.

Сучасний стан інформаційно-комп’ютерних технологій створюють необхідні можливості для розробки універсальної системи проектування таких пристроїв, яка здатна мінімізувати час розробки, підвищити її якість та запобігти помилкам від людського фактору.

1 ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Проблема флокуляції при магнітному збагачені залізовмісних руд

Флокуляція – це процес об’єднання у флокули із частинок сильно магнітних матеріалів під дією зовнішнього магнітного поля або за рахунок залишкової магнітної індукції цих магнітних частинок (характерно для феромагнітних суспензій). При магнітному розподілені, а саме: витягу, притягувані, виштовхуванні магнітним полем, магнітні частинки, випробувавши сильний магнітний вплив, запам’ятовують залишкову намагніченість. У результаті цього, після поділу частинок у магнітному полі відбувається зміна гранулометричного складу продуктів поділу, і наступна операції з такими продуктами мають показники, що відрізняються від очікуваних, тобто спотворюються, внаслідок чого, досягнення теоретично можливих показників збагачених продуктів проблематичне.

З одного боку, створення флокул з частинок магнетиту (Fe_3O_4) позитивно впливає на вилучення тонких частинок при вологому та сухому збагаченні в барабанних сепараторах з нижньою подачею матеріалу, тому що питома магнітна сприйнятливість флокули вище, ніж розрізнених частинок. Магнітна флокуляція магнетиту та високі магнітні параметри забезпечують видалення заліза в концентрат приблизно до 95 %. При цьому вміст заліза в хвостах зазвичай становить 1%.

Магнітна флокуляція добре проявляється при згущенні концентратів та знешламлюванні зливів з гідроциклонів та концентратів. У першому випадку флокулоутворення підвищує швидкість осадження частинок концентрату та зменшує потрібну площу згущувачів, а в другому сприяє виведенню тонких породних частинок у злив.

Втім, флокулоутворення приводить і до негативного ефекту, що відображається у зниженні якості концентрату, зниженні ефективності класифікації в гідроциклонах, тонкого гідравлічного грохочення та процесу фільтрування. Флокуляція магнетиту погіршує якість магнетитових концентратів тому, що при магнітній сепарації до флокул чіпляються дрібні частки пустої породи і бідні згустки (утворюються неселективні флокули). Чим вища коерцитивна сила магнетиту, тим важче видалити частинки пустої породи з флокули та отримати магнетитовий концентрат високої якості.

Внаслідок флокуляції захоплення нерудної фази збільшується, що ускладнює виведення цих часток з маси концентрату без використання

спеціальних методів. Ймовірність видалення відкритих нерудних частинок наближається до нуля. Отже, отримати чисті магнетитові концентрати за допомогою магнітних методів, які наразі використовуються на збагачувальних фабриках залізних руд, теоретично неможливо.

1.2 Використання розмагнічування в технологічному процесі збагачення руд чорних металів

Згідно попереднього пункту можна зробити висновок, що магнітна флокуляція суттєво впливає на процес магнітного збагачення, тому основна задача – використовуючи спеціальні апарати, впливати на процес флокулоутворення для досягнення вищих показників якості кінцевого продукту.

Близько 20-ти років на Центральному ГЗК проводився промисловий експеримент із випал-магнітного збагачення окислених кварцитів. На основі багаторічних досліджень НДГРІ та Механобрчермета спроектовано та споруджено випал-магнітний комплекс, що переробляв 10 млн т/рік окисленої руди шляхом перетворення її на штучний магнетит з подальшим його вилученням на сепараторах з постійними магнітами[3].

Основним недоліком при збагачені штучного магнетиту є його магнітотвердість, що заважає розмагнічувати флокули та видаляти з них захоплені пусті частини породи. Він характеризується підвищеною коерцитивною силою (H_c = до 24 кА/м) (табл.1) і є більш магнітно-жорстким порівняно з магнетитом. У випадку відновлювального випалу окислених кварцитів основною причиною високої коерцитивної сили штучного магнетика є різке охолодження його водою після виходу з випалювальної печі, що викликає інтенсивні внутрішні напруги, тріщини, та утворює дрібнокристалічні структури з кристалами близьких розмірів. Також, не можна говорити про високу коерцитивну силу як про власну властивість штучного магнетиту, оскільки залежності $H_c = f(d)$ для природного та штучного магнетиту практично не відрізняються, якщо умови їхньої кристалізації однакові (див. рис. 1).

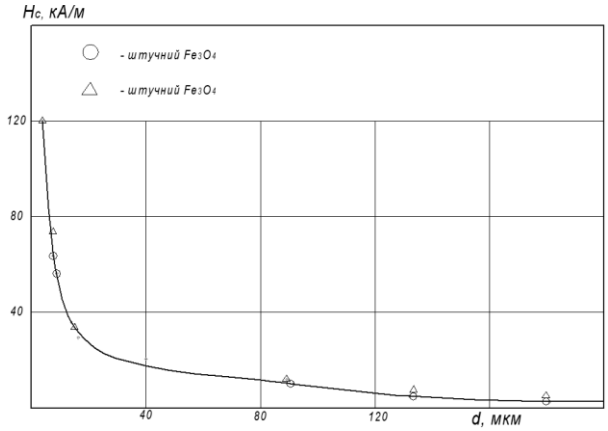


Рисунок 1 – Залежність коерцитивної сили H_c природного та штучного магнетита від розміру частинок d

Таблиця 1 – Характеристика магнітних властивостей природного та штучного магнетиту та магтеміту, отримані з руд різних родовищ

Родовище	Вміст, %					Намагніченість $n \cdot 10^3, A/м$		Коерцитивна сила, H_c, кА/м	Питома магнітна сприятливість $\gamma \cdot 10^3$, $м^3/кг$
	$Fe_{общ}$	FeO	Fe_3O_4	$\gamma\ Fe_2O_3$	TiO_2	максимальна	залишкова		
Лебединський*	66,9	28,6	92,3	-J-J	-J-J	80,5	20,0	48,0	6,85
Кременчуцьке*	69,1	28,6	92,6	-J-J	-J-J	72,0	22,3	59,0	6,05
Таштагальське*	62,8	24,4	78,8	-J-J	-J-J	64,5	12,5	38,4	5,75
Соколівське**	61,9	24,4	78,9	-J-J	-J-J	105,4	-J-J	24,8	4,89
Качканарське**	63,7	26,6	85,5	-J-J	2,2	126,0	37,0	68,0	7,42
Копанське	60,0	30,6	59,0	-J-J	15,0	22,0	13,0	100,0	1,96
Штучний магнетит, отриманий відновленням бурого залізняку Аккерманівського родовища	57,8	19,5	62,8	-J-J	-J-J	45,7	23,0	10,4	4,52
Те саме, але після окислення до магнетиту	56,2	1,9	6,1	56,7	-J-J	55,0	10,0	9,2	5,73
Штучний магнетит, отриманий відновленням мартиту Криворізького родовища	68,2	25,1	79,1	-J-J	-J-J	189,0	60,5	23,2	5,75
Міаеокоу (КНР)***	67,8	26,3	85	-J-J	-J-J	86,5	16,4	33,4	7,72
Норберг (Швеція)***	69,8	29,0	93,5	-J-J	-J-J	386,0	-J-J	-J-J	8,06
* Намагнічування проводилось при H=80кА/м, а визначення при Н=24кА/м ** Намагнічування проводилось при H=46.5кА/м *** Намагнічування проводилось при H=96кА/м									

Оскільки найбільш твердими магнітними властивостями володіють концентрати випал-магнітного збагачення Криворізького ЦГЗК, перед операціями класифікації по крупності (перед гідроциклонами і тонким

грохотінням) і фільтруванням концентрату застосовується розмагнічування з метою дефлокуляції частинок[3].

Магнетит, що міститься в залізистих (магнетитових) кварцитових руд, має в середньому знижену коерцитивну силу (H_c < 5 кА/м). Тому на збагачувальних фабриках, що переробляють залізисті кварцити, операція попереднього розмагнічування застосовується не завжди. Але практично завжди застосовується попереднє намагнічування пульп перед операціями знерухомлення зливів гідроциклонів і концентрату в магнітних дешламаторах.

При збагаченні магнетитових руд попереднє розмагнічування або намагнічування пульпи застосовується залежно від магнітних властивостей конкретного родовища магнетиту. Наприклад, на Високогірському ГЗК та Абагурській збагачувальній фабриці використовуються апарати, що розмагнічують, перед класифікацією в гідроциклонах, але не перед магнітними дешламатори. На Соколівсько-Сарбайському ГЗК апарати, що розмагнічують, перед класифікацією в гідроциклонах не використовуються, але застосовуються магнітні дешламатори з попереднім намагнічуванням пульпи.

Також процес розмагнічування та намагнічування використовують при методі «селективного магнітного флокулоутворення». Даний спосіб передбачає обробку пульпи безпосередньо перед операцією сепарації в спеціальному флокуляторі. Останній є рядом електромагнітних котушок (рис. 2) із зростаючою напруженістю магнітного поля (від 3,2-4 до 40 кА/м), усередині яких протікає мінеральна суспензія. При послідовному і рівномірному посиленні напруженості магнітного поля спочатку утворюються суто магнетитові флокули (без включень немагнітних частинок), які в кінці зони обробки зі збільшенням 77 до 40 кА/м зміцнюються і зовні обростають зростками магнетиту з порожньою породою.

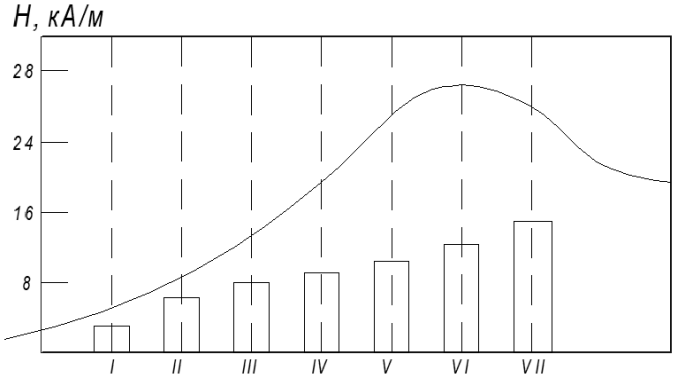


Рисунок 2 – Селективний магнітний флокулятор:
а – осьовий розріз; 1 – немагнітна труба; 2 – турбулятор; 3 – електромагнітна котушка; б – розподіл магнітного поля в робочій зоні магнітного селективного флокулятора (при I = 20 А); I-VII – номери котушок

Але використання селективної флокуляції перспективна насамперед для розмагніченого продукту поступаючого на сепаратор. Результати впливу попередньої обробки методом селективної флокуляції наведені на табл.2.

Таблиця 2 – Вплив попередньої обробки пульпи у флокуляторі на результати мокрої магнітної сепарації

Руда	Продукт	Вихід Fe, %	Вміст Fe, %	Вилучення Fe, %
Криворізькі кварцити	Концентрат	51/47,2	53,5/61,2	82,5/82,9
	Хвіст	49/55,8	11,6/10,4	17,5/17,1
	Вихідний	100	32,8	100
Комиш-Бурунський ЗРК	Концентрат	41,4/41,1	62,5/66,7	73,3/79,3
	Хвіст	58,6/59,9	16,0/12,3	26,7/10,7
	Вихідний	100	35,2	100
Примітка. В числівнику – без обробки, в знаменнику – з обробкою				

Також доцільно використовувати розмагнічування при переділі магнітного концентрату між двома прийомами сепарації.

На Абагурській збагачувальній фабриці проведено промислові випробування технології зі стадіальним виділенням концентрату із застосуванням гвинтових сепараторів СВМ-3-750 на продукті розвантаження млина самоподрібнення. Для отримання концентрату продукту ММС необхідно, щоб живлення гвинтового сепаратора було представлено окремими зернами магнетиту, породних мінералів і зростків. Тому на другому етапі випробувань для руйнування магнетитових флокул перед гвинтовою сепарацією використано додаткову операцію розмагнічування. В результаті вдалося виділити перед останньою стадією подрібнення кондиційний концентрат із вмістом заліза 63,1 %.

Перед операцією тонкого гідравлічного грохочення підвищення ефективності поділу по крупності завжди рекомендується застосовувати розмагнічування вихідної пульпи. Однак при дуже розведеній пульпі показники грохочення можуть бути вищими і без нього. Результати промислового експерименту показали, що при розведеному живлені на грохочені не слід застосовувати попереднє розмагнічування пульпи. У цьому випадку, порівняно з розмагнічуванням, вихід підрешітного продукту зростає на 9,42 % зі

збільшенням вилучення класу –71 мкм у підрешітний продукт та ефективності класифікації на 8,89 та 11,18% відповідно.

Механізм цього процесу імовірно полягає в наступному: розмагнічування пульпи призводить до руйнування флокул і роз'єднання окремих дрібних частинок, що їх утворюють. При цьому при вельми розбавленій пульпі окремі дрібні частинки титаномагнетиту не встигають осісти на сито гуркоту і відносяться потоком пульпи в надрешітний продукт. Якщо не використовувати розмагнічування, то флокули, як відносно великі агрегати, встигають осісти на сито гуркоту. Надалі руйнація флокул відбувається під дією інерційних механічних сил, що виникають при високочастотних коливаннях сит гуркоту, і окремі дрібні частинки титаномагнетиту більшою мірою переходять у підрешітний продукт.

Застосування розмагнічування перед фільтруванням титаномагнетитового концентрату призвело до зменшення його вологості на 0,52%. Це узгоджується з промисловим застосуванням апаратів, що розмагнічують, на Качканарському ГЗК (зниження вологості концентрату становить в середньому 0,5 %). Попереднє розмагнічування перед фільтруванням більш магніто м'якого магнетиту Сутарського родовища в порівнянні з титаномагнетитом також дозволило зменшити вологість концентрату. Імовірно, це пов'язано з тонкою крупністю частинок концентрату (менше 45 мкм), що призвело до підвищення коерцитивної сили магнетиту і, як наслідок, підвищення ефективності застосування операції попереднього розмагнічування перед фільтруванням.

1.3 Аналіз електромагнітних процесів при розмагнічуванні феромагнітної пульпи

Домени. Енергія міждоменних границь. Феромагнетик, що знаходиться в намагніченої стані, має велику кількість магнітних доменів, що орієнтовані в одному напрямку або з'єднані, формуючи великі домени. Внаслідок цього магнітні потоки окремих доменів зливаються, утворюючи єдиний потік, що проявляється як залишковий магнетизм або як розсіяне магнітне поле за межами феромагнітного матеріалу.

Феромагнітний зразок кінцевих розмірів, який намагнічений до насичення (при цьому відсутня доменна структура), має значну магнітостатичну енергією у своєму магнітному полі. Енергія магнітних полюсів для випадку рис. 3, а:

$$E_{p\text{а}} = \frac{1}{2} \cdot N \cdot I_s^2 \cdot V$$

Розрахунки вказують, що поділ феромагнетика на окремі домени спонтанної намагніченості призводить до значного зниження енергії *Ер*. Для випадку рис. 3, б:

$$E_{p\text{б}} = \frac{1}{2} \cdot N \cdot \left(\frac{I_s^2}{2}\right)^2 + \frac{1}{2} \cdot N \cdot \left(\frac{I_s^2}{2}\right)^{\rho} = \frac{1}{4} \cdot N \cdot I_s^2 = \frac{E_{p\text{а}}}{2}$$

Отже для випадку рис. 3, в:

$$E_{p\text{б}} = \frac{1}{n} \cdot E_{p\text{а}}$$

Таким чином, коли магнетик розбивається на n доменів, його магнітостатична енергія $E_\text{р}$ зменшується у n разів, оскільки частина енергії витрачається на формування міждоменних меж. Вектори I_S у сусідніх доменах, як ілюструється на рис. 3, б, мають напрямки, які відрізняються на 180°. У межі доменів (або стінки) відбувається поступова зміна напрямку магнітних моментів, причому магнітні моменти сусідніх доменів утворюють певний кут.

Добавлено примечание ([M1]): да б?

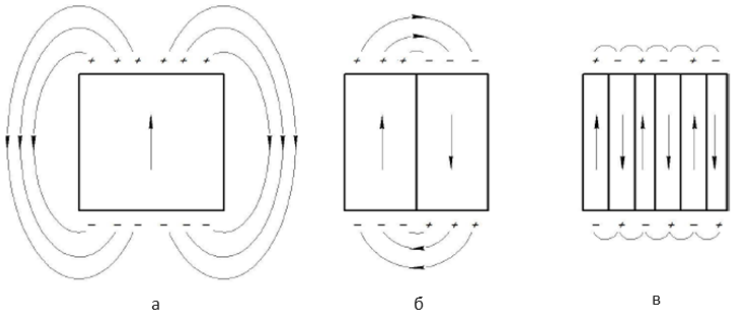


Рисунок 3 – Схема зображення доменів

Для відхилення одного магнітного моменту на певний кут щодо іншого необхідно витратити енергію на подолання обмінних сил, які намагаються зберігати магнітні моменти паралельно. Тому процес поділу на домени не відбувається до $n \to \infty$, оскільки це призвело б до зменшення енергії $E_\text{р}$ до нуля. Замість цього існує деяке оптимальне число доменів, що відповідає мінімуму суми енергії $E_\text{р}$ та граничної енергії $E_\text{гр}$.

Основною причиною формування доменної структури є магнітостатична енергія полюсів феромагнітних матеріалів. Наприклад, в однорідному нескінченному кристалі доменна структура не утворюється, оскільки для нескінченного кристала $N = 0$ і $E_\text{р} = 0$.

У реальних феромагнетиках доменна структура повинна враховувати всі взаємодії в кристалічних решітках. Розмагнічений зразок є системою доменів, в

яких сумарний магнітний момент дорівнює нулю, при цьому напрямок намагніченості кожного домену орієнтований уздовж осей легкого намагнічування. Напрями легкого намагнічування визначаються мінімумом загальної вільної енергії феромагнітного матеріалу.

Процеси перемагнічування. У магнітному полі, що перевищує насичення ($H \geq H_s$, де H — зовнішнє поле, H_S — поле насичення), монокристал або полікристалічний феромагнетик досягають стану насичення магнітним моментом у напрямку поля. При зменшенні поля процеси обертання стають основними. Вектори намагніченості (I_S) монокристала або кристалітів полікристала починають змінювати орієнтацію, спрямовуючись уздовж легших осей намагнічування. Далі перемагнічування феромагнетика відбувається через зсув меж між доменами. Для цього потрібно утворення «зародка» перемагнічування всередині домену, що аналогічно зародкам фазових переходів першого роду в термодинаміці, таким як утворення кристалів у розплаві або крапель у пересиченому парі.

Пропонують наступні можливі причини утвору зародків перемагнічування:

1. У феромагнетику навіть у полях насичення H_S залишаються невеликі ділянки доменів з орієнтацією I_S протилежною H_S.

2. Поля поверхні зразка, що розмагнічують, а також внутрішні поля розсіювання, що обумовлені неферомагнітними включеннями й порожнечами, можуть сприяти утвору зародків.

3. До утвору зародків можуть привести теплові флуктуації.

Перемагнічування відбувається, коли зародки перемагнічування досягають достатнього розміру, перевищуючи критичні величини. Якщо ж зародки менші за ці розміри, вони є термодинамічно нестабільними і можуть «розчинятися» в початковій фазі.

Незворотні зміни у межах доменів призводять до виникнення залишкової намагніченості, що є основною причиною магнітного гістерезису.

Процеси обертання вектора спонтанної намагніченості (I_S) можуть призвести до незворотного намагнічування та гістерезису. У феромагнетику, що не має магнітної анізотропії, спонтанна намагніченість I_S орієнтується вздовж будь-якого малого зовнішнього поля. Коли знак поля змінюється на протилежний, I_S змінює свій знак без затримки, і гістерезисна петля відсутня. Однак у зразка з кінцевими розмірами та неізометричною формою з'являється анізотропія форми, яка викликає гістерезис. Зміна знаку поля призведе до зміни

напрямку намагніченості лише тоді, коли величина поля досягне критичного значення H_0, що достатньо велике, щоб енергія зразка в зовнішньому магнітному полі перевершила енергію анізотропії форми. Таким чином, анізотропія форми створює потенційний бар'єр для I_S, який буде подоланий лише при значному зовнішньому полі H_0. В результаті наявність анізотропії форми затримує зміну напрямку намагніченості, яка відбувається стрибком, і з'являється магнітний гістерезис, спричинений незворотним обертанням спонтанної намагніченості.

Матеріали з кристалографічною анізотропією та анізотропією напружень мають більші можливості для виникнення гістерезису. Найсильніше виражені явища незворотного намагнічування та гістерезису спостерігаються в анізотропних неоднорідних феромагнетиках, коли відбуваються процеси зсуву меж між доменами.

Зовнішнє магнітне поле також сприяє анізотропії, утворюючи напрямок легкого намагнічування. З підвищенням напруженості поля цей напрямок стає все більш вираженим. Незворотні зміни намагніченості, що ведуть до гістерезису, обумовлені зміною магнітної анізотропії, яка може бути викликана різними факторами, включаючи вплив магнітного поля. Згідно з розробками Кондорського, можна вказати три різні механізми гістерезису.

1. Гістерезис, обумовлений незворотним обертанням феромагнітних зерен. Він здійснюється в тому випадку, коли утруднено утвір зародків перемагнічування. Наприклад, такий гістерезис можна спостерігати в конгломераті однодоменних феромагнітних зерен, зацементованих у неферомагнітну матрицю.

2. Гістерезис, викликаний затримкою росту зародків перемагнічування. Цей вид гістерезису спостерігається в однорідних матеріалах з однієї віссю легкого намагнічування. Затримка росту зародків пов'язана з необхідністю витрати роботи на збільшення поверхні зародків.

3. Гістерезис, обумовлений затримкою зсуву границь між доменами. Ці затримки викликаються місцевими неоднорідностями матеріалу.

У реальних феромагнетиках гістерезис тією чи іншою мірою обумовлений усіма трьома причинами.

Повне розмагнічування феромагнетика. Розглядаючи діаграму (рис. 4), на яку нанесені криві повернення із точок H_{GB} і H_{c3}, неважко переконатися, що, впливаючи на зразок полем, що має напруженість $-H_{GB}$ і H_{c3}, не можна повністю розмагнітити цей зразок – після припинення дії поля індукція буде мати деяке значення, рівне відповідно B' *і* B''.

Добавлено примечание ([M2]): Треба повернутися на початок і включити посилання!!!

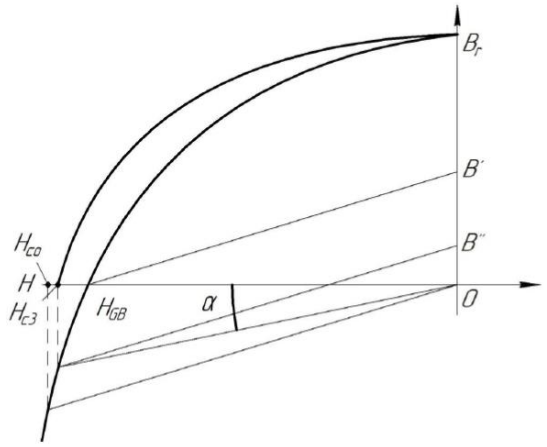


Рисунок 4 – Схема, що пояснює принцип повного розмагнічування феромагнетика

Для досягнення повного розмагнічування зразка необхідно застосувати негативне поле H_{C0}, значення якого можна визначити, якщо провести лінію через нульове значення індукції B у третьому квадранті до перетину з петлею $B(H)$. Це значення коерцитивної сили, яке позначають як H_{C0}, використовується для оцінки матеріалів магнітофонних стрічок та дротів.

Досягнення H_{C0} на феромагнітних матеріалах дозволяє отримати повністю розмагнічений зразок, що важливо для отримання результатів, не залежних від попереднього намагнічення. Проте, точне визначення цього значення ускладнюється через обмежену точність амперметрів, що використовуються для налаштування напруженості H_{C0}, а також через неоднорідність матеріалів зразків. Це призводить до того, що такий метод не застосовується для отримання повного розмагнічування випробуваних зразків.

Для розмагнічування на практиці застосовують змінне магнітне поле низької або високої частоти, інтенсивність якого поступово зменшується до нуля. Зразок розташовують у котушці, через яку протікає змінний струм, і повільно виводять його з цього поля, поки він не опиниться на значній відстані, де вплив поля котушки можна вважати незначним. Змінний струм необхідний для досягнення повного «розмагнічування» зразка. Величина максимального струму в котушці встановлюється так, щоб інтенсивність поля всередині котушки була принаймні в 1,2 рази більшою за максимальне значення поля, під дією якого утворюється залишкова індукція в зразку.

Поведінка частинок у змінному магнітному полі. Змінне магнітне поле виникає під час переміщення немагнітного барабана відносно статичної багатополюсної магнітної системи. Коли на поверхні барабана знаходиться магнітний матеріал, він не перемагнічується, рухаючись від одного полюса до іншого. Замість цього він переорієнтовується пасмами, які обертаються навколо осі слабкого намагнічування. Це створює ілюзію того, що пасмо "рухається" по поверхні барабана в напрямку, протилежному його обертанню.

Якщо барабан залишається нерухомим, а магнітна система рухається, пасма на поверхні барабана під час проходження полюсів переміщуються на відстань, що дорівнює довжині пасма, незалежно від кроку між полюсами [6].

Згідно з експериментальними даними [6], пасма стають менш чіткими зі збільшенням частоти, і на частоті 400 Гц вони стають нерозрізненими для людського ока.

Аналіз даних на рис. 5 дає можливість зробити такі висновки. Оскільки магнітна сприйнятливість зменшується зі зменшенням крупності, то пасма стають коротшими, й тому їхня швидкість знижується. Однак, зі збільшенням частоти їхня швидкість вже не залежать від розміру, тому що опір хмари частинок не залежить від окремої частинки, а має деяке середнє значення, що залежить від розмірів і швидкості хмари. Було визначено[1], при якій частоті флокули й частинки відриваються від поверхні барабана при зміні знаку напруженості поля(табл.3).

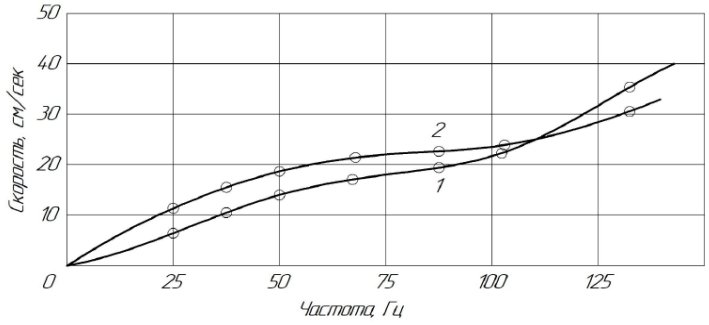


Рисунок 5 – Швидкості переміщення згущених мас частинок від частоти зовнішнього магнітного поля

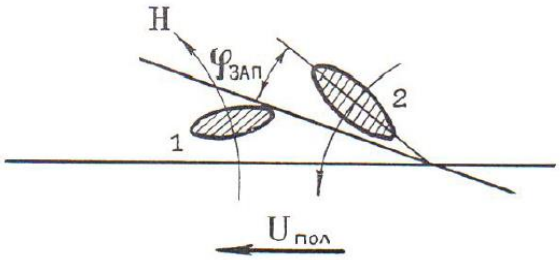


Рисунок 6 – Схема руху флокул при впливі поля високої частоти

Таблиця 3 – Зміна кута відставання флокули залежно від частоти проходження магнітних полюсів

Частота зміни поля, Гц	10	50	100	500	1000	1500	2000	3000
Кут запізнювання, град	0	0,006	0,24	36	49	69	74	79

При частоті 500 Гц частинки виконують коливальні рухи, не встигаючи здійснити повне обертання, а при 1 кГц кут запізнювання перевищує 45°. Розмагнічування виникає, коли кут запізнювання більше 90°, що призводить до появи намагніченості, спрямованої протилежно до вектора зовнішнього магнітного поля. При значенні кута запізнювання близькому до 180° створюються оптимальні умови для розмагнічування частинок.

У повітряному середовищі змінне магнітне поле активно руйнує флокули, але через малий опір руху флокул умови для розмагнічування залишаються складними.

Якщо розглядати вплив змінного магнітного поля на магнітні частинки в рідкому середовищі (пульпі), то вони зазвичай мають витягнуту форму, схожу на еліпсоїд обертання із співвідношенням осей $\Lambda = 2$. Частинка, орієнтуючись вздовж вектора зовнішнього магнітного поля за допомогою своєї довгої осі (яка легше піддається намагнічуванню), слідує за зміною напрямку цього поля.

Таблиця 4 – Кут запізнення повороту частинки до вектора зовнішнього змінного магнітного поля

Частота, Гц	10	50	100	500	1000	3000	5000	10000	50000	100000
Кут запізнення, град	0	0	1	72	120	160	168	172	176	177

Ступінь розмагні-чування	0	0	0	0	0,5	0,93	0,97	0,99	0,997	0,998

Отже, при частотах до 100 Гц частинки пульпи практично слідують за напрямком зовнішнього магнітного поля із запізнюванням лише на 1°. Коли частота перевищує 1000 Гц, запізнювання значно збільшується, досягши понад 90°, і починається перемагнічування частинок. За частоти 100 кГц умови для перемагнічування стають достатніми, оскільки кут запізнювання досягає 172° (табл. 4).

Кут запізнення може бути використаний у якості мірила розмагніченості частинок: $К_{роз} = \sin(\varphi - 90)$, оскільки розмагнічування починається тоді, коли складова вектора зовнішнього магнітного поля починає мати напрямок, протилежний вектору намагніченості частинки.

1.4 Основні фактори, що впливають на розмагнічування продуктів магнітного збагачення

Фактори, що впливають на ефективність розмагнічування, можна підрозділити на наступні групи в залежності:

а) від характеристики продуктів збагачення (магнітні властивості матеріалу, вміст магнітного компонента, гранулометричний склад);

б) від характеристик технологічного потоку (швидкість руху пульпи, її щільність, в'язкість, динамічні характеристики потоку);

в) від характеристики апарата, що розмагнічує, (максимальна напруженість поля, частота, градієнт полю, довжина зони розмагнічування).

Вплив на процес розмагнічування характеристик продукту збагачення.

Магнітна проникність частинок, що розмагнічуються, визначає характеристики магнітного поля.

Магнітні властивості магнетиту залежать від крупності частинок(рис. 7). Зі зменшенням крупності насіння магнетиту від 0,04 мм його магнітна сприйнятливість знижується більш ніж удвічі – з $17{,}7 \cdot 10^{-4}$ до $7{,}5 \cdot 10^{-4}$ м^3/кг.

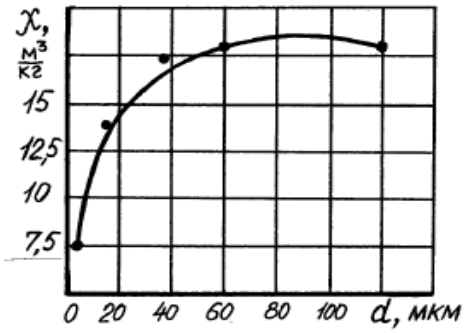


Рисунок 7 – Залежність питомої магнітної сприйнятливості магнетита від крупності частинок

Питома магнітна сприйнятливість частини руди, що містить певну кількість магнетиту, залежить лише від відсоткового вмісту у ньому магнетиту.

Об'ємну магнітну сприйнятливість магнетиту з іншими мінералами можна розрахувати за формулою:

$$ae_{\text{ср}} = 10^{-4} \cdot \alpha^2 \cdot ae_0$$

де - α - вміст магнетиту в зростку, %; ae_0 - об'ємна магнітна сприйнятливість частинок чистого магнетиту.

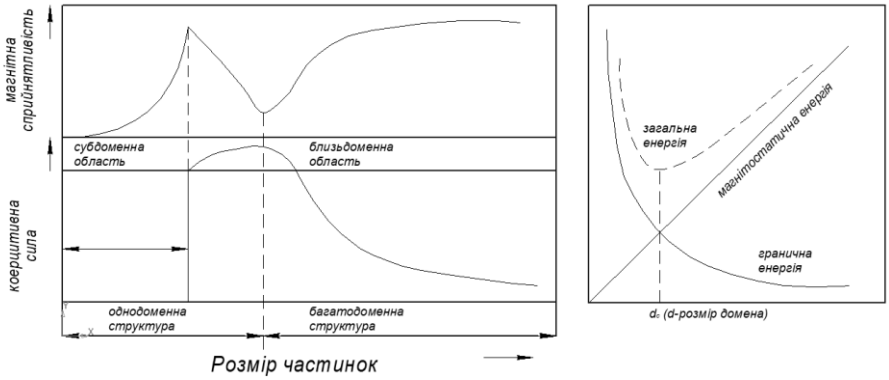


Рисунок 8 – Вплив розміру частинок на коерцитивну силу, початкову магнітну сприйнятливість скупчених частинок (а) та магнітної енергії цієї системи (б)

Звертають увагу на магнітні властивості при збагачувані дрібно вкраплених руди тому, що вимагають нормального розкриття високого ступеня подрібнення (до –50 мкм і навіть –30 мкм). При цьому розміри дрібних фракцій

наближаються до доменних розмірів (для магнетиту цей розмір може становити кілька мікрометрів без поля). Магнітні властивості у близьких частинок докорінно відрізняються від властивостей великих масивів цієї ж речовини.

Вплив на процес розмагнічування від параметрів технологічного потоку

1) Швидкість руху пульпи

Швидкість потоку пульпи впливає на ефективність розмагнічування, оскільки висока швидкість може призводити до недостатнього часу впливу магнітного поля тим самим, знижуючи якість розмагнічування. Однак за дуже низької швидкості можуть виникнути застої, що також знижує ефективність процесу. Оптимальна швидкість має бути розрахована для забезпечення рівномірного впливу магнітного поля

2) Щільність пульпи

Чим вище щільність пульпи (тобто вміст твердих частинок), тим складніше розмагнічувати її, оскільки частинки можуть агломеруватися, утворюючи великі згустки, які важче розмагнічувати. При нижчій щільності частинки можуть вільно циркулювати в потоці, що полегшує розмагнічування.

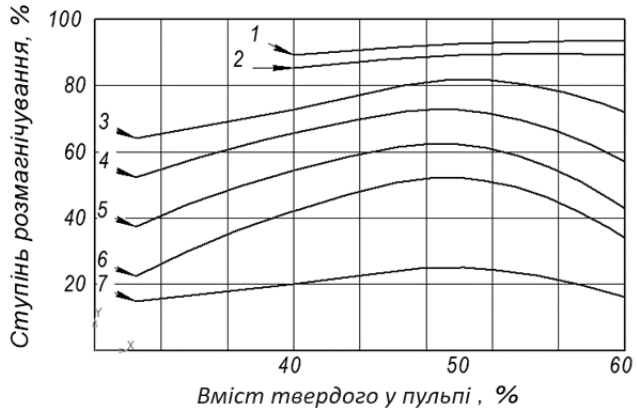


Рисунок 9 – Залежність ступеня розмагнічування концентрату Криворізького ЦГЗК від змісту твердого в пульпі: 1 – *H*=128 кА/м, *f*=370Гц; 2 – *H*=96 кА/м, *f* = 370 Гц; 3 – *H* = 160 кА/м, *f*=50 Гц; 4 – *H*=128 кА/м, *f* = 50Гц; 5 – Н=96 кА/м, *f*=50 Гц; 6 – *H* = 64 кА/м, *f*=50 Гц; 7 – *H* = 32 кА/м, *f*=50Гц

3) В’язкість

В'язкість пульпи залежить від її складу та рідини-носія, яка впливає на рух частинок у магнітному полі. Чим вище в'язкість, тим менше рухливість частинок,

що ускладнює їхнє розмагнічування. Зниження в'язкості покращує умови для ефективнішого впливу магнітного поля.

4) Динамічна характеристика потоку

Ламінарний потік (плавний, без різких змін) є кращим для процесу розмагнічування, оскільки при турбулентному потоці (хаотичний рух рідини) частинки можуть випадати із зони ефективного впливу магнітного поля та переорієнтовуватися. Ламінарна течія допомагає частинкам проходити через магнітне поле рівномірно і послідовно.

Вплив на процес розмагнічування від характеристики РА

1) Максимальна напруженість поля

Максимальний струм у котушці, що розмагнічує, установлюють такого значення, щоб напруженість поля усередині котушки перевищувала, щонайменше, в 1,2 рази максимальне значення напруженості, під впливом якої була отримана залишкова індукція даного зразка.

На рис. 10 показані залежності ступеня розмагнічування концентратів випал-магнітного збагачення Криворізького ЦГЗК (коерцитивна сила приблизно $H_C = 24$ кА/м) від напруженості магнітного поля. Як видно, ступінь розмагнічування росте зі збільшенням напруженості поля. При низьких напруженнях (16-20 кА/м) обидва матеріали мають ступінь розмагнічування 20-30 %. Зі збільшенням напруженості спочатку ступінь розмагнічування ростуть швидко, потім криві вирівнюються. Концентрат КГЗК більш магнітом ’який (коерцитивна сила $H_C = 7$-8 кА/м) досягає ступеня розмагнічування 90 % при напруженості 64 кА/м і частоті 400 Гц. На рис. 10 пунктиром показана теоретична крива ступеня розмагнічування, що практично збігає з експериментальної.

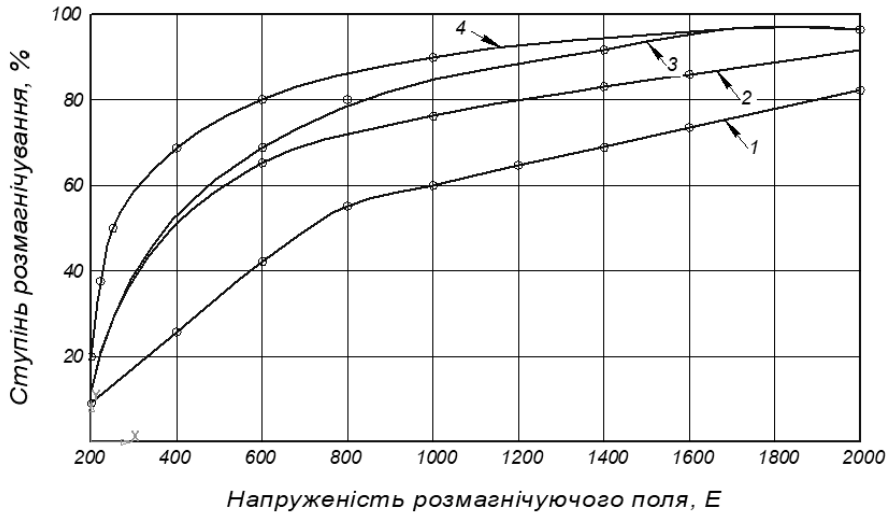


Рисунок 10 – Залежність ступеня розмагнічування концентрату Криворізького ЦГЗК від напруженості магнітного поля при різній його частоті: 1 – 50 Гц; 2 – 235 Гц; 3 – 280 Гц; 4 – 370 Гц.

2) Частота

В дослідженнях зміни залишкової намагніченості матеріалу визначили залежність кількості прикладених імпульсів перемагнічування на якість розмагнічування. Визначило, що п'ять періодів згасаючого змінного поля забезпечують (при достатній максимальній напруженості поля РА) розмагнічування матеріалу на 80 %, а для повного розмагнічування тонкоподрібненого сильномагнітного матеріалу потрібно не менш 10 таких перемагнічувань. Тому виходячи с цього факту визначають мінімально необхідну частоту [2].

Підвищення ступеня розмагнічування зі збільшенням частоти магнітного поля можна пояснити збільшенням числа перемагнічувань матеріалу під час проходження через розмагнічуючий апарат (РА) (рис. 11).

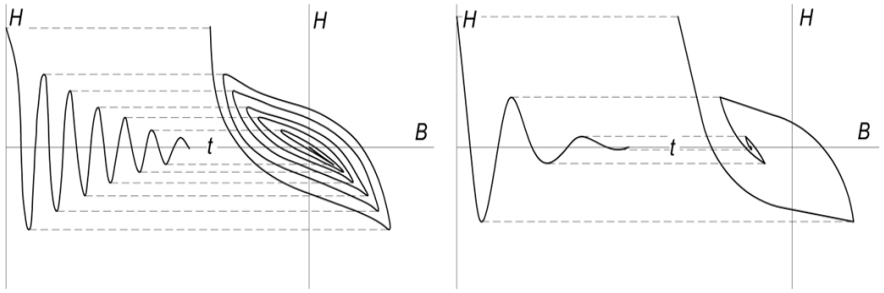


Рисунок 11 – «М’яке» розмагнічування (зліва) та неповне розмагнічування при невеликій кількості циклів перемагнічування (справа)

Як згадувалось раніше, частота проходження магнітних полюсів впливає на ефективність розмагнічування, де основним показником являється кут запізнення. Розмагнічування буде спостерігатися в тому випадку, коли кут запізнювання буде більше 90°. У цьому випадку спостерігається протилежний напрямок намагніченості частинки й вектора зовнішнього магнітного поля. Коли кут запізнювання наближається до 180°, тоді умови для розмагнічування частинок будуть ідеальними.

3) Градієнт поля

4) Довжина зони розмагнічування

Довжина зони розмагнічування визначається, щоб виключити пропуски нерозмагнічених часток пульпи при максимальній швидкості потоку.

Наприклад, якщо черговий пакет згасаючих коливань у контурі збуджується через $T = 0{,}02$ с, а максимальна швидкість пульпи V у м/с, тоді мінімальну довжину котушки слід прийняти рівною

$$L = T \cdot V = 0{,}02 \cdot V \text{ м} = 20 \cdot V \text{ мм}.$$

1.5 Критерії ефективності процесу розмагнічування

Для визначення ефективності процесу розмагнічування використовують лабораторні і промислові дослідження.

В лабораторних умовах ефективність процесу розмагнічування можна вивчати за допомогою різних методів. Один з них полягає в тому, щоб механічно зафіксувати частинки у просторі, змішуючи феромагнетик з гіпсом. Під час затвердіння цієї суміші вона піддається впливу постійного магнітного поля, що змушує частинки вирівнюватися уздовж вектора цього поля. Після затвердіння суміш розмагнічують, визначаючи магнітні властивості до та після цього процесу. Інший спосіб дослідження ступеня розмагнічування магнетитових частинок полягає в мікроскопічному аналізі пульпи, обробленої високочастотним магнітним полем. Наприклад, на рис. 12 показано зображення частинок пульпи магнетиту після намагнічування (збільшення х24), а на рис. 13 — після впливу змінного магнітного поля з частотою 20 кГц. Обидві пульпи були інтенсивно механічно перемішані, і розмір їх частинок залишився незмінним. Це свідчить про те, що механічний вплив не має значного ефекту на розмір флокул.

Рисунок 12 – Суспензія з намагнічених частинок магнетиту

Рисунок 13 – Суспензія з розмагнічених частинок магнетиту

Дослідження розмірів частинок дозволяє зробити висновок про те, чи всі частинки мають розмір менший за 20 мкм. Під час класифікації таких частинок, наприклад, в гідроциклонах, вони зазвичай потрапляють до зливального продукту, на відміну від намагнічених частинок, де більша частина у вигляді флокул осідає в пісковому продукті та повертається в млин.

У промислових умовах, в порівнянні з лабораторними, отримати точні результати значно складніше, тому для досліджень використовуються непрямі ознаки. Як було зазначено в пункті 1.2, доцільно проводити розмагнічування суспензії (пульпи), яка потрапляє в гідроциклони, оскільки флокули з частинок, що належать до певного класу крупності, мають більший розмір і потрапляють до піскового продукту, повертаючись у млин для подрібнення, що збільшує циркулююче навантаження та знижує ефективність подрібнення. Тому в ході досліджень основна увага приділяється таким факторам: чи збільшується вміст заліза в кінцевому концентраті, чи зростає вміст заліза в хвостах, чи знижується його вміст на виході, а також аналізу виходу продукту в зливі та пісках з гідроциклона до і після розмагнічування. Швидкість осадження розмагніченої суспензії є також непрямим показником ефективності розмагнічування. Графіки кінетики згущення для намагнічених та розмагнічених магнетитових суспензій

представлені на рис. 14. Як видно з рисунка, швидкість осадження розмагніченої суспензії майже втричі менша, ніж у намагніченій.

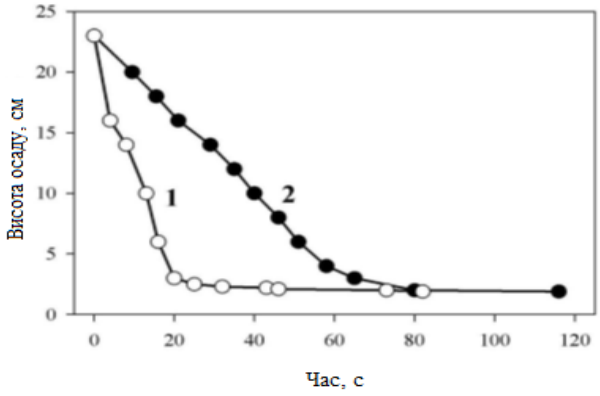


Рисунок 14 - Залежність висоти осаду магнетиту від часу:
1, 2 – намагнічена й розмагнічена суспензії магнетиту відповідно

Раніше було проведено дослідження класифікації намагніченого та розмагніченого магнетиту в гідросайзері. Згідно з роботою [16], при класифікації розмагніченого магнетиту вихід часток розміром менше 50 мкм у злив класу збільшується майже в 3,5 рази порівняно з намагніченим. У гідросайзері потік рідини має ламінарний характер, що практично виключає руйнування магнітних флокул. Натомість у гідроциклоні рідина рухається турбулентно, що підвищує ефективність класифікації намагніченої суспензії завдяки частковому руйнуванню магнітних флокул. Метою цього дослідження було визначити, як розмагнічування суспензії впливає на її класифікацію в гідроциклоні. Дослідження проводилися в гідроциклоні діаметром 30 мм з пісковим отвором розміром 5 мм і зливним отвором – 10 мм. Подача в гідроциклона здійснювалася через щілинний отвір розмірами 4х10 мм.

Результати дослідження наведено в табл. 5

З даних табл. 5 видно, що вихід розмагніченого магнетиту класу мінус 50 мкм у злив у середньому вище на 8 %, ніж намагніченого. При якісному мікроскопічному аналізі було встановлено, що при досліджених режимах роботи даного гідроциклону величина граничного зерна поділу була значно менше 50 мкм. Тому значна кількість класу -50 мкм потрапило в пісковий продукт.

Таблиця 5 – Результати дослідження класифікації магнетиту в гідроциклоні

Клас крупності, мм	Намагнічений		Розмагнічений	
	Вихід продукту, %			
	Пісковий	Зливальний	Пісковий	Зливальний
Тиск на вході 1атм.				
+ 0,050	3,09	0,15	2,85	0,14
- 0,050	78,34	18,42	71,49	25,52
Тиск на вході 2атм.				
+ 0,050	6,06	0,35	1,9	0,63
- 0,050	79,77	13,83	72,29	25,17
Тиск на вході 3атм.				
+ 0,050	4,62	0,66	2,05	0,32
- 0,050	78,22	16,5	72,99	24,65

1.6 Порівняльний аналіз існуючих систем імпульсних розмагнічувальних апаратів.

Як було показано в пп. 1.4 та 1.5, основними перевагами імпульсних розмагнічувальних апаратів (РА) є суттєве зменшення масогабаритних параметрів при високому рівні ефективності розмагнічування. Тому починаючи з 70-х років минулого століття в практиці розмагнічування пульпи феромагнітних матеріалів використовуються, як правило, лише імпульсні РА.

Незважаючи на більш ніж 50-річну історію використання імпульсних РА їх конструкція і параметри постійно модернізувалися на основі постійного прогресу в галузі силової електроніки та розвитку технологій збагачення. При цьому принципові риси кращих зразків імпульсних РА залишалися практично незмінними. Як правило, це: в 15-20 разів менші масогабаритні параметри котушки, що розмагнічує феромагнітну суміш, високий рівень ефективного розмагнічування великих об'ємів пульпи (діаметр пульпопроводу може досягати 400 мм, а швидкість пульпи 5 м/с), достатньо високий рівень максимальної напруженості магнітного поля (для ефективного розмагнічування магнітно жорстких продуктів збагачення з високою коерцитивною силою), синхронізація роботи з низьковольтною мережею синусоїдальної напруги промислової частоти 50 Гц, при якій протягом періоду $T = 0{,}02$ с забезпечується «м'яке» розмагнічування (див. рис. 11) – 10-40 перемагнічувань за період при плавному зменшенні амплітуди магнітного поля. Останній параметр особливо важливий, оскільки від нього залежить робоча частота коливального контуру, добротність і параметри його елементів – індуктивності котушки L і ємності конденсатора C. Важливою характеристикою, від якої залежить інтенсивність електромагнітних

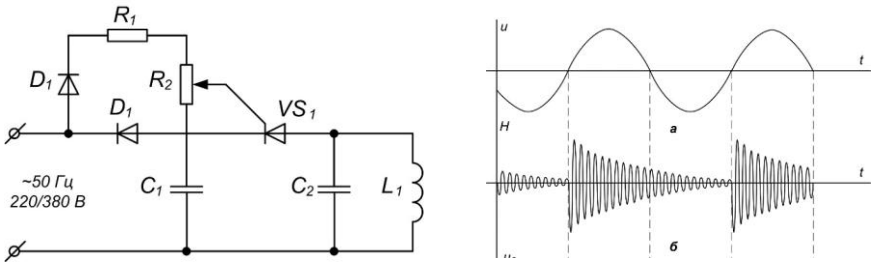
процесів, число витків котушки, перетин проводу, амплітуди напруги і струму в елементах РА та ін., є напруга живлення. Таким чином, при розробці конструкцій РА є можливість вибору широкого спектру вихідних параметрів, переважна більшість яких обумовлена особливостями технологічного процесу і фізико-технічними параметрами конкретних продуктів магнітної обробки.

В історичному ракурсі найбільш активні роботи з розробки та впровадження імпульсних РА ще з 70-х років минулого століття проводилися на кафедрі електромеханіки Криворізького національного університету (раніше кафедра основ електротехніки і електричних машин Криворізького гірничорудного інституту). Один з перших варіантів імпульсного РА показаний на рис. 15 [7]. Він характеризувався простотою конструкції, високою ефективністю розмагнічування і надійністю. Певні проблеми були з накопичувальним конденсатором, в якості якого використовувалися стандартні косинусні конденсатори з масляним наповнювачем. Велика площа поверхні та теплообмін через масляне середовище значно нівелювало проблему перегрівання накопичувального конденсатора, особливо при його неперервній роботі. Для полегшення температурного режиму використовувалося охолодження зовнішнім вентилятором.

Добавлено примечание ([M3]):

Добавлено примечание ([M4]):

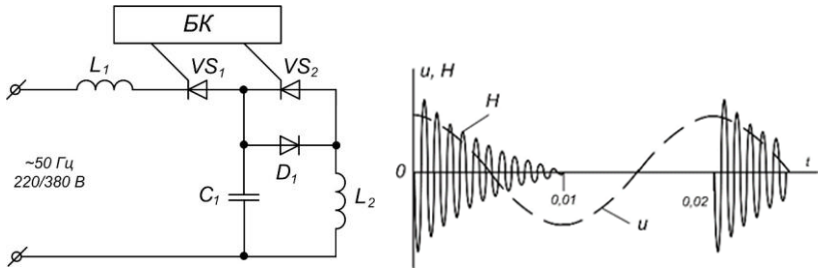
Однією з переваг даної схеми є тривалість розрядного процесу протягом всього періоду мережі T = 0,02 с (рис. %%, б). Завдяки цьому забезпечувалася більша кількість циклів перемагнічування, що можна використовувати в ряді випадків як резерв для зменшення частоти в коливальному контурі.



а б

Рисунок 15 – Один з перших розмагнічувальних апаратів, розроблених на кафедрі основ електротехніки КГРІ у 1973 році:
а – принципова схема; б – зміна напруги мережі та магнітного поля

Інший варіант виконання імпульсного РА представлений на рис. 16 [8].



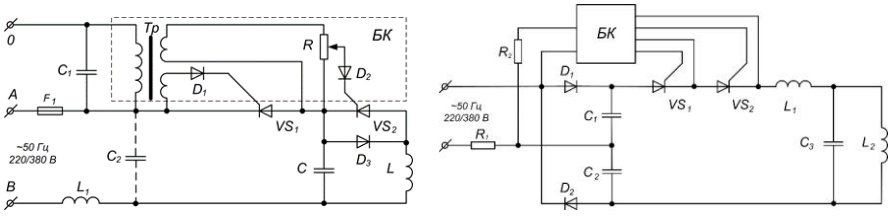
а б

Рисунок 16 – Імпульсний РА з суміщенням накопичувального і розрядного конденсаторів:

а – принципова схема; б – зміна напруги мережі та магнітного поля

Основна відмінність даної схеми від попередньої полягає у суміщенні в одному конденсаторі двох функцій – функції накопичення і розряду накопиченої енергії на котушку індуктивності. Однако «ціною» за таке спрощення є включення в схему додаткового тиристора і деяке ускладнення блоку керування. Крім того, тривалість серії розмагнічувальних імпульсів у даній схемі дорівнює пів періода (рис. 16, б). Періодична відсутність поля протягом кожної половини періода при великих швидкостях пульпи може бути скомпенсована збільшенням робочої частоти магнітного поля, що не завжди прийнятно.

На рис. 17,а і рис. 17,б показані варіанти виконання імпульсного РА з подвоєнням напруги живлення. Це дозволяє при тій же енергії конденсатора зменшити його ємність у відповідності з формулою для енергії електричного поля $W_C=CU^2/2$. Збережена сумісність накопичувального та розрядного конденсаторів в одному конденсаторі. У схеми введено також згладжувальний дросель, який у режимі зарядки конденсатора створює додаткове збільшення напруги на ньому.



а б

Рисунок 17– Модифікації імпульсних РА з подвоєнням напруги живлення

У всіх розглянутих варіантах реалізації імпульсного розмагнічування використано ефект ударного збудження коливального контуру *L-C*. Використання джерела живлення промислової частоти обумовлено орієнтацією на гірничо-збагачувальні підприємства. Сучасна елементна база дозволяє виконати розробку імпульсних РА з використанням джерел постійного струму, а також більш компактних і надійних комплектуючих елементів.

1.7 Особливості імпульсного РА – КТУ

Для ефективного розмагнічування феромагнітної пульпи необхідно, щоб пристрій володів наступними основними якостями:

1) пристрій повинний виробляти імпульси струму, що випливають безупинно з частотою, що виключає можливість переорієнтації часток і достатньої для забезпечення можливо більшої кількості циклів перемагнічування кожної феромагнітної частки;

2) для зменшення габаритів котушки, що розмагнічує, і для найбільш повного використання енергії живильної мережі варто застосовувати часовий принцип розмагнічування;

3) пристрій повинний зберігати працездатність у широкому діапазоні швидкостей пульпи.

Одна зі схем пристрою, що розмагнічує, розроблених у КТУ на кафедрі «Електромеханіка» відповідно до вище зазначених вимог, показана на рис. 15 Схема складається з котушки, що розмагнічу, L_1, конденсатора C_1, накопичувального конденсатора С и схеми керування. Котушка L_1 і конденсатор C_1 складають коливальний контур ударного порушення. Загасаючі в часі коливання в цьому контурі збуджуються накопичувальним конденсатором С через тиристор *T* та струмовідокремлюючу індуктивність *L*. Діод *D* призначений для пропущення імпульсів зарядного струму однієї полярності. Діод D_1, додатковий резистор *R* і потенціометр R_1 формують імпульс, керуючий тиристором *T*.

Пристрій, що розмагнічує, живиться від мережі 50 Гц і працює в такий спосіб. При негативній напівхвилі напруги мережі накопичувальний конденсатор через діод *D* заряджається до амплітудного значення живильної напруги мережі. При позитивній напівхвилі напруги мережі зарядний діод *D* закривається, а імпульс позитивної полярності через керований діод D_1, додатковий резистор *R* і потенціометр R_1 подається на керуючий електрод тиристора *T*, що відкривається. Заряд, накопичений конденсатором С, через

відкритий тиристор T збуджує загасаючі коливання в контурі, що складається з котушки, що розмагнічує, L_1 і конденсатора C_1. Частота коливань складає декілька кГц, а загасання процесу в часі забезпечується за рахунок активного опору контуру і при необхідності може бути змінено. Одиничного розряду накопичувального конденсатора С досить для порушення в коливальному контурі L_1C_1 пакета високочастотних коливань, що обгинає амплітуда яких загасає по експонентному законі.

Протягом одного пакета загасаючих високочастотних коливань, порушуваних одним розрядом накопичувального конденсатора, відбувається повне розмагнічування феромагнітної пульпи, що знаходиться в зоні дії котушки, що розмагнічує, L_1.

Протягом порівняно тривалого часу t=3,5– 4 мс накопичувальний конденсатор заряджається від мережі до амплітудного значення напруги (538 В) і в момент t_1 за дуже короткий час (приблизно 0,23 мс) розряджається на контур L_1 C_1.

За рахунок високої частоти розмагнічування відбувається усередині невеликої по обсязі обмотки, що охоплює пульпопровід. Збільшена ділянка що розмагнічує поле з мітками часу через 0,1мс показаний на рис.16.

Поле усередині обмотки майже однорідне, тому розмагнічування часток відбувається не за рахунок просторового, а за рахунок тимчасового загасання поля усередині котушки і за рахунок просторово-тимчасового – на виході з нього.

Картина напруженості поля котушки(рис. 17), що розмагнічує, у відносних одиницях H^* у площині, що збігається з віссю котушки для першого квадранта. Картина поля знімалася для котушки діаметром 230 мм, довжиною 80мм, товщиною обмотки 8 мм, тобто l/d=0.35; $t<<d$.

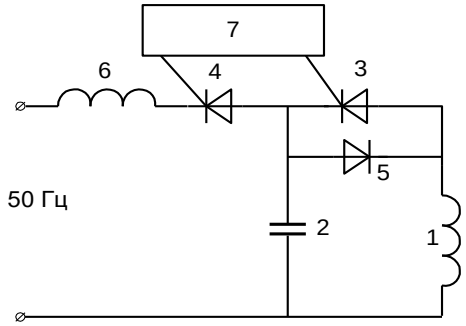


Рисунок 18 – Пристрій для розмагнічування пульпи феромагнітних матеріалів.

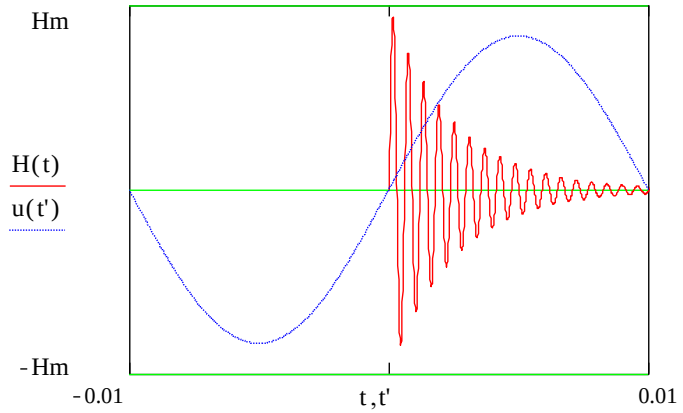


Рисунок 19 – Осцилограма що розмагнічує поля котушки індуктивності.

В апараті, що розмагнічує, розробленому в КТУ, не потрібно висока амплітуда поля, тому що вся енергія поля цілком витрачається на розмагнічування часток. При цьому легко реалізувати 10-40 циклів перемагнічування з повільним і регульованим загасанням амплітуди поля по експонентному законі.

Висока частота перемагнічуючих імпульсів робить роботу апарата, що розмагнічує, майже не залежною від швидкості пульпи.

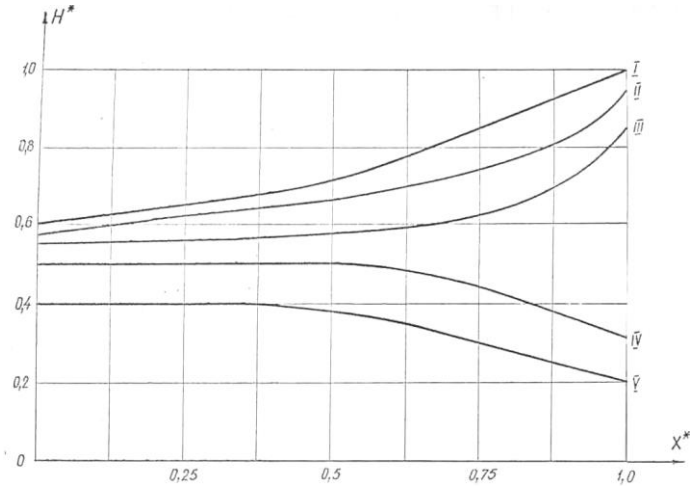


Рисунок 20 – Відносна напруженість *H**, що розмагнічує, поля в площині, перпендикулярній осі котушки у функції відносного радіуса *X**

2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

2.1 Розробка математичної моделі та програмного забезпечення для розрахунку магнітного поля у пульпопроводі в широкому спектрі вхідних параметрів

При розробці РА необхідно приділити особливу увагу режимам роботи і параметрам котушки, що розмагнічує, силових конденсаторів і тиристорів. У даній роботі основна увага спрямована на розрахунок параметрів котушки, оскільки саме в ній відбувається основний процес розмагнічування пульпи.

Як зазначено в пункті 1.4, основними чинниками, що впливають на розмагнічування, є максимальна напруженість магнітного поля, кількість циклів перемагнічування матеріалу в активній зоні РА, а також поступове зниження напруженості магнітного поля до майже нульових значень. Очевидно, числові значення цих факторів, які необхідні для визначення параметрів котушки, залежать від ряду вторинних параметрів, серед яких є взаємозалежні та незалежні. Як було показано раніше, ефективність розмагнічування залежить від:

- магнітної жорсткості матеріалу (коерцитивної сили та залишкової індукції), що безпосередньо впливає на максимальну напруженість магнітного поля котушки;
- кількості необхідних для глибокого розмагнічування циклів перемагнічування, що обумовлена тривалістю проходження матеріалом активної зони котушки і може бути забезпечена такими взаємопов’язаними параметрами, як довжина котушки, частота розмагнічуючого поля, швидкість пульпи;
- ефективною магнітною проникністю пульпи як гетерогенного середовища з різними параметрами концентрації часток та їх магнітних властивостей; цей параметр безпосередньо впливає на індуктивність котушки і параметри магнітного поля.

Вказані параметри можна розглядати як початкові для аналізу. При їх визначенні необхідно враховувати як специфічні технологічні умови, так і результати наукових досліджень, а також дані лабораторних і виробничих випробувань. Крім того, до цього списку варто додати внутрішній і зовнішній діаметри пульпопроводу, напругу в мережі живлення, швидкість пульпи та інші показники. Рекомендований набір вхідних параметрів для розрахунку магнітного поля і характеристик котушки наведено в табл. 6. Геометричні розміри котушки можна побачити на рис. 21.

Таблиця 6 – Вхідні параметри для розрахунку котушки РА

Задані						Рекомендовані			
Внутрішній діаметр пульпопр. D_1, мм	Внутрішній діаметр котушки D, мм	Максим. напружен. магн. поля $H_{макс}$, А/мм	Відносна магн. прон. пульпи μ, од	Напруга мережі U, В	Максим. швидкість пульпи V, м/с	Частота розмагн.п. f, Гц	Коефіцієнт заповнен. $K_з$, од	Мінімальна довжина котушки L, мм	Висота котушки H, мм
250	270	50	1,2	380	5	600-1500	0,5-0,7	20 V	(0.1-0,3) L

Розглянемо деякі рекомендації щодо вибору розрахункових параметрів котушки. Котушка, що розмагнічує, розташовується на діелектричній ділянці пульпопроводу і повинна мати таку мінімальну довжину L, щоб виключити пропуски нерозмагнічених часток пульпи при максимальній швидкості потоку. Так, якщо черговий пакет згасаючих коливань у контурі збуджується через T = 0,02 с, а максимальна швидкість пульпи V, тоді мінімальну довжину котушки слід прийняти рівною

$$L = T \cdot V = 0{,}02 \cdot V \text{ м} = 20 \cdot V \text{ мм}. \quad (1)$$

За відсутності достовірної інформації відносну магнітну проникність пульпи μ можна приймати в діапазоні 1,1÷1,3 в залежності від вмісту твердого в пульпі.

Частоту коливального контуру f рекомендується обирати з урахуванням обраної довжини котушки L та максимальної швидкості руху пульпи V, виходячи з кількості циклів перемагнічування $n_ц$ = 10 -15.

Коефіцієнт заповнення вікна обмотки $K_з$ залежить від форми перетину провідника (прямокутна шина або круг), класу та товщини ізоляції, якості намотки тощо. Бажано також врахувати досвід виготовлення подібних котушок.

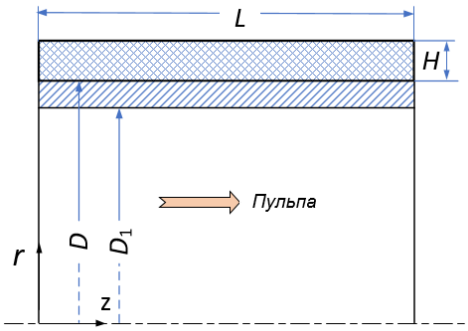


Рисунок 21 – Основні геометричні параметри розмагнічуючої котушки

Далі наведемо основні формули для розрахунку магнітного поля і параметрів котушки. Зазначимо, що викладені далі розрахунки не спрямовані на конструкцію конкретного РА. Наведені далі формули є універсальними щодо частоти розмагнічуючого поля, геометричних параметрів пульпопроводу, магнітних характеристик продуктів збагачення, необхідної інтенсивності магнітного поля, швидкості пульпи та ін. технологічних параметрів. Для ілюстрації результатів обчислювальних експериментів використаємо вхідні дані з табл. 6. Крім того, приймаємо частоту магнітного поля f=1000 Гц, довжину і висоту котушки відповідно L=100 мм, H=10 мм, коефіцієнт заповнення вікна котушки $K_З$ = 0,6.

Першим і найбільш відповідальним кроком при розрахунках є визначення необхідної кількості витків котушки w, при якому забезпечується задане з технологічних умов максимальне значення напруженості магнітного поля, наприклад, $H_{макс}$ = 50 А/мм. У загальному випадку котушка може мати n шарів з m витками у кожному з них, тобто $w = n \cdot m$.

Позначимо через z і r координати центру i-j-го витка котушки

$$z_{i,j}=0{,}5 \cdot L/m+(i\text{-}1) \cdot L/m;$$
$$r_{i,j}=D/2+0{,}5 \cdot H/n+(j\text{-}1) \cdot H/n,$$

де i – номер шару, j – номер витка в цьому шарі. Магнітне поле у будь-якій точці r, z, створене витком i-j при струмі 1 А [12]

$$h_r = \sum\left(r + \frac{1}{(2 \cdot \pi)} \cdot \left(\frac{z - z_{ij}}{r \cdot a} \cdot \left(-K + \frac{r^2 + r_{ij}^2 + (z - z_{ij})^2}{b \cdot E}\right)\right)\right); \quad (2)$$

$$h_z = \sum\left(z + \frac{1}{(2 \cdot \pi)} \cdot \left(\frac{1}{a} \cdot \left(K + \frac{r_{ij}^2 - r^2 - (z - z_{ij})^2}{b \cdot E}\right)\right)\right), \quad (3)$$

де

$$K = \sqrt{\frac{4 \cdot r \cdot r_{ij}}{\left(r + r_{ij}\right)^2 + \left(z - z_{ij}\right)^2}}$$

– модуль еліптичних інтегралів першого K і другого E роду.

$$zz = z(i, j),\ rr = r(i, j),$$
$$a = \sqrt{(r + r_{ij})^2 + (z - z_{ij})^2},$$
$$b = (r + r_{ij})^2 + (z - z_{ij})^2$$

В залежності від технологічних умов подальші розрахунки можуть бути спрямовані на забезпечення або максимальної, або середньої в об'ємі пульпопроводу напруженості магнітного поля. Для визначення необхідної магніторушійної сили (МРС) обмотки зі струмом I і числом витків w ($F=Iw$) для цих базових варіантів спочатку розрахуємо значення максимальної та середньої напруженостей при умовній МРС F=1. Для цього сформуємо два масиви точок: перший – на прямій $r = D/2$, $0 < z < L$, де знаходиться точка максимальної напруженості, і другий – на прямій $z=L/2$, $0 < r < D/2$ для обчислення середнього значення напруженості магнітного поля в пульпопроводі. При розрахунку замінимо котушку одношаровим аналогом з довільним числом витків M, наприклад, M=20. Тоді розрахунковий струм одного витка при МРС F =1 А дорівнює $1/M$ = 1/20 А. Обчислюючи за формулою (2) в обраних системах точок відповідні значення осьової (за напрямом пульпопроводу) напруженості магнітного поля, знаходимо відповідно значення $h_{z_макс}$ і $h_{z_ср}$. Тоді необхідна для забезпечення максимальної напруженості МРС повинна дорівнювати $F_{макс} = H_{макс}/h_{z_макс}$. Для заданих в табл. 6 числових даних розрахунки дають наступні значення: $H_{макс}$ = 50 А/мм, $h_{z_макс}$ = 0,0059 А/мм, $F_{макс}$ = 8455 А. Якщо ж необхідно забезпечити задане середнє значення напруженості магнітного поля в пульпопроводі, то слід використати формулу $F_{ср} = H_{ср}/h_{z_ср}$. Наприклад, при $H_{ср}$ = 30 А/мм розрахунки дають наступні значення: $h_{z_ср}$ = 0,0041 А/мм, $F_{ср}$ = 7613 А.

Важливо зазначити, що вказані числові характеристики мають місце на початку процесу розмагнічування, інтенсивність якого за технологічними вимогами повинна плавно зменшуватися фактично до нуля.

Для визначення числа витків, при яких забезпечуються задані МРС, використаємо формулу для струму в коливальному контурі [12]

$$i(t) = -Ae^{-\delta t}\sin(\omega t), \qquad (4)$$

де $A = U_0/\omega L_к$; $\omega = 2\pi f$ – кутова частота; $U_0 = \sqrt{2}U$ – максимальна напруга заряду конденсатора; $\delta = \frac{r_{sum}}{2L_k}$ – коефіцієнт згасання коливань; r_{sum} – сумарний активний опір коливального контуру; L_k – індуктивність котушки.

Важливим моментом розрахунку параметрів процесу розмагнічування є необхідність забезпечення мінімального струму в кінці першого півперіода (t = 0,01 с), коли відбувається комутація тиристорів. Примусове значення коефіцієнта згасання коливань δ можна забезпечити лише підбором величини

сумарного активного опора r_{sum}, який крім опору котушки r_k повинен враховувати опори кабелю живлення, діелектричних втрат в конденсаторі і, у разі необхідності, опір додаткового резистора. Ці опори залежать від конкретних умов і в подальшому визначаються сумарним додатковим опором $r_д = r_{sum} - r_k$. Для визначення активного опору котушки r_k використаємо класичну формулу

$$r_k = r_0 \frac{l_k}{S_k},$$

де $r_0 = 0{,}017$ Ом·мм^2/м – питомий опір нагрітого мідного проводу; l_k – довжина проводу (шини), м; S_k – поперечний переріз проводу, мм^2. Останній можна знайти по площі вікна обмотки HL, коефіцієнту заповнення вікна обмотки і її числа витків. Сумарний опір коливального контуру r_{sum} визначимо з формули згасання коливань δ за умови, що при t = 0,01 с струм зменшується у 20 разів (5 % від початкового значення A):

$$\delta = -100 \ln(0.05) = 300\,, r_{sum} = 2\,\delta \cdot L_k = 600 L_k\,.$$

З рис. 16 видно, що максимальне значення струму наступає в момент $t_{макс} = 0{,}25/f$ і дорівнює

$$i_{макс} = A e^{-\delta t_{макс}} = \frac{U_0}{\omega L_к} e^{-\frac{0.25\delta}{f}} \quad . \tag{5}$$

Помноживши в цьому виразі ліву і праву сторони на число витків котушки w і враховуючи, що $F_{макс} = w i_{макс}$, а індуктивність котушки $L_к = L_{k_відн} w^2$, де $L_{k_відн}$ залежить лише від геометричних параметрів D, L і H, перепишемо рівняння (5) у вигляді

$$F_{макс} = w i_{макс} = \frac{U_0}{\omega L_{k_відн} w} e^{-\frac{0.25\delta}{f}}, \tag{6}$$

звідки число витків при забезпеченні максимальної напруженості

$$w = w_{макс} = \frac{U_0}{2\pi f L_{k_відн} F_{макс}} e^{-\frac{0.25\delta}{f}}. \tag{7}$$

Аналогічний вираз легко отримати і для числа витків, що забезпечують задане середнє значення напруженості магнітного поля в пульпопроводі на початку розряду конденсатора

$$w_{ср} = \frac{U_0}{2\pi f L_{k_відн} F_{sr}} e^{-\frac{0.25\delta}{f}} \tag{8}$$

Важливий висновок, що випливає з формул (7) і (8) полягає в тому, що при заданих геометричних параметрах котушки D, L і H задані значення

максимальної або середньої напруженості магнітного поля однозначно визначають відповідні числа витків. Слід зауважити, що отримані за формулами (7) і (8) результати, як правило, не є цілими, тому ці значення слід округлити до найближчих цілих. Це може дещо змінити розраховані значення МРС котушки. Але таке відхилення можна мінімізувати незначною зміною геометричних параметрів *L* і *H*.

Зазначимо також, що точність розрахунків головним чином залежить від точності визначення індуктивності котушки. На жаль, в науково-технічній літературі відсутні точні аналітичні вирази для циліндричних котушок з довільними геометричними параметрами. Найбільш поширеною є емпірична формула, яку рекомендується використовувати при багатошарових обмотках [13]

$$L_{\text{к}_{\text{відн}}} = \mu \frac{8 \cdot 10^{-9} (D+H)^2}{3(D+H)+HL+10H}. \quad (9)$$

Позначення в цій формулі: D - внутрішній діаметр котушки, L -довжина котушки, H - висота намотки проводу, μ - відносна магнітна проникність пульпи

2.2 Оптимізація параметрів імпульсного розмагнічувального апарата з урахуванням комплексу технологічних та конструктивних вимог та обмежень та результати обчислювальних експериментів

Наведені вище формули реалізовані у спеціальній обчислювальній програмі, що написана у пакеті прикладних програм Матлаб (Додаток А). Основною особливістю розробленої програми є її універсальність щодо основних технологічних параметрів (діаметрів пульпопроводу і котушки, швидкості пульпи та її гранулометричних і фізичних властивостей, зокрема магнітної жорсткості), вибору напруги джерела живлення, необхідної частоти та величини максимальної чи середньої напруженості магнітного поля та простота реалізації різних наборів вхідних параметрів.

Вона базується на мінімальній кількості емпіричних чи недостатньо точних аналітичних формул, основою є загальні теоретичні математичні рівняння, що ґрунтуються на теорії електричних кіл і магнітного поля.

Для демонстрації функціональних можливостей програми в табл. 7 представлені результати розрахунків основних параметрів котушки РА для різних варіантів, що мають різні набори вхідних параметрів. Варіанти в таблиці

відрізняються діаметрами пульпопроводів, величинами максимальної або середньої напруженості й частоти магнітного поля, а також габаритами котушки для розмагнічування. Для кожного варіанту були розраховані такі параметри, як число витків котушки w, максимальний і середній струм $I_{макс}$ та I, густина струму δ в провіднику витка, його переріз S, а також маса котушки Gм і активна потужність P.

Таблиця 7 – Результати розрахунку варіантів РА

Варіанти	Задано						
	D_1, мм	D, мм	$H_{макс}$, А/мм	$H_{ср}$, А/мм	H, мм	L, мм	f, Гц
1	250	270	50	-	10	100	600
2	250	270	50	-	10	100	1000
3	250	270	50	-	10	100	1500
4	250	270	50	-	30	100	1000
5	250	270	50	-	30	150	1000
6	250	270	50	-	30	200	1000
7	250	270	-	50	30	200	1000
8	300	320	-	50	30	150	1000
9	300	320	30	-	20	150	1500
10	300	320	-	30	30	250	1500
11	100	120	30	-	10	100	1500
12	100	120	30	-	8	120	1000
Варіанти	Розраховано						
	w	$I_{макс}$, А	I, А	δ, А/мм^2	S, мм^2	$G_м$, кг	P, Вт
1	39	213	49,0	3,19	15	4,7	853
2	24	355	78,0	3,12	25	4,7	814
3	16	546	117	3,12	37,5	4,7	815
4	40	241	53,0	1,18	45	15,1	553
5	43	283	62,2	1,00	62,8	22,6	649
6	45	327	71,7	0,90	80	30,2	749
7	43	358	78,6	0,94	83,7	30,2	820
8	26	584	128	1,24	104	26,4	1340
9	28	263	56,4	0,88	64,3	17,1	393
10	36	315	67,5	0,54	125	44,0	470
11	114	38,3	8,22	1,56	5,26	2,18	57
12	150	31,9	7,00	1,83	3,84	2,06	73

За даними варіантів 1-3 видно, що число витків котушки *w* суттєво залежить від частоти розмагнічуючого поля. Важливо відзначити, що зміна габаритних розмірів котушки *L* і *H* також впливає на необхідну кількість витків котушки (варіанти 4-6), але при цьому забезпечується задане максимальне або середнє значення напруженості магнітного поля на початку розряду конденсатора. Варіанти 7 і 8 кількісно підтверджують логічно очікуваний результат про збільшення інтенсивності поля при однакових значення максимальної і середньої напруженості. Порівняння наведених в табл. 7 результатів також свідчить про значне збільшення числа витків обмотки при зменшенні частоти поля и внутрішнього діаметру котушки.

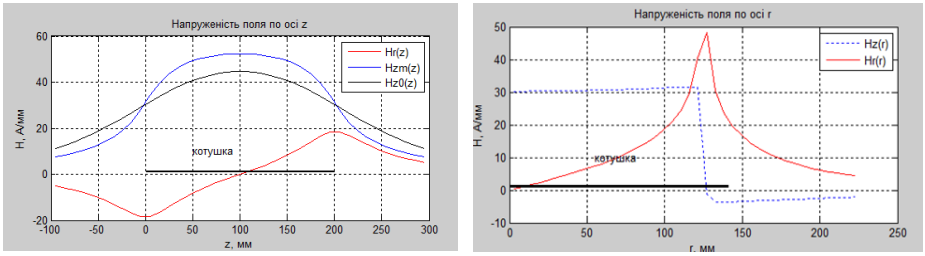
В табл. 8 для котушки з внутрішнім діаметром *D*=100 мм, числом витків *w*=88, довжиною *L*=100 мм і висотою намотки *H*=8 мм проілюстровано для різних частот вплив відносної магнітної проникності пульпи μ на електромагнітні параметри. Показано, що при фіксованому числі витків котушки електромагнітне навантаження суттєво зменшується при збільшенні магнітної проникності пульпи та частоти магнітного поля. Ці дані мають чітке фізичне трактування.

Таблиця 8 – Вплив магнітної проникності пульпи на характеристики магнітного поля при різних частотах

μ пульпи	500 Гц			1000 Гц			1500 Гц		
	$H_{макс}$, А/мм	I, А	δ, А/мм^2	$H_{макс}$, А/мм	I, А	δ, А/мм^2	$H_{макс}$, А/мм	I, А	δ, А/мм^2
1,1	145	52,6	9,6	80	27,6	5,0	53	17,2	3,2
1,2	125	47,0	8,7	71	25,0	4,5	48	16,9	3,0
1,3	110	43,0	8,1	60	22,0	4,0	41	14,9	2,7
1,4	98	40,4	7,5	53	20,0	3,8	37	14,0	2,6

В програмі передбачений розрахунок більше 20 електричних та геометричних параметрів для кожного варіанту. Це забезпечує можливість пошуку оптимального вектору параметрів за різними цільовими функціями (наприклад, за максимальною щільністю струму, мінімальною масою котушки, оптимальними енергетичними показниками тощо)

Для візуального відображення результатів розрахунку кожного варіанту передбачено програмне формування масивів даних з можливістю їх візуалізації. Деякі з них наведені на рис. 22-24.



а б

Рисунок 22 – Зміна *z*-складової напруженості магнітного поля на осі котушки (синя крива) і на її внутрішній поверхні (чорна крива) та *r*-складової (червона крива) у напрямі руху пульпи – а; зміна *z*- та *r*-складових напруженості по радіусу в центрі котушки – б

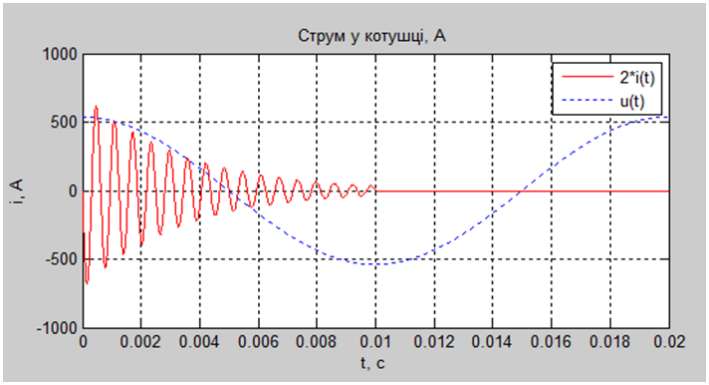


Рисунок 23 – Графік зміни струму (напруженості магнітного поля) та напруги мережі за період

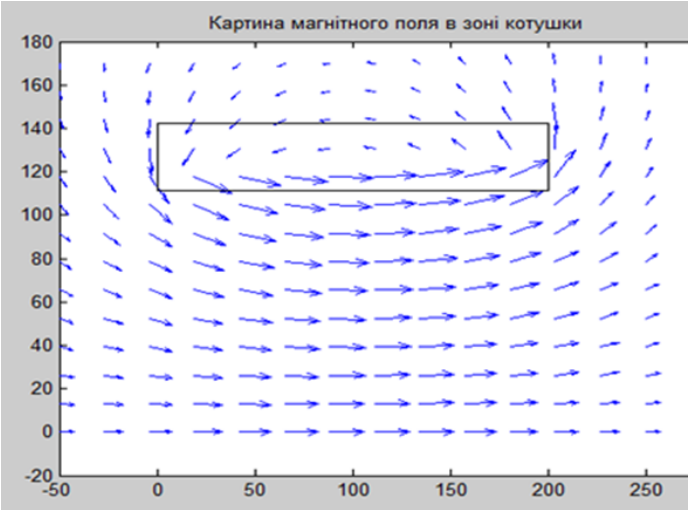


Рисунок 24 – Картина розподілу векторів напруженості магнітного поля в зоні котушки РА

ВИСНОВКИ

1. Встановлені однозначні залежності між необхідними параметрами експоненціально згасаючого розмагнічуючого поля та числом витків циліндричної котушки з довільними геометричними параметрами.

2. На основі комплексного використання коло-польового підходу, точних аналітичних залежностей та сучасних можливостей математичного моделювання розроблена універсальна обчислювальна програма з широким спектром функціональних можливостей як в частині технологічних вимог та обмежень, так і в частині табличного, графічного та візуального відображення результатів розрахунків.

3. Розрахунками підтверджена адекватність запропонованої математичної моделі та висока функціональність її програмної реалізації. Великий обсяг розрахункової інформації дозволяє ефективно за параметрами часу і точності проводити комплекс обчислювальних експериментів щодо проектування та оптимізації параметрів котушки як основного елемента РА.

4. Запропонований метод та його програмна реалізація можуть бути використані при розробці та оптимізації розмагнічуючих пристроїв для мокрої та сухої сепарації продуктів переробки руд чорних металів, можуть бути також корисними як для інженерів і науковців відповідних галузей, так і для студентів навчальних закладів гірничої та електричної галузей знань.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Младецький І.К., Березняк О.О., Куваєв В.М., Куваєв Я.Г., Березняк О.О Змінні магнітні поля в сепарації і розмагнічуванні тонких феромагнітних матеріалів: [Монографія.] — Дніпро: Середняк Т. К., 2019, — 128 с.

2. Ломовцев Л.А., Нестерова Н.А., Дробченко Л.А. Магнитное обогащение сильномагнитных руд. М., Недра, 1979, 235 с.

3. Кармазин В.В., Кармазин В. И. Магнитные, электрические и специальные методы обогащения полезных ископаемых. Т. 1. Магнитные и электрические методы обогащения полезных ископаемых. М.: Горная книга, 2012. 672 с.

4. Ганженко И. М., Зарщикова Г. Г., Камалова Т. Б., Алексеева Л. А., Шестак Е. М., Якубайлик Э. К. Влияние размагничивания на процессы гидравлической классификации сильномагнитных руд // Обогащение руд. 2013. № 2. С. 13–16.

5. Пелевин А. Е. Повышение качества магнетитовых концентратов в переменном магнитном поле // Обогащение руд. 2019. № 6. С. 19–24. DOI: 10.17580/or.2019.06.04.

6. Деркач В.Г. Специальные методы обогащения полезных ископаемых / В.Г. Деркач. – М.: Недра, 1966. – 423 с.

7. Пелевин А.Е. Влияние магнитной флокуляции на результаты обогащения железосодержащих руд // Обогащение руд. 2021. № 4. С. 13–16.

8. А.с. 293638 [СССР]. Устройство для размагничивания пульп ферромагнитных материалов с разной коэрцитивной силой / Авт. изобрет. А.А. Статкевич, А.Ф. Харитоненко, Н.Г. Фролов и др. – Опубл. В Б. И., 1971, №6.

9. А.с. 378250 [СССР]. Размагничивающий аппарат / Авт. изобрет. Л.А. Титов, А.В. Дерягин, А.Г. Пленокос. – Опубл. В Б. И., 1973, №199.

10. А.с. 441964 [СССР]. Устройство для размагничивания пульп ферромагнитных материалов / Авт. изобрет. Н.Н. Чайко, Э.Г. Файнштейн, С.Т. Толмачев, В.И. Ткач. – Опубл. В Б. И. 05.09.1974, № 33.

11. Патент №15094. Пристрій для розмагнічування пульпи феромагнітних матеріалів / Авт. Чайко М.М., Толмачов С.Т., Кірносов Е.Г. Опубл. 15.06.2006. Код посилання Пристрій для розмагнічування пульпи феромагнітних матеріалів.

12. Патент №71550. Спосіб розмагнічування феромагнітної пульпи / Авт. Кірносов С.Е., Нечай А.М., Кірносов К.Е. та ін. Опубл. 10.07.2012. Код посилання Спосіб розмагнічування феромагнітної пульпи

13. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: учебник для бакалавров / Л. А. Бессонов. — 12-е изд., исправ. и доп. — М.: Издательство Юрайт, 2016. — 701 с. — Серия: Бакалавр. Углубленный курс.

14. Немцов М. В., Шамаев Ю. М. Справочник по расчету параметров катушек индуктивности. — М.: Энергоиздат, 1981. — 136 с.

15. Березняк А.А. Размагничивание ферромагнитных частиц в пульпе / А.А. Березняк, И.К. Младецкий, Э.М. Пайва // Збагачення корисних копалин: Науково-технічний збірник. – Дніпропетровськ: ДВНЗ «НГУ». – 2014. – Вип. 57(98). – С.130-137 .

16. Пелевин А.Е. Магнитные и электрические методы обогащения. 2015. 159 с.

ДОДАТОК 1

ПРОГРАМА РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ
КОТУШКИ ІМПУЛЬСНОГО РОЗМАГНІЧУЮЧОГО ПРИСТРОЮ

```
clc;
clear all;
%******************Зовнішні параметри
% Напруга мережі (задається), В
Uset=380;
% Максимальна напруга заряду конденсатора, В
U0=sqrt(2)*Uset;
% коефіцієнт заповнення обмотки (уточнюється
у процесі розрахунку)
kz=0.6;
% Прийнята частота розмагнічуючого поля, Гц
f=1000;
% Магнітна проникність пульпи, од.
% (задається з урахуванням пульпи і магнітних
властивостей матеріалу)
mu_pulp=1.2;
% Питомий опір нагрітого провідника, Ом*мм2/м
ro=0.017;

%********** Вихідні дані котушки

% Внутрішній діаметр труби (пульпопроводу), мм
D1=200;
% Зовнішній діаметр труби (пульпопроводу), мм
% D2=270;
% Внутрішній діаметр котушки (з зовнішньою
ізоляцією), мм
D=220;
% висота намотки котушки (по радіусу), мм
H=20;
% довжина котушки (по осі), мм
L=150;

% ************ Необхідні характеристики розмагнічуючого поля
% H_max або H_середн. у трубі (задається користувачем один із варіантів),
А/мм

h_max=50;
h_sr=50;

% Розрахунок напруженості поля H_max або H_середн при мрс=1
% і одношарової  обмотки
```

```
% умовна кількість витків
mn=20;
% масив координат точок джерела з мрс=1, мм
for i=1:mn
     z(i)=0.5*L/mn+(i-1)*L/mn;
     r(i)=0.5*(D+H);
end;
% Розрахунковий струм витка при мрс=1
Tok1=1/mn;
% масив координат точок контура прямокутника для мрс=1,  мм
delta_mds=0.5*(D-D1+H);
mt_z_mds=50;
mt_r_mds=11;
shag_z_mds=(L+2*delta_mds)/(mt_z_mds);
   for i=1:mt_z_mds
     mas_z_mds(i)=0.5*shag_z_mds-delta_mds+(i-1)*shag_z_mds;
   end;
shag_r_mds=(D-D1+H)/(mt_r_mds-1);
   for i=1:mt_r_mds
     mas_r_mds(i)=D1/2+shag_r_mds*(i-1);
   end;
% розрахунок поля Hz всередині котушки при mds=1
mds_ind=0;
mds_z1=0;
mds_z2=0;
mds_r1=0;
mds_r2=0;
hr=[];
hz=[];
k_m=2/(1+mu_pulp);
for k=1:mt_z_mds
  hr(k)=0;
  hz(k)=0;
  rt=D1/2;
  zt=mas_z_mds(k);
  for i=1:mn
       zz=z(i);
       rr=r(i);
      kk=sqrt((4*rt*rr)/((rt+rr)^2+(zt-zz)^2));
       [K,E]=ellipke(kk*kk);
       a=sqrt((rt+rr)^2+(zt-zz)^2);
       b=(rt-rr)^2+(zt-zz)^2;
       hz(k)=hz(k)+k_m*Tok1/(2*pi)*(1/a*(K+(rr^2-rt^2-(zt-zz)^2)/b*E));
  end;
```

```
  mds_z1=mds_z1+shag_z_mds*hz(k);
  end;
%     Розрахунок H_макс всередині котушки
hz_max=0;
for k=1:mt_z_mds
   if hz(k)>hz_max
      hz_max=hz(k);
      zt_max=mas_z_mds(k);
   end;
end;
hz_max;

% розрахунок поля Hz поза котушки при mds=1

for k=1:mt_z_mds
  hr(k)=0;
  hz(k)=0;
     rt=D1/2+(D-D1+H);
  zt=mas_z_mds(k);
  for i=1:mn
       zz=z(i);
       rr=r(i);
      kk=sqrt((4*rt*rr)/((rt+rr)^2+(zt-zz)^2));
       [K,E]=ellipke(kk*kk);
       a=sqrt((rt+rr)^2+(zt-zz)^2);
       b=(rt-rr)^2+(zt-zz)^2;
       hz(k)=hz(k)+1*Tok1/(2*pi)*(1/a*(K+(rr^2-rt^2-(zt-zz)^2)/b*E));
  end;
  mds_z2=mds_z2-shag_z_mds*hz(k);
end;

%  розрахунок поля Hr при mds=1

for k=1:mt_r_mds
  hr(k)=0;
  hz(k)=0;
  rt=mas_r_mds(k);
  zt=L+delta_mds;
  for i=1:mn
       zz=z(i);
       rr=r(i);
      kk=sqrt((4*rt*rr)/((rt+rr)^2+(zt-zz)^2));
       [K,E]=ellipke(kk*kk);
       a=sqrt((rt+rr)^2+(zt-zz)^2);
       b=(rt-rr)^2+(zt-zz)^2;
```

```
      hr(k)=hr(k)+1*Tok1/(2*pi)*((zt-zz)/(rt*a)*(-K+(rt^2+rr^2+(zt-zz)^2)/b*E));
  end;
  mds_r1=mds_r1+shag_r_mds*hr(k);
end;

% Перевірка! Повинно бути mds=1
mds= mds_z1+ mds_z2 +2* mds_r1;

% Розрахунок розподілу Hz  при мрс=1 по верикальній осі симетрії
% та Нсередн по цьому розподілу

mt_r_sred=30;
shag_r_sred=(D1/2-0.01)/(mt_r_sred-1);
   for i=1:mt_r_sred
     mas_r_sred(i)=0.01+(i-1)*shag_r_sred;
   end;
h_sred=0;
h_sum=0;
hr=[];
hz=[];
for k=1:mt_r_sred
  hr(k)=0;
  hz(k)=0;
  rt=mas_r_sred(k);
  zt=L/2;
  for i=1:mn
       zz=z(i);
       rr=r(i);
      kk=sqrt((4*rt*rr)/((rt+rr)^2+(zt-zz)^2));
       [K,E]=ellipke(kk*kk);
       a=sqrt((rt+rr)^2+(zt-zz)^2);
       b=(rt-rr)^2+(zt-zz)^2;
       hz(k)=hz(k)+Tok1/(2*pi)*(1/a*(K+(rr^2-rt^2-(zt-zz)^2)/b*E));
  end;
  h_sum=h_sum+hz(k);
end;
h_sred=h_sum/mt_r_sred;

% **********************
% Розрахунок розподілу поля за заданої
% напруженості розмагнічуючого поля

% Коефіцієнти підсилення мрс

% по максимальній напруженості
```

```
k_us_max=h_max/hz_max;
% по середній напруженості
k_us_sr=h_sr/h_sred;
% Відносна індуктивність котушки, Гн
Lk_otn=(mu_pulp*8*10^-9*(D+H)^2)/(3*(D+H)+H*L+10*H);

% Число витків котушки за заданої напруженості h_max;
wmax=U0*exp(-0.25/f)/(2*pi*f*Lk_otn*k_us_max);
mmax=round(wmax)
nmax=1;

% Число витків котушки за заданої напруженості h_sr;
wsr=U0*exp(-0.25/f)/(2*pi*f*Lk_otn*k_us_sr);
msr=round(wsr);
nsr=1;

% ****************************
% Розрахунок розподілу поля за заданої макимальної напруженості
% (цілі числа m та n можна змінювати, але m*n повинно залишатися близьким
до wmax)

m=mmax;
n=nmax;
k_us=k_us_max;
Lk=(m*n)^2*Lk_otn;

% Розрахунок розподілу поля за заданої середньої напруженості
% (цілі числа m та n можна змінювати, але m*n повинно залишатися близьким
до wsr)
%
% m=msr;
% n=1;
% k_us=k_us_sr;
% Lk=(m*n)^2*Lk_otn;

% Масив координат точок джерела (витків) за декількох шарів обмотки
% m=20;
% n=4;
z=[];
r=[];
for i=1:m
  for j=1:n
    z(i,j)=0.5*L/m+(i-1)*L/m;
    r(i,j)=D/2+0.5*H/n+(j-1)*H/n;
  end;
```

```
end;

%******************

% Обнулення накопичуючих змінних
rk=0;
lkat=0;
 for i=1:m
     for j=1:n
        zz=z(i,j);
        rr=r(i,j);
        kk=sqrt((4*rt*rr)/((rt+rr)^2+(zt-zz)^2));
        [K,E]=ellipke(kk*kk);
        a=sqrt((rt+rr)^2+(zt-zz)^2);
        b=(rt-rr)^2+(zt-zz)^2;
        hz=hz+1/(2*pi)*(1/a*(K+(rr^2-rt^2-(zt-zz)^2)/b*E));
        % Довжина витка, мм
        lv=2*pi*rr;
         % Довжина провідника усіх витків котушки, м
         lkat=lkat+  lv*0.001;
      end;
  end;

 % Переріз провідника, мм2
 sv=(L*H*kz)/(m*n)
 % Опір котушки, ом
 rk=ro* lkat/sv;
% Вага міді котушки, кг
ves=lkat*sv*8.9*0.001

%****************% Коливний контур

% Кругова частота
w=2*pi*f;
% Згасання: це вимога 5% у кінці розряду
dl=-100*log(0.05);
% Сумарний опір, Ом
rsum=dl*2*Lk;
% Опір кабелю та ін.
r_kab=rsum-rk;
% Ємність
C1=10^6/(Lk*(w^2+dl^2))%mkF
C=C1/(10^6);%F
% Добротність контура
Q=sqrt(Lk/C)/rsum;
```

```
%********** Перехідний процес

% Початкове значення огинаючої
A=U0/(Lk*w);
% Ставити хороший крок для точного обчислення!
t=0:0.00001:0.02;
% Обнулення
i_ef=0;
   for i=1:length(t)
     tt=t(i);
     Us(i)=U0*cos(100*pi*tt);
     if i<=round(length(t)/2)
%   Увага !!!! Струм
      ii1(i)=-A*exp(-dl*tt)*sin(w*tt);
     else
      ii1(i)=0;
     end
     % інтеграл від квадрату струму
     i_ef=i_ef+((ii1(i))^2)*0.00001; %
   end

%Діюче значение струму
Ief=sqrt(50*i_ef)
%  час максимума струму
Ief=sqrt(50*i_ef)
ttmax=0.25/f;
% Максимальний струм розряду
Ief=sqrt(50*i_ef)
 Imax= A*exp(-dl* ttmax)
% максимальна м.р.с., А
F=k_us;
% Ефективна густина струму в котушці, А/мм2
Ief=sqrt(50*i_ef)
delta_eff=Ief/sv
% Активна потужність, Вт
Psum=rsum*(Ief)^2
% Втрати в котушці,  Вт
P_kat=rk*(Ief)^2;
% Повна Потужність, ВА
 S=Ief*Uset;

%  ********** Результати розрахунку
% Lk,
% Ief,Imax,delta_eff,Psum,P_kat,S,sv, ves,C1,
```

% delta,Q,rk,lkat,

% **********Розрахунок візуальної інформації