

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до магістерської роботи містить 93 стор., 26 рис., 15 табл., 41 бібл. найм, 1 додаток.

Мета роботи полягає у визначенні робочих і енергетичних характеристик поліградієнтних електромагнітних сепараторів з пластинчастими матрицями для вилучення феромагнітних частинок з дисперсних середовищ.

Показано, що збільшення інтенсивності магнітного поля у сепараторах з електромагнітним збудженням має свою межу, обумовлену насиченням елементів магнітопроводу. Зростання напруженості магнітного поля також пов'язане зі збільшенням споживаної потужності, що призводить до більш високої вартості пристроїв. У той же час підвищення неоднорідності магнітного поля можна досягти за рахунок оптимізації форми, геометричних розмірів і взаємного розташування елементів багатокomпонентної магнітної матриці сепаратора.

Проведені дослідження ступеня неоднорідності магнітного поля та оцінка спектру силового поля в площині робочих зон синтезованих структур, що дозволило визначити раціональні структурні варіанти матриць на основі параметру ефективної площі робочої зони. Запропоновано підхід до визначення граничної умови (векторного магнітного потенціалу) двовимірних розрахункових областей, який ґрунтується на дослідженні просторового розподілу магнітного поля в робочій зоні електромагнітного сепаратора.

Ключові слова: електромагнітний сепаратор, поліградієнтна матриця, робоча зона, геометричні критерії подібності, граничні умови, ефективна площа.

ABSTRACT

Pages – 93; Drawings – 26; Tables – 15; Sources – 41; Addition – 1.

The purpose of the work is to determine the operating and energy characteristics of polygradient electromagnetic separators with plate matrices for the extraction of ferromagnetic particles from dispersed media.

It is shown that the increase of the intensity of magnetic field in separators with electromagnetic excitation has its own limit, due to the saturation of the elements of magnetic wire. The increase of intensity of the magnetic field is also associated with an increase in power consumption, which leads to higher price of devices.

At the same time, an increase of inhomogeneity of magnetic field can be achieved by optimizing of shape, geometrical dimensions and relative position of the elements of multicomponent magnetic matrix of the separator.

The inhomogeneity degree of the magnetic field and the spectrum of the force field in the plane of working areas of the synthesized structures were researched, which made it possible to determine rational structural variants of the matrices based on the effective area parameter of the working area. An approach is proposed to determine the boundary conditions (vector magnetic potential) of two – dimensional calculation areas, based on the study of the spatial distribution of the magnetic field in the working area of an electromagnetic separator.

Keywords: electromagnetic separator, polygradient matrix, working area, geometric criteria of similarity, boundary conditions, effective area.

ЗМІСТ

	Стор.
ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ КОНСТРУКТИВНИХ РІЗНОВИДІВ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ ПОЛІГРАДІЄНТНОЇ МАГНІТНОЇ СЕПАРАЦІЇ.....	11
1.1 Конструктивна різноманітність пристроїв для поліградієнтної магнітної сепарації.....	11
1.2 Методи аналізу магнітних полів у міжполюсних робочих зазорах матриць поліградієнтних сепараторів.....	27
РОЗДІЛ 2. ОГЛЯД ІСНУЮЧОГО ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ РОЗРАХУНКІВ МАГНІТНИХ ПОЛІВ МЕТОДОМ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ	39
2.1 Програмне забезпечення ANSYS MAXWELL.....	39
2.2 Програмне забезпечення COMSOL Multiphysics.....	41
2.3 Програмне забезпечення Infolytica.....	42
2.4 Програмне забезпечення для розрахунку двовимірних плоскопаралельних і плоскомеридіанних електромагнітних, теплових і механічних полів.....	44
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА РОЗРАХУНКОВИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ЧИСЕЛЬНО-ПОЛЬОВОГО АНАЛІЗУ.....	50
3.1 Математична модель стаціонарного магнітного поля.....	50
3.2 Розробка розрахункових моделей для чисельно-польового аналізу	51
РОЗДІЛ 4. ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ СТРУКТУРНИХ ВАРІАНТІВ МАТРИЦІ ПОЛІГРАДІЄНТНОГО СЕПАРАТОРА.....	57
4.1 Показники для оцінки ступеня неоднорідності магнітного поля...	57
4.2 Порівняльний аналіз ступеня неоднорідності поля в геометрично ідентичних робочих зонах.....	58
4.3 Дослідження ступеня неоднорідності поля уздовж характерних ліній робочих зон, інваріантних до перетворень подібності.....	62

4.4	Оцінка спектра силового поля $H_{\text{grad}}(H)$ в площині робочих зон досліджуваних структур.....	68
4.5	Визначення величини векторного магнітного потенціалу (граничної умови) на границі de	70
4.6	Вибір раціональної структури матриці електромагнітного сепаратора.....	75
	ВИСНОВКИ.....	80
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	82
	ДОДАТОК А.....	87

ВСТУП

Важливим етапом різних технологічних процесів переробки вихідної сировини, проміжних або кінцевих продуктів є поділ сумішей сипких матеріалів, виділення твердої фракції з рідкого або газоподібного середовища. В даний час для цих цілей застосовуються технічні пристрої – сепаратори. На практиці широке застосування отримав метод магнітної сепарації, заснований на використанні відмінностей в магнітній сприйнятливості часток поділюваних середовищ.

Найбільш ефективною технологією, яка спроможна відокремлювати дрібнодисперсні феромагнітні частинки розміром від 0,005 мм до 1мм, є поліградієнтна магнітна сепарація. У робочих зонах пристроїв для поліградієнтної магнітної сепарації розміщуються матриці з дискретним поліградієнтним середовищем із заданими електромагнітними властивостями і геометричними параметрами елементарних осередків, що складаються з феромагнітних тіл (наприклад, загострених пластин, куль, циліндрів, стрижнів, сталеві вати і т.д.), за рахунок яких відбувається зміна первинного магнітного поля, що підвищує градієнт його напруженості, і, як наслідок, надійність вилучення дрібнодисперсних феромагнітних часток з матеріалу. Виходячи з положень генетичної теорії структурної організації електромагнітних систем, поліградієнтні магнітні сепаратори можуть бути віднесені до класу суміщених систем, в яких структурно об'єднані магнітна система і робочий орган (матриця), що має свою внутрішню структуру.

Більшість існуючих пристроїв для поліградієнтної магнітної сепарації призначена для очищення рідинних середовищ (пульпи) або запилених газів. У той самий час у зв'язку зі зростанням вимог до якості продукції проблема вилучення високодисперсних феромагнітних включень, які виникають в процесі зносу обладнання, є актуальною й для сипких матеріалів: борошна, круп, цукру, крохмалю, комбікорму, керамічної та фармацевтичної сировини тощо. Стандартами встановлені гранично допустимі норми наявності металодомішок у харчових продуктах, наприклад, в борошні – не більше 3

мг/кг сухої речовини, в комбікормі – не більше 20-30 мг/кг. Наявність металевих домішок у харчових продуктах неприпустиме, оскільки їх попадання разом з їжею в організм людини призводить до хвороб, а іноді і до загибелі.

В сучасних умовах для очищення сипких матеріалів від дрібнодисперсних феромагнітних включень знайшли застосування переважно відкриті багатополюсні системи магнітних сепараторів, які є недостатньо ефективними при видаленні феромагнітних домішок розміром до 1 мм. Наявність в робочих зонах існуючих пристроїв для поліградієнтної сепарації невеликих за розмірами повітряних проміжків, де саме й відбувається сепарація матеріалів, унеможливорює їх застосування для очищення сипких речовин. Тому потребують подальших досліджень процеси, що відбуваються в робочому органі сепаратора – матриці з поліградієнтним середовищем. При цьому слід враховувати, що збільшення інтенсивності магнітного поля у сепараторах з електромагнітним збудженням має свою межу, обумовлену насиченням елементів магнітопроводу. Зростання напруженості магнітного поля також пов'язане зі збільшенням споживаної потужності, що призводить до більш високої вартості пристроїв. У той же час підвищення неоднорідності магнітного поля можна досягти за рахунок оптимізації форми, геометричних розмірів і взаємного розташування елементів багатокомпонентної магнітної матриці сепаратора. Дослідження в цьому напрямку представляють найбільший практичний і теоретичний інтерес.

Тому тема магістерської роботи, спрямованої на вибір раціональних характеристик поліградієнтних електромагнітних сепараторів з пластинчастими матрицями є актуальною та складає предмет дослідження.

Мета і задачі дослідження. Мета роботи полягає у визначенні робочих і енергетичних характеристик поліградієнтних електромагнітних сепараторів з пластинчастими матрицями для вилучення феромагнітних частинок з дисперсних середовищ.

Для досягнення мети були поставлені та розв'язані такі задачі:

1. Аналіз функціональних та структурних особливостей поліградієнтних електромагнітних (магнітних) сепараторів.

2. Варіантні розрахунки та порівняльний аналіз розподілу силового магнітного поля в робочих зазорах синтезованих структур електромагнітного сепаратора з пластинчастим поліградієнтним середовищем заданої конфігурації. Створення програмного забезпечення для дослідження робочих характеристик синтезованих структур матриць. Визначення раціональних конструктивних параметрів пластинчатих елементів багатокомпонентної магнітної матриці поліградієнтного сепаратора.

Об'єкт дослідження. Сепарування феромагнітних частинок з дисперсних середовищ.

Предмет дослідження. Робочі характеристики, співвідношення геометричних розмірів пластинчастих елементів матриць, нові технічні рішення.

Методи дослідження. Теоретичною та методологічною основою дослідження є структурно-системний підхід, основи теорії структурної організації та еволюції електромеханічних систем, системне та генетичне моделювання, фундаментальні положення теорії електромагнітного поля та теоретичної електротехніки. При аналізі магнітного поля використовувався скінченно-елементний метод розв'язання нелінійних диференційних рівнянь в часткових похідних в тривимірній та двовимірній постановках. В якості інструменту аналізу магнітних полів були застосовані програмні комплекси Elcut та Infolytica (програмний модуль Magnet), для побудови геометрії моделей – програма КОМПАС. При визначенні граничних умов для двовимірних розрахункових моделей робочих зон синтезованих структур матриці використовувалися двовимірна таблична інтерполяція та апроксимація розрахунково-експериментальної залежності методом найменших квадратів. Для перевірки теоретичних положень і наукових результатів був застосований метод фізичного експерименту.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ КОНСТРУКТИВНИХ РІЗНОВИДІВ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ ПОЛІГРАДІЄНТНОЇ МАГНІТНОЇ СЕПАРАЦІЇ

1.1 Конструктивна різноманітність пристроїв для поліградієнтної магнітної сепарації

Важливим етапом різних технологічних процесів переробки вихідної сировини, проміжних або кінцевих продуктів є поділ сумішей сипких матеріалів, виділення твердої фракції з рідкого або газоподібного середовища. В даний час для цих цілей застосовуються технічні пристрої – сепаратори, принцип дії яких заснований на використанні фізичних полів різної природи і деяких фізичних властивостей матеріалів: щільності, електропровідності, діелектричної проникності, намагніченості, змочуваності та адсорбції, відбивної здатності тощо [1]. На практиці широке застосування отримав метод магнітної сепарації, заснований на використанні відмінностей в магнітній сприйнятливості часток поділюваних середовищ.

Магнітні сепаратори можуть бути декількох видів, вони розрізняються за типом установки, за способом подачі вихідної сировини, функціональності, також вони можуть мати різний рівень напруженості магнітного поля.

Сепаратори бувають електромагнітними і виконаними на основі постійних магнітів, вони виробляються наступних типів: підвісні, поліградієнтні, барабанні, шківні, роликові тощо.

Найбільш складним є процес вилучення з немагнітних середовищ слабомагнітних і дрібнодисперсних феромагнітних включень розміром близько 0,05 мм і менше. Для видалення таких включень застосовуються різноманітні за конструкцією високоградієнтні (поліградієнтні) магнітні сепаратори.

В робочих областях поліградієнтних систем для магнітної сепарації створені умови для забезпечення максимального значення напруженості H магнітного поля (до 1600 кА/м і вище) і величини $\text{grad}H$ за рахунок формування локальних зон з тривимірною неоднорідністю магнітного поля шляхом введення в робочий простір різних феромагнітних тіл, наприклад сталевих кульок [1, 2].

Аналіз інформаційних джерел [1, 2] показав, що основними структурними елементами поліградієнтних магнітних сепараторів є: джерело магнітного поля (магнітна або електромагнітна система); робочий орган, виконаний у вигляді нерухомої касети (матриці) або обертового ротора, заповнений поліградієнтним (гетерогенним) середовищем; допоміжні підсистеми, що забезпечують безперебійну роботу магнітного сепаратора (наприклад, підсистема подачі матеріалу, що сепарується в робочу зону, підсистема забезпечення видалення з робочої зони магнітної і немагнітної фракцій тощо).

Електромагнітні системи поліградієнтних сепараторів призначені для створення первинного магнітного поля, можуть бути відкритого або закритого типу (рис. 1.1). Якщо в електромагнітних системах відкритого типу (рис. 1.1, а) полюса розташовуються тільки з одного боку робочої зони, то робочі зони електромагнітних систем закритого типу обмежені полюсами з обох сторін (рис. 1.1, б).

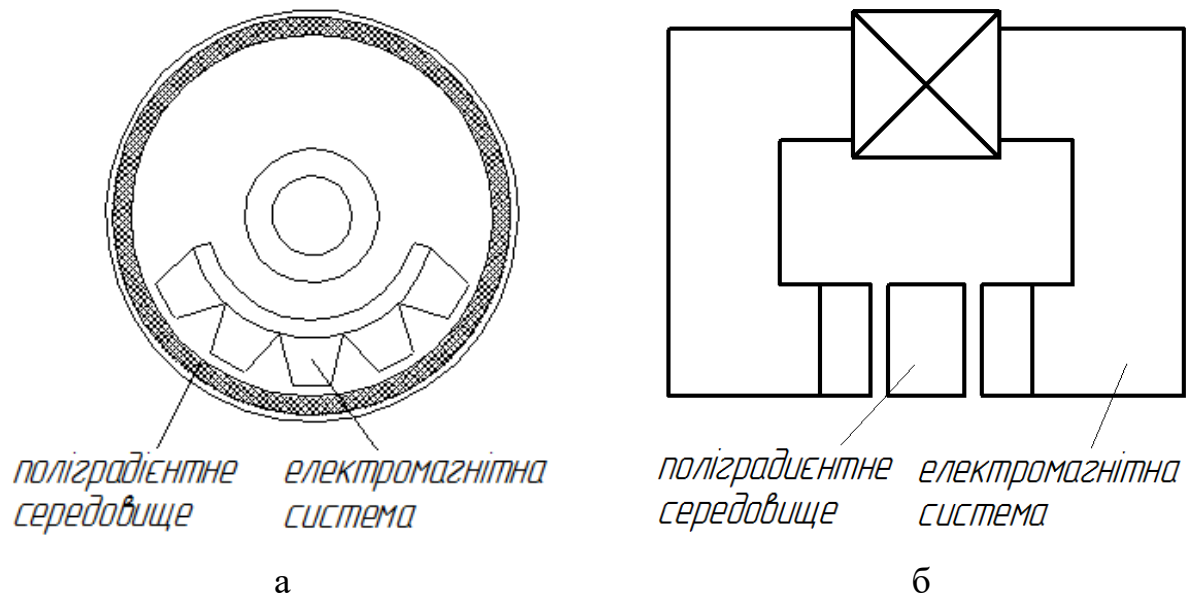


Рисунок 1.1 – Узагальнені схеми електромагнітних систем поліградієнтних сепараторів: а) відкритого типу; б) закритого типу

У робочих зонах електромагнітних систем розміщуються матриці або касети з поліградієнтним середовищем з феромагнітних тіл (куль, циліндрів, стрижнів, сталевій вати, загострених пластин тощо), за рахунок яких відбувається зміна первинного магнітного поля, що підвищує градієнт його напруженості, і, як наслідок, надійність вилучення слабомагнітних і дрібнодисперсних феромагнітних частинок з матеріалу [1].

Розрізняють матриці контактної та безконтактної типу [3]. В контактних матрицях елементи поліградієнтного середовища контактують один з одним та мають вигляд куль, сталевій вовни тощо. Це дозволяє отримати високе вилучення слабомагнітних часток, але вимагає спеціальної регенерації. Безконтактні матриці регенеруються самостійно, вони поділяються на матриці I роду, в яких робочі елементи (наприклад – пластини) встановлені поперек шляху робочого потоку, і матриці II роду, в яких робочі елементи встановлені паралельно магнітному потоку. Найбільш досліджені матриці I роду, але матриці II роду забезпечують більш високу надійність вилучення феромагнітних включень за рахунок більших зазорів між пластинами. Тому в подальших дослідженнях будуть розглянуті безконтактні матриці II роду.

У науково-технічній літературі, наприклад, в [4, 5], наведені класифікації магнітних сепараторів, що враховують цілий ряд технологічних ознак, в тому числі: спосіб подачі матеріалу в робочу зону; характер поведінки магнітних частинок в магнітному полі; напрямок руху матеріалу, що підлягає сепарації; спосіб видалення продуктів поділу з робочої зони; конструкцію пристроїв для видалення магнітних включень тощо.

В роботі [2] подано класифікацію поліградієнтних магнітних сепараторів, яка включає, зокрема, такі характеристики: розташування полюсів в робочому органі сепаратора (сепаратори з полярністю, що чергується по колу барабана і сепаратори з постійною полярністю); напрямок руху потоку пульпи в феромагнітних середовищах (сепаратори, у яких феромагнітне середовище рухається назустріч потоку пульпи, і сепаратори, у яких феромагнітне середовище рухається в напрямку руху потоку пульпи).

Поліградієнтні середовища магнітних сепараторів відносяться до гетерогенних структур, класифікація яких досить повно представлена в роботі [6]. Під гетерогенною структурою розуміється неоднорідна система, що складається з двох або більше однорідних частин (фаз). В роботі [6] показано найбільш поширені типи упорядкованих з чітко вираженою періодичністю гетерогенних структур, які застосовуються в різних технічних пристроях і матеріалах. У загальному випадку правильні гетерогенні структури можуть бути багатofазними і багатокomпонентними, коли в межах однієї з фаз є кілька фракцій (компонентів) [7]. Гетерогенні структури можна класифікувати за геометричними параметрами (формою і розмірами елементів дисперсної фази); концентрацією включень; показниками симетрії (впорядковані – з чітко вираженою періодичністю – та невпорядковані); за фізичними властивостями (ізотропні і анізотропні, лінійні і нелінійні, електричні, магнітні, діелектричні, гальваномангнітні ін.); за агрегатним станом дисперсійного середовища (газові, рідкі або тверді).

Розглянемо більш докладно основні типи поліградієнтних середовищ, які застосовуються в матрицях поліградієнтних магнітних сепараторів:

1. Стрижневі поліградієнтні середовища [8]. Приклади таких структур показані на рис. 1.2. При цьому стрижні можуть бути різного поперечного перерізу: круглі (рис. 1.2, а), квадратні (рис. 1.2, б) прямокутні (рис. 1.2, в).

2. Пластинчасті поліградієнтні середовища [9], які можуть бути з гладкими або зигзагоподібними пластинами. Поверхня пластин також може бути виконана у вигляді виступів і жолобків, що чергуються [10]. Приклади таких середовищ представлені на рис. 1.3.

3. Кулясті поліградієнтні середовища [11]. При заповненні матриці магнітного сепаратора кулями одного і того ж діаметру (рис. 1.4, а) поліградієнтне середовище є двофазним однокомпонентним, якщо в матриці сепаратора розміщені кулі, що відрізняються своїми геометричними розмірами, то можна говорити про багатокомпонентне поліградієнтне середовище. Зокрема, на рис. 1.4, б як приклад зображене двофазне двокомпонентне поліградієнтне середовище.

4. Ґратчасті поліградієнтні середовища [12], які можуть бути: однокомпонентні з прямокутними решітками (рис. 1.5, а), двокомпонентні з прямокутними решітками і жорстко закріпленими в вершинах решіток кулями (рис. 1.5, б), двокомпонентні зі стільниковими решітками і закріпленими в стільниках кулями (рис. 1.5, в).

Таким чином, до особливостей гетерогенних середовищ, що застосовуються в поліградієнтних магнітних сепараторах, слід віднести наступне:

– поліградієнтні середовища магнітних сепараторів є переважно двофазними симетричними структурами, що складаються з внутрішньої дисперсної фази феромагнітних тіл з чітко вираженими межами, і зовнішньої дисперсійної немагнітної фази (наприклад, повітря), що є тим середовищем, в якому розподілені феромагнітні об'єкти;

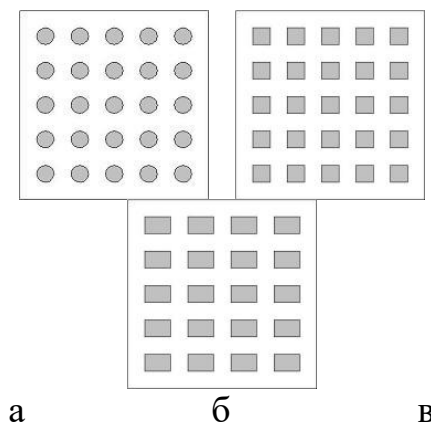


Рисунок 1.2– Стрижневі поліградієнтні середовища зі стрижнями круглого (а), квадратного (б) та прямокутного (в) перетину

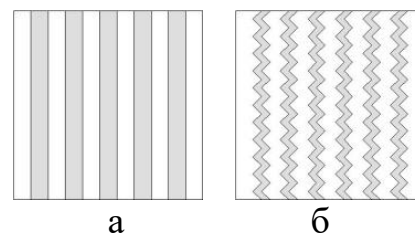


Рисунок 1.3 – Пластинчасті поліградієнтні середовища з гладкими (а) та зигзагоподібними (б) пластинами

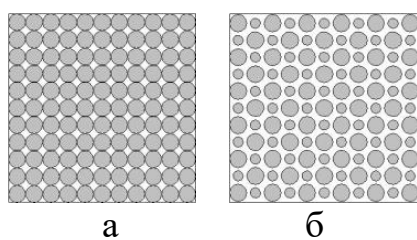


Рисунок 1.4 – Однокомпонентні (а) та двокомпонентні (б) кулясті поліградієнтні середовища

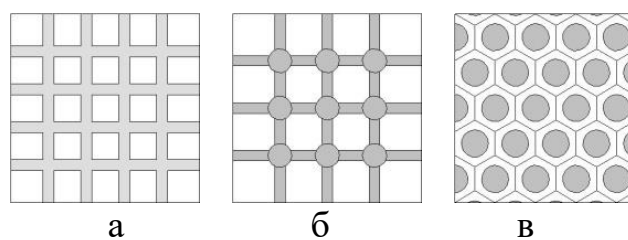


Рисунок 1.5 – Ґратчасті поліградієнтні середовища: однокомпонентне (а) середовище; двокомпонентне (б) середовище з прямокутною решіткою; двокомпонентне середовище зі стільниковою решіткою (в)

– поліградієнтні магнітні сепаратори можуть бути класифіковані за типом електромагнітної системи, що створює первинне магнітне поле (відкриті і закриті); за геометричними параметрами (формою і розмірами) і фізичними властивостями (ізотропні і анізотропні) феромагнітних тіл поліградієнтних середовищ.

– максимальне використання на практиці отримали стрижневі, пластинчасті, кулясті і ґратчасті поліградієнтні середовища магнітних сепараторів.

Залежно від геометричної форми і розмірів феромагнітних тіл, що утворюють поліградієнтні середовища, можуть бути виділені чотири основних типи поліградієнтних магнітносепаруючих пристроїв.

1. У магнітних сепараторах зі *стрижневими поліградієнтними середовищами* феромагнітні тіла, розміщені в фільтр-матрицях, представляють собою стрижні різного поперечного перетину (круглі, трикутні, квадратні або прямокутні).

На рис. 1.6 для прикладу представлена конструкція магнітного сепаратора, поліградієнтне середовище якого утворено стрижнями круглого перетину [13]. Сепаратор включає магнітну систему 1, розташовану всередині робочого органу 2 з поліградієнтними елементами 3. Останні закріплені паралельно один до одного на робочому органі 2 і виконані у вигляді стрижнів 4 з різьбленням, в поглибленнях якого покладений дріт 5 з магнітом'якого матеріалу, закріплених на робочому органі паралельно один до одного.

Вихідний матеріал надходить в зону дії магнітного поля, що створюється магнітною системою 1, на поліградієнтне середовище 3. Немагнітні частки разом з основною кількістю води йдуть до відповідного приймача, а магнітні і слабомагнітні частки закріплюються на витках дроту 5, розподіляючись рівномірно по всій поверхні поліградієнтного середовища 3, виносяться робочим органом 2 з робочої зони і змиваються водою в приймач магнітної фракції. Різьба стрижня забезпечує постійний зазор між витками дроту по всій довжині елемента поліградієнтного середовища.

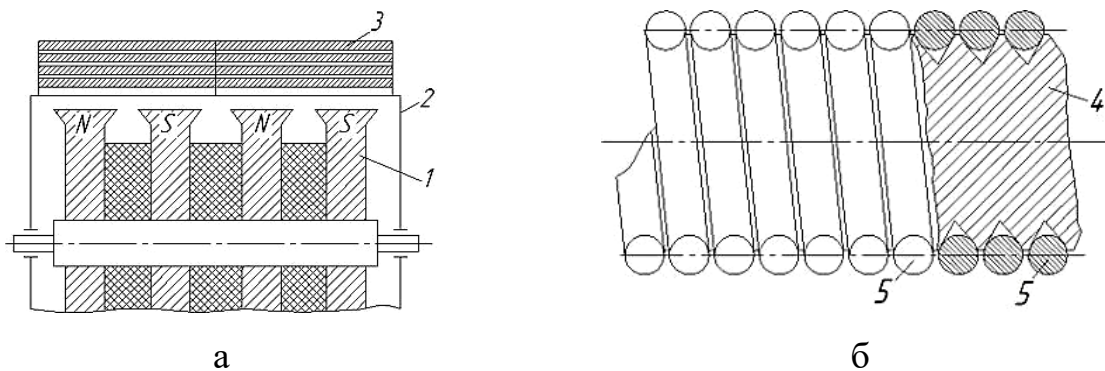


Рисунок 1.6 – Поліградієнтний магнітний сепаратор [13]:

поздовжній розріз сепаратора (а), елементи поліградієнтного середовища (б)

Поліградієнтний магнітний сепаратор, який зображений на рис. 1.7, містить матрицю, заповнену феромагнітними тілами трикутного перетину [14].

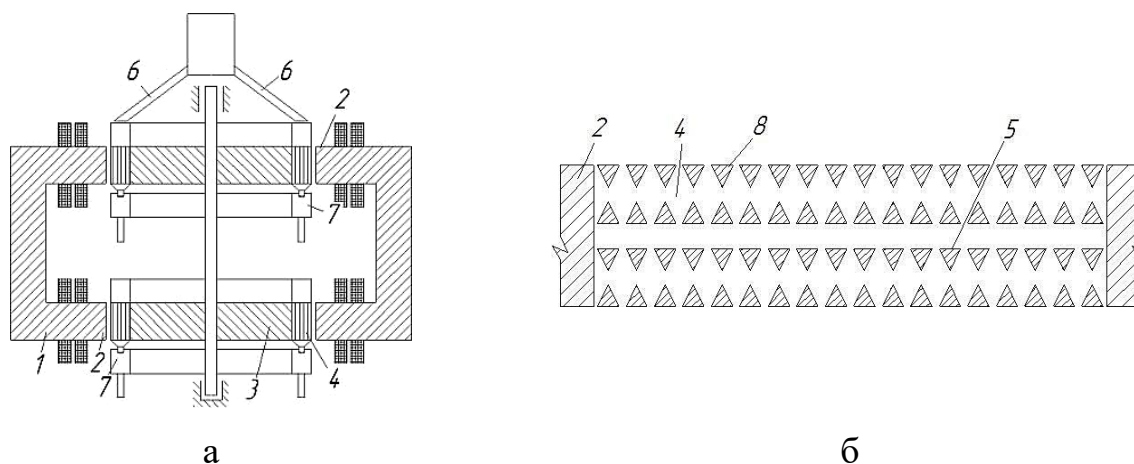


Рисунок 1.7 – Поліградієнтний магнітний сепаратор [14]: загальний вигляд магнітного сепаратора (а) та конструкція матриці (б)

Пристрій включає магнітну систему 1 з полюсами 2, ротор 3, встановлений з можливістю обертання, робочу камеру з феромагнітними матрицями 4, встановленими вертикально вздовж напрямку руху пульпи і перпендикулярно поверхні полюсів з утворенням вертикальних каналів 5 для проходження пульпи, завантажувальний 6 і розвантажувальні 7 патрубки. Кожна матриця 4 виконана дворядною з феромагнітних тіл 8 трикутного перетину, розташованих паралельно один одному в площині матриці, а феромагнітні тіла звернені однією зі своїх поверхонь в сторону каналу 5 для

проходження пульпи. Простір між феромагнітними тілами 8 заповнений немагнітним матеріалом.

Магнітний сепаратор працює наступним чином. Початковий продукт у вигляді пульпи через завантажувальний патрубок 6 надходить в частину робочої камери, розміщеної в міжполюсному зазорі магнітної системи. Проходячи через канали 5, під впливом магнітного поля магнітні частинки, що знаходяться в пульпі притягуються до робочої поверхні матриць 4, концентруючись у гострих кутів феромагнітних тіл, в зоні найбільшого значення градієнта напруженості магнітного поля. Під впливом промивної води від притягнутих магнітних частинок відмиваються налипли на них немагнітні частинки, які разом з водою розвантажуються в приймачі для немагнітного продукту через патрубки 7. При виході матриць 4 із зони дії магнітного поля в канали 5 подають змивну воду, яка змиває з робочої поверхні матриць магнітні частинки в приймач для концентрату через патрубки 7.

2. В магнітних сепараторах з *пластинчастими поліградієнтними середовищами* феромагнітні тіла, розміщені в фільтр-матрицях, являють собою гладкі або зигзагоподібні пластини. Поверхні пластин також можуть бути виконані у вигляді виступів та жолобків.

На рис. 1.8 показаний магнітний сепаратор з пластинчастим поліградієнтним середовищем [15]. Сепаратор включає магнітну систему 1 з полюсами, в міжполюсному зазорі якої розташований робочий орган у вигляді касети 2, заповнений пакетами 3, складеними з магнітних 4 і немагнітних 5 смуг, що чергуються між собою. Смуги своїми довгими сторонами орієнтовані в напрямку від живильника 6 до приймача 7 немагнітного продукту, тобто розміщені вертикально. Між поверхнями суміжних пакетів є зазор, який утворює канал 8 для проходу пульпи.

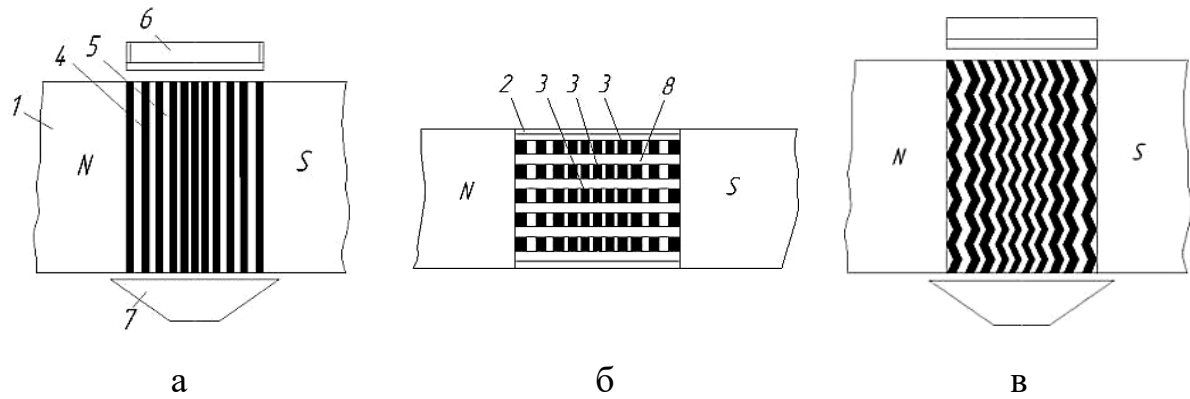


Рисунок 1.8 – Магнітний сепаратор [15]: схема сепаратора (а), розміщення наповнювача з касетами, в яких смуги звернені в бік полюсів своїми площинами (б), схема сепаратора з зигзагоподібними смугами (в)

Сепаратор працює наступним чином. Пульпа матеріалу, який збагачується, з живильника *б* подається на стінки пакетів *3* і, утримуючись на них під дією сил поверхневого натягу, рухається тонким шаром. При цьому середина каналу *8* залишається порожньою, що дозволяє мати будь-яку необхідну для запобігання забивання ширину каналу.

Під дією магнітних сил слабomagнітні зерна притягуються до поверхні пакетів *3* на краях магнітних смуг *4*, а немагнітні зерна потрапляють в приймач *7* немагнітного продукту. Після виключення магнітної системи або виведення касети *2*, зібраної з пакетів *3*, із зони між полюсами магнітний продукт змивається з пакетів *3* до відповідного приймача. Завдяки зменшенню товщини немагнітних смуг *5* в пакетах *3* в напрямку від полюсів до центру міжполярного зазору умови вилучення магнітних частинок з потоку пульпи стають однаковими по всій площі пакета, і тим самим виключається можливість проскакування магнітних частинок в центрі міжполюсного зазору, що, в свою чергу, призводить до підвищення вилучення магнітної фракції. Завдяки зигзагоподібній формі смуг *4* та *5* практично всі частинки потрапляють в зону дії магнітних сил. Крім того, звивиста форма смуг забезпечує створення додаткового градієнта магнітного поля, причому чим менше кут повороту зигзагів, тим вище градієнт, а отже, і вилучаючі магнітні сили.

Поліградієнтне середовище магнітного сепаратора, який представлений на рис. 1.9, утворене пластинами, поверхня яких виконана у вигляді виступів і жолобків [16].

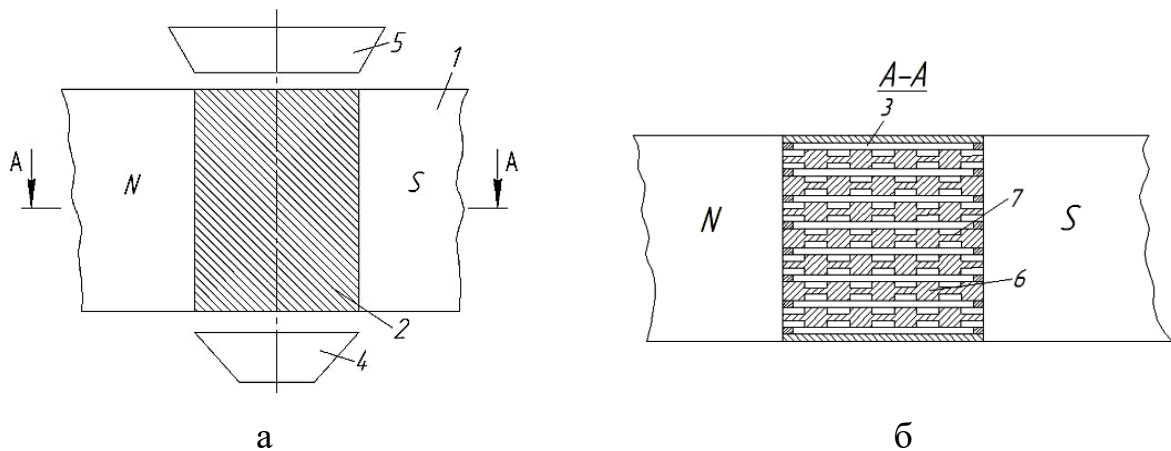


Рисунок 1.9 – Магнітний сепаратор для сепарації слабомагнітних матеріалів [16]: схема сепаратора (а) та розріз А-А (б)

Магнітний сепаратор (рис. 1.9) працює в такий спосіб. Вмикається магнітна система 1 та намагнічуються пластини 2. При цьому високоградієнтне магнітне поле утворюється як на гострих краях виступів б, так і на конусоподібних виступах, утворених зернами залізного порошку на поверхні виступів б і жолобків 7. Пульпа збагачуваного матеріалу подається на намагнічені пластини 2, рухається по ним і частково в каналі 3, утвореному суміжними пластинами 2. Частина пульпи, що проходить по пластинах, рухається переважно по жолобках 7 похило вниз, а також перетікає з жолобків 7 через краї виступів б. При русі пульпи по жолобку магнітні частинки під дією магнітних сил притягуються не тільки до країв виступів б, а й (здебільшого) до центрів мікроградієнтів, утворених зернами магнітом'якого залізного порошку. В результаті вилучення слабомагнітних частинок з потоку і осадження їх на пластину відбуваються практично по всій її поверхні (як на виступах б, так і на жолобках 7), що підвищує осаджувальну здатність феромагнітного наповнювача.

В результаті розміщення пластин 2 уздовж силових ліній магнітного поля значно знижується ймовірність механічного забивання зазорів

Зсильномагнітнимита чужорідними тілами, і вся корисна площа пластини виконує свою безпосередню функцію – витяг слабомагнітних матеріалів, причому градієнт напруженості магнітного поля уздовж поверхні пластини забезпечує ефективний силовий режим поділу.

Розташування виступів 6 і жолобків 7 по обидва боки однієї і тієї ж пластини з протилежним кутом нахилу дозволяє отримати у всіх зазорах 3 потоки пульпи, що рухаються в одному і тому ж напрямку, що забезпечує створення однакових умов вилучення у всіх зазорах 3, а також рівномірне зношування пластин. Крім того, перехрещення виступів і жолобків по обидва боки однієї і тієї ж пластини збільшує її жорсткість і знижує небезпеку механічної поломки.

3. У магнітних сепараторах з *кулястими поліградієнтними середовищами* феромагнітні тіла, розміщені у фільтр-матрицях, представляють собою кулі однакового або різного діаметра. Приклад конструкції магнітного сепаратора з кулястимполіградієнтним середовищем наведено на рис. 1.10 [17].

Сепаратор містить корпус 1 з немагнітного матеріалу, наприклад циліндричної форми, стінки якого виконані гофрованими, з входним 2 і вихідним 3 отворами, перфорований піддон 4, на якому всередині корпусу 1 розташовані феромагнітні кулі 5. Із зовнішнього боку корпусу 1 розташована магнітна система з полюсами 6, магнітопроводом 7 та полюсними наконечниками 8. Радіус заокруглення западин гофрів більше радіуса феромагнітних куль 5, а поверхня полюсних наконечників 8, звернена до корпусу 1, виконана еквідистантною поверхні зовнішніх стінок корпусу 1. Крім цього, полюсні наконечники 8 можуть бути виконані у вигляді немагнітних ємностей 9, заповнених феромагнітними частинками 10. Одна зі стінок ємності 9, без зазору прилегла до зовнішньої стінки корпусу 1, виконана з еластичного матеріалу, а магнітопровід замикає обидва полюси 6. Немагнітна ємність 9 може прилягати до корпусу 1 відкритою стороною, знижуючи магнітний опір контакту наконечника і ємності.

Потік середовища, що очищається подається у вхідний отвір 2 корпусу 1 і омиває феромагнітні кулі 5. Металеві включення, що містяться в очищуваному середовищі, притягуються до феромагнітних куль 5. У середній частині корпусу 1 середа, що очищається рухається між кулями зигзагоподібно, омиваючи кулі 5 з усіх боків, що сприяє збільшенню відстані, яку проходить середовище, що очищається, і тим самим підвищенню ефективності сепарації. Так само зигзагоподібно рухається середовище, що очищається по під стінами корпусу 1, так як розташовані в западинах гофрів кулі 5 перешкоджають прямолінійному руху середовища, що очищається.

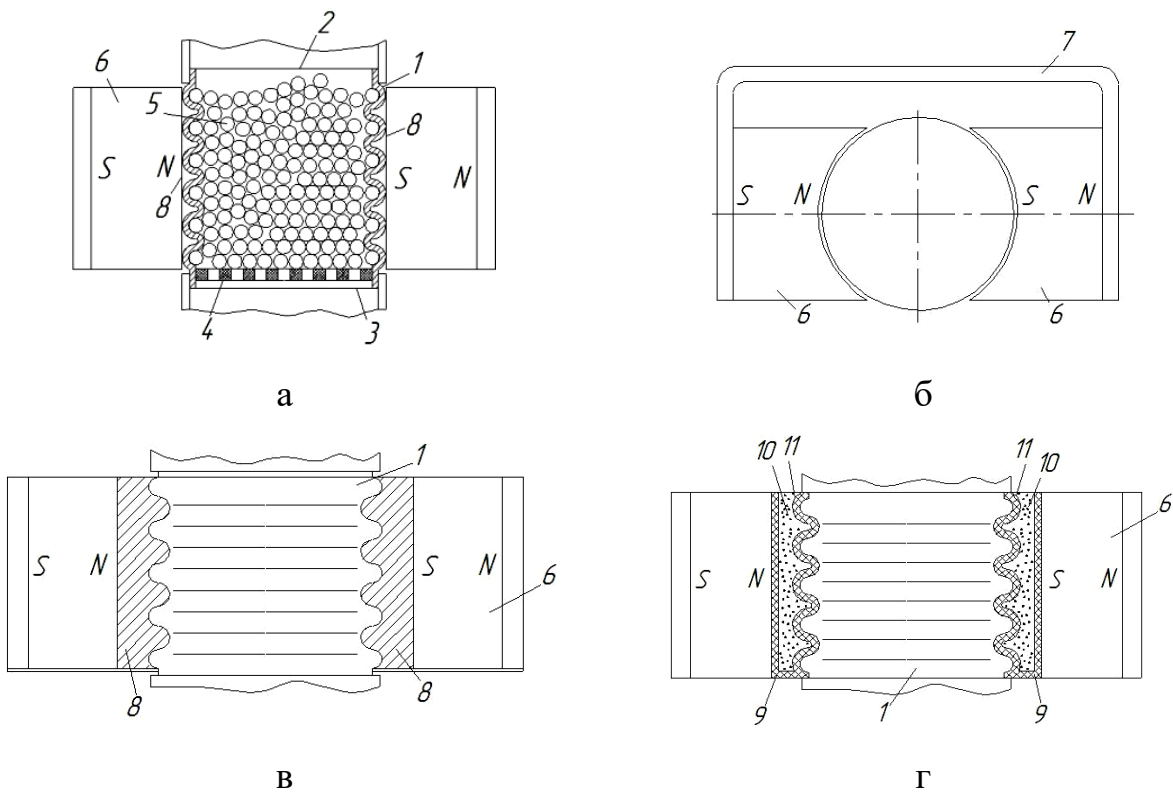


Рисунок 1.10 – Магнітний сепаратор [17]: поперечний розріз (а), вид зверху (б) та приклади виконання (в, г) магнітного сепаратора

4. У магнітних сепараторах з *гратчастими поліградієнтними середовищами* застосовуються прямокутні і стільникові решітки.

На рис. 1.11 приведена конструкція сепаратора з поліградієнтним середовищем у вигляді прямокутної решітки [18]. Поліградієнтний сепаратор має електромагнітну систему 2, живильник 3, брызкала 4, приймачі продуктів

поділу 5 і робочий орган 1 з розташованим в ньому поліградієнтним середовищем, виконаним у вигляді розміщених одна над іншою решіток б, що утворюють квадратні осередки. Решітки встановлені із зсувом одна щодо іншої з розташуванням вершини осередку решітки, що лежить вище над центром осередку нижче лежачої решітки, а в вершинах осередків встановлені жорстко закріплені на них кулі 7.

Пристрій працює наступним чином. Вихідний матеріал надходить до робочого органу в зоні дії магнітного поля. Магнітні частинки притягуються до куль і виносяться при обертанні робочого органу із зони дії магнітного поля, а немагнітні частинки під дією сили тяжіння проходять через решітки в приймачі для немагнітної фракції. З бризгал на решітки при виході їх із зони дії магнітного поля подається вода, яка змиває з куль магнітні частинки. Завдяки постійним зазорам між кулями відбувається відмивання куль, що підвищує ефективність процесу сепарації.

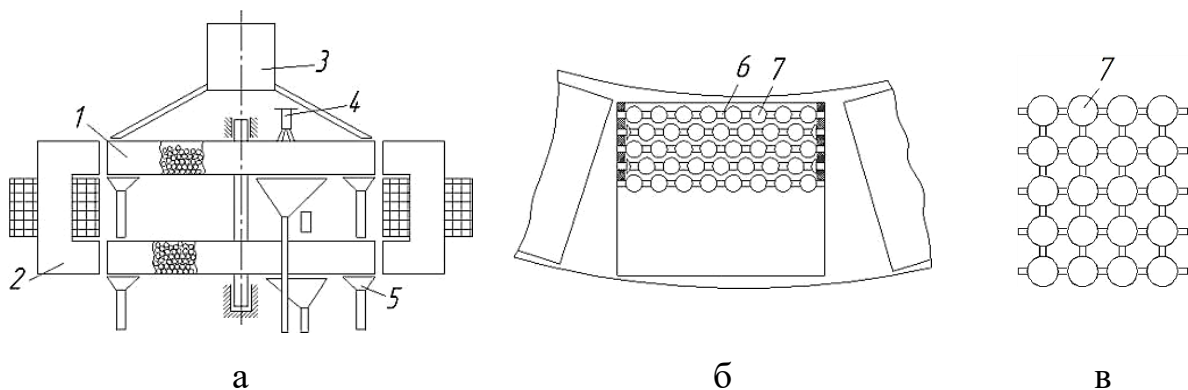


Рисунок 1.11 – Поліградієнтний електромагнітний сепаратор [18]:
загальний вигляд (а), установка решіток в робочому органі (б),
вид решітки (в) сепаратора

Для очищення технологічних газів у чорній і кольоровій металургії, машинобудівної та хімічної промисловості знайшли застосування магнітні фільтр-сепаратори з поліградієнтним середовищем у вигляді стільникової решітки (рис. 1.12) [19]. Такий фільтр містить вхідний патрубок 1, корпус 2, стільниковоподібні грати 3 з немагнітного матеріалу (наприклад, фторопласта або алюмінію), сферичні тіла 4 (кульки з феромагнітного

матеріалу), розподільні і монтажні ґрати 5, систему бризгал (форсунок) 6 для змиву і регенерації фільтра, шламоотвідний елемент 7, каплевідбійник 8, магнітну систему 9 (соленоїд) і вихідний патрубок 10.

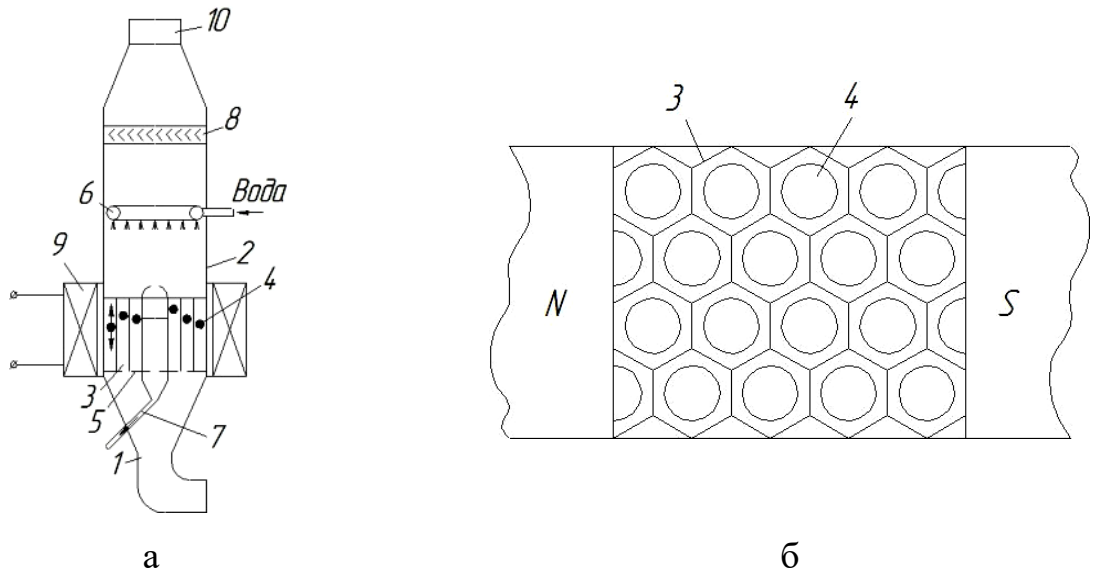


Рисунок 1.12 – Магнітний фільтр [19]: загальний вигляд (а), вигляд решітки (б)

Магнітний фільтр-сепаратор працює наступним чином. Запилений газ підводиться по вхідному патрубку 1 в корпус 2, рівномірно розподіляючи по каналах стільниковоподібної решітки 3 і приводячи у зважений стан кульки 4, чому сприяє пондеромоторна магнітна сила введеної в дію магнітної системи 9. Феромагнітні кульки 4 набувають зворотно-поступальний рух, рухаючись уздовж силових ліній магнітного поля; при цьому з максимальною ефективністю реалізується інерційно-ударний «ефект мішені» і кулонівська взаємодія мас (феромагнітна порошок в полюс магніту). Водою з бризгал (форсунок) 6 обложені порошок змиваються та у вигляді шламу виводяться з апарату через шламовідвідний елемент 7. Механічний винос вологи усувається каплевідбійником 8. Очищений газ викидається в атмосферу або направляється в наступний щабель очищення через вихідний патрубок 10.

Проведений аналіз показав, що більшість існуючих пристроїв для поліградієнтної магнітної сепарації призначена для очищення від

дрібнодисперсних феромагнітних домішок рідинних середовищ (пульпи) або запилених газів. У зв'язку зі зростанням вимог до якості продукції проблема вилучення високодисперсних феромагнітних включень, які виникають в процесі зносу обладнання, є актуальною й для сипких матеріалів [20, 21]. Наявність в робочих зонах розглянутих вище пристроїв невеликих за розмірами повітряних проміжків, де саме й відбувається сепарація матеріалів, унеможлиблює їх застосування для очищення сипких речовин (борошна, круп, керамічної сировини тощо). Зазначимо, що для очищення сипких матеріалів знайшли застосування переважно відкриті багатополюсні системи магнітних сепараторів, які є недостатньо ефективними при видаленні феромагнітних домішок розміром до 0,005 мм [21]. На рис. 1.13 наведені для прикладу магнітні системи відкритого типу, які використовуються для очищення від феромагнітних включень сипких речовин сільськогосподарського призначення [22-24].

Одним із напрямків підвищення ефективності магнітної сепарації сипких середовищ є впровадження саме поліградієнтних магнітних сепараторів. В останні роки в області системного проектування об'єктів нової техніки особливого значення набуває структурно-системний підхід, що спричинене тенденцією зростання різноманітності та суттєвого ускладнення технічних систем [1, 25].

Зміст структурно-системного підходу можна представити як послідовність характерних етапів його реалізації [25]: "генетична концепція будови і розвитку системи" → "генетична класифікація породжувальних елементів" → "принципи структурної організації" → "закономірність розвитку" → "моделі еволюції" → "методологія спрямованого синтезу і прогнозування нових класів систем". У той самий час створення або удосконалення поліградієнтних магнітних сепараторів до сих пір відбувається переважно емпіричним шляхом. І хоча, як зазначено вище, поліградієнтні магнітні сепаратори мають широке поширення, узагальнюючі структурно-системні дослідження цього класу пристроїв до теперішнього часу не проводилися.

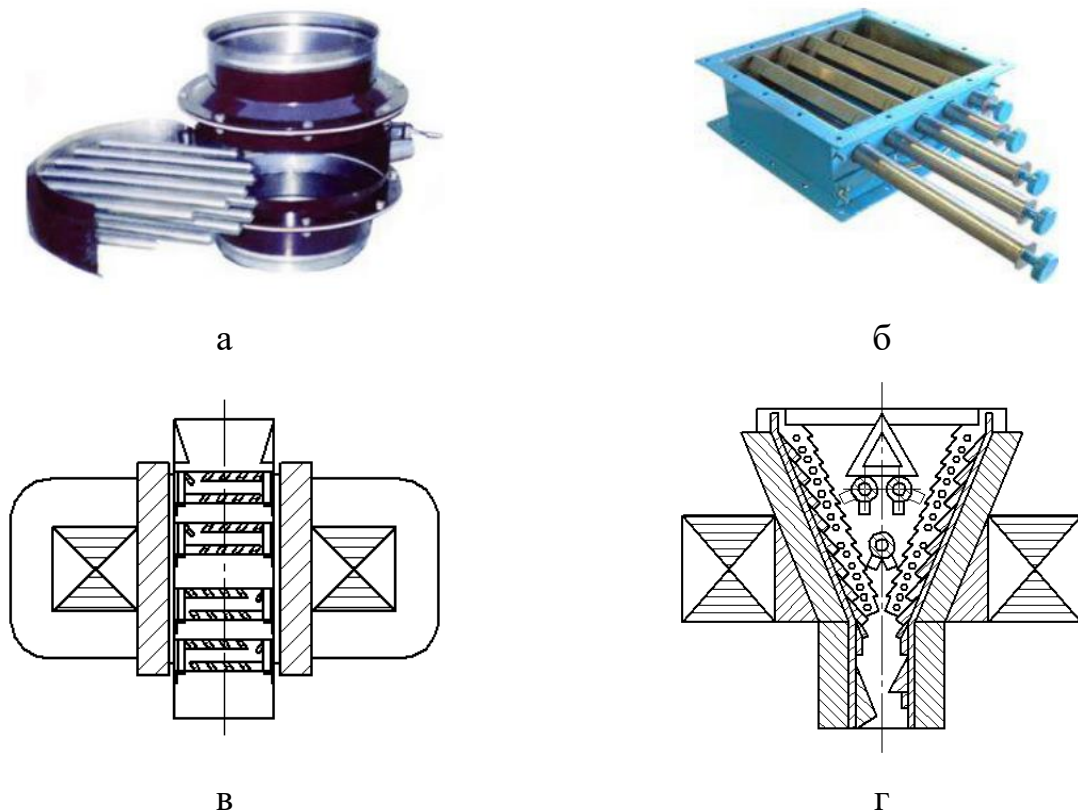


Рисунок 1.13 – Конструктивні різновиди магнітних сепараторів для очищення сипких речовин сільськогосподарського призначення:

поліградієнтні сепаратори на базі постійних магнітів [22] (а, б),

електромагнітний сепаратор УСС-4 [23] (в),

електромагнітний сепаратор УСС-5М [24] (г)

1.2 Методи аналізу магнітних полів у міжполюсних робочих зазорах матриць поліградієнтних сепараторів

При аналізі робочих магнітних полів сепараторів завдання формулюються відносно векторного магнітного потенціалу A (задається співвідношення $A = \text{rot} B$, B – вектор індукції магнітного поля). Для лінійних і ізотропних середовищ ($\mu_x = \mu_y = \mu_z = \mu = \text{const}$) рівняння магнітного поля відносно векторного магнітного потенціалу являє собою рівняння Пуассона

$$\nabla^2 A = -\mu_a J, \quad (1.1)$$

де μ_a – абсолютна магнітна проникність; \mathbf{J} – вектор щільності струму.

Оскільки в робочих зазорах поліградієнтних середовищ має місце умова відсутності електричних струмів, то для опису магнітного поля вводиться в розгляд скалярний магнітний потенціал φ_m , що задається співвідношенням [1] $\mathbf{H} = -grad\varphi_m = -\nabla\varphi_m$, де \mathbf{H} – вектор напруженості магнітного поля в розрахунковій області, що не зайнята електричними струмами. Використання скалярного магнітного потенціалу φ_m дозволяє звести задачу визначення розподілу магнітного поля в робочому просторі поліградієнтних середовищ магнітних сепараторів до вирішення рівняння Лапласа

$$\nabla^2\varphi_m = 0. \quad (1.2)$$

Після знаходження скалярного потенціалу φ_m розподіл напруженості магнітного поля визначається як $\mathbf{H} = -\nabla\varphi_m$, а магнітної індукції – $\mathbf{B} = \mu_0\mathbf{H}$ (μ_0 – магнітна постійна, що дорівнює $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м).

Для того щоб рівняння (1.1) та (1.2) мали єдине рішення, вони доповнюються граничними (крайовими) умовами. На замкнутій межі моделі можуть бути задані наступні граничні умови [1]:

1. Граничні умови першого роду (Дирихле) – на межі задається значення шуканої функції, тобто $\varphi_m = f_1(x, y, z)$, де точки з декартовими координатами

(x, y, z) знаходяться на межі. Умова $\varphi_m = 0$ є однорідною.

2. Граничні умови другого роду (Неймана). Для них задається зміна шуканої функції по нормалі n до межі, тобто $\partial\varphi_m / \partial n = f_2(x, y, z)$, де точки з координатами (x, y, z) знаходяться на межі. Умова $\partial\varphi_m / \partial n = 0$ є однорідною.

3. Граничні умови третього роду $\partial\varphi_m / \partial n + f_3(\varphi_m) = f_4(x, y, z)$, де точки з координатами (x, y, z) знаходяться на межі.

На границі моделі можуть бути задані змішані граничні умови, тобто поєднання вищенаведених умов першого, другого і третього роду.

При магнітній сепарації частинок домінуючою силою, яка відокремлює магнітні частинки від немагнітних в неоднорідному магнітному полі, є магнітна (пондеромоторна) сила F_m . На величину цієї сили впливає як силове поле сепаратора, так і фізичні властивості частинки [26]. На жаль, у науковій літературі питання врахування цих факторів залишаються дискусійними.

Для оцінки силового поля сепаратора в [27] пропонується використовувати векторну функцію $G(r)$ точки простору r , чисельно рівну магнітній силі, що діє на частинку одиничного об'єму з одиничною магнітною сприйнятливістю, розташовану в цій точці

$$G(r) = \nabla |B_0|^2 / 2\mu_0, \quad (1.3)$$

де B_0 – модуль магнітної індукції зовнішнього неоднорідного магнітного поля.

Функція $G(r)$ називається силовою функцією неоднорідного магнітного поля і є його внутрішньою характеристикою.

У практиці магнітної сепарації при розрахунку магнітної сили F_m , що діє на тіло, що вилучається об'ємом V , найбільш часто виходять з виразу [28, 29]

$$F_m = 0,5\mu_0\chi grad(H_0)^2 V, \quad (1.4)$$

де H_0 – модуль напруженості магнітного поля в середній точці об'єму феромагнітного тіла; χ – середня магнітна сприйнятливість феромагнітного тіла, що вилучається, що залежить від його форми, співвідношення розмірів і магнітної проникності речовини, яка визначається співвідношенням

$$M_{\text{ср}} = \chi(H_0)_{\text{ср}},$$

де $M_{\text{ср}}$, $(H_0)_{\text{ср}}$ – середні (для об'єму феромагнітного тіла) значення вектора намагніченості M і вектора напруженості H_0 . Відзначимо, що при цьому

неявно приймається рівність H_0 модулю вектора $(H_0)_{cp}$ і умова малої зміни функції $grad(H_0)^2$ всередині об'єму V .

Вираз (1.4) може бути легко перетворено до наступного розрахункового виразу

$$F_m = \mu_0 \chi H_0 grad(H_0) V, \quad (1.5)$$

з якого видно, що напрямок сили вилучення збігається з напрямком вектора градієнта модуля напруженості магнітного поля.

З вищевикладеного можна зробити висновок про обґрунтованість застосування в практиці магнітної сепарації традиційного способу для визначення питомої наведеної сили f_{np} магнітного поля як добутку напруженості магнітного поля сепаратора на її градієнт [1]

$$f_{np} = F_m / \mu_0 \chi V = H grad H. \quad (1.6)$$

При дослідженні силових магнітних полів питома наведена сила f_{np} може служити критерієм здатності магнітосепаруючих пристроїв до вилучення феромагнітних включень, а, отже, і критерієм їх ефективності.

Зі співвідношення (1.6) випливає, що для отримання більш високих значень сили вилучення f_{np} необхідно збільшувати напруженість H магнітного поля та її градієнт $grad H$. Збільшення інтенсивності H магнітного поля у сепараторах з електромагнітним збудженням має свою межу, обумовлену насиченням елементів магнітопроводу. Зростання H також пов'язане зі збільшенням споживаної потужності, що призводить до більш високої вартості пристроїв. У той же час збільшення значень $grad H$ можна досягти за рахунок оптимізації форми, геометричних розмірів і взаємного розташування елементів багатоконпонентної магнітної матриці сепаратора. Дослідження в цьому напрямку представляють найбільший практичний і теоретичний інтерес.

В даний час для вирішення рівнянь (1.1) та (1.2) розроблені різні аналітичні методи і методи чисельного розрахунку. Аналітичні методи

(наприклад, методи поділу змінних, Роговського та конформних перетворень) досить широко застосовуються при розрахунках магнітних полів за рахунок таких переваг [30-32]:

- значно менший в порівнянні з чисельними методами час розрахунку;
- наявність аналітичних виразів, що дозволяють безпосередньо досліджувати вплив параметрів магнітної системи на розподіл магнітного поля.

У той же час аналітичні методи мають обмеження на розмірність розв'язуваних завдань: розрахунок здійснюється переважно для двовимірних магнітних полів (відзначимо принципову можливість використання аналітичних методів і для тривимірних магнітних полів, наприклад в [33]). Застосування аналітичних методів пов'язане з прийняттям цілого ряду припущень, наприклад, про нескінченно велику магнітну проникність матеріалу магнітопроводу та полюсів (це дає рівність нулю тангенціальної складової вектора індукції магнітного поля для залізних поверхонь розрахункової області) та лінійності їх магнітних властивостей [34].

Розглянемо більш детально деякі з аналітичних методів розрахунку з точки зору можливості і доцільності їх використання для розрахунків і порівняльної оцінки характеристик магнітних полів в робочих міжполюсних зазорах матриць поліградієнтних сепараторів.

Метод розділення змінних – метод розв'язання диференціальних рівнянь, заснований на алгебраїчному перетворенні вихідного рівняння до рівності двох виразів, що залежать від різних незалежних змінних. У застосуванні до рівнянь в приватних похідних схема поділу змінних призводить до знаходження рішення у вигляді ряду або інтеграла Фур'є. У цьому випадку метод також називають методом Фур'є і методом стоячих хвиль [35].

Метод розділення змінних знайшов застосування для розрахунку магнітних потоків в обмотувальному вікні плоского електромагніту шляхом рішення відповідного рівняння Пуассона за умови рівномірного розподілу струму по площі обмотувального вікна [36].

В даний час при прямокутних межах, в яких досліджується магнітне поле, широко застосовується метод Роговського, що полягає в тому, що рішення шукається у вигляді ряду Фур'є і поширюється на поля розподілених струмів, що знаходяться в прямокутних межах. Метод дозволяє визначити поле в рівномірному зазорі при наявності в ньому обмотки зі струмом, розподіленої в вікнах трансформаторів і магнітних системах електричних апаратів, в пазах електричних машин тощо [37].

Слід зазначити, що навіть при досить простій прямокутній формі зазору при застосуванні даного методу виходять досить складні і громіздкі вирази, незручні для практичного застосування. Тому в задачу дослідження часто вводяться питання знаходження спрощеної методики розрахунку. Для цього, відшукавши точне розв'язання, спрощують його, а потім порівнюють результати спрощених рішень з точними, визначаючи по їх розбіжності межі застосування спрощених формул.

Застосування описаних вищеаналітичних методів для розрахунків магнітних полів в поліградієнтних сепараторах ускладнено, оскільки в робочому міжполюсному просторі матриць має місце умова відсутності електричних струмів.

На сьогоднішній день є достатньо розроблені способи використання конформного відображення практично для будь-якої реальної конфігурації границі розрахункової області [38-41]. Основна ідея методу конформних перетворень, який є практичним застосуванням теорії функції комплексної змінної, полягає в заміні складних полів простими полями, для яких рішення відомі.

Конформне відображення – це безперервне відображення, що зберігає форму нескінченно малих фігур і для якого виконується властивість сталості кутів і сталості розтягувань. Назва методу походить від латинського – *conformis* – подібний, безперервне відображення, що зберігає форму нескінченно малих фігур: наприклад, нескінченно мале коло залишається нескінченно малим колом; кути між лініями в точці їх перетину один з одним не змінюються і т.д.

Конформне перетворення відображає кожную точку $z = x + jy$ реального розрахункового поля, що описують комплексною площиною, в точку $w = u + jv$ іншої комплексної площині, з більш простою конфігурацією поля. Основна складність методу – знаходження виду функції для даної реальної полюсної системи. На практиці, при спробах знайти функцію конформного відображення, використовують або спеціальні каталоги конформних відображень [43], або шукають її за допомогою послідовних проб.

При узагальненому аналізі магнітних сепараторів і оцінці ефективності того чи іншого удосконалення магнітне поле в робочому міжполюсному зазорі часто розраховують саме методом конформного перетворення, оскільки магнітне поле (при виконанні певних умов) може вважатися плоскопаралельним [28, 30-32].

За допомогою методу конформних перетворень можуть бути розраховані значення напруженості H магнітного поля тільки для обмеженої кількості вихідних розрахункових областей. Для більшості конфігурацій магнітних систем відсутні аналітичні рішення. Тому метод конформних перетворень не може бути застосований для порівняльної оцінки напруженості поля в робочих міжполюсних зазорах поліградієнтних матриць, що відрізняються досить складною конфігурацією.

В останні роки з'явилися численні алгоритми і програми комп'ютерного розрахунку магнітного поля, засновані на використанні чисельних методів моделювання магнітних полів. На практиці широкого поширення набули такі чисельні методи, як метод скінченних різниць (МСР), метод скінченних елементів (МСЕ), метод граничних елементів (МГЕ) і метод інтегральних рівнянь (МІР).

Ідея методу скінченних різниць (методу сіток) відома давно, з відповідних праць Ейлера. Однак практичне застосування цього методу було тоді дуже обмежено через велику кількість ручних обчислень, пов'язаних з розмірністю одержуваних систем алгебраїчних рівнянь, на вирішення яких потрібні роки. В даний час, з появою швидкодіючих комп'ютерів, ситуація в корені змінилася. Цей метод став зручний для практичного використання і є

одним з найбільш ефективних при вирішенні різних завдань математичної фізики.

Основна ідея методу скінченних різниць для наближеного чисельного рішення крайової задачі для двовимірного диференційного рівняння в приватних похідних полягає в тому, що:

1) на площині в області A , в якій шукається рішення, будується сіткова область A_s (рис.1.14), що складається з однакових осередків розміром s (s – крок сітки) і є наближенням даної області A ;

2) задане диференційне рівняння в часткових похідних замінюється в вузлах сітки A_s відповідним скінченно-різницеvim аналогом;

3) з урахуванням граничних умов встановлюються значення шуканого рішення в граничних вузлах області A_s .

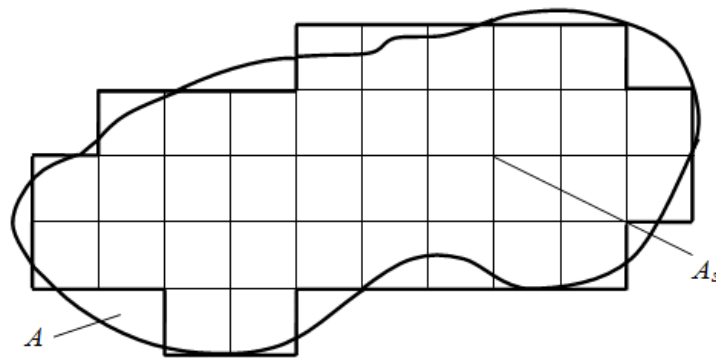


Рисунок 1.14 – Побудова сіткової області

Вирішуючи отриману систему скінченно-різницевих рівнянь алгебри, отримаємо значення шуканої функції у вузлах сітки A_s , тобто наближене чисельне рішення крайової задачі. Вибір сіткової області A_s залежить від конкретного завдання, але завжди треба прагнути до того, щоб контур сіткової області A_s найкращим чином апроксимував контур області A .

Метод скінченних елементів (МСЕ) – це чисельний метод рішення диференційних рівнянь в часткових похідних, а також інтегральних рівнянь, що використовують при розв’язанні завдань прикладної фізики. Метод широко використовується для вирішення завдань механіки деформованого твердого тіла, теплообміну, гідродинаміки і електродинаміки [41].

Основна ідея МСЕ заключається в тому, що:

1) будь-яку безперервну величину (наприклад, напруженість поля, температуру, тиск, переміщення) можна апроксимувати дискретною моделлю, яка будується на безлічі кусково-неперервних функцій, визначених на скінченному числі підобластей (елементів);

2) кусочно-безперервні функції визначаються за допомогою значень неперервної величини в скінченному числі точок даної області.

У загальному випадку алгоритм вирішення задач розрахунку магнітних полів сепараторів різних типів за допомогою МСЕ включає в себе наступні етапи:

1. Ідеалізація середовища розрахункової області, тобто представлення її скінченим числом елементів певного виду. У двовимірному випадку в якості елементів зазвичай вибирають трикутники, в тривимірному – призми.

2. Визначення апроксимуючих функцій елементів.

3. Рішення об'єднаної системи алгебраїчних рівнянь і розрахунок характеристик магнітного поля у вузлах області.

Варіаційний підхід, який використовується в МСЕ, призводить до поліпшеного наближення граничних умов на межі поділу середовищ з різною магнітною проникністю. Умови рівності нормальної складової індукції і тангенціальної складової напруженості поля на межах розділу середовищ в МСЕ створюються автоматично.

При вирішенні завдань аналізу магнітних полів сепараторів досить високу ефективність показав метод скінченних елементів.

В роботі [15] виконаний розрахунок електромагнітного поля та моментів з урахуванням магнітних властивостей матеріалів та параметрів моделі за допомогою методу скінченних елементів та відповідних програмних комплексів. Авторами показано, що конфігурація магнітної системи істотно впливає на моментні характеристики електродвигуна.

У статті [27] за допомогою методів комп'ютерного моделювання показана можливість локалізації магнітних наночастинок у заданій області та керування їхнім рухом у потоці рідини під дією зовнішнього високоградієнтного магнітного поля. Для створення такого поля розроблено

магнітну систему на основі постійних магнітів і виконано чисельний розрахунок розподілу тривимірного магнітного поля і магнітної сили в активній зоні системи.

Метод граничних елементів [22] – це метод вирішення крайових задач для диференціальних рівнянь в часткових похідних, що з'явився в результаті поєднання ідей теорії потенціалу з методами сучасної теорії апроксимації. МГЕ, з точки зору теорії апроксимації, має багато спільних рис з методом скінченних елементів, але відрізняється від нього істотною перевагою: дискретизація здійснюється як правило, не всередині області, в якій шукається рішення, а на її межі.

У роботі [33] розглянуто переваги методу інтегральних рівнянь (МІР), над методами скінчених елементів чи скінчених різниць, основними з яких є:

- чисельно-аналітичний характер методу;
- можливість врахування періодичної структури в ядрі інтегрального рівняння;
- комплексний потенціал поля і його силові характеристики виражаються через класичні двоякоперіодичні (еліптичні) функції;
- задача формулюється щодо фізичного вектора магнітного стану довільного середовища – вектора намагніченості, представлення якого у вигляді функції комплексного змінного дозволяє використовувати основні оператори теорії загальнених аналітичних функцій;
- розрахункові рівняння формулюються щодо локального розподілу ферромагнітних тіл (фаз гетерогенних структур) в основному паралелограмі періодів;
- для трикутних комірок області дискретизації можна отримати аналітичні вирази для характеристик поля в довільній точці простору, що забезпечує підвищення точності обчислень;
- відсутня необхідність задання граничних умов при довільних періодах решітки та складній геометрії елементів фаз гетерогенної структури.

Також для розрахунку магнітних характеристик сепараторів знайшли застосування методи експериментального вивчення різних фізичних об'єктів

або явищ, засновані на використанні моделі, що має ту ж фізичну природу, що і досліджуваний об'єкт (фізичне моделювання). Метод полягає в створенні лабораторної фізичної моделі явища в зменшених масштабах і проведенні експериментів на цій моделі. Висновки і дані, отримані в цих експериментах, поширюються потім на явище в реальних масштабах.

У статті [34] виконано моделювання та дослідження електротехнічної системи регульованої сепарації немагнітних матеріалів з використанням магнітної рідини. Розраховані сили, які діють на немагнітні тіла в магнітній рідині, які знаходяться у неоднородному магнітному полі. Були виконані експериментальні дослідження на фізичній моделі сепаратора.

У роботі [35] розглянутий комплексний підхід до дослідження магнітного поля електромагніту постійного струму з розщепленими полюсами і полюсними наконечниками. Були проведені експериментальні дослідження магнітного поля на дослідному зразку електромагніта з використанням цифрового мілітеслометра з давачем Холла та доповнені результатами аналітичного та чисельного розрахунку магнітного поля в програмі Elcut 6.0 (професійна версія).

У роботі [36] було досліджене магнітне поле, що створюється магнітною системою в її робочій зоні, і вплив вирізу в зовнішньому кільцевому полюсі на значення напруженості магнітного поля і магнітної сили в зоні розвантаження за допомогою експериментальних досліджень. Для цього була розроблена і виготовлена фізична модель електромагнітної шайби в масштабі лінійних розмірів 1:5.

Таким чином, для розрахунку магнітних характеристик поліградієнтних сепараторів знайшли застосування аналітичні, чисельні та експериментальні методи. В безпосередній інженерній практиці розрахунків магнітосепаруючих систем отримали переважне поширення чисельні методи, перш за все, МСЕ, для якого відомі досить доступні програмні продукти, що дозволяють реалізувати його на персональних комп'ютерах. Можливість проведення різноманітних розрахунків та порівняльного аналізу при

дослідженні поліградієнтних матриць різних конфігурацій також є безперечною перевагою чисельних методів.

РОЗДІЛ 2

ОГЛЯД ІСНУЮЧОГО ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ РОЗРАХУНКІВ МАГНІТНИХ ПОЛІВ МЕТОДОМ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Для розрахунків магнітних полів електромеханічних пристроїв знайшли застосування наступні скінченно-елементні програмні продукти: COMSOL Multiphysics (<http://www.comsol.com>), ELCUT (<http://elcut.ru>), ANSYS MAXWELL (<http://www.ansys.com>), FEMLAB (http://matlab.exponenta.ru/femlab/book6/3_2_1.php), Flux (<http://magsoftflux.com/products/motor-cad>), INFOLITICA (<http://www.infolytica.com>), які дозволяють робити розрахунки як двовимірних, так й тривимірних магнітних полів.

2.1 Програмне забезпечення ANSYS MAXWELL

Програмний комплекс ANSYS MAXWELL вже протягом більш ніж тридцяти років є однією з найбільш потужних і найпопулярнішою скінченно-елементною розрахунковою системою в світі (понад мільйон лише легальних користувачів в 117 країнах світу, близько 98 тис. комерційних (промислових) інсталяцій, близько 128 тис. "університетських" (некомерційних, дослідницьких) інсталяцій). У число клієнтів компанії ANSYS входять практично всі найбільші промислові корпорації світу: BMW, Boeing, Caterpillar, Daimler-Chrysler, FIAT, Ford, General Electric, Lockheed Martin, Mitsubishi, Shell, Volkswagen-Audi та ін. Компанія першою реалізувала рішення пов'язаних багатодисциплінарних завдань, включила власну мову програмування APDL. Особливістю програми є файлова сумісність всієї лінійки продуктів ANSYS для всіх підтримуваних платформ. Універсальність програми дозволяє використовувати одну й ту ж модель для вирішення таких

пов'язаних завдань, як міцність при тепловому навантаженні, вплив магнітних полів на міцність конструкції, тепломасоперенесення в електромагнітному полі. Можливості постпроцесингу ANSYS дозволяють детально вивчити поведінку виробу при навантаженні. Користувач може переглядати результати як в загальному, для всієї конструкції, так і детально – на рівні окремого шару [37]. Відмінною особливістю ANSYS Composite Prep Post є наявність унікальних алгоритмів для моделювання складкоутворення (драпірування), що дозволяє враховувати в розрахунку орієнтацію волокон в шарах, навіть в разі складної геометричної форми виробу [38]. Основні недоліки: висока вартість, складність в освоєнні.

У статті [39] за допомогою програми ANSYS досліджено вплив форми перетину елементів магнітного середовища на розподіл індукції і градієнта магнітного поля поліградієнтного сепаратора. У цій роботі встановлено, що найбільш сильне і неоднорідне магнітне поле забезпечує поліградієнтне середовище на основі трикутних елементів.

Програмний комплекс ANSYS для вирішення завдань низькочастотного електромагнетизму (електродвигуни, реле, електромагніти тощо) містить продукти ANSYS Emag і ANSYS Multiphysics.

ANSYS Emag – це додатковий модуль до ANSYS Mechanical, який використовується при вирішенні задач низькочастотних електромагнітних полів, пов'язаних з завданнями механіки, наприклад, при розрахунку індукційного нагріву, мікроелектромеханічних систем, при вирішенні завдань відстеження заряджених частинок.

ANSYS Multiphysics включає в себе всі можливості модуля ANSYS Emag, а також вирішувач для високочастотних електромагнітних полів і багато інших можливостей для вирішення завдань з інших областей фізики в рамках середовища ANSYS Workbench. ANSYS Multiphysics – ідеальний інструмент для виконання сполученого аналізу електромеханічних пристроїв і рішення задач електромагнітно-теплової взаємодії.

2.2 Програмне забезпечення COMSOL Multiphysics

COMSOL Multiphysics (колишній Femlab) – пакет моделювання для розв’язання задачі з області електромагнетизму, теорії пружності, динаміки рідин і газів та хімічної газодинаміки [40]. Представлений пакет дає можливість вирішити завдання як в математичній постановці у вигляді системи рівнянь, так і в фізичному, шляхом вибору фізичної моделі (наприклад, моделі процесу дифузії). Безумовно в будь-якому випадку буде вирішуватися система рівнянь, і відмінність полягає лише в можливості використовувати фізичні системи одиниць і фізичну термінологію. У так званому фізичному режимі роботи можна використовувати заздалегідь визначені рівняння для більшості явищ, що мають місце в науці і техніці, таких як перенесення тепла і електрики, теорія пружності, дифузія, поширення хвиль і потік рідини. Пакет COMSOL Multiphysics дозволяє моделювати практично всі фізичні процеси, які описуються приватними диференціальними рівняннями. Програма містить різні вирішувачі, які допоможуть швидко впоратися навіть з найскладнішими завданнями, а проста структура додатка забезпечує простоту і гнучкість використання. Сильною стороною програми є її можливість одночасно враховувати різні види фізичних взаємодій. Додаткові модулі дозволяють реалізувати моделювання процесів переносу маси і енергії з урахуванням кінетики хімічних реакцій (модуль `chemicalengineering`), руху рідин і газів в пористих середовищах і під землею (модуль `earthscience`), електромагнітних взаємодій (модуль `electromagnetics`) і процесів теплопередачі (`heattransfer`), а також забезпечити вирішення проектних завдань в області мікроелектромеханіки (MEMS) і аналізу структурних деформацій (`structuralmechanics`). Також потрібно згадати й інші продукти: розширення `ReactionEngineeringLab™`, призначене для моделювання хімічних систем з використанням формул хімічних реакцій, і сумісну з системою MATLAB мову програмування `COMSOL Script™` для роботи з моделями COMSOL Multiphysics. Програмні продукти COMSOL випускаються у версіях для платформ Windows, Linux,

Solaris Macintosh. Бібліотека MaterialLibrary містить інформацію про дві з половиною тисячі матеріалів, включаючи хімічні елементи, корисні копалини, гірські породи, ґрунт, метали, оксиди, а також теплоізоляційні, напівпровідникові і оптичні матеріали. Для кожного з матеріалів передбачено понад два десятки властивостей, таких як пружні, термомеханічні або електромагнітні. Крім того, в системі передбачена можливість імпорту характеристик матеріалів з бази даних матеріалів величезного числа постачальників.

В роботі [41] була створена тривимірна математична модель, і проаналізовано з використанням COMSOL Multiphysics 3.3 вплив зміни трубчастих дротів високоградієнтного магнітного сепаратора на ефективність захоплення системи.

2.3 Програмне забезпечення Infolytica

Гарні результати при моделюванні електромагнітних полів показав пакет моделювання Infolytica. Програмне забезпечення Infolytica включає в себе як модулі загального призначення для 2D та 3D-моделювання, так і спеціалізовані інструменти. За допомогою простого у використанні і точного програмного забезпечення можна практично моделювати прості і складні електромагнітні і електромеханічні пристрої [22].

Основним модулем програми, який дозволяє розрахувати будь-яку конфігурацію магнітної системи, як в 2D, так й в 3D є програмний модуль MagNet. Він використовується для проектування двигунів, датчиків, трансформаторів, виконавчих механізмів, соленоїдів або будь-якого компонента з постійними магнітами або котушками.

Основні переваги для ефективного проектування: простота використання та інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, який об'єднує 2D/3D середовища моделювання; імпорт широкого спектру форматів файлів САПР; часовий аналіз з урахуванням лінійного, обертального або довільного рухів;

моделювання рухомих частин з урахуванням 6 ступенів свободи; моделювання декількох об'єктів, які одночасно рухаються.

В роботі [13] наведено дані численних досліджень та результати моделювання циліндричного магнітного редуктора і електрогенератора з постійними магнітами. Показано, що застосування редуктора на постійних магнітах дозволяє підвищити частоту обертання електрогенератора заданої потужності і, тим самим, зменшити його розміри і масу. Розрахунок магнітного поля і характеристик циліндричного магнітного редуктора і електрогенераторів виконаний в пакетах Magnet і MotorSolve компанії Infolytica.

В роботі [14] наведено результати чисельного дослідження впливу кількості та висоти пазів статора, а також конфігурації постійних магнітів в роторі на характеристики електродвигунів для міського електробуса. Розрахунок робочих характеристик виконано в програмному пакеті Infolytica MotorSolve.

У статті [15] наведені результати моделювання електродвигуна з постійними магнітами. Досліджено чотири типи електродвигунів з різною конфігурацією постійних магнітів в роторі, виконаний розрахунок електромагнітного моменту і робочих характеристик в програмних пакетах Magnet і MotorSolve, наданих компанією Infolytica.

Всі вищеописані програмні пакети тривимірного моделювання важкодоступні через свою дорожнечу. При розрахунках магнітних полів електромеханічних пристроїв зокрема, електричних машин класичної конструкції, як свідчить досвід проектування [16, 17], тривимірні розрахунки виявляються надмірно трудомісткими і тривалими і не виправдовують витрат в порівнянні з двовимірними розрахунками, тим більше, що не дають адекватного уточнення результатів. Тому тривимірні магнітні поля розраховують переважно для специфічних конструкцій електромеханічних пристроїв або при вирішенні спеціальних завдань, наприклад, при розрахунках електромагнітних полів в торцевих зонах електричних машин.

2.3 Програмне забезпечення для розрахунку двовимірних плоскопаралельних і плоскомеридіанних електромагнітних, теплових і механічних полів

У зв'язку з цим при розрахунках двовимірних плоскопаралельних і плоскомеридіанних електромагнітних, теплових і механічних полів методом МСЕ знайшли застосування такі програми, як ELCUT, QuickField, FEMM. Вони призначені для розв'язання завдань електростатики, лінійної і нелінійної магнітостатики, лінійної і нелінійної теплопровідності, напружено-деформованого стану механічних конструкцій, завдань протікання електричного струму та розрахунку вихрових струмів в синусоїдальному магнітному полі.

З програм, орієнтованих на рішення польових задач МСЕ в двовимірних областях, привертає увагу програма FEMM (FiniteElementMethodMagnetics) [10], розміщена на загальнодоступному сайті [http://femm.berlios/de](http://femm.berlios.de). Рівень реалізації програми і інтерфейсу такі, що користувачеві досить найзагальніших уявлень про МСЕ і можна обійтися без знання алгоритмічних мов програмування. Ще однією перевагою пакета FEMM є можливість програмної автоматизації побудови розрахункових моделей, організації розрахунків і видачі розрахункової інформації на основі використання вбудованого в цю програму скрипту Lua. Також пакет FEMM можна використовувати не тільки для розрахунку магнітних полів, а й для інших застосувань, наприклад для розрахунку вихрових струмів.

FEMM (FiniteElementMethodMagnetics) – це пакет програм для чисельного рішення польових задач в двовимірних областях, що виділяються в пристроях з плоскопаралельною або аксіально-осьовою симетрією. Конкретно, на основі МСЕ забезпечені розрахунки магнітостатичних полів і гармонійно змінних електромагнітних полів в лінійних і нелінійних середовищах, а також електростатичних полів в лінійних середовищах.

FEMM підрозділяється на 3 основні частини:

1. Інтерактивна оболонка Femm.exe є сполучним пакетом передрозрахункових і післярозрахункових операцій. Тут забезпечуються геометричні побудови розглянутих об'єктів в декартових або полярних координатах. Геометрія досліджуваного об'єкта може бути імпортована в FEMM ще й з інших графічних пакетів (наприклад, AutoCAD або CorelDraw).

Оболонка забезпечує завдання властивостей матеріалів, в тому числі кривих намагнічування феромагнетиків, а також граничних умов на зовнішніх і внутрішніх межах в сформованій області. Це умови Діріхле, Неймана, змішані умови (комбінація двох попередніх), умови на межі зі скін-ефектом, умови періодичності і антиперіодичності, спеціальні умови на зовнішніх незамкнених межах.

Отримані рішення відображаються на тлі області розрахунку (за вибором) силовими лініями, у векторній формі, тонуванням за рівнями поля. Для заданих ліній будуються графіки, що характеризують розподіл щільності поля. Можна переглядати параметри поля в будь-яких точках області, а також оцінювати ряд інтегральних величин в певних її зонах: магнітні потоки, сили, індуктивності, енергію, магнітні напруги та ін.

2. Програма triangle.exe розбиває сформовану область рішення на велику кількість трикутних елементів, що відповідає суті МСЕ. Поряд з внутрішньо обумовленим характером триангуляції області, можуть бути реалізовані і побажання користувача щодо необхідного ступеня дискретизації локальних підобластей, а також допустимої форми трикутників.

3. Програми fkern.exe для магнітних tabelasolv для електростатичних полів пов'язують завдання, що вирішується з відповідною математичною моделлю на основі системи рівнянь Максвелла і вирішують цю систему в числовій формі з урахуванням заданих властивостей матеріалів і граничних умов.

В інтерактивну оболонку інтегровано алгоритмічну мову Lua, за допомогою якої можна програмним шляхом (на відміну від ручного) формувати, коректувати і аналізувати геометрію області розрахунку, а також

організувати видачу та оцінку результатів розрахунків, вводячи необхідні рівняння або математичні вирази.

Програма FEMM активно використовується в навчальній роботі та науково-дослідній діяльності кафедри електричних машин НТУ «Харківський політехнічний інститут». Так, в роботі [11] розглянуті загальні можливості і проблеми використання програми FEMM для розрахунку магнітного поля електричних машин. Проведено тестування програми на прикладі електричної машини складної конструкції за допомогою зіставлення розрахункових і експериментальних даних. Запропоновано практичний варіант подолання однієї з виявлених проблем розрахунку магнітного поля, що пов'язано з необхідністю врахування різнорідних осьових довжин ділянок магнітопроводу електричних машин.

Програма QuickField являє собою англomовну версію ELCUT.

Програмний комплекс ELCUT (розробник – виробничий кооператив «ТОР») – це потужний сучасний комплекс інженерного моделювання електромагнітних завдань МСЕ, що дозволяє вирішувати плоско паралельні та осесиметричні класи двовимірних задач. У комплексі використаний принцип візуального програмування при цьому в графічному редакторі будується геометрична модель досліджуваного пристрою, що дозволяє скоротити часові витрати на програмування при вирішенні польових задач [12, 13].

Переваги автоматизації в ELCUT для кожного користувача:

– Автоматизація ітераційних обчислень, наприклад: розрахунки з послідовно зростаючими параметрами.

– Автоматизація та визначення параметрично заданої геометрії для деяких видів завдань, наприклад: параметричний опис геометрії електричних машин з використанням стандартних геометричних примітивів (зазори, котушки, ядра) може полегшити побудову моделі в ELCUT.

– Автоматизація обчислень певних величин, наприклад: обчислення індукції і втрат електричної машини або ємності системи провідників в багатошаровій друкованій платі.

– Використання польового моделювання за допомогою ELCUT як частини рішення ширшого завдання, наприклад: оптимізація масо-габаритних параметрів магнітопроводу зі збереженням необхідного магнітного опору.

– Використання ELCUT разом з MS Office, MatLab, AutoCAD та іншими засобами для вирішення конкретних завдань в загальному середовищі.

В роботі [24] моделювання магнітостатики здійснювалося в ліцензійному програмному пакеті ELCUT 5.6. Наведено результати порівняльного розрахунку магнітного поля та електромагнітного моменту електрогенераторів з постійними магнітами і явно вираженими полюсами на статорі. При цьому досліджуються два типи конструктивних модифікацій ротора – з тангенціальним і радіальним намагнічуванням постійних магнітів.

У статті [25] розглянуті фізичні об'єкти і складені для них математичні моделі, проведено експеримент і чисельне моделювання при коректному визначенні граничних умов. Аналіз отриманих результатів підтвердив достовірність і точність математичного моделювання та області застосування пакетів ELCUT 5.6 і ANSYS 10.0 (професійна версія).

В роботі [26] проведено чисельне дослідження впливу конфігурації магнітної системи електричних машин з постійними магнітами і зубчастопазовим статором на пульсації електромагнітного моменту. Показано, що моделювання ЕМ за допомогою пакету ELCUT 5.6 на стадії проекту дозволяє оптимізувати геометрію магнітопроводу і домагатися кращих показників.

Починаючи з версії 6.0 ELCUT більше не є чисто двовимірним пакетом. У ELCUT 6.0 з'явилася 3-вимірна електростатика. ELCUT 6.1 вже містить імпорт довільної 3D геометрії з комерційно розповсюджуваних або безкоштовних CAD-програм. У ELCUT 6.2 можливості тривимірних розрахунків доповнені новими типами задач: розрахунком електричного поля постійних струмів в провідному середовищі та рішенням встановленої задачі теплопровідності [28].

Основні переваги даного програмного комплексу: дружній призначений для користувача інтерфейс, простота опису моделей, широкі аналітичні можливості комплексу і високий ступінь автоматизації всіх операцій. Редактор моделі дозволяє достатньо швидко описати і створити модель досліджуваних об'єктів. Крім того, фрагменти моделі можна імпортувати з системи AutoCAD або інших систем проектування. Можна обчислювати різні інтегральні величини на заданих користувачем лініях, поверхнях або об'ємах. Недоліки: використовується один вид скінченного елемента, трикутник (немає вибору між типами скінченних елементів), види аналізу задач механіки і теплопередачі обмежені по функціональності і є допоміжними [32].

Серед розглянутих програм ELCUT, на перший погляд, має обмежені можливості в порівнянні з іншими програмами. Однак деякі обмеження досить легко долаються. Найбільш серйозним недоліком ELCUT є те, що в цій програмі на сьогоднішній день відсутня можливість одночасного вирішення польових задач (наприклад, електромагнітної і теплової). Це не дозволяє автоматично враховувати зміну властивостей матеріалів в процесі розрахунку. Перевагами ELCUT є також розвинені можливості по обробці результатів розрахунку (розрахунок індуктивностей, ємностей, зусиль тощо).

Всі розглянуті пакети є універсальними (призначені для вирішення різних типів польових задач), дозволяють вирішувати лінійні і нелінійні задачі і мають приблизно однакову точність і можливості. Порівняльний аналіз програмних пакетів представлений в табл. 2.1 [37].

Таблиця 2.1 – Порівняльний аналіз скінченно-елементного програмного забезпечення

№	Можливості пакету	ANSYS	COMSOL	FEMM	Infolytica	ELCUT
1		<i>Вид аналізу:</i>				
	Електромагнітний	так	так	так	так	так
	Тепловий	так	так	так	так	так
	Гідрогазодинамічний	так	так	так	так	ні

Подовження табл. 2.1

№	Можливості пакету	ANSYS	COMSOL	FEMM	Infolytica	ELCUT
	Механічний	так	так	так	так	так
	Сумісний (мультифізичний)	так	так	так	так	тільки послідовний
2		<i>Вид розрахунку:</i>				
	Статичний	так	так	так	так	так
	Динамічний	так	так	так	так	тільки для теплових задач
3		<i>Геометрична модель:</i>				
	Двовимірна	так	так	так	так	так
	Осесиметрична	так	так	так	так	так
	Тривимірна	так	так	так	так	так
4	Вибір типу скінченного елемента	так	ні	ні	так	ні
5	Можливість моделювання зовнішніх електричних ланцюгів	так	так (експорт в Simu-link)	так (експорт в Simu-link)	так	ні

Таким чином, з урахуванням викладеного вище, для проведення подальших досліджень доцільним є використання програмного продукту ELCUT версії 5.6.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА РОЗРАХУНКОВИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ЧИСЕЛЬНО-ПОЛЬОВОГО АНАЛІЗУ

3.1 Математична модель стаціонарного магнітного поля

Магнітне поле в робочій зоні поліградієнтного сепаратора описується системою рівнянь Максвелла у магнітостатичному наближенні у відсутності електричного струму, доповненою матеріальними рівняннями, що визначають фізичні властивості матеріалів [27],

$$\begin{aligned}\nabla \times \mathbf{H} &= 0, \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0,\end{aligned}\tag{3.1}$$

де \mathbf{H} – вектор напруженості магнітного поля; \mathbf{B} – вектор магнітної індукції.

Рівняння, що описує стан феромагнітних елементів та оточуючого середовища (повітря), має вигляд

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H},\tag{3.2}$$

де μ_r - відносна магнітна проникність феромагнітного матеріалу та повітря ($\mu_r = 1$). В загальному випадку магнітна проникність μ_r феромагнітного матеріалу залежить від напруженості магнітного поля \mathbf{H} . При розв'язанні задачі у лінійній постановці залежність магнітної проникності μ_r від напруженості магнітного поля \mathbf{H} не враховується.

При аналізі робочих магнітних полів сепараторів завдання вирішується відносного векторного магнітного потенціалу \mathbf{A} (задається співвідношення $\mathbf{A} = \text{rot} \mathbf{B}$). Тому стаціонарна крайова задача, що підлягає розв'язанню відносно векторного магнітного потенціалу \mathbf{A} , набуває виду

$$\nabla^2 A = 0. \quad (3.3)$$

Рівняння (3.3) з відповідними граничними умовами розв'язується методом скінченних елементів за допомогою програми ELCUT 5.6, об'єкти якої забезпечують створення нової задачі, опис її геометричної моделі, побудову сітки скінченних елементів, розв'язання задачі та аналіз її результатів в тому вигляді, як це робиться інтерактивно за допомогою графічного призначеного для користувача інтерфейсу. Як відзначено вище, основною перевагою даного програмного продукту перед аналогами є простота побудови геометричних моделей, зручний інтерфейс, можливість використання готових бібліотек магнітних і немагнітних матеріалів, досить висока точність розрахунків.

3.2 Розробка розрахункових моделей для чисельно-польового аналізу

На рис. 3.1 представлені розрахункові моделі досліджуваних робочих зон, що відповідають поставленій задачі. Нагадаємо, що синтезовані структури (S_1, S_3, S_4, S_5) отримані з використанням наступних операцій симетрії [10]: S_1 – дзеркальної симетрії щодо осі OY ; S_3 – дзеркальної симетрії щодо осей OX і OY ; S_4 – дзеркальної симетрії щодо осей OX і OY з ковзанням; S_5 – центральної симетрії. Розрахункові моделі робочих міжполюсних зон, як свідчить рис. 3.1, відрізняються повторюваністю характерних областей.

Основні геометричні розміри робочих зон, які варіювалися при дослідженні, показані на рис. 3.2 на прикладі структури S_3 . Тут прийняті такі позначення: δ – міжполюсний робочий проміжок, що відповідає мінімальній відстані між пластинами; α – кут при вершині виступу полюса; b – основа виступу полюса; a – робоча ширина матриці.

При проведенні досліджень розподілу магнітного поля в повітряних зазорах матриць поліградієнтних сепараторів використані геометричні співвідношення між елементами магнітної системи [13]. Задавалися наступні відношення для досліджуваних областей: $X_1 = b/a$ та $X_2 = \alpha$ [13]. У цьому

випадку результати моделювання мають вигляд залежностей досліджуваних характеристик від відносних величин, що характеризують геометрію полюсів магнітної системи.

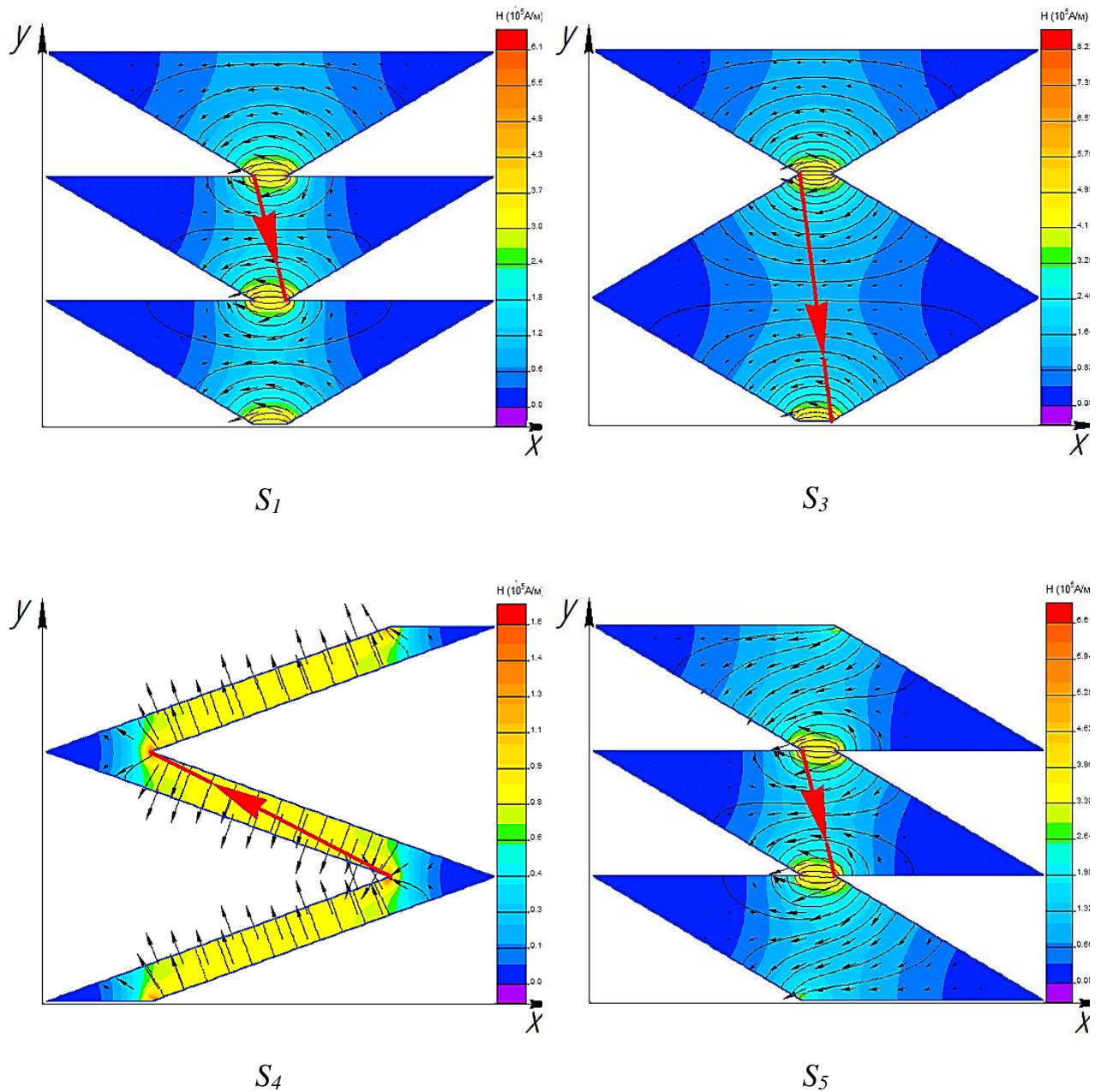


Рисунок 3.1 – Розрахункові моделі робочих зон досліджуваних структур

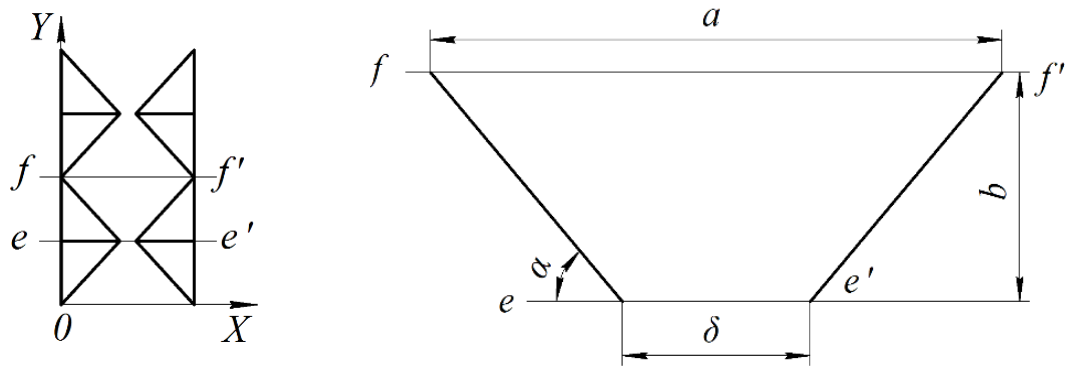


Рисунок 3.2 – Основні геометричні розміри робочої зони
на прикладі структури S_3

Діапазони варіювання відношень X_1 та X_2 , які мають практичний інтерес, на першому етапі досліджень склали: $X_1=b/a=0,2\dots0,4$; $X_2=\alpha=0,22\pi\dots0,44\pi$. Приймались такі фіксовані значення геометричних співвідношень: $X_1=b/a=0,2$; $0,3$; $0,4$ та $X_2=\alpha=0,22\pi$; $0,28\pi$; $0,33\pi$; $0,39\pi$; $0,44\pi$. Робоча ширина матриці a є незмінним параметром (приймалася по базовій конструкції сепаратора, $a=180$ мм). Відповідно, для всіх можливих попарних комбінацій зазначених відношень було розроблено 60 комп'ютерних моделей робочих зон.

Двовимірні геометричні моделі робочих міжполюсних зон для досліджуваних структурних композицій (S_1 , S_3 , S_4 , S_5) поліградієнтних середовищ розроблені з урахуванням наступних припущень та обмежень [13]:

1. Магнітне поле в межах робочих міжполюсних зон є плоскопаралельним.

2. Вплив тривимірності магнітного поля для всіх точок робочої зони однаковий і залежить тільки від товщини пластин і відстані між пластинами в матриці.

3. В розрахункових моделях робочих міжполюсних зон враховуються три характерні періодично повторювані області.

4. Сталь полюсів має нескінченну магнітну проникність (ідеальне залізо).

5. Вплив на розподіл поля геометрії осердь і котушок, що намагнічують, незначний, і їм можна знехтувати.

Припущення про нескінченну магнітну проникність сталі полюсів з достатньою точністю справедливо при невеликих значеннях магнітної індукції в сталі полюсів, як це має місце в дійсності. Магнітна система електромагнітного сепаратора, включаючи пластини матриці, виготовлена зі сталі марки Ст. 3. Насичення матеріалу магнітопроводу для вказаної марки сталі починається при магнітній індукції $B > 1$ Тл [19]. Експериментальні дослідження базової конструкції сепаратора показали, що максимальне значення магнітної індукції B в сталі полюсів в робочому режимі при струмі в обмотках $I = 3,2$ А не перевищує 0,95 Тл [10]. При такому значенні магнітної індукції матеріал полюсів є ненасиченим, а магнітна проникність сталі приймає постійне та достатньо велике значення $\mu = 995$ [10].

При описі фізичних властивостей задачі задавалася відносна магнітна проникність повітря $\mu_r = 1$.

В ELCUT 5.6 існує декілька способів задання джерел магнітного поля. Поля можуть обчислюватися або з джерел (струмів або постійних магнітів), або граничних умов (симетрія та зовнішні однорідні поля). При розв'язанні поставленої задачі магнітне поле задавалося з використанням двох граничних умов у напрямку осі OY щодо векторного магнітного потенціалу: $A = 0$ Вб/м та $A = \text{const}$. Аналогічний підхід до задання джерел поля використовується, наприклад, для розрахунків магнітних полів розсіювання намагнічених деталей в магнітній дефектоскопії [12] та утримаюючих магнітних полів магніторідинних герметизаторів [12].

Слід зазначити, що формування граничних умов є важливим етапом розрахунків магнітного поля, від правильного визначення яких залежить можливість отримання реального, з фізичної точки зору, результату. Розглянемо задання граничних умов на прикладі розрахункової області для структури S_4 , що використовується в базовій конструкції електромагнітного сепаратора (рис. 3.3).

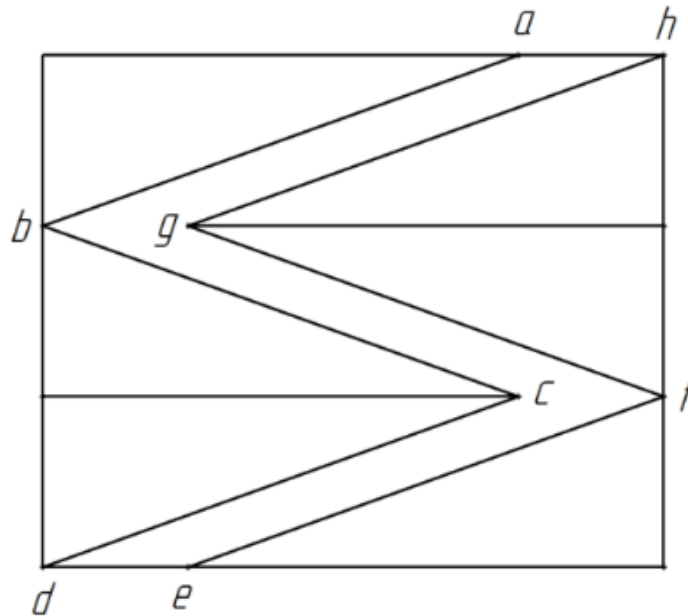


Рисунок 3.3 – Розрахункова модель робочої зони для структури S_4

Розрахункова область для структури S_4 (рис. 3.3) обмежена контуром $abcdefgh$, для якого задавалися наступні граничні умови:

ah – силова лінія, для якої векторний магнітний потенціал $A_{ah}=0$ (умова Діріхле);

de – силова лінія, для якої також задається гранична умова Діріхле, що визначає поведінку нормальної складової індукції на межі. На ділянці de значення векторного магнітного потенціалу є постійним $A_{de}=const$. При цьому слід зауважити, що векторний магнітний потенціал для плоскопаралельного магнітного поля має тільки одну складову у напрямку, який є перпендикулярним до площини рисунку. Тому векторний магнітний потенціал A може розглядатися як скалярна величина. Особливості визначення векторного магнітного потенціалу A на ділянці de наведені в розділі 4;

ab, bc, cd, ef, fg, gh – границі, що відповідають ідеальним сталевим поверхням, для яких $H_t=0$ (однорідна умова Неймана). Така гранична умова є природньою, так як встановлюється за умовчанням на всіх тих сторонах, що утворюють зовнішню межу, де явно не вказана інша гранична умова.

Підтвердження достовірності результатів чисельно-польового аналізу, отриманих за допомогою прийнятих вище двовимірних розрахункових

моделей, було здійснено шляхом вибіркового порівняння результатів аналізу з результатами фізичного та комп'ютерного 3D-моделювання електромагнітного сепаратора (наведені у Розділі 4).

Основним питанням подальших досліджень є вибір з множини (S_1, S_3, S_4, S_5) синтезованих структур таких, для яких магнітне поле в робочій зоні відрізняється досить високим ступенем неоднорідності.

РОЗДІЛ 4

ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ СТРУКТУРНИХ ВАРІАНТІВ МАТРИЦІ ПОЛІГРАДІЄНТНОГО СЕПАРАТОРА

4.1 Показники для оцінки ступеня неоднорідності магнітного поля

При розгляді магнітних полів в робочих зазорах досліджуваних структур виникає питання про кількісний критерій неоднорідності магнітного поля. Зазвичай неоднорідність поля магнітних сепараторів характеризується коефіцієнтом k неоднорідності, який фізично являє собою градієнт, який припадає на одиницю напруженості поля,

$$k = \text{grad}H / H . \quad (4.1)$$

На практиці для оцінки неоднорідності поля можуть бути використані локальні та інтегральні показники.

Локальні показники неоднорідності поля в більшості випадків визначаються в характерних точках досліджуваних робочих зон наступним чином:

– як абсолютний або відносний перепад інтенсивності (магнітної індукції або напруженості) поля в досліджуваних точках робочої зони. Наприклад, в [16] в якості критерію прийнято найбільше відносне відхилення Δ значення напруженості H_i поля в i -ой контрольній точці від поля H_0 в деякій базовій 0-ій точці

$$\Delta = \frac{\max_i |H_i - H_0|}{H_0}; \quad (4.2)$$

– як відношення напруженості поля H_i в розглянутій i -ой точці до базисної напруженості H_0 (наприклад, до середньої напруженості в даній області) [17]

$$k = H_i / H_0. \quad (4.3)$$

Інтегральна неоднорідність k_i визначається для діапазону значень напруженості магнітного поля за формулою [18]

$$k_i = (H_{\max} - H_{\min}) / (H_{\max} + H_{\min}), \quad (4.4)$$

де H_{\max}, H_{\min} – максимальне та мінімальне значення напруженості магнітного поля із заданого діапазону, відповідно.

Слід зауважити, що проведення обчислювального експерименту передбачає візуалізацію магнітного поля у вигляді відповідного кольорового зображення розподілу силових ліній. Аналіз структурних (текстурних) властивостей таких зображень також може дати необхідну інформацію для оцінки неоднорідності поля в площині робочої поверхні. Таку неоднорідність можна оцінювати по градієнтам, спектрам Фур'є, дисперсії амплітуд [19]. Однак зазначені методи оцінки неоднорідності поля поки не мають прикладного характеру.

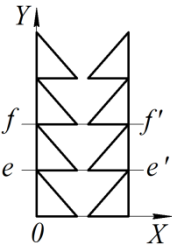
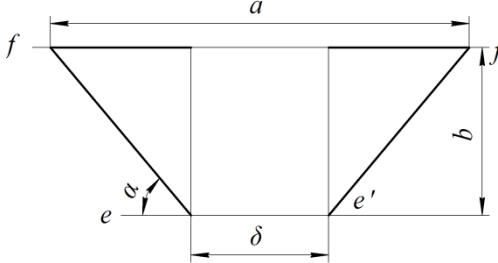
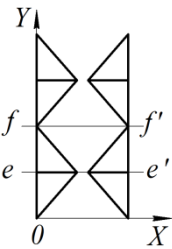
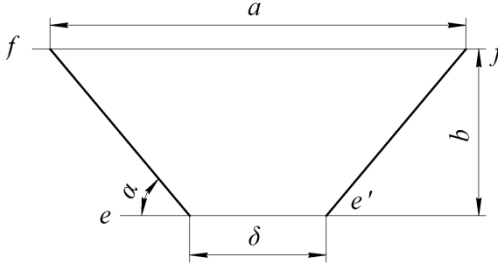
4.2 Порівняльний аналіз ступеня неоднорідності поля в геометрично ідентичних робочих зонах

На початковому етапі порівняльний аналіз ступеня неоднорідності поля був проведений для структурних варіантів поліградієнтних середовищ, робочі зони яких геометрично ідентичні (подібні). Серед синтезованих структур S_i до таких структур належать варіанти S_1 та S_3 , які широко застосовуються в фільтр-матрицях поліградієнтних сепараторів, наприклад, в роторному сепараторі типу «Джонс».

У табл. 4.1 для обраних структур (S_1, S_3) наведені магнітні моделі характерних повторюваних геометрично ідентичних областей, обмежених

лініями симетрії ff' та ee' . Слід зазначити, що виділені робочі зони в структурах S_1 та S_3 (табл. 4.1) не є фізично подібними, тому що для подібності фізичного явища необхідно не тільки подібність геометричних розмірів, але і подібність граничних умов, яка в розглянутих моделях відсутня.

Таблиця 4.1 – Магнітні моделі геометрично подібних робочих міжполюсних зон

Структури	Варіанти геометрії	Магнітні моделі характерних областей
S_1		
S_3		

Порівняльну оцінку неоднорідності поля в цьому випадку зручно виконувати для подібних точок робочих міжполюсних зон за формулою (4.2). Для цього були обрані сім подібних точок, розташовані уздовж прямих ліній, що проходять через середини повітряних зазорів робочих зон (точки 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 на рис. 4.1), з однаковими координатами Y . Далі визначалася просторова конфігурація магнітного поля в робочих зазорах синтезованих структур. На рис. 4.2 показані результати моделювання (картини магнітного поля).

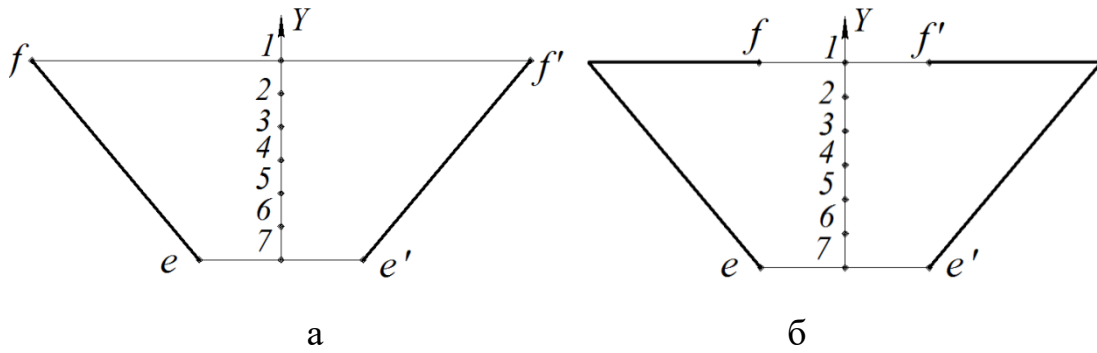


Рисунок 4.1 – Розташування характерних точок
для структури S_1 , (а) та структури S_3 (б)

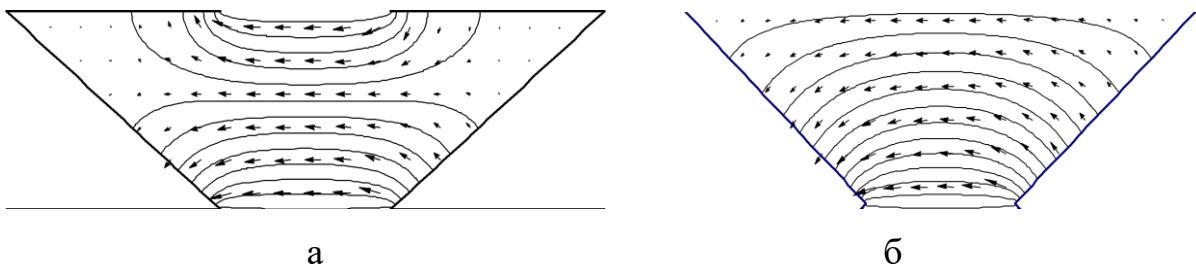


Рисунок 4.2 – Результати моделювання при $b/a=0,3$ та $\alpha=0,22\pi=40^\circ$:
для структури S_1 , (а) та структури S_3 (б)

В результаті проведених досліджень було встановлено, що при $X_2 > 40^\circ = 0,22\pi$ магнітне поле в робочих міжполюсних зонах досліджуваних структур практично однорідне при будь-яких значеннях $X_1 = b/a$.

Так, в табл. 4.2 наведені для прикладу результати оцінки ступеня локальної неоднорідності поля в подібних точках структур S_1 та S_3 при $X_2 = 60^\circ = 0,33\pi$, а також розраховані за формулою (4.3) показники інтегральної неоднорідності. Як видно з таблиці, локальні показники ступеня неоднорідності поля $k \sim 1$ для всіх подібних точок, а інтегральний показник неоднорідності поля не перевищує 7,0% для структури S_3 при $X_1 = b/a = 0,4$.

Найбільш висока ступінь інтенсивності і неоднорідності поля в досліджуваних варіантах структур (S_1 , S_3) спостерігається при $X_1 = b/a = 0,4$ та $X_2 = 40^\circ = 0,22\pi$. Як приклад, в табл. 4.3 показані результати оцінки ступеня неоднорідності поля в подібних точках структур при $X_2 = 40^\circ = 0,22\pi$, а також розраховані показники інтегральної неоднорідності k_i .

Таблиця 4.2 – Результати оцінки ступеня неоднорідності магнітного поля при $X_2=60^\circ=0,33\pi$

Код	X_1	Локальний коефіцієнт k неоднорідності магнітного поля в подібних точках							$\frac{H_{\max}}{H_{\min}}$	k_i , %
		1	2	3	4	5	6	7		
S_1	0,2	0,99	0,99	0,997	1,0	1,0	1,01	1,01	1,01	0,65
	0,3	0,99	0,99	1,01	1,01	1,01	1,02	1,02	1,02	1,1
	0,4	1,02	1,02	1,01	1,01	1,03	1,03	1,03	1,02	1,1
S_3	0,2	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,01	0,37
	0,3	0,98	0,98	0,99	1,0	1,02	1,02	1,03	1,05	2,5
	0,4	0,94	0,94	0,95	1,0	1,04	1,08	1,03	1,15	7,0

Таблиця 4.3 – Результати оцінки ступеня неоднорідності магнітного поля при $X_2=40^\circ=0,22\pi$

Код	X_1	Локальний коефіцієнт k неоднорідності магнітного поля в подібних точках							$\frac{H_{\max}}{H_{\min}}$	k_i , %
		1	2	3	4	5	6	7		
S_1	0,2	0,99	1,0	1,01	1,01	1,01	1,02	1,02	1,03	1,5
	0,3	1,08	1,06	1,02	1,01	1,04	1,09	1,10	1,09	4,3
	0,4	1,93	0,69	0,45	0,44	0,56	0,96	1,97	4,49	63,6
S_3	0,2	0,99	0,99	0,99	1,0	1,01	1,01	1,01	1,03	1,5
	0,3	0,83	0,84	0,89	0,97	1,08	1,18	1,23	1,48	19,3
	0,4	0,37	0,388	0,44	0,55	0,76	1,35	3,12	8,32	78

На рис. 4.3 показані криві зміни локального коефіцієнта k неоднорідності магнітного поля в подібних точках для структур S_1 та S_3 при $X_1=b/a=0,4$, $X_2=40^\circ=0,22\pi$.

Як можна бачити з графіків (рис. 4.3), починаючи з координати, що відповідає точці 3 (тобто на більшій частині діапазону зміни вертикальної координати Y), коефіцієнт неоднорідності k вище для структури S_3 , досягаючи найбільшого значення в точці 7, де зубець однієї пластини розташований навпроти зубця суміжної пластини. Відповідно, й інтегральний коефіцієнт k_i неоднорідності вище для структури S_3 . В цілому, для структур S_1 та S_3 мають місце досить високі значення показника інтегральної неоднорідності поля k_i , які при $X_1=b/a=0,4$ склали, відповідно, 63,6% і 78%. Тому для остаточного вибору раціональної структури поліградієнтного середовища необхідний аналіз їх силових характеристик $H_{\text{grad}}(\mathbf{H})$.

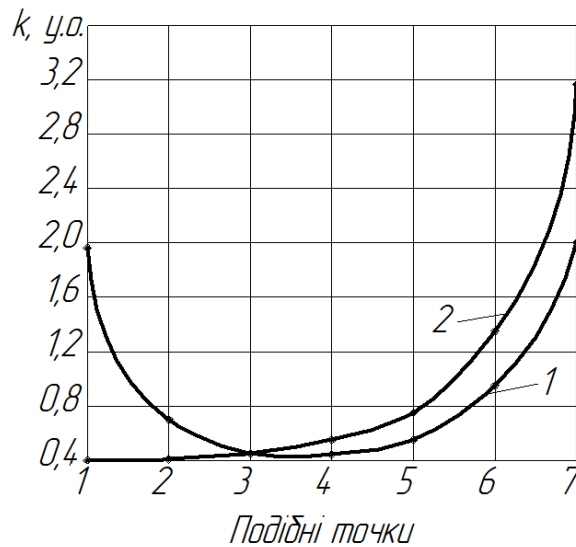


Рисунок 4.3 – Зміна локального коефіцієнта k неоднорідності поля в подібних точках для структур S_1 (крива 1) та S_3 (крива 2) при $X_1=b/a=0,4$, $X_2=40^\circ=0,22\pi$

Таким чином, на основі даних обчислювального експерименту проведено аналіз розподілу магнітного поля в подібних точках для двох структурних варіантів (S_1 , S_3) пластинчастих поліградієнтних середовищ, які відрізняються геометричною подібністю робочих областей. Встановлено, що найбільш висока ступінь інтенсивності та неоднорідності поля в досліджуваних варіантах структур спостерігається при $X_1=b/a=0,4$ та $X_2 \leq 40^\circ=0,22\pi$. При проведенні порівняльної оцінки ступеню неоднорідності магнітного поля в робочих зонах геометрично ідентичних структур можуть бути використані як локальний, так і інтегральний показники неоднорідності поля. Використання локального показника є більш інформативним.

4.3 Дослідження ступеня неоднорідності поля уздовж характерних ліній робочих зон, інваріантних до перетворень подібності

Попередня оцінка ступеня неоднорідності магнітного поля в робочих зонах всіх синтезованих структур (S_1 , S_3 , S_4 , S_5) може бути виконана шляхом порівняння показників неоднорідності поля уздовж характерних ліній [11]. Вибір характерних ліній в цілому інваріантний до перетворень подібності, але залежить від розташування зон неоднорідності поля в робочих зазорах. В

якості характерних при дослідженні неоднорідності поля прийняті лінії (виділені червоним кольором на рис. 3.1), що з'єднують вершини протилежних трикутних пластин матриці. Характерні лінії проходять через міжзубцові ділянки з найбільш високою неоднорідністю магнітного поля.

В досліджуваних робочих областях синтезованих структур S_i проводилося визначення локальних значень магнітної напруженості H поля в точках вздовж характерних ліній на відстанях, що становлять 0, 20, 40, 60, 80 і 100% від довжини характерної лінії. У табл. 4.4 представлені результати розрахунку інтегрального коефіцієнта k_i неоднорідності поля для різних конфігурацій поліградієнтних середовищ. Приймалися наступні геометричні співвідношення: $X_1=b/a=0,2; 0,3; 0,4$; $X_2=\alpha=0,22\pi; 0,28\pi; 0,33\pi; 0,39\pi; 0,44\pi$.

Таблиця 4.4 – Результати розрахунку напруженості магнітного поля уздовж характерних ліній

Код структури	Напруженість магнітного поля, відн.од., в точках						δ , мм	k_i , %	V, %
	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0			
$X_1=b/a=0,2, X_2=\alpha=0,22\pi$									
S1	1,51	0,72	0,71	0,71	0,72	1,64	94,2	40	44
S3	1,97	0,74	0,71	0,71	0,74	1,13	94,2	46	50
S4	1,64	0,68	0,64	0,64	0,68	1,72	100,8	47	53
S5	1,57	0,75	0,73	0,73	0,73	1,50	94,2	37	41
$X_1=b/a=0,3, X_2=\alpha=0,22\pi$									
S1	1,66	0,66	0,63	0,64	0,70	1,70	51,3	46	53
S3	2,15	0,70	0,59	0,59	0,71	1,26	51,3	57	62
S4	1,46	0,74	0,64	0,64	0,76	1,77	74,5	47	49
S5	1,61	0,71	0,67	0,67	0,71	1,63	51,3	41	48
$X_1=b/a=0,4, X_2=\alpha=0,22\pi$									
S1	2,18	0,45	0,33	0,37	0,62	2,04	8,4	74	87
S3	3,06	0,40	0,24	0,24	0,40	1,66	8,4	85	64
S4	1,69	0,71	0,59	0,59	0,71	1,71	60,5	48	54
S5	2,12	0,53	0,35	0,34	0,51	2,15	8,4	72	88
$X_1=b/a=0,2, X_2=\alpha=0,28\pi$									
S1	1,70	0,75	0,74	0,75	0,76	1,30	119,6	39	41
S3	1,63	0,90	0,65	0,65	0,66	1,51	119,6	43	45
S4	1,64	0,71	0,68	0,68	0,71	1,56	125,0	41	47
S5	1,55	0,77	0,76	0,76	0,77	1,38	119,6	34	37
$X_1=b/a=0,3, X_2=\alpha=0,28\pi$									

Продовження таблиці 4.4

S1	1,54	0,73	0,72	0,72	0,75	1,54	89,4	36	42
S3	1,76	0,66	0,61	0,61	0,66	1,71	89,4	49	57
S4	1,72	0,70	0,63	0,63	0,70	1,61	104,4	46	52
S5	1,67	0,70	0,69	0,69	0,70	1,54	89,4	41	47
$X_1=b/a=0,4, X_2=\alpha=0,28\pi$									
S1	1,48	0,74	0,71	0,73	0,83	1,50	59,2	36	38
S3	1,88	0,65	0,53	0,53	0,65	1,76	59,2	56	64
S4	1,69	0,71	0,60	0,60	0,71	1,70	91,6	48	54
S5	1,63	0,68	0,64	0,64	0,68	1,73	59,2	46	53
$X_1=b/a=0,2, X_2=\alpha=0,33\pi$									
S1	1,52	0,77	0,77	0,77	0,78	1,40	138,4	33	36
S3	1,48	0,76	0,75	0,75	0,76	1,50	138,4	33	38
S4	1,50	0,76	0,74	0,74	0,76	1,51	143,0	34	39
S5	1,48	0,77	0,76	0,76	0,77	1,47	138,4	32	36
$X_1=b/a=0,3, X_2=\alpha=0,33\pi$									
S1	1,70	0,73	0,73	0,73	0,75	1,35	117,6	40	42
S3	1,52	0,71	0,68	0,68	0,71	1,69	117,6	42	47
S4	1,58	0,76	0,72	0,72	0,61	1,62	129,4	45	47
S5	1,55	0,65	0,64	0,64	0,65	1,51	117,6	41	49
$X_1=b/a=0,4, X_2=\alpha=0,33\pi$									
S1	1,50	0,67	0,67	0,68	0,71	1,77	97,0	45	50
S3	1,56	0,71	0,64	0,64	0,71	1,74	97,0	46	51
S4	1,48	0,76	0,68	0,68	0,76	1,63	120,0	41	44
S5	2,30	0,86	0,85	0,85	0,86	2,34	97,0	47	70
$X_1=b/a=0,2, X_2=\alpha=0,39\pi$									
S1	1,51	0,79	0,79	0,79	0,79	1,32	153,8	31	33
S3	1,39	0,83	0,82	0,82	0,83	1,32	153,8	26	27
S4	1,37	0,84	0,82	0,82	0,84	1,31	158,0	25	26
S5	1,41	0,78	0,78	0,78	0,78	1,48	153,8	31	35
$X_1=b/a=0,3, X_2=\alpha=0,39\pi$									
S1	1,51	0,74	0,74	0,74	0,75	1,52	140,7	35	40
S3	1,30	0,81	0,79	0,79	0,81	1,50	140,7	31	32
S4	1,40	0,80	0,76	0,76	0,80	1,47	150,7	32	34
S5	1,51	0,74	0,74	0,74	0,74	1,52	140,7	34	40
$X_1=b/a=0,4, X_2=\alpha=0,39\pi$									
S1	1,58	0,71	0,71	0,71	0,74	1,56	127,6	38	44
S3	1,47	0,78	0,74	0,74	0,78	1,50	127,6	34	38
S4	1,36	0,83	0,78	0,78	0,83	1,42	144,5	29	30
S5	1,54	0,72	0,72	0,72	0,72	1,57	127,6	37	43
$X_1=b/a=0,2, X_2=\alpha=0,44\pi$									
S1	1,20	0,91	0,91	0,91	0,91	1,16	166,9	14	14

Продовження таблиці 4.4

S3	1,22	0,90	0,89	0,89	0,90	1,19	166,9	16	16
S4	1,20	0,91	0,90	0,90	0,91	1,19	171,0	14	15
S5	1,18	0,91	0,91	0,91	0,91	1,18	166,9	13	14
$X_1=b/a=0,3, X_2=\alpha=0,44\pi$									
S1	1,41	0,81	0,81	0,81	0,81	1,35	161,0	27	30
S3	1,22	0,89	0,88	0,88	0,89	1,24	161,0	17	18
S4	1,19	0,90	0,88	0,88	0,90	1,23	167,6	16	17
S5	1,36	0,82	0,82	0,82	0,82	1,35	161,0	24	27
$X_1=b/a=0,4, X_2=\alpha=0,44\pi$									
S1	1,13	1,32	0,76	0,76	0,77	1,25	154,6	24	26
S3	1,23	0,89	0,87	0,87	0,89	1,25	154,6	18	19
S4	1,21	0,90	0,87	0,87	0,90	1,26	164,8	18	18
S5	1,29	0,82	0,83	0,83	0,82	1,41	154,6	26	28

Коефіцієнт неоднорідності k_i змінюється від нуля до одиниці, тому будемо надалі дотримуватися такої класифікації: $k_i \leq 0,3$ – слабо однорідне (або слабо неоднорідне) поле; $0,3 < k_i \leq (0,9 \dots 1)$ – неоднорідне поле. Ця класифікація добре узгоджується з коефіцієнтом варіації – основним статистичним показником, що характеризує однорідність даних (значення коефіцієнта варіації V також наведені в табл. 4.4). У математичній статистиці прийнято вважати, що, якщо значення коефіцієнта V менше 33%, то сукупність даних є однорідною, якщо більше 33%, то – неоднорідною. Основною перевагою коефіцієнта варіації V є те, що він не пов'язаний з масштабом аналізованих даних, тому служить відносною характеристикою міри розкиду даних і розраховується як відношення середньоквадратичного відхилення σ до середньої величини \bar{x}

$$V = \sigma / \bar{x}. \quad (4.5)$$

Порівняльний аналіз розрахованих значень коефіцієнта k_i неоднорідності поля показав, що при $X_2=\alpha=0,44\pi$ і будь-якому значенні $X_1=b/a$ з діапазону $X_1=b/a=0,2 \dots 0,4$ магнітне поле в робочих зазорах слабо неоднорідне, тобто $k_i \leq 30\%$ (в табл. 4.4 такі структури виділені кольором). При $X_2=\alpha=0,44\pi$ максимальне значення інтегрального коефіцієнту k_i неоднорідності поля склало 27% (структура S_1 при $X_1=b/a=0,3$), а мінімальне

– 13% (для структури S_5 при $X_1=b/a=0,2$). Тому практичний інтерес представляє аналіз неоднорідності поля в синтезованих структурах (S_1, S_3, S_4, S_5) при $X_1=b/a=0,2; 0,3$ та $X_2=\alpha=0,22\pi; 0,28\pi; 0,33\pi; 0,39\pi$. Однак і при зазначених геометричних співвідношеннях отримані три структури зі слабо неоднорідними полями в робочих зазорах, які можуть бути виключені з подальшого розгляду (виділені в табл. 4.4 кольором).

При $X_1=b/a=0,2$ найбільш високу ступінь неоднорідності поля (переважно в зоні біля зубців) забезпечує структура S_4 з максимальним значенням $k_i=47\%$ (при $X_2=\alpha=0,22\pi$). При цьому слід зазначити, що в міжзубцовій зоні структури S_4 магнітне поле наближається до однорідного.

При $X_1=b/a=0,3$ максимальні значення показника k_i неоднорідності поля спостерігаються:

- у структури S_3 : при $X_2=\alpha=0,22\pi$ – $k_i=57\%$; при $X_2=\alpha=0,28\pi$ – $k_i=49\%$;
- у структури S_4 : при $X_2=\alpha=0,33\pi$ – $k_i=45\%$.

З подальшим зменшенням міжполюсного повітряного зазору δ ($X_1=b/a=0,4$) при $X_2=\alpha=0,22\pi$ спостерігається істотне посилення ступеня неоднорідності магнітного поля вздовж характерних ліній робочих зон структур S_1, S_3, S_5 . Коефіцієнт неоднорідності k_i магнітного поля для цих структур склав, відповідно, 74; 85 та 72%.

При $X_1=b/a=0,4$ та $X_2=\alpha=0,28\pi$ максимальне значення показника $k_i=56\%$ у структури S_3 . При $X_1=b/a=0,4$ та $X_2=\alpha=0,39\pi$ у всіх структур (S_1, S_3, S_4, S_5), прийнятих до подальшого розгляду, приблизно однакові і відносно невисокі значення коефіцієнта k_i з діапазону (34...38) %.

На рис. 3.7 представлені залежності максимальних значень коефіцієнта k_i в залежності від відношень $X_1=b/a$ і $X_2=\alpha$ із зазначенням кодів структур.

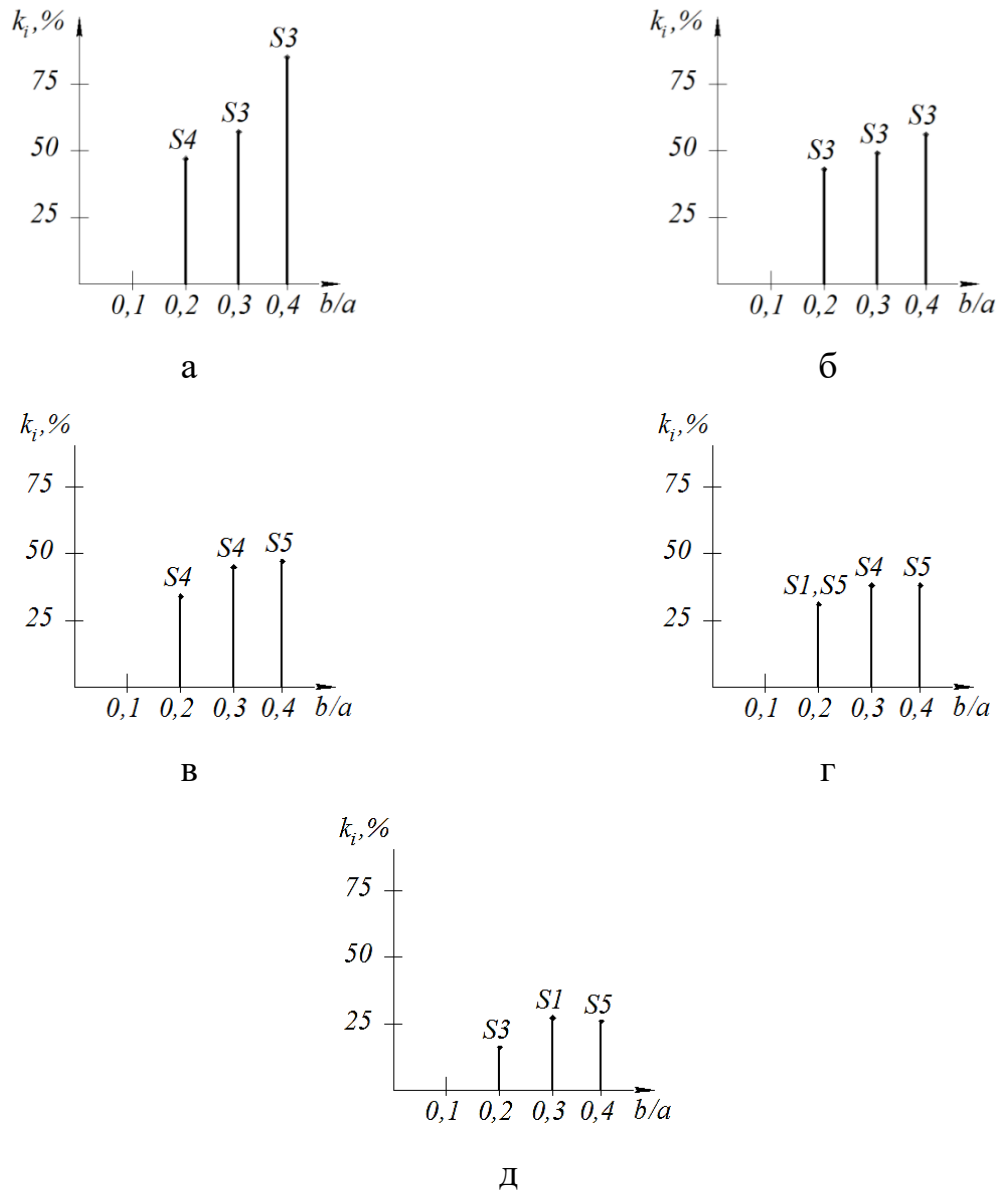


Рисунок 4.4 – Залежності максимальних значень коефіцієнта k_i в залежності від співвідношень $X_1=b/a$: $X_2=\alpha=0,22\pi$ (а); $X_2=\alpha=0,28\pi$ (б); $X_2=\alpha=0,33\pi$ (в); $X_2=\alpha=0,39\pi$ (г); $X_2=\alpha=0,44\pi$ (д)

В структурах, що відрізняються високою неоднорідністю поля (рис. 4.4), середня напруженість H поля може бути відносно невисокою. При цьому слід враховувати, що характер осадження феромагнітних частинок на полюсах істотно залежить від форми пластинчастих елементів. Так, гострокінцевий полюс має більш високу напруженість поля, ніж тупокінцевий, однак обсяг робочого простору, що охоплюється полем, буде менше. Тому необхідні подальші дослідження з визначення силових характеристик $H_{grad}(H)$ в робочих зонах відібраних структур.

Таким чином, запропонований і реалізований підхід для попередньої оцінки ступеня неоднорідності магнітного поля в поліградієнтних середовищах синтезованих структур шляхом порівняння неоднорідності поля уздовж характерних ліній, перевагою якого є інваріантність до перетворень подібності. Даний метод дозволяє відсікти структури зі слабо неоднорідними полями. Однак для остаточного вибору раціональних структур необхідна оцінка спектра силового поля $H_{\text{grad}}(H)$ у всій площині робочої зони.

4.4 Оцінка спектра силового поля $H_{\text{grad}}(H)$ в площині робочих зон досліджуваних структур

На наступному етапі для визначення раціональних варіантів поліградієнтних матриць здійснено оцінку всього спектру силового поля $H_{\text{grad}}(H)$ в площині робочих зон досліджуваних структур у двовимірній постановці. Досвід проектування магнітних сепараторів свідчить про те, що відносний вплив тривимірного магнітного поля приблизно однаковий для всіх точок плоских магнітних моделей робочих міжполюсних зон та не залежить від геометричних критеріїв подібності $X_1=b/a$ і $X_2=\alpha$ [15].

Для вирішення задачі з оцінки спектру силового магнітного поля розроблена програма з використанням мови програмування Java 7 та фреймворку Spring, яка на вході опрацьовує результати розрахунку напруженості H магнітного поля, отримані в програмі Elcut у вигляді Excel файлів. Для роботи з Excel файлами призначена бібліотека Apache POI. Результатом виконання програми є новий Excel файл з даними розрахунку силової характеристики $H_{\text{grad}}(H)$ магнітного поля. Основні етапи обчислювального експерименту наведені на рис. 4.5.

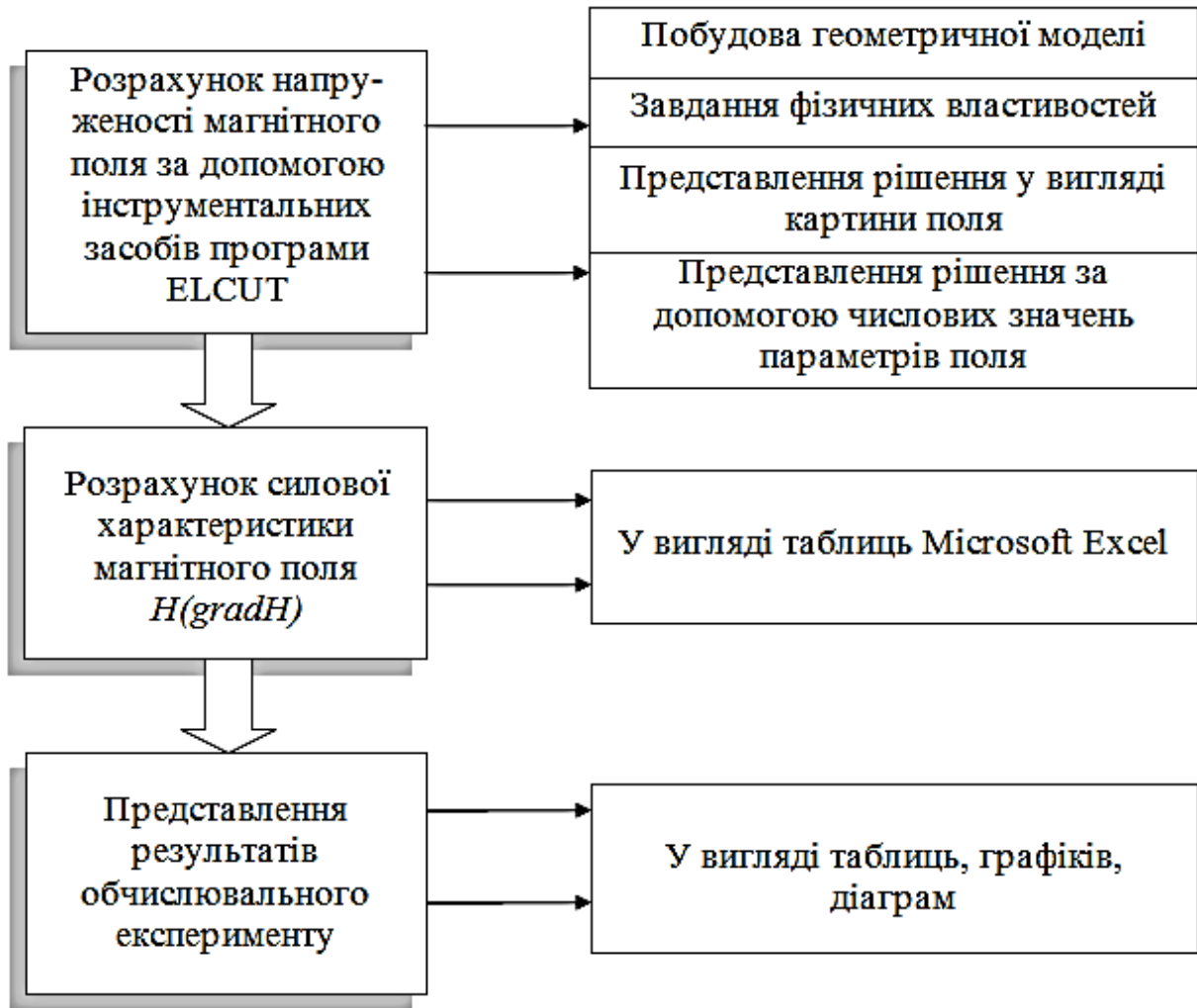


Рисунок 4.5 – Основні етапи обчислювального експерименту

Для розв'язання завдання по визначенню раціональних варіантів поліградієнтних матриць був задіяний метод порівняльного аналізу силових характеристик досліджуваних варіантів структур матриці з відповідними характеристиками базового варіанту сепаратора (рис.2.15, в): код структури S_4 ; геометричні критерії подібності $X_1=b/a=0,28$, $X_2=\alpha=0,11\pi$. Як зазначено вище, базовий варіант магнітного сепаратора був розроблений емпіричним шляхом та реалізований у вигляді фізичної моделі, експериментальні дослідження якої підтвердили її працездатність. Перевірка на оптимальність для базового варіанту сепаратора не проводилась.

4.5 Визначення величини векторного магнітного потенціалу (граничної умови) на границі de

Для проведення порівняльного аналізу синтезованих структур необхідно визначитись з числовими значеннями векторного магнітного потенціалу A_{de} на границі de (рис. 4.1) двовимірних областей синтезованих структур з врахуванням результатів дослідження просторового розподілу магнітного поля в матриці електромагнітного сепаратора.

Слід зазначити, що для вирішення задачі по визначенню граничної умови A_{de} було вирішено обмежитись розглядом структурних варіантів матриці, які належать до структури S_4 . Чисельно-польовий аналіз (3D-аналіз) просторового розподілу магнітного поля потребує значних обчислювальних та часових ресурсів. Тому на даному етапі доцільним є аналіз тільки тих структурних варіантів матриці, які належать до того ж самого структурного коду S_4 , що і базова структура сепаратора.

Для визначення векторного магнітного потенціалу A_{de} обрані три структурні варіанти матриці електромагнітного сепаратора, що належать до структури S_4 , з наступними вихідними та розрахунковими параметрами (див. Розділ 4):

Варіант 1: $X_1=b/a=0,18$, $X_2=\alpha=0,15\pi$, розрахункове значення магнітного потоку Φ через площадку S $\Phi=0,0000126111$ Вб, $A_{de}=0,00630554$ Вб/м.

Варіант 2: $X_1=b/a=0,40$, $X_2=\alpha=0,18\pi$, розрахункове значення магнітного потоку Φ через площадку S $\Phi=0,0000558067$ Вб, $A_{de}=0,027903332$ Вб/м.

Варіант 3: $X_1=b/a=0,28$, $X_2=\alpha=0,11\pi$ (відповідають базовій конструкції сепаратора), розрахункове значення магнітного потоку Φ через площадку S $\Phi=0,0000640057$ Вб, $A_{de}=0,032002859$ Вб/м.

До розгляду був введений так званий коефіцієнт заповнення k_m , який пов'язує основні геометричні співвідношення ($X_1=b/a$, $X_2=\alpha$) елементів матриці сепаратора, та характеризує заповненість робочого проміжку матриці металевими елементами,

$$k_m = \frac{b}{a} \operatorname{ctg} \alpha. \quad (4.6)$$

Для структурних варіантів матриці електромагнітного сепаратора, що були досліджені, коефіцієнт заповнення k_m склав, відповідно: для варіанту 1 – $k_m=0,3532$; для варіанту 2 – $k_m=0,616$; для варіанту 3 – $k_m=0,769$.

В табл. 4.5 наведений розрахунок коефіцієнту заповнення k_m при варіюванні геометричних критеріїв подібності $X_1=b/a$ та $X_2=\alpha$ в діапазонах: $X_1=b/a=0,15\dots0,42$, $X_2=\alpha=0,11\pi\dots0,18\pi$. Слід зазначити, що прийняті на самому початку дослідження діапазони зміни критеріїв X_1 та X_2 ($X_1=b/a=0,2\dots0,4$; $X_2=\alpha=0,22\pi\dots0,44\pi$) на даному етапі були відкориговані у відповідності до геометричних особливостей структури S_4 .

Таблиця 4.5 – Коефіцієнт заповнення k_m

$b/a \backslash \alpha$	0,15	0,18	0,20	0,25	0,28	0,30	0,35	0,40	0,42
0,11 π	0,412	0,495	0,549	0,687	0,769	0,824	0,962	-	-
0,12 π	0,379	0,455	0,505	0,631	0,707	0,758	0,884	-	-
0,13 π	0,347	0,416	0,462	0,578	0,647	0,693	0,809	0,924	0,971
0,14 π	0,322	0,386	0,429	0,536	0,600	0,643	0,751	0,858	0,901
0,15 π	0,294	0,3532	0,393	0,491	0,55	0,589	0,687	0,785	0,824
0,16 π	0,271	0,325	0,361	0,451	0,505	0,541	0,631	0,722	0,758
0,17 π	0,260	0,312	0,346	0,433	0,485	0,520	0,606	0,693	0,727
0,18 π	0,231	0,277	0,308	0,385	0,431	0,462	0,539	0,616	0,647

За даними, що отримані вище, був побудований графік (рис. 4.6), який описує залежність векторного магнітного потенціалу A_{de} від коефіцієнта заповнення k_m . За допомогою цього графіку шляхом інтерполяції можуть бути визначені значення A_{de} для будь яких проміжних точок, що належать діапазону $0,3532 \leq k_m \leq 0,769$.

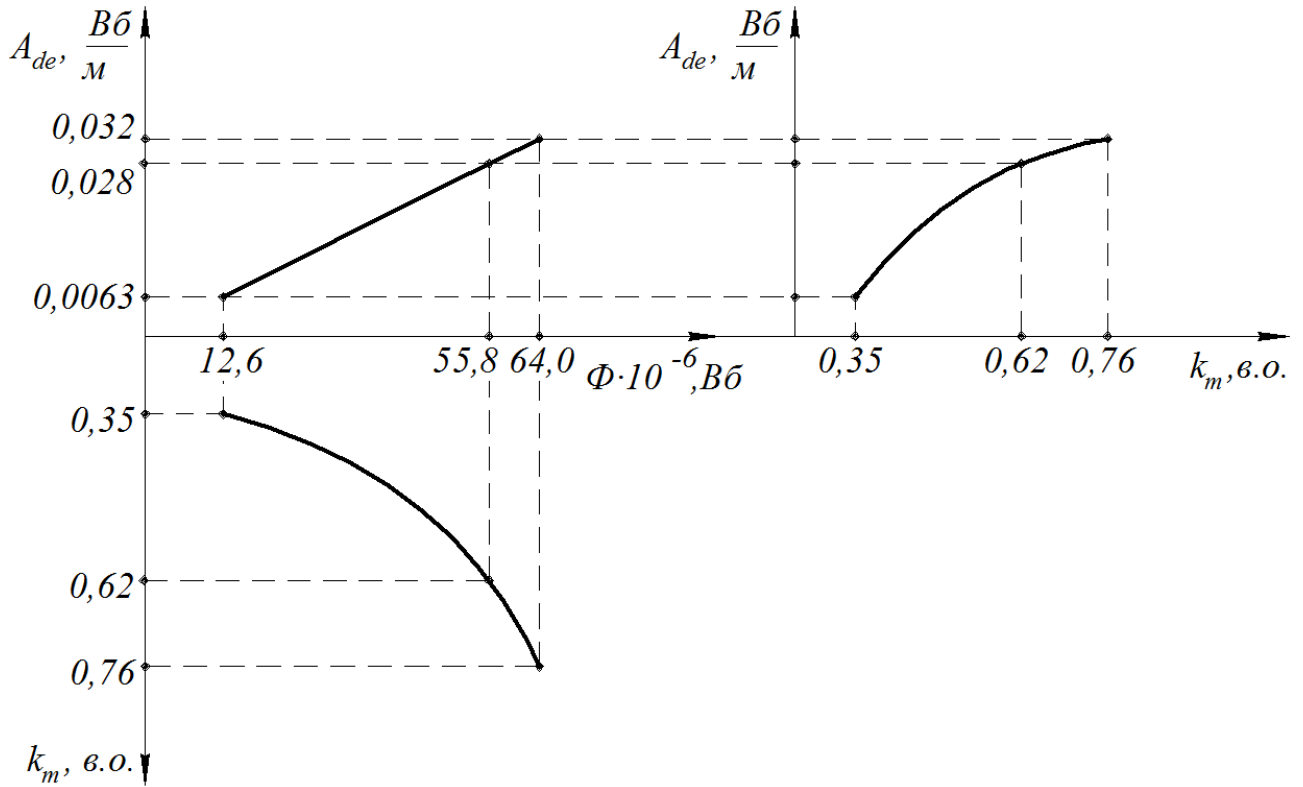


Рис. 4.6 – Залежність векторного магнітного потенціалу A_{de} від коефіцієнту заповнення k_m

Для обчислення значень A_{de} в проміжних точках розглянутого інтервалу $0,3532 \leq k_m \leq 0,769$ була побудована функція, яка наближено описує даний процес на основі методу найменших квадратів. Ця функція називається апроксимуючою функцією (регресією), а сама задача побудови апроксимуючих функцій – завданням апроксимації. Для вирішення цього завдання були використані можливості пакета MS Excel шляхом додавання обраної регресії (лінії тренду – trendlines) в діаграму, побудовану на основі таблиці даних (рис. 4.7). На основі даних діаграми Excel дозволяють отримувати лінійний, поліноміальний, логарифмічний, степеневий, експоненціальний типи регресій, які задаються рівнянням $y=y(x)$, де x – незалежна змінна, яка приймає значення послідовності натурального ряду чисел (1; 2; 3; ...). При підборі лінії тренда Excel автоматично розраховує значення коефіцієнту детермінації R^2 , який характеризує достовірність апроксимації та має знаходитися в межах $R^2=0,85 \dots 1,0$.

Рівняння побудованої регресії, за яким обчислювалися значення векторного магнітного потенціалу A_{de} в проміжних точках розглянутого

інтервалу, має вигляд поліноміальної залежності (коефіцієнт детермінації $R^2=1$)

$$A_{de} = -0,1349k_m^2 + 0,2132k_m - 0,0522. \quad (4.7)$$

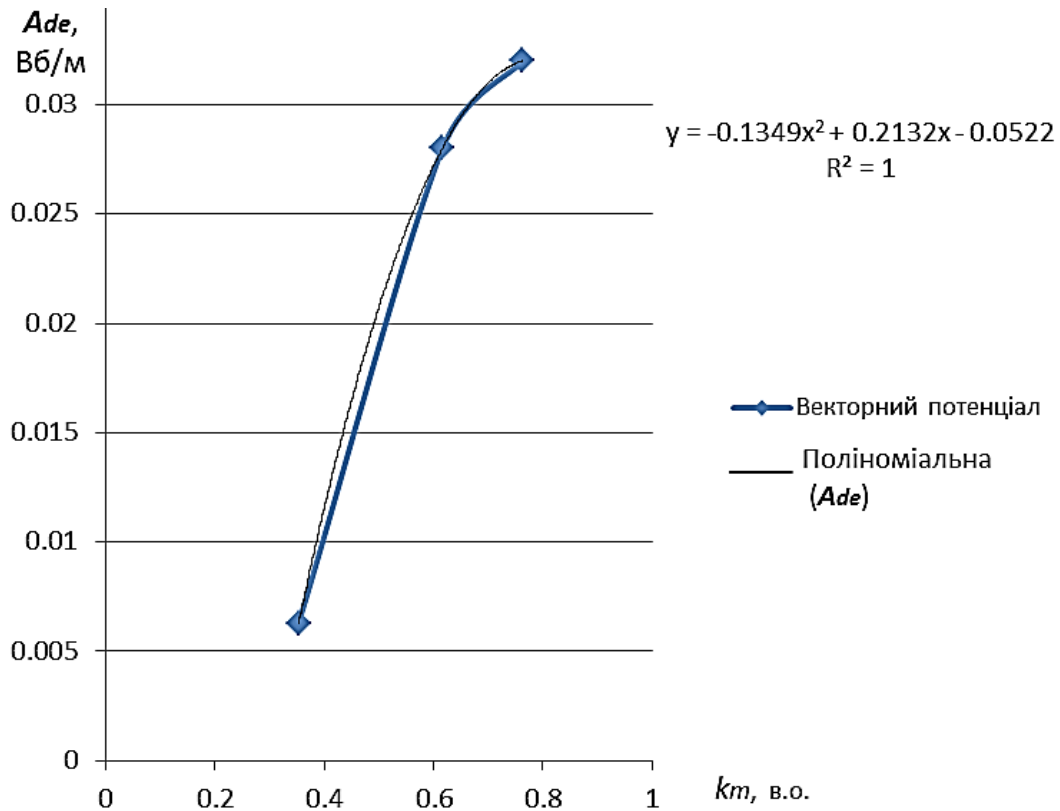


Рис. 4.7 – Поліноміальна апроксимація залежності векторного магнітного потенціалу A_{de} від коефіцієнту заповнення k_m

За результатами поліноміальної апроксимації (3.14) був визначений векторний магнітний потенціал A_{de} для різних комбінацій X_1 та X_2 (табл. 4.6). Для наочності результати розрахунку A_{de} наведені також у вигляді об'ємного графіку (рис. 4.8), який побудовано з використанням інструментальних засобів програмного пакету MatLab.

Таблиця 4.6 – Векторний магнітний потенціал A_{de} (поліноміальна апроксимація)

$b/a \backslash \alpha$	0,15	0,18	0,20	0,25	0,28	0,30	0,35	0,40	0,42
0,11 π	0,0127	0,0203	0,0242	0,0306	0,0320	-	-	-	-
0,12 π	0,0092	0,0169	0,0211	0,0286	0,0311	0,0319	-	-	-
0,13 π	0,0055	0,0131	0,0175	0,026	0,0293	0,0308	0,032	-	-
0,14 π	0,0025	0,0100	0,0144	0,0233	0,0272	0,0291	0,0318	-	-
0,15 π	-	0,0063	0,0108	0,02	0,0243	0,0266	0,0306	0,0320	-
0,16 π	-	0,0028	0,0072	0,0165	0,0211	0,0237	0,0286	0,0314	0,0319
0,17 π	-	0,00119	0,0054	0,0148	0,0195	0,0222	0,0275	0,0308	0,0315
0,18 π	-	-	0,0007	0,0099	0,0146	0,0175	0,0235	0,0279	0,0293

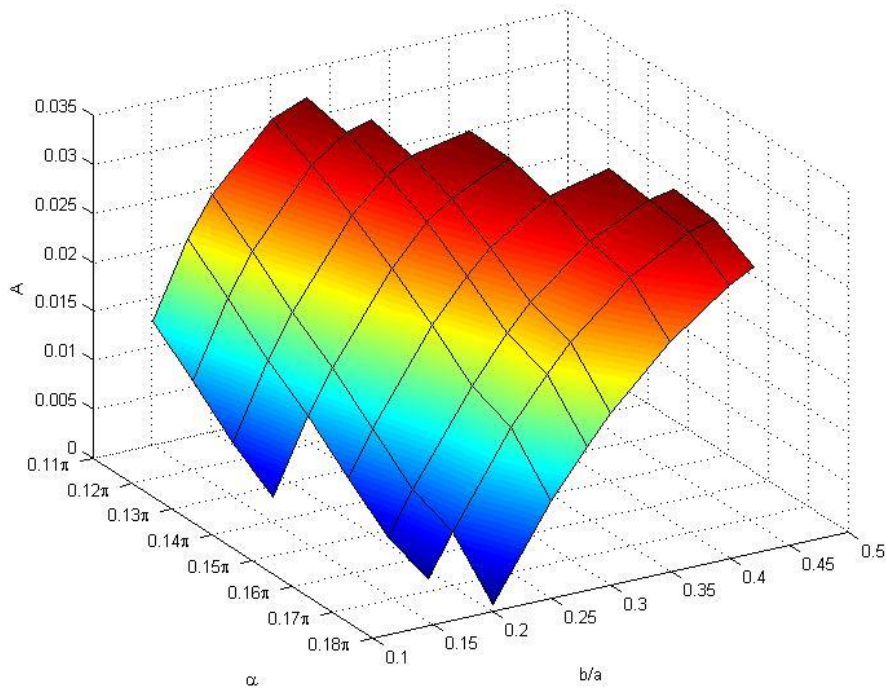


Рисунок 4.8 – Розподіл векторного магнітного потенціалу A_{de}

Таким чином, були визначені значення векторного магнітного потенціалу A_{de} для різних комбінацій геометричних критеріїв подібності X_1 та X_2 структури S_4 , які будуть використані для задання граничних умов в обчислювальному експерименті при виборі раціональної структури матриці електромагнітного сепаратора.

4.6 Вибір раціональної структури матриці електромагнітного сепаратора

Для базової моделі сепаратора під час обчислювального експерименту була визначена частка P_b площі робочої зони (міжполюсного проміжку) матриці, в якій величина силового параметру f_{np} задовольняє вимозі $f_{\min} \leq f_{np} \leq f_{\max}$, де f_{\min} – мінімальне граничне значення силової характеристики $f_{\min} = (\mathbf{Hgrad}(\mathbf{H}))_{\min}$, за якої забезпечується, виходячи з досвіду проектування магнітних сепараторів, достатня ефективність видалення феромагнітних включень (при розрахунках за рекомендаціями [15] прийняте значення $f_{\min} = 3 \cdot 10^8 \text{ A}^2/\text{M}^3$); f_{\max} – максимальне значення питомої приведенної сили, яке для базової моделі становило $f_{\max} = (\mathbf{Hgrad}(\mathbf{H}))_{\max} = 8,6 \cdot 10^9 \text{ A}^2/\text{M}^3$. Ця частина площі робочої області P_b була виражена у відсотках по відношенню до величини P всієї площі робочої зони: $\gamma = P_b / P$. При цьому параметр γ залежить від геометричних критеріїв X_1 , X_2 і може бути визначений, по аналогії з, як ефективна площа робочої зони матриці. Для базового варіанту сепаратора параметр γ склав $\gamma = 5,3\%$.

При розрахунках також додатково визначався параметр γ_1 , який характеризує ту частину площі робочої зони, де виконується умова $f_{np} > f_{\max} = 8,6 \cdot 10^9 \text{ A}^2/\text{M}^3$. Деякі результати розрахунків, отримані під час обчислювального експерименту, наведені у табл. 4.7 – 4.14 та рис. 4.9.

Таблиця 4.7 – Результати варіантних розрахунків параметра γ при $X_2 = \alpha = 0,11\pi (20^\circ)$

$X_1 = b/a$	A , Вб/м	δ , мм	k_m , в.о.	$H_{\max} \cdot 10^3$, А/м	$\text{grad}(\mathbf{H})_{\max}$ $\cdot 10^3$, А/м ²	$f_{\max} \cdot 10^9$, А ² /м ³	γ , %	γ_1 , %
0,15	0,0127	36,2	0,412	283,2	141,6	34,3	16,0	0,2
0,18	0,0203	31,1	0,494	391,6	195,8	64,5	36,5	0,5
0,20	0,0242	27,7	0,550	336,5	168,2	46,4	23,0	0,5
0,25	0,0306	19,3	0,687	179,5	88,0	13,5	8,1	0,1
0,28	0,0320	13,6	0,763	135,7	67,8	8,6	5,3	0

Таблиця 4.8 – Результати варіантних розрахунків параметра γ при $X_2=\alpha=0,12\pi$ ($21,6^\circ$)

$X_1=b/a$	A, Вб/м	δ , мм	k_m , в.о.	$H_{\max} \cdot 10^3$, А/м	$\text{grad}(H)_{\max}$ $\cdot 10^3$, А/м ²	$f_{\max} \cdot 10^9$, А ² /м ³	γ , %	γ_1 , %
0,15	0,0092	41,2	0,379	200,9	100,4	17,8	6,4	0,1
0,18	0,0169	36,1	0,455	366,8	183,4	55,3	30,3	0,4
0,20	0,0211	33,1	0,505	365,0	182,5	54,6	31,1	0,5
0,25	0,0286	24,4	0,631	224,5	112,2	20,3	10,0	0,2
0,28	0,0311	19,4	0,707	155,3	77,6	11,7	7,0	0,1
0,30	0,0319	16,1	0,758	130,0	65,0	8,3	5,4	0

Таблиця 4.9 – Результати варіантних розрахунків параметра γ при $X_2=\alpha=0,13\pi$ ($23,4^\circ$)

$X_1=b/a$	A, Вб/м	δ , мм	k_m , в.о.	$H_{\max} \cdot 10^3$, А/м	$\text{grad}(H)_{\max}$ $\cdot 10^3$, А/м ²	$f_{\max} \cdot 10^9$, А ² /м ³	γ , %	γ_1 , %
0,15	0,0055	46,7	0,347	126,5	63,3	6,7	2,0	0
0,18	0,0131	41,8	0,416	296,4	148,2	37,8	10,0	0,2
0,20	0,0175	38,4	0,462	299,7	149,8	39,4	20,3	0,2
0,25	0,026	30,2	0,578	286,4	143,3	33,4	11,6	0,3
0,28	0,0293	25,2	0,647	198,1	99,0	18,0	8,4	0,1
0,30	0,0308	21,9	0,693	184,7	92,3	13,9	6,9	0,1
0,35	0,032	13,7	0,809	110,5	55,2	5,7	3,7	0

Таблиця 4.10 – Результати варіантних розрахунків параметра γ при $X_2=\alpha=0,14\pi$ (25°)

$X_1=b/a$	A, Вб/м	δ , мм	k_m , в.о.	$H_{\max} \cdot 10^3$, А/м	$\text{grad}(H)_{\max}$ $\cdot 10^3$, А/м ²	$f_{\max} \cdot 10^9$, А ² /м ³	γ , %	γ_1 , %
0,15	0,0025	51,6	0,322	65,1	32,5	1,7	0,3	0
0,18	0,0100	46,7	0,386	203,5	101,7	18,4	4,9	0,1
0,20	0,0144	43,4	0,429	275,7	137,8	35,8	9,7	0,2
0,25	0,0233	35,3	0,536	296,2	148,1	37,2	12,4	0,3
0,28	0,0272	30,8	0,596	219,9	109,9	22,8	9,4	0,2
0,30	0,0291	27,1	0,643	213,7	106,8	18,3	7,6	0,1
0,35	0,0318	19,0	0,751	134,8	67,2	8,6	4,9	0

Таблиця 4.11 – Результати варіантних розрахунків параметра γ при $X_2=\alpha=0,15\pi$ (27°)

$X_1=b/a$	A, Вб/м	δ , мм	k_m , в.о.	$H_{\max} \cdot 10^3$, А/м	$\text{grad}(H)_{\max}$ $\cdot 10^3$, А/м ²	$f_{\max} \cdot 10^9$, А ² /м ³	γ , %	γ_1 , %
0,18	0,0063	52,8	0,353	133,4	66,7	7,7	1,8	0
0,20	0,0108	49,6	0,393	224,8	112,4	21,0	4,4	0,1
0,25	0,02	41,6	0,491	290,0	144,9	39,8	11,2	0,3
0,28	0,0243	37,2	0,545	263,4	131,7	31,2	10,0	0,2
0,30	0,0266	33,6	0,589	258,9	129,4	27,5	8,1	0,2
0,35	0,0306	25,6	0,687	180,4	90,1	14,1	5,9	0,07
0,40	0,0320	17,6	0,785	114,0	56,9	6,1	3,6	0

Таблиця 4.12 – Результати варіантних розрахунків параметра γ при $X_2=\alpha=0,16\pi$ (29°)

$X_1=b/a$	A, Вб/м	δ , мм	k_m , в.о.	$H_{\max} \cdot 10^3$, А/м	$\text{grad}(H)_{\max}$ $\cdot 10^3$, А/м ²	$f_{\max} \cdot 10^9$, А ² /м ³	γ , %	γ_1 , %
0,18	0,0028	58,9	0,325	56,4	28,2	1,5	0,2	0
0,20	0,0072	55,8	0,361	148,2	74,1	9,0	1,9	0,02
0,25	0,0165	47,9	0,451	241,1	120,5	24,8	6,9	0,2
0,28	0,0211	43,2	0,505	284,4	142,1	35,2	8,5	0,2
0,30	0,0237	40,0	0,541	256,9	128,4	27,9	8,1	0,2
0,35	0,0286	32,2	0,631	205,7	102,8	17,8	6,1	0,1
0,40	0,0314	24,3	0,722	158,3	79,0	10,3	4,4	0,04
0,42	0,0319	21,1	0,758	127,7	63,7	8,0	3,8	0

Таблиця 4.13 – Результати варіантних розрахунків параметра γ при $X_2=\alpha=0,17\pi$ (30°)

$X_1=b/a$	A, Вб/м	δ , мм	k_m , в.о.	$H_{\max} \cdot 10^3$, А/м	$\text{grad}(H)_{\max}$ $\cdot 10^3$, А/м ²	$f_{\max} \cdot 10^9$, А ² /м ³	γ , %	γ_1 , %
0,18	0,00119	61,9	0,312	24,8	12,4	0,3	0	0
0,20	0,0054	58,8	0,346	103,3	51,6	4,7	1,0	0
0,25	0,0148	51,0	0,433	245,9	122,9	25,6	5,2	0,2
0,28	0,0195	46,7	0,485	269,7	134,8	29,8	7,7	0,2
0,30	0,0222	43,2	0,520	263,9	131,9	28,8	7,5	0,2
0,35	0,0275	35,4	0,606	198,6	99,2	18,2	6,2	0,1
0,40	0,0308	27,6	0,693	175,1	87,4	12,3	4,8	0,1
0,42	0,0315	24,5	0,727	154,0	76,8	10,1	4,1	0,04

Таблиця 4.14 – Результати варіантних розрахунків параметра γ при $X_2=\alpha=0,18\pi$ (33°)

$X_1=b/a$	A , Вб/м	δ , мм	Заповнення металом, %	$H_{\max}\cdot 10^3$, А/м	$\text{grad}(H)_{\max}\cdot 10^3$, А/м ²	$f_{\max}\cdot 10^9$, А ² /м ³	γ , %	γ_1 , %
0,25	0,0099	60,3	0,385	160,0	79,9	11,6	2,0	0,04
0,28	0,0146	56,1	0,431	226,2	112,9	21,8	3,7	0,1
0,30	0,0175	52,7	0,462	215,5	107,5	21,6	4,8	0,1
0,35	0,0235	45,2	0,539	216,1	108,0	22,0	5,6	0,1
0,40	0,0279	37,7	0,616	206,2	102,9	17,3	5,1	0,1
0,42	0,0293	34,6	0,647	175,6	87,7	14,9	4,7	0,08

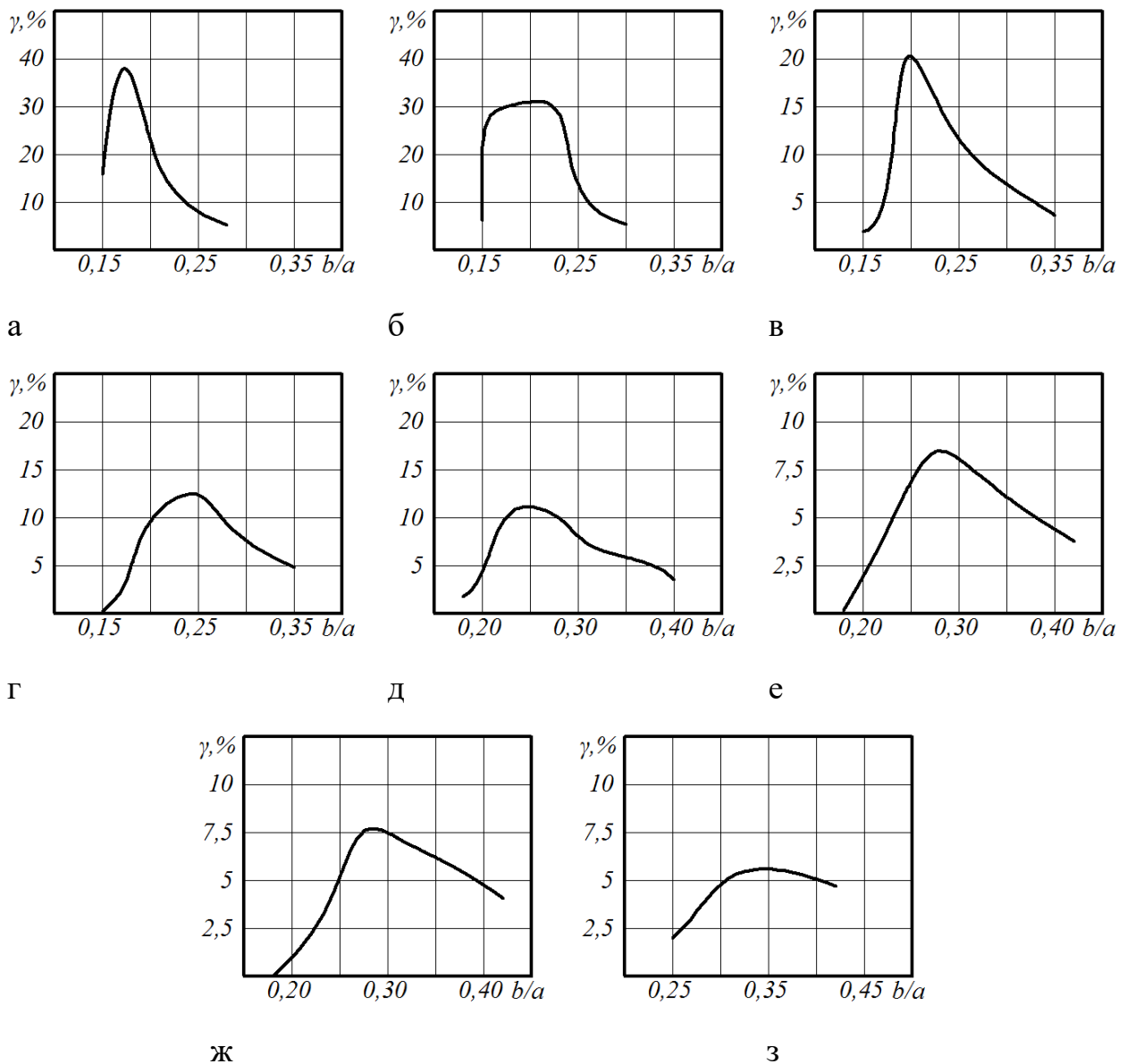


Рис.4.9 – Результати варіантних розрахунків параметра γ :

а – $X_2=\alpha=0,11\pi$; б – $X_2=\alpha=0,12\pi$; в – $X_2=\alpha=0,13\pi$; г – $X_2=\alpha=0,14\pi$;
 д – $X_2=\alpha=0,15\pi$; е – $X_2=\alpha=0,16\pi$; ж – $X_2=\alpha=0,17\pi$; з – $X_2=\alpha=0,18\pi$

Раціональними будуть вважатися варіанти досліджуваних систем, які задовольняють умові

$$\gamma(X_1, X_2) \rightarrow \max. \quad (4.8)$$

Результати розрахунків, отримані під час обчислювального експерименту, показали, що умові (3.15) задовольняє структура S_4 с геометричними критеріями подібності $X_1=b/a=0,18$; $X_2=\alpha=0,11\pi$, для якої параметр γ набуває максимального значення $\gamma= 36,5\%$. Для порівняння – параметр γ для базової структури склав $5,3\%$ (в табл.3.7 параметри базового сепаратора виділені кольором). Таким чином, раціональними для структури S_4 слід вважати параметри: $X_1=b/a=0,18$ та $X_2=\alpha=0,11\pi$.

Достовірність отриманих під час обчислювального експерименту результатів була підтвердження порівнянням з результатами, одержаними іншими дослідниками:

1. В роботі [38] визначено, що інтенсивність і градієнт поля навколо кута трикутного елемента матриці зростають, коли бісектриса гострого кута паралельна напрямку поля. Отримані в роботі результати також свідчать про те, що найбільш високі силові характеристики та значення показника γ має структура (S_4), бісектриса гострого кута трикутних елементів яких паралельна напрямку зовнішнього поля.

2. В роботі [23] показано, що для досягнення необхідних для вилучення феромагнітних включень магнітної сили та інтенсивності магнітного поля в області вістря зуба необхідно, щоб кут α зуба не перевищував $\alpha=0,18\pi=33^\circ$. Отриманий для раціональної структури S_4 геометричний критерій подібності $X_2=\alpha=0,11\pi=20^\circ$ задовольняє цій умові.

ВИСНОВКИ

В магістерській роботі вирішене актуальне наукове завдання по визначенню робочих і енергетичних характеристик поліградієнтних електромагнітних сепараторів з пластинчастими матрицями для вилучення феромагнітних частинок з дисперсних середовищ із використанням сукупності системних методів синтезу і аналізу для підвищення ефективності видалення феромагнітних домішок розміром до 1 мм.

Результати досліджень, проведених за темою роботи, дозволяють сформулювати такі висновки.

1. Визначено основні конструктивні різновиди поліградієнтних магнітних сепараторів, виділені особливості та систематизовані найбільш поширені структурні типи поліградієнтних середовищ, що було використано для визначення повного видового складу поліградієнтних магнітних сепараторів.

2. Показано, що більшість існуючих пристроїв для поліградієнтної магнітної сепарації призначена для очищення рідинних середовищ (пульпи) або запилених газів. У той самий час у зв'язку зі зростанням вимог до якості продукції проблема вилучення високодисперсних феромагнітних включень, які виникають в процесі зносу обладнання, є актуальною й для сипких матеріалів: борошна, круп, цукру, крохмалю, комбікорму, керамічної та фармацевтичної сировини тощо.

3. Показано, що збільшення інтенсивності магнітного поля у сепараторах з електромагнітним збудженням має свою межу, обумовлену насиченням елементів магнітопроводу. Зростання напруженості магнітного поля також пов'язане зі збільшенням споживаної потужності, що призводить до більш високої вартості пристроїв. У той же час підвищення неоднорідності магнітного поля можна досягти за рахунок оптимізації форми, геометричних розмірів і взаємного розташування елементів багатокомпонентної магнітної матриці сепаратора.

4. Запропонований підхід до вибору раціонального варіанту поліградієнтної матриці електромагнітного сепаратора, що складається з двох етапів (1 етап – дослідження ступеня неоднорідності магнітного поля; 2 етап – оцінка спектра силового поля в площині робочих зон досліджуваних структур) та забезпечує розв’язання задачі за критерієм ефективної площі робочої зони.

5. Аналіз, проведений з використанням методу простого перебору варіантів, показав, що структура S_4 з параметрами $X_1=b/a=0,18$ та $X_2=\alpha=0,11\pi$ може вважатися раціональною з точки зору високого значення ефективної площі γ робочої зони ($\gamma=36,5\%$), що у порівнянні з базовою конструкцією сепаратора, конфігурація поліградієнтного середовища якого також відповідає структурі S_4 (параметри базової структури - $X_1=b/a=0,28$, $X_2=\alpha=0,11\pi$), обраної емпіричним шляхом, характеризується наступним:

– максимальна напруженість H_{\max} та максимальний градієнт напруженості $\text{grad}(H)_{\max}$ магнітного поля раціональної структури перевищують майже у 3 рази відповідні показники базової структури;

– розраховане значення ефективної площі робочої зони γ для раціональної структури майже у 7 разів більше, ніж у базової.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Загирняк М. В., Бранспиз Ю. А., Шведчикова И. А. Магнитные сепараторы. Проблемы проектирования: моногр. Киев : Техніка, 2011. 224 с.
2. Кармазин В. И., Кармазин В. В., Замыцкий О. В., Бардовский В. А. Разработка непрерывного камерного высокоградиентного магнитного сепаратора с сильным полем. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2000. № 1. С. 59-63.
3. Толмачев С. Т., Бондаревский С. Л. Классификация гетерогенных структур и условие их двоякопериодичности. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2013. № 5/5 (65). С. 24-28.
4. Пилов П. И., Шутов В. Ю., Кабакова Н. Г., Шатова Л. А. Сепарация ультрадисперсных слабомагнитных материалов в сверхсильных магнитных полях. *Збагачення корисних копалин*. 2017. Вип. 68(109). С. 133-138.
5. Просвирин В. И., Мастюкин Е. П., Кузнецов И. О., Гулевский В. Б. Особенности извлечения ферропримесей из сыпучих сельскохозяйственных материалов. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2011. Вип. 1, Том 1. С. 75-78.
6. Шинкаренко В. Ф. Основы теорії еволюції електромеханічних систем. Київ : Наукова думка, 2002. 288 с.
7. Толмачев С. Т., Бондаревский С. Л., Кондратенко И. П. К вопросу о моделировании процесса движения магнитных частиц в неоднородном магнитном поле. *Вісник Криворізького національного університету*. 2012. № 3(32). С. 224-228.
8. Кириленко А. В., Чехун В. Ф., Подольцев А. Д., Кондратенко И. П., Кучерявая И. Н., Бондар В. В., Шпилевая С. И., Тодор И. Н. Анализ силового воздействия высокоградиентного магнитного поля на магнитные наночастицы в потоке жидкости. *Доповіді Національної академії наук України*. 2010. №9. С. 162-172.
9. Загирняк М. В., Бранспиз Ю. А. Шкивные магнитные сепараторы. Киев : Техніка, 2000. 304 с.
10. Svoboda J., Fujita T. Recent developments in magnetic methods of

material separation. *Miner. Eng.* 2003. № 16 (9). P. 785-792.

11. Загирняк М. В. Исследование. Расчет и усовершенствование шкивных магнитных сепараторов. Киев : ИСМО, 1996. 488 с.

12. Шведчикова И. А. Расчет магнитного поля подъемного электромагнита методом конформных преобразований. *Електротехніка і електромеханіка*. 2013. №1. С. 38-40.

13. Zagirnyak M., Branspiz Yu., Shvedchikova I. Using a conformal mapping method for calculation of a multipolar system magnetic field. *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*. 2012. №7b. P. 98-102.

14. Бранспиз Ю. А., Вельченко А. А. Расчет векторного потенциала в обмоточном окне плоскопараллельного электромагнита с несимметричным зазором. *Техническая электродинамика: Тем. выпуск «Проблемы современной электроники»*. 2010. № 1. С. 21–24.

15. Лаврик В. И. Справочник по конформним отображениям / В. И. Лаврик, В. Н. Савенков. – К.: Наукова думка, 1970. – 252 с.

16. Smolkin M. R., Smolkin R. D., Smolkin E. R. Analysis of Magnetic Fields and Circuits in Separators With Plane-Parallel and Plane-Meridian Symmetry. *IEEE Transactions On Magnetics*. VOL. 44. № 8. P. 1990-2001.

17. Smolkin R. D., Garin Yu. M., Krokhrnal V. S., Sayko O. P. New process for placer gold recovery by means of magnetic separation. *IEEE Transactions On Magnetics*. Vol. 28. № 1. P.671-674.

18. Smolkin R. D. Calculation of Magnetic Field Strength and Electromagnetic Ponderomotive Force of Separators. *IEEE Transactions On Magnetics*. Vol. 38. № 3. P.1528-1533.

19. Гребеников В. В., Прыймак М. В. Исследование влияния конфигурации магнитной системы на моментные характеристики электродвигателей с постоянными магнитами. *Електротехніка та електроенергетика*. 2009. №2. С. 57-60.

20. Бондаревський С. Л. Методи аналізу локальних і приведених магнітних властивостей двоякоперіодичних структур зі складними геометричними та фізичними параметрами : дис. канд. техн. наук : 05.09.05 /

Національна академія наук України, Інститут електродинаміки. Київ, 2014.

21. Загирняк М. В., Подорожний С. В., Загирняк В. Е. Экспериментальное исследование магнитного поля в рабочем зазоре электромагнитной системы, выполненной в виде шайбы с вырезом в кольцевом полюсе. *Вісник КДПУ*. 2006. Випуск 3 (39). Частина 1. С. 59-62.

22. Ковтун В. А. Короткевич С. Г. Обзор современных прикладных программных комплексов для проведения исследований композитных изделий. *Интернет-журнал "Технологии техносферной безопасности"* (<http://ipb.mos.ru/ttb>). 2016. № 1 (65). С. 1-9.

23. ANSYS Theoretical Manual [Електронний ресурс]. – 2018. – Режим доступа : <https://www.ansys.com> (дата звернення: 21.05.2018).

24. Ren L., Zeng Sh., Zhang Y. Magnetic field characteristics analysis of a single assembled magnetic medium using ANSYS software. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2015. № 25. P. 479-487.

25. COMSOL Multiphysics Modeling Software. [Електронний ресурс]. – 2018. – Режим доступа: <http://www.comsol.com/>. (дата звернення: 21.05.2018).

26. Haitao C. Chen H., Bockenfeld D., Rempfer D., Kaminski M., Liu X., Rosengart A. Preliminary 3-D analysis of a high gradient magnetic separator for biomedical applications. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2008. Vol. 320. P. 279-284.

27. Infolytica is now part of Mentor, a Siemens Business [Електронний ресурс]. – 2018. – Режим доступа : <https://www.mentor.com/products/mechanical/infolytica>. (дата звернення: 21.05.2018).

28. Гребеников В. В., Прыймак М. В. Электрогенератор на постоянных магнитах с цилиндрическим магнитным редуктором для ветроустановки. *Гідроенергетика України*. 2017. № 3-4. С. 70-74.

29. Гребеников В. В., Прыймак М. В. Сравнительный анализ магнитных систем электродвигателей с постоянными магнитами для электробуса. *Вісник НТУ "ХПІ": збірник наукових праць. Тематичний випуск: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії*. 2016. № 11

(1183). С. 42-48.

30. Гребеников В. В., Шымчак П., Прыймак М. В. Сравнительный анализ модификаций магнитной системы электродвигателя для электробуса. *Праці ІЕД НАНУ*. 2016. Вип. 43. С. 48-53.

31. Милых В. И., Высочин А. И. Расчет трехмерного распределения магнитного поля мощного турбогенератора в режиме холостого хода. *Електротехніка і електромеханіка*. 2011. №3. С.30-32.

32. Мілих В. І., Н. В. Полякова Числено-польові розрахунки електромагнітних параметрів турбогенераторів. *Вісник НТУ «ХП»*. Тематичний випуск «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії». Харків : НТУ «ХП», 2014. № 38. С. 3-18.

33. ELCUT® Программа моделирования электромагнитных, тепловых и механических задач [Электронный ресурс]. – 2018. – Режим доступа : <http://elcut.ru/> (дата обращения 21.05.2018).

34. QuickField [Электронный ресурс]. – 2018. – Режим доступа: <http://www.quickfield.com/> (дата звернення: 21.05.2018).

35. Finite Element Method Magnetics FEMM [Электронный ресурс]. – 2018. – Режим доступа: <http://www.femm.info/wiki/HomePage> (дата звернення: 21.05.2018).

36. Милых В. И., Поляков И. В., Полякова Н. В., Штангеев Е. И. Расчетно-экспериментальное тестирование программы FEMM и преодоление проблем ее использования для расчета магнитного поля электрических машин. *Електротехніка і Електромеханіка*. 2004. № 3. С. 38-43.

37. Романченко Ю. А., Gerlici J., Шведчикова И. А., Никитченко И. В. Исследование влияния конфигурации магнитной системы сепаратора на постоянных магнитах на распределение магнитного поля в рабочей зоне. *Науково-практичний журнал Електротехніка і електромеханіка*. 2017. №2. С. 13-17.

38. Гребеников В. В. Сравнительный анализ конструктивных модификаций электрогенератора малой мощности с постоянными магнитами и явнополюсным статором. *Техническая электродинамика*. 2013. №2. С. 64-

68.

39. Андреева Е. Г., Татевосян А. А., Семина И. А. Исследование моделей магнитных систем открытого типа в комплексах программ ELCUT и ANSYS. *Омский научный вестник*. 2013. №2 (120). С. 231-235.

40. Гребеников В. В., Прыймак М. В. Способы уменьшения пульсаций электромагнитного момента в электрических машинах с постоянными магнитами и зубцово-пазовым статором. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України: Зб. наук. пр.* 2010. Вип 27. С. 52-57.

41. Шведчикова И. А., Романченко Ю. А. Анализ структурного разнообразия полиградиентных магнитных сепараторов. *Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації: збірник матеріалів конференції XII Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів (Кременчук 10-11 квітня 2014 р.)*. Кременчук : КрНУ, 2014. С. 245-246.

Додаток А

ТЕХНІЧНИЙ ОПИС ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО СЕПАРАТОРА

Сепаратор складається з електромагнітної системи, укладеної в металевий (немагнітний) корпус.

Електромагнітна система (рис. А.1 – А.4) включає в себе два циліндричних осердя *1* із закріпленими на них намагнічуючими котушками *2*, полюса *3*, виконані у вигляді феромагнітних пластин зі скошеними кутами і прикріплені до торцевих частин осердь *1*; з касети, встановленої з можливістю зворотно-поступального руху у вертикальній площині в зазорі між полюсами *3* і виконаної у вигляді короба прямокутного перетину без дна так, що дві протилежні стінки *4* касети, паралельні полюсам *3*, виконані з феромагнітного матеріалу, а дві інші стінки *5* – з немагнітного, при цьому до феромагнітних стінок *4* зсередини кріпляться кілька рядів похило встановлених паралельних феромагнітних пластин *6* з трикутними виступами, зверненими всередину касети, а з зовнішнього боку на стінках *4* і *5* – опорні куточки *7*, виготовлені з феромагнітного матеріалу, і куточки *8*, виконані з немагнітного матеріалу; з живильника *9*, встановленого над касетою сепаратора, і висувного немагнітного приймального бункера *10*, що встановлюється під сепаратором.

Пристрій працює наступним чином. У робочому режимі висувний приймальний бункер *10* відсувається в сторону від касети (див. рис. А.1), а намагнічуючі котушки *2*, обмотки яких з'єднані зустрічно, підключаються до мережі постійного струму. Під дією намагнічуючої сили котушок *2* в просторі між полюсами *3* створюється магнітне поле. При цьому, як видно зі схеми електромагнітної системи на рис. А.4, полюса-пластини *3* набувають різну полярність (див. рис. А.3), так як обмотки котушок *2* з'єднані зустрічно і магнітні потоки в осердях *1* мають однаковий напрямок. Це дозволяє значно збільшити напруженість магнітного поля в зоні *1* (на рис. А.4 зона *1* відзначена пунктиром), тобто в місці розташування касети для проходження

сипучого матеріалу, за рахунок додавання магнітних полів від обох намагнічуючих котушок.

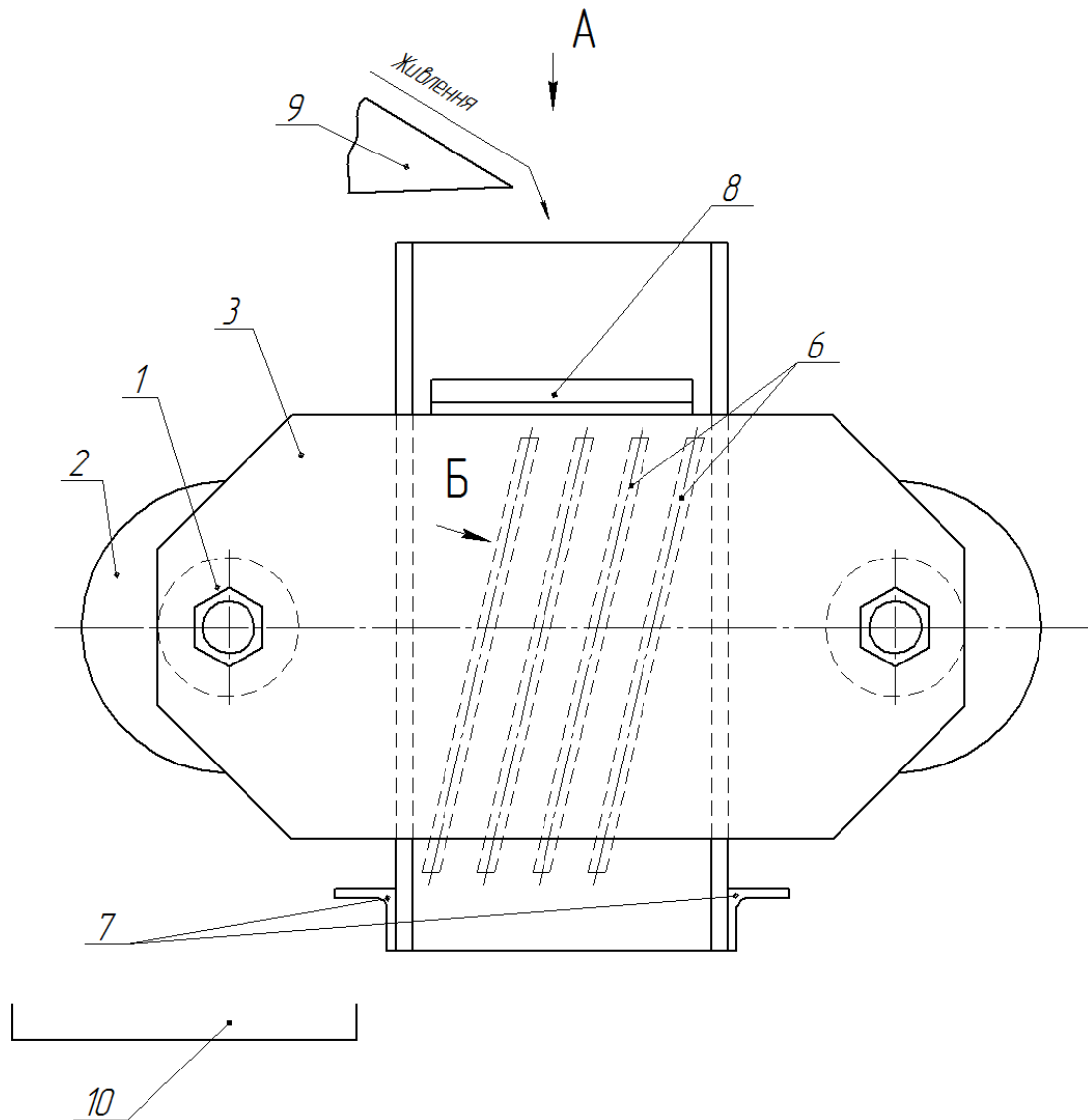


Рисунок А.1 – Зовнішній вигляд електромагнітного сепаратора

Під дією магнітного поля на феромагнітні куточки 7 і на касету в цілому будуть діяти підйомні електромагнітні сили, в результаті чого касета переміститься вертикально вгору до зіткнення (упору) куточків 7 з нижніми гранями полюсів 3.

Немагнітний сипучий матеріал разом зі слабوماгнітними або дрібнодисперсними феромагнітними частинками, які містяться в ньому, подається за допомогою живильника 9 безпосередньо в середину касети на

похилі паралельні пластини 6 з трикутними виступами, зверненими всередину касети.

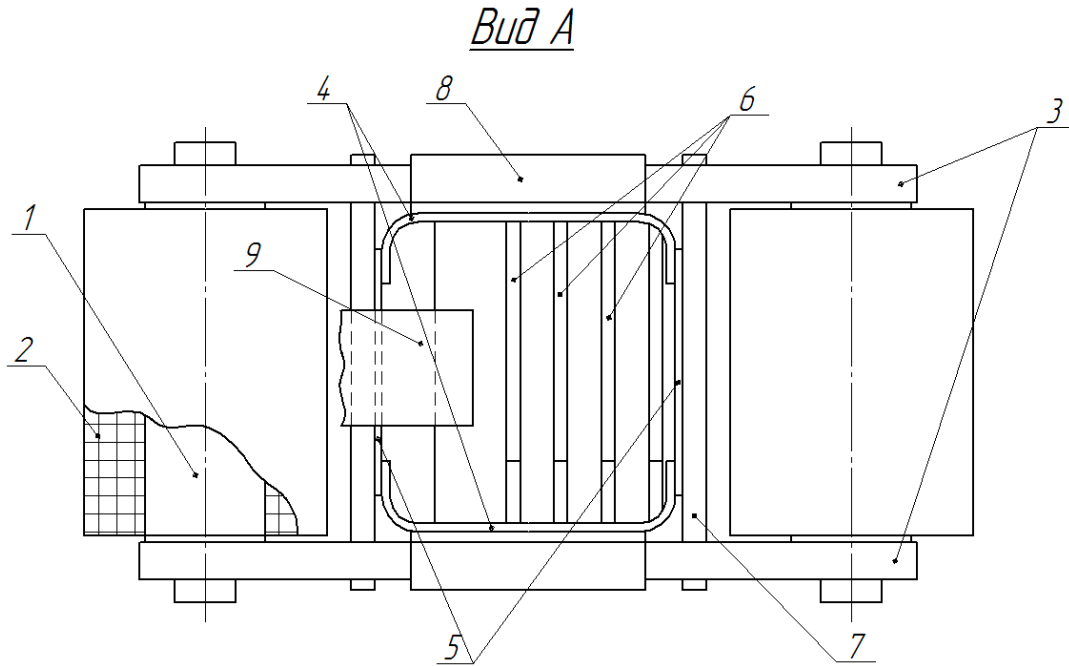


Рисунок А.2 – Зовнішній вигляд електромагнітного сепаратора

Наявність односторонніх трикутних виступів та впадин у пластин 6 дозволяє створити в робочому зазорі, утвореному пластинами, магнітне поле високої неоднорідності. Особливо великі значення градієнтів напруженості магнітного поля матимуть місце у кромках трикутних виступів, де створюються електромагнітні сили, достатні для вилучення дрібнодисперсних феромагнітних або слабомагнітних частинок. При цьому величина зазорів між похило встановленими паралельними рядами пластин 6 практично у 8...12 разів більше в порівнянні з відомими пристроями для магнітної сепарації слабомагнітних і дрібнодисперсних феромагнітних тіл, що дозволяє значно підвищити продуктивність пристрою і уникнути швидкого забивання робочого об'єму магнітними частинками. Крім того, неоднорідність поля у всьому робочому обсязі виявляється досить високою, що забезпечує істотне підвищення надійності вилучення слабомагнітних або дрібнодисперсних феромагнітних тіл.

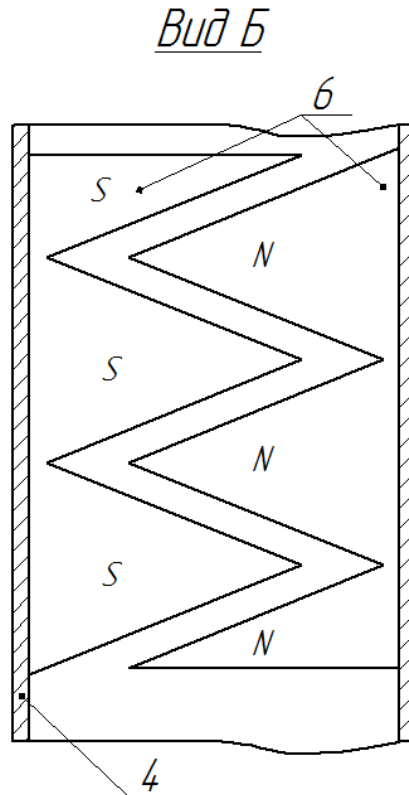


Рисунок А.3 – Полюса-пластини

Сипучий матеріал подається на похилі пластини б в підвішеному стані. Частинки матеріалу, вдаряючись з кромками пластин, постійно змінюють напрямки свого руху, що сприяє кращому перемішуванню матеріалу. Зважений стан і перемішування матеріалу при проходженні через касету полегшують видалення домішок з немагнітного матеріалу. При цьому похилі пластини б розташовані під таким кутом, що матеріал, який підлягає сепарації, проходить через кілька робочих зазорів, утворених пластинами б, що збільшує час перебування сипучого матеріалу в зоні високоградієнтного поля і сприяє більш надійному вилученню магнітних часток.

Таким чином, в робочому режимі немагнітна фракція сипучого матеріалу вільно проходить через касету, а слабомагнітні або дрібнодисперсні феромагнітні частинки під дією сил магнітного поля "налипають" до феромагнітних пластин б, накопичуючись на них.

Для періодичного розвантаження вилучених і "залипших" до феромагнітних пластин б слабомагнітних та дрібнодисперсних феромагнітних частинок котушки 2 відключаються від мережі, а

приймальний бункер 10 встановлюється під касету. При цьому магнітне поле різко послаблюється і касета під дією власної ваги переміщається вертикально вниз до зіткнення немагнітних куточків 8 з верхніми границями полюсів-пластин 3. В результаті відбувається досить ефективне відпадиння вилучених часток в висувний приймальний бункер 10. Далі знову відсувається приймальний бункер 10, котушки 2 знову підключаються до мережі і процес повторюється аналогічно попередньому.

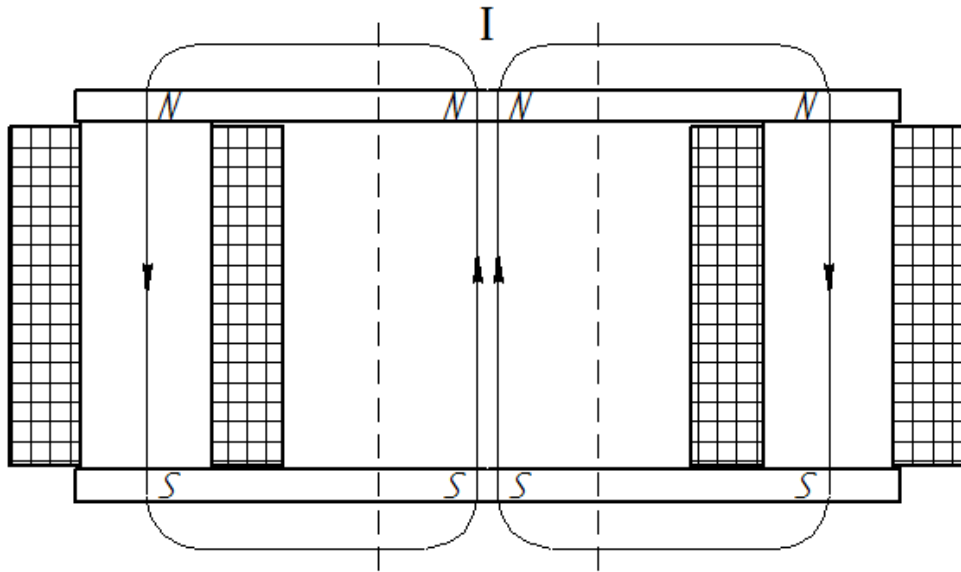


Рисунок А.4 – Схема електромагнітної системи

Число витків кожної котушки – 1968. Обмотувальний дріт марки ПЕТВ, діаметр дроту 1,4 мм, перетин дроту – 1,54 мм².

Загальний вигляд сепаратора і геометричні розміри наведені на рис. А.5.

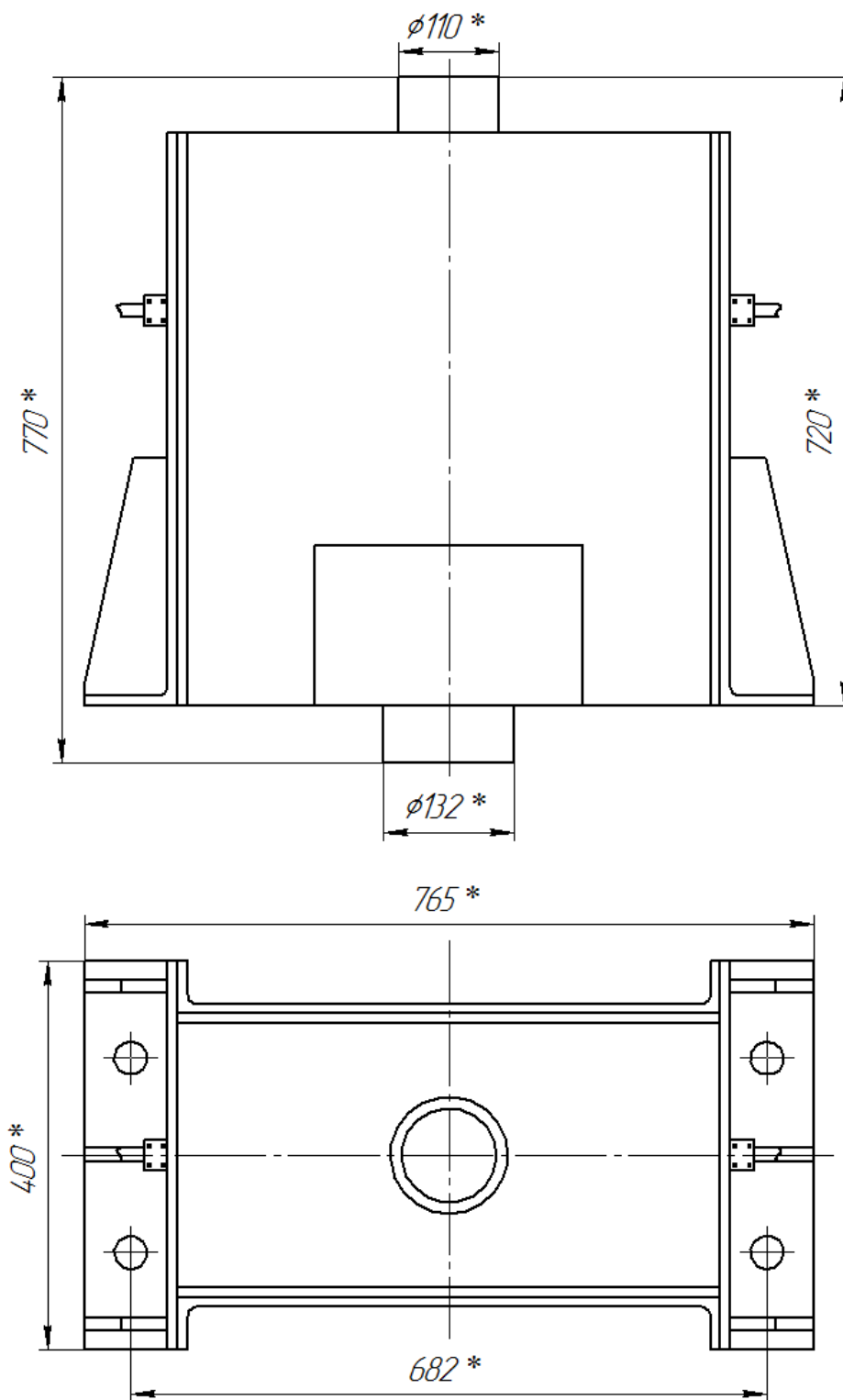


Рисунок А.5 – Загальний вигляд сепаратора і геометричні розміри

Технічну характеристику сепаратора наведено у табл. А.1.

Таблиця А.1 – Технічна характеристика сепаратора

№	Найменування параметрів	Норма для типорозміру СЕМ-200
1	Продуктивність по вихідному продукту, м ³ /год, не більше	5
2	Концентрація металодомішок у вихідному продукті (грам на 1 кг продукту)	0,1...40
3	Крупність металодомішок, мм	0,01...5
4	Ступінь вилучення металодомішок,%, не менше – при крупності 0,01...0,1 мм – при крупності 0,1...1 мм – при крупності від 1 мм та більше	75 90 98
5	Маса сепаратора, кг, не більше	150
6	Габаритні розміри сепаратора, мм, не більше – довжина – ширина – висота	800 450 800
7	Споживана потужність, Вт	300±60
8	Напруженість магнітного поля на робочих кромках зубчастих пластин, кА/м, не менше	250
9	Напруга мережі постійного струму, В – при тривалому режимі роботи (ПВ=100%) – при повторно-короткочасному режимі роботи (ПВ=50%)	80 110
10	Виконання сепаратора	пилозахищене