

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ МИХАЙЛА ОСТРОГРАДСЬКОГО

РОМАНЧЕНКО ЮЛІЯ АНДРІЇВНА



УДК 621.318:621.928.8

**ПОЛІГРАДІЄНТНІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ
СЕПАРАТОРИ З УДОСКОНАЛЕНИМИ
СТРУКТУРАМИ ПЛАСТИНЧАСТИХ МАТРИЦЬ**

Спеціальність 05.09.01 – Електричні машини й апарати

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Кременчук – 2019

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано на кафедрі електричної інженерії Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля Міністерства освіти і науки України, м. Северодонецьк

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Шведчикова Ірина Олексіївна,
Київський національний університет технологій та дизайну
Міністерства освіти і науки України,
професор кафедри енергоменеджменту
та прикладної електроніки

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Гребеніков Віктор Володимирович,
Інститут електродинаміки Національної
академії наук України,
провідний науковий співробітник
відділу електромеханічних перетворювачів

кандидат технічних наук
Волканін Євген Євгенович,
Кременчуцький льотний коледж
Харківського національного університету
внутрішніх справ Міністерства внутрішніх справ України,
викладач навчального відділу

Захист відбудеться «11» грудня 2019 р. о 10:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 45.052.01 у Кременчуцькому національному університеті імені Михайла Остроградського за адресою: 39600, м. Кременчук, Першотравнева, 20.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського за адресою: 39600, м. Кременчук, Першотравнева, 20 і на сайті спеціалізованої вченої ради Д 45.052.01 за електронною адресою: http://www.kdu.edu.ua/spec_rada/avtoref_recall.php?id_r=3

Автореферат розісланий «4» листопада 2019 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради,
к.т.н., доц.



А. В. Некрасов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Найбільш ефективною технологією для вилучення із різних матеріалів феромагнітних частинок розміром до 1мм є поліградієнтна магнітна сепарація. У робочих зонах поліградієнтних сепараторів розміщуються матриці з дискретним поліградієнтним середовищем із заданими електромагнітними властивостями і геометричними параметрами елементарних осередків (феромагнітних тіл), за рахунок яких відбувається зміна первинного магнітного поля, що підвищує градієнт його напруженості, і, як наслідок, надійність вилучення феромагнітних часток. Виходячи з положень генетичної теорії структурної організації електромагнітних систем, поліградієнтні сепаратори можуть бути віднесені до класу сумішених об'єктів, 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 дрібнодисперсних феромагнітних включень, які виникають в процесі зносу обладнання, є актуальною й для сипких матеріалів (борошна, круп, фармацевтичної сировини тощо). В сучасних умовах для очищення сипких матеріалів знайшли застосування переважно відкриті багатополюсні магнітні системи, 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, унеможливує їх застосування для очищення сипких речовин.

Тому *актуальним* науковим завданням є визначення удосконалених структур пластинчастих матриць поліградієнтних електромагнітних сепараторів для вилучення феромагнітних частинок розміром до 1 мм з дисперсних середовищ.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана відповідно до напряму наукових досліджень кафедри електричної інженерії Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, а також є складовою частиною держбюджетних тем, в яких здобувач брав участь як співвиконавець, зокрема держбюджетної теми ДН-04-15 «Дослідження та розробка новітнього покоління магнітометричних приладів діагностики зон переддефектного стану металоконструкцій» (№ держреєстрації 0115U000644); держбюджетної теми ДН-04-17 «Розробка нових приладів для дефектоскопії сталевих колісних пар» (№ держреєстрації 0117U000562).

Мета і задачі дослідження. Мета роботи полягає у визначенні нових удосконалених структур пластинчастих матриць поліградієнтних електромагнітних сепараторів для підвищення ефективності вилучення феромагнітних частинок з дисперсних середовищ.

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

- аналіз функціональних та структурних особливостей поліградієнтних електромагнітних (магнітних) сепараторів;
- визначення генетичної програми (повного видового складу) класу поліградієнтних магнітних сепараторів та синтез структурних варіантів

пластинчастої поліградієнтної матриці на основі трикутних породжувальних елементів;

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

– теоретичні та експериментальні дослідження робочого процесу та характеристик електромагнітного поліградієнтного сепаратора з метою обґрунтування та підтвердження наукових результатів дисертаційної роботи.

Об'єкт дослідження – сепарування феромагнітних частинок з дисперсних середовищ.

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

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 диференціальних 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.

Наукова новизна одержаних результатів:

– дістали подальшого розвитку структурно-системні дослідження функціонального класу магнітних сепараторів, що дозволило вперше визначити межі існування, кількісний склад і генетичну структуру видів поліградієнтних магнітних сепараторів;

– набули подальшого розвитку методи структуроутворення функціонального класу магнітних сепараторів, що дозволило вперше здійснити з використанням генетичних операторів синтезу та перетворень симетрії спрямований пошук нових структурних варіантів пластинчастої поліградієнтної матриці на основі трикутних породжувальних елементів;

– вперше отримано новий аналітичний вираз для розрахунку векторного магнітного потенціалу вздовж границь двовимірних розрахункових моделей робочих зон синтезованих структур поліградієнтної матриці, який враховує геометричні розміри магнітних систем, що дозволяє проводити порівняльний аналіз

структурних варіантів поліградієнтних матриць електромагнітного сепаратора та наближає результати розрахунків до реальних процесів;

– отримав подальший розвиток метод порівняльного аналізу структурних варіантів магнітних систем електромагнітного сепаратора шляхом визначення параметру ефективної площі робочої зони пластинчастої поліградієнтної матриці, який, на відміну від існуючих, дозволяє визначити раціональні структурні варіанти поліградієнтної матриці, що забезпечують підвищення ефективності вилучення феромагнітних частинок з дисперсних середовищ.

Обґрунтованість і достовірність наукових результатів, висновків і рекомендацій забезпечуються коректністю прийнятих при побудові розрахункових математичних моделей припущень і підтверджуються збігом теоретичних положень з результатами математичного моделювання, фізичних експериментів та досліджень інших авторів, позитивним впровадженням результатів роботи.

Практичне значення отриманих результатів:

– за результатами синтезу створено систематизований каталог структурних варіантів пластинчастого поліградієнтного середовища;

– експериментально обґрунтовано спрямований вибір конкурентоспроможних технічних рішень щодо вдосконалення конструкції поліградієнтного електромагнітного сепаратора, на які отримано патенти (патенти України №103156, №107311, №133530);

– розроблено програмне забезпечення, за допомогою якого здійснено розв’язання задачі з оцінки спектру силового магнітного поля в робочій зоні;

– результати дисертаційної роботи впроваджено в навчально-методичній роботі на кафедрі електричної інженерії Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля при викладанні дисциплін «Моделювання електромеханічних систем», «Системне проектування електромеханічних пристроїв», «Технологія виробництва електротехнічного обладнання», «Спеціальні питання теорії електричних машин та апаратів», «Основи теорії структур електромеханічних систем»;

– результати роботи пройшли експериментальну перевірку в умовах науково-дослідних лабораторій кафедри електричної інженерії Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. Отримані експериментальні дослідження підтверджують основні теоретичні положення дисертації;

– результати дисертаційної роботи впроваджені на підприємство ДП «Станично-Луганське ДЛМГ».

Особистий внесок здобувача. Основні результати, які складають суть дисертаційної роботи, отримані автором самостійно. У публікаціях, написаних в співавторстві, здобувачеві належать: у [1] – розрахунки локальних значень магнітної напруженості та коефіцієнту неоднорідності поля; [2, 9, 15, 17, 18-21] – оцінка спектру силового поля; вибір раціональних геометричних параметрів за критерієм ефективної площі; [3] – дослідження впливу форми постійних магнітів методом скінченних елементів з використанням програмного пакету Elcut; [4] – генетичний синтез внутрішньої структури поліградієнтного середовища; [5] – розробка геометричних моделей робочих міжполюсних зон; порівняльний аналіз розподілу індукції і силової функції магнітного поля в робочих зазорах; [6] – побудова

класифікації магнітних сепараторів, що враховує структурні властивості поліградієнтних середовищ; [7] – визначення повного видового складу функціонального класу поліградієнтних електромагнітних сепараторів; [8] – побудова узагальненої генетичної моделі; [10-12, 14] – систематизація та визначення припустимого структурного різноманіття поліградієнтних магнітних сепараторів; [13] – розробка конструктивних рішень для двостадійної магнітної сепарації.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи були представлені й обговорені на: XII Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених і спеціалістів «Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації» (м. Кременчук, Україна, 2014р.); Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених, аспірантів і студентів «Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики» (м. Київ, Україна, 2014 р.); Міжнародних симпозіумах SIEMA-2016, SIEMA-2017 «Проблеми електроенергетики, електротехніки та електромеханіки» (м. Харків, Україна, 2016р., 2017р.); XVII Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика» (м. Кременчук, Україна, 2016р.); XIX міжнародній науково-технічній конференції «Технологія – 2016» (м. Сєверодонецьк, Україна, 2016р.); I, II, III Всеукраїнських інтернет-конференціях студентів, аспірантів та молодих учених «Технічні науки в Україні: погляд у майбутнє» (м. Сєверодонецьк, м. Київ, Україна, 2016р., 2017р., 2018р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Університетська наука. Проблеми міжнародної інтеграції» (м.Люблін, Польща, 2017р.); International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES-2017) (Kremenchug, Ukraine, 2017), VIII Міжнародній науково-практичній конференції «Енергоефективний університет» (м. Київ, Україна, 2018 р.).

Робота обговорювалася та була схвалена на засіданні розширеного семінару Наукової Ради «Наукові основи електроенергетики» в Інституті електродинаміки НАН України (м. Київ, Україна, 2018 р.).

Публікації. Основні положення й результати дисертації відображені у 21 друкованій праці, зокрема: 1 стаття у закордонному виданні (Естонія); 2 статті у фахових виданнях України, занесених до міжнародної наукометричної бази даних *Web of Science™ Core Collection*; 1 стаття у фаховому виданні України, занесеному до міжнародної наукометричної бази даних *Scopus*; 1 стаття у матеріалах міжнародної конференції, що індексується у міжнародній наукометричній базі даних *Scopus*; 4 статті у фахових наукових журналах України, занесених до міжнародних наукометричних баз даних «Ulrich's Periodicals Directory», «Index Copernicus», «Infobase Index», «Google Scholar», «CiteFactor», «Universal Impact Factor» та ін., 9 тез доповідей на конференціях, 3 патенти України на корисну модель. Одна робота опублікована без співавторів.

Структура та обсяг дисертації. Повний обсяг дисертації становить 190 сторінок друкованого тексту й містить анотацію, вступ, чотири розділи, висновки, список використаних джерел і чотири додатки. Основна частина викладена на 144 сторінках. Список використаних джерел складається зі 152 найменувань на 16 сторінках. Дисертація містить 76 рисунків і 30 таблиць, з яких 14 рисунків і 11 таблиць на окремих 12 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи, її зв'язок з науковими програмами та темами, сформульовано мету та завдання дослідження, викладено наукову новизну, описано методи дослідження, дані про практичне значення одержаних результатів, публікації, наведені відомості про особистий внесок здобувача.

У **першому розділі** дисертаційної роботи розглянуто конструктивну різноманітність поліградієнтних пристроїв для магнітної сепарації сипких середовищ; здійснений огляд методів розрахунку магнітних полів в робочих міжполюсних проміжках матриць сепараторів; обґрунтований вибір програмного продукту для проведення чисельно-польових розрахунків.

Аналіз інформаційних джерел, відображений у дисертаційній роботі, показав, що основними структурними елементами поліградієнтних магнітних сепараторів є: джерело магнітного поля (магнітна або електромагнітна система); робочий орган, виконаний у вигляді нерухомої матриці (касети) 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).

Теоретичним та експериментальним методам дослідження електромагнітних та магнітних сепараторів різних типів, у тому числі поліградієнтних, присвячено роботи сучасних вітчизняних та закордонних вчених, зокрема С. Л. Бондаревського, Ю. А. Бранспіза, Є. Є. Волканіна, М. В. Загірняка, В. О. Карташяна, В. І. Кармазіна, В. В. Кармазіна, І. П. Кондратенка, О. Д. Подольцева, Р. Д. Смолкіна, В. Г. Сумцова, С. Т. Толмачова, І. О. Шведчикової, Р. С. Улубабова, В. В. Яковенка, Luzheng Chen, D. Jones, J. Svoboda та інших.

Встановлено, що процеси, які відбуваються в робочому органі сепаратора – поліградієнтному середовищі, в теоретичному і практичному відношеннях є найбільш важливими. Показано, що в поліградієнтних магнітних сепараторах найбільш часто використовуються наступні поліградієнтні середовища (рис. 1): стрижневі; пластинчасті, які можуть бути з гладкими або зигзагоподібними пластинами; кулясті; ґратчасті. У той же час у відомих класифікаціях магнітних сепараторів структурні властивості поліградієнтних середовищ не враховуються.

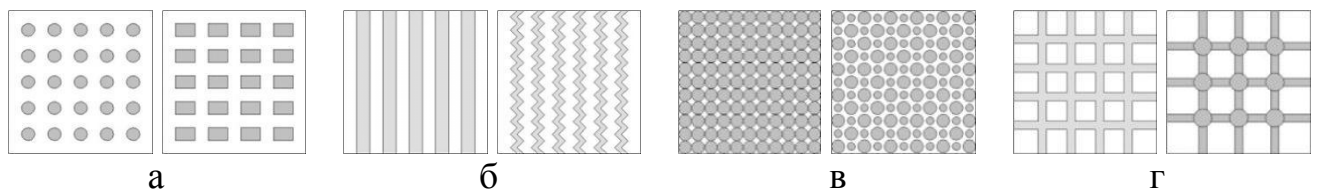


Рисунок 1 – Поліградієнтні середовища:
стрижневі (а); пластинчасті (б); кулясті (в); ґратчасті (г)

У першому розділі також розглянуто основні методи аналізу магнітних полів у міжполюсних робочих зазорах матриць поліградієнтних сепараторів. В результаті проведеного аналізу встановлено, що, в безпосередній інженерній практиці розрахунків магнітосепаруючих систем отримали переважне поширення чисельні

методи, перш за все, метод скінчених елементів, для якого відомі досить доступні програмні продукти, що дозволяють реалізувати його на персональних комп'ютерах. Можливість проведення різноманітних розрахунків при дослідженні поліградієнтних матриць різних конфігурацій також є безперечною перевагою чисельних методів.

В дисертації також обґрунтовано, що в практиці магнітної сепарації застосовують традиційний спосіб для визначення питомої приведенної сили f_m магнітного поля як добутку напруженості магнітного поля сепаратора на її градієнт

$$f_m = \frac{F_M}{\mu_0 \chi V} = \mathbf{H} \text{grad}(\mathbf{H}). \quad (1)$$

Встановлено, що при дослідженні силових магнітних полів питома приведена сила f_m може служити критерієм здатності до вилучення магнітосепаруючих пристроїв, а, отже, і критерієм їх ефективності.

Також представлений огляд існуючих програмних продуктів для розрахунків магнітних полів методом скінчених елементів, на основі якого для проведення подальших досліджень в рамках дисертаційної роботи обрані для розрахунків програмні продукти ELCUT версії 5.6 та Infolytica (програмний модуль Magnet).

Таким чином, проведений автором аналіз функціональних та структурних особливостей поліградієнтних електромагнітних сепараторів та методів розрахунків їх робочих магнітних полів дозволив перейти до вирішення основних задач, поставлених у дисертаційній роботі.

У **другому розділі** проведений структурно-системний аналіз функціонального класу поліградієнтних магнітних сепараторів. Для знаходження області Q існування породжувальних структур поліградієнтних магнітних сепараторів визначено їх істотні ознаки $(p_1, p_2, p_3,)$, сукупність яких узагальнюється цільовою функцією пошуку $F_p=(p_1, p_2, p_3,)$, де p_1 – наявність первинної твердотільної структури (індуктора магнітного поля); p_2 – наявність переміщуваної вторинної дискретної структури (феромагнітних робочих тіл); p_3 – можливість розміщення в робочому просторі первинної структури робочого органу з поліградієнтним середовищем.

Для коректного вирішення завдання пошуку на область Q накладені обмеження: 1) функціональна структура класу обмежується розглядом різноманіття двох підкласів Q_{ep} і Q_n , що забезпечують можливість реалізації оберտального і поступального руху робочого органу, відповідно; 2) породжувальна структура довільного виду представляється електромеханічною парою, утвореною в результаті схрещування твердотільної первинної і вторинної дискретної структур; породжувальна структура допускає можливість просторового поєднання з відповідною структурою вторинного робочого органу матричного типу; 3) пошук здійснюється в межах першого великого періоду P^I генетичної класифікації $P^I \subset \langle S_0 \rangle$, з розгляду виключаються джерела-ізотопи і породжувальні структури групи 0.0; 4) на даному етапі вирішення задачі з розгляду виключаються складні варіанти генетично мутованих і гібридних структур; 5) результати синтезу включають інформацію про генетично допустиму різноманітність як відомих (реально-інформаційних), так і неявних (потенційно можливих) видів, ще відсутніх на даний період їх еволюції (табл. 1, 2).

Таблиця 1 – Видове різноманіття функціонального класу поліградієнтних магнітних сепараторів обертального руху

Група	Підгрупа	Рід				
		ЦЛ	КН	ТП	СФ	ТЦ
0.2	у	ЦЛ0.2у	КН0.2у	ТП0.2у	СФ0.2у	ТЦ0.2у
2.2		ЦЛ2.2у	КН2.2у	ТП2.2у	СФ2.2у	ТЦ2.2у

Таблиця 2 – Видове різноманіття функціонального класу поліградієнтних магнітних сепараторів поступального руху

Група	Підгрупа	Рід			
		ПЛ	ЦЛ	КН	ТП
2.0	х	-	ЦЛ2.0х	КН2.0х	ТП2.0х
2.2		ПЛ2.2х	ЦЛ2.2х	КН2.2х	ТП2.2х
2.2	у	ПЛ2.2у	-	-	-

Аналіз існуючого структурного розмаїття поліградієнтних магнітних сепараторів показав, що всі відомі технічні рішення на даному етапі еволюції представлені структурними представниками 7-ми реально-інформаційних видів $N_{PI} = (S_{ЦЛ2.0х}, S_{ЦЛ2.2у}, S_{ПЛ2.2у}, S_{ЦЛ0.2у}, S_{ТП2.2х}, S_{ТП2.0х}, S_{СФ2.2у})$, де $S_{ЦЛ2.0х}, \dots, S_{СФ2.2у}$ – породжувальні структури реально-інформаційних видів поліградієнтних магнітних сепараторів, які визначалися за результатами історичних і патентно-інформаційних досліджень за період з 1937 по 2017 рр. Кількість неявних $N_{неявн.}$ потенційно конкурентоспроможних видів, ще не задіяних в еволюційному процесі (структурне передбачення), склало $N_{неявн.} = 11$.

З використанням генетичних операторів синтезу побудована узагальнена генетична модель структуроутворення поліградієнтних середовищ (рис. 2), де прийняті наступні позначення: S_0 – елементарна породжувальна структура; S_R – реплікована породжувальна структура; S^*_R – реплікована інверсна структура; S_{RM} – реплікована мутована структура; S^*_{RM} – реплікована інверсна мутована структура; P_1 – популяція реплікованих структур; P_2 – популяція реплікованих інверсних структур; P_3 – популяція реплікованих мутованих структур, P_4 – популяція реплікованих інверсних мутованих структур.

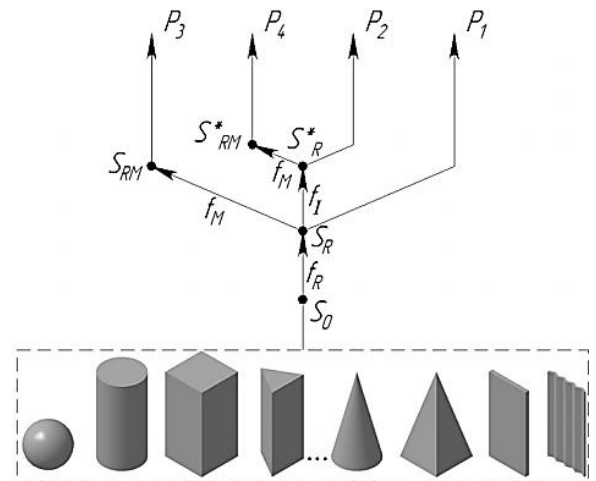


Рисунок 2 – Узагальнена генетична модель структуроутворення поліградієнтних середовищ

Основним генетичним оператором структуроутворення поліградієнтного середовища є оператор реплікації f_R . В роботі показано, що правила розміщення реплікованих елементарних породжувальних структур S_0 в просторі визначаються геометричним класом (формою) сепараційного каналу сепаратора (плоский, циліндричний, сферичний тощо) та підпорядковані принципам симетрії та ізомерії – властивості, що пов'язана з наявністю множини варіантів просторового розміщення однакової кількості однотипних елементів. Досвід проектування поліградієнтних

магнітних сепараторів свідчить про те, що найбільш сильні та неоднорідні магнітні поля в робочих зазорах забезпечують поліградієнтні середовища на основі трикутних елементів. З огляду на це в роботі представлені два варіанти практичної реалізації процедури структурного (генетичного) синтезу структур поліградієнтних середовищ на основі трикутних елементів, що задовольняють цільовим функціям F_{S1} та F_{S2} . Далі для прикладу наведена процедура пошуку можливих варіантів структур матриці, що задовольняють цільовій функції F_{S2}

$$F_{S2} = \{PL, S_0, P, M, Q_{\Sigma}, L_s, L_g\}, \quad (2)$$

де PL – геометричний клас сепараційного каналу (плоский); S_0 – елементарна породжувальна моноструктура поліградієнтного середовища (пластина в формі прямокутного трикутника); P – спосіб подачі речовини в робочу область сепараційного каналу (верхня подача); M – тип матриці сепаратора (багатошарова, всі шари матриці ідентичні); Q_{Σ} – вимога щодо забезпечення гарантованої повноти пошуку структур.

На цільову функцію F_{S2} були накладені наступні обмеження: L_s – виключення з розгляду структур вищих рівнів складності, зокрема, структур зі складними видами симетрії; L_g – обмеження на використання генетичних операторів синтезу: не враховується генетичний оператор мутації f_M ; процедура синтезу обмежується результатами генерації структур при коефіцієнтах реплікації $k_{ROx}=2$, $k_{ROy}=4$, $k_{ROz}=4$ за координатними осями OX , OY та OZ , відповідно; оператор просторової інверсії f_I відповідає за зміну просторового розміщення реплікованих уздовж осі OX моноструктур S_0 . У відповідності до заданої сукупності ознак і обмежень (2) була розроблена генетична модель, за допомогою якої визначений загальний порядок застосування операторів синтезу.

В роботі доведено, що при коефіцієнті реплікації $k_R \geq 2$ допускаються різні варіанти просторових компонувань структур (ізомерних композицій), кількість яких зростає зі збільшенням значення k_R (рис. 3). Ця властивість носить системний характер, так як проявляється на будь-якому рівні структурної організації багатоелементних електромеханічних структур.

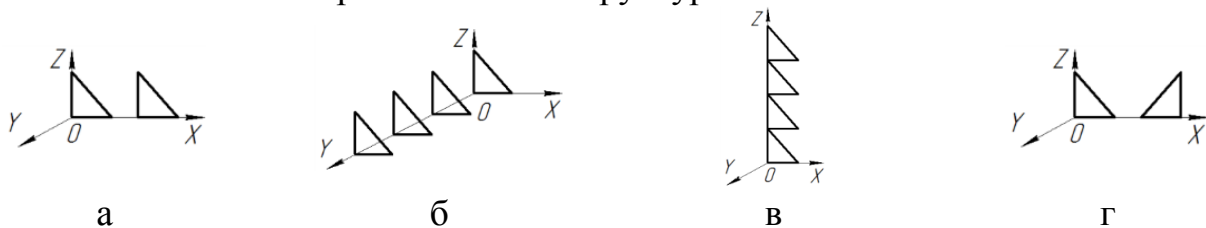
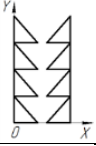

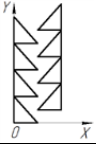
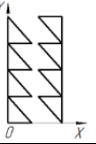
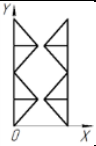
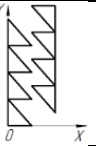


Рисунок 3 – Приклади просторових композицій при різних коефіцієнтах реплікації: $k_{ROx}=2$ (а); $k_{ROy}=4$ (б); $k_{ROz}=4$ (в); $k_{ROx}=2$ (г)

Проявом симетрії поліградієнтних середовищ є періодичність просторового розподілу однакових елементарних структурних форм (моноструктур). Поліградієнтні середовища можна віднести до симетричних фігур, які підпадають під дію законів симетрії, що виявляються за допомогою елементів симетрії: центру інверсії ($\bar{1}^*$) – центральна симетрія; площини симетрії (m) – дзеркальна симетрія; вектора перенесення T – переносна симетрія або трансляція; площини P_i ковзного відображення – змінна симетрія. З використанням перетворень симетрії для заданої

функції пошуку F_{S2} отримано множину (S_1, S_2, \dots, S_n) , що складається з $n = 6$ ізомерних композицій поліградієнтного середовища (табл. 3).

Таблиця 3 – Результати синтезу просторових ізомерних композицій поліградієнтного середовища за заданою функцією пошуку F_{S2}

Код	Геометрична модель ізомеру	Операція симетрії	Елементи симетрії	Код	Геометрична модель ізомеру	Операція симетрії	Елементи симетрії
S_1		Дзеркальна симетрія	m_v	S_4		Дзеркальна симетрія з ковзанням	m_g, m_v, P_t
S_2		Дзеркальна симетрія з ковзанням	m_v, P_t	S_5		Центральна симетрія	$(\bar{1}^*)$
S_3		Дзеркальна симетрія	m_g, m_v	S_6		Центральна симетрія з ковзанням	$(\bar{1}^*), P_t$

Достовірність результатів синтезу поліградієнтних середовищ підтверджена шляхом порівняння результатів патентно-інформаційного пошуку та результатів синтезу. За результатами моделювання отримано три патенти.

Таким чином, дослідження, проведені у другому розділі, дозволили визначити генетичну програму (повний видовий склад) функціонального класу поліградієнтних магнітних сепараторів та синтезувати структурні варіанти поліградієнтних середовищ електромагнітного сепаратора для очищення сипких речовин у відповідності до прийнятої цільової функції та операцій симетрії.

В **третьому розділі** з метою визначення раціональних конфігурацій поліградієнтних матриць та їх активних розмірів було проведено чисельне моделювання розподілу магнітного поля в робочих міжполюсних зонах в двовимірній лінійній постановці. Для цього обрані чотири структурних варіанти (композиції) (S_1, S_3, S_4, S_5) пластинчастого поліградієнтного середовища, отримані шляхом генетичного моделювання та застосування операцій симетрії (з періодом трансляції T). Всі обрані структурні варіанти задовольняють інтегральній цільовій функції пошуку F_{S2} . Структури S_2 та S_6 , які отримані з застосуванням ковзної симетрії з половинним періодом трансляції $T/2$, виключено з розгляду через їх відносну складність.

Запропоновано проводити вирішення задачі по вибору раціональних структурних варіантів поліградієнтних матриць в процесі обчислювального експерименту в два етапи: 1) попередній чисельно-польовий аналіз синтезованих структур – шляхом оцінки ступеня неоднорідності магнітного поля в їх робочих зазорах; 2) визначення раціональних структур поліградієнтних матриць – шляхом оцінки та порівняльного аналізу спектра силового поля $H_{grad}(H)$ в площині робочих зон синтезованих структур.

Магнітне поле в робочій зоні сепаратора описується системою рівнянь Максвелла у магнітостатичному наближенні у відсутності струму, доповненою

матеріальними рівняннями, що визначають фізичні властивості матеріалів,

$$\begin{aligned}\nabla \times \mathbf{H} &= 0; \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0,\end{aligned}\quad (3)$$

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

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

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H}, \quad (4)$$

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 формулюються відносно 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

$$\nabla^2 \mathbf{A} = 0. \quad (5)$$

Рівняння (5) з відповідними граничними умовами було розв'язано методом скінченних елементів за допомогою програми ELCUT 5.6. На рис. 4 представлені розрахункові моделі досліджуваних робочих зон, що відповідають поставленій задачі першого етапу досліджень.

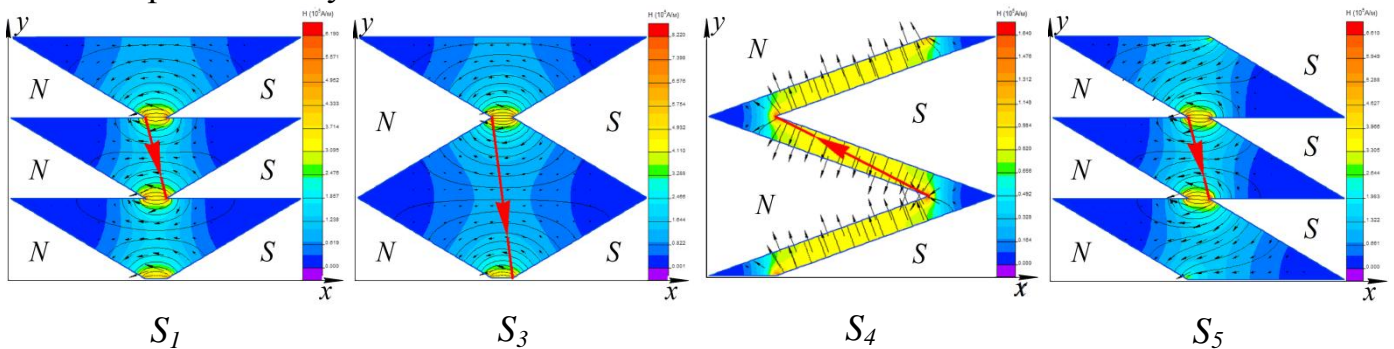


Рисунок 4 – Розрахункові моделі робочих зон досліджуваних структур

Основні геометричні розміри робочих зон, які варіювалися при дослідженні, показані на рис. 5 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. Задавалися наступні відношення для досліджуваних областей: $X_1 = b/a$ та $X_2 = \alpha$. У цьому випадку результати моделювання мають вигляд залежностей досліджуваних характеристик від відносних величин, що характеризують геометрію полюсів магнітної системи.

В якості базового варіанта сепаратора при проведенні порівняльного аналізу прийнята структура з наступними характеристиками: код структури – S_4 ; геометричні критерії подібності – $X_1 = b/a = 0,28$; $X_2 = \alpha = 0,11\pi$. За базовий варіант прийнятий магнітний сепаратор, розроблений емпіричним шляхом та реалізований у вигляді фізичної моделі.

Діапазони варіювання відношень X_1 та X_2 , які мають практичний інтерес, на першому етапі досліджень склали: $X_1=b/a=0,2\dots0,4$; $X_2=\alpha=0,22\pi\dots0,44\pi$. Приймалися 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.

Розрахункова область (показана на рис. 6 на прикладі структури S_4) обмежена контуром $abcdefgh$, для якого задавалися наступні граничні умови: ah – силова лінія, для якої векторний магнітний потенціал $A=0$ (умова Діріхле); de – силова лінія, для якої також задається гранична умова Діріхле, що визначає поведінку нормальної складової індукції на границі. На ділянці de значення векторного магнітного потенціалу є постійним $A_{de}=const$; ab, bc, cd, ef, fg, gh – границі, що відповідають ідеальним сталевим поверхням, для яких $H_t=0$ (однорідна умова Неймана).

Попередня оцінка ступеня неоднорідності магнітного поля в робочих зонах всіх синтезованих структур виконана шляхом порівняння показників неоднорідності поля $k = H_i / H_0$ (H_i – напруженість поля в i -ої контрольній точці, H_0 – середня напруженість в даній області) уздовж характерних ліній. 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 (позначені стрілками на рис. 4), що з'єднують вершини протилежних трикутних пластин матриці.

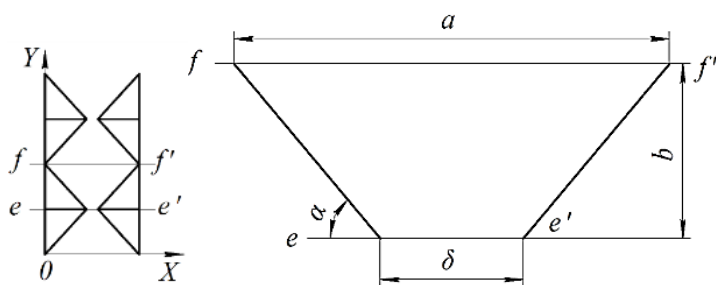


Рисунок 5 – Основні геометричні розміри робочої зони на прикладі структури S_3

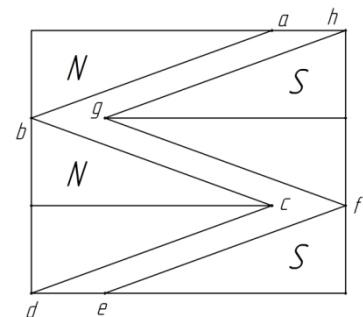


Рисунок 6 – Розрахункова модель робочої зони (для структури S_4)

В досліджуваних робочих областях синтезованих структур S_i проводилося визначення локальних значень магнітної напруженості H_i поля в точках вздовж характерних ліній на відстанях, що становлять 0, 20, 40, 60, 80 і 100% від довжини характерної лінії. Були отримані результати розрахунку інтегрального коефіцієнта k_i неоднорідності поля в залежності від геометричних розмірів пластин і для різних конфігурацій поліградієнтних середовищ.

Коефіцієнт неоднорідності k_i змінюється від нуля до одиниці: $k_i \leq 0,3$ – слабо однорідне (або слабо неоднорідне) поле; $0,3 < k_i \leq (0,9\dots1)$ – неоднорідне поле. 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 $X_1=b/a=0,2\dots0,4$ магнітне поле в робочих зазорах слабо неоднорідне, тобто $k_i \leq 30\%$. Даний метод дозволив відсікти структури зі слабо неоднорідними полями. Однак

для остаточного вибору раціональних структур була здійснена оцінка спектра силового поля $H_{grad}(H)$ у всій площині робочої зони.

При оцінці спектру силового поля $H_{grad}(H)$ в розрахунковій області робочої зони (рис. 6) має бути задане певне числове значення векторного магнітного потенціалу A_{de} на ділянці de , обумовлене геометричною конфігурацією робочої зони. Для вирішення цього завдання був проведений чисельно-польовий 3D-аналіз із застосуванням програмного пакету Infolytika, результати якого наведені в наступному розділі. У зв'язку з тим, що чисельно-польовий аналіз просторового розподілу магнітного поля потребує значних обчислювальних та часових ресурсів, було вирішено обмежитись на даному етапі розглядом тільки тих структурних варіантів матриці, які належать до того ж самого структурного коду S_4 , що і базова конструкція сепаратора.

До розгляду був введений так званий коефіцієнт заповнення $k_m=(b/a)\cdot ctg\alpha$, який пов'язує основні геометричні співвідношення ($X_1=b/a$, $X_2=\alpha$) елементів матриці сепаратора. Далі шляхом випадкової вибірки обрані три структурні варіанти матриці електромагнітного сепаратора з наступними вихідними та розрахунковими параметрами: *варіант 1*: $X_1=b/a=0,18$; $X_2=\alpha=0,15\pi$, розрахункове значення магнітного потоку $\Phi=1,261\cdot 10^{-5}$ Вб; $A_{de}=6,3\cdot 10^{-3}$ Вб/м; $k_m=0,3532$; *варіант 2*: $X_1=b/a=0,40$; $X_2=\alpha=0,18\pi$, розрахункове значення магнітного потоку $\Phi=5,581\cdot 10^{-5}$ Вб; $A_{de}=27,9\cdot 10^{-3}$ Вб/м; $k_m=0,616$; *варіант 3*: $X_1=b/a=0,28$; $X_2=\alpha=0,11\pi$ (відповідають базовій конструкції сепаратора), розрахункове значення магнітного потоку $\Phi=6,40\cdot 10^{-5}$ Вб; $A_{de}=0,032\cdot 10^{-3}$ Вб/м; $k_m=0,769$.

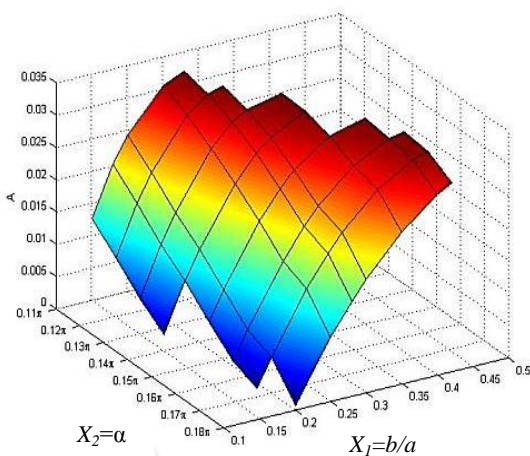


Рисунок 7 – Розподіл векторного магнітного потенціалу A_{de}

Прийняті на початковому етапі дослідження діапазони зміни критеріїв X_1 та X_2 ($X_1=b/a=0,2\dots 0,4$; $X_2=\alpha=0,22\pi\dots 0,44\pi$) були відкориговані у відповідності до геометричних особливостей обраної структури S_4 та склали: $X_1=b/a=0,15\dots 0,42$, $X_2=\alpha=0,11\pi\dots 0,18\pi$. З урахуванням цього отримана наступна залежність векторного магнітного потенціалу A_{de} від коефіцієнту заповнення k_m та від критеріїв X_1 та X_2 : $A_{de} = -0,1349k_m^2 + 0,2132k_m - 0,0522$ (рис. 7).

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 $f_{min}=(H_{grad}(H))_{min}$, за якої забезпечується, виходячи з досвіду проектування магнітних сепараторів, достатня ефективність видалення феромагнітних включень (при розрахунках прийняте значення $f_{min}=3\cdot 10^8$ А²/м³); f_{max} – максимальне значення питомої приведенної сили, яке для базової моделі становило $f_{max}=(H_{grad}(H))_{max}=8,6\cdot 10^9$ А²/м³. 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 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 $f_{np} > f_{max} = 8,6 \cdot 10^9 \text{ A}^2/\text{м}^3$. Раціональними вважаються варіанти досліджуваних систем, які задовольняють умові: $\gamma(X_1, X_2) \rightarrow \max$. Результати розрахунків, отримані під час обчислювального експерименту, показали, що цій умові задовольняє структура S_4 з геометричними критеріями подібності $X_1=b/a=0,18$; $X_2=\alpha=0,11\pi$, для якої параметр γ набуває максимального значення $\gamma=36,5\%$.

Таким чином, раціональними для структури S_4 слід вважати параметри: $X_1=b/a=0,18$ та $X_2=\alpha=0,11\pi$. При цьому, за оціночними розрахунками, продуктивність електромагнітного сепаратора з раціональною структурою пластинчастої матриці при незмінній ефективності вилучення феромагнітних включень збільшилась на 3-5% у порівнянні з продуктивністю базового варіанту пристрою.

У **четвертому розділі** наведені результати розрахунково-експериментальних досліджень електромагнітного сепаратора та напрямки його удосконалення.

Враховуючи, що різниця значень векторного магнітного потенціалу $|\overline{A_{de}} - \overline{A_{ah}}| = |\overline{A_{de}}|$ дорівнює середньому потоку вектора магнітної індукції (магнітному потоку) Φ у робочому повітряному проміжку, який припадає на одиницю товщини t полюсу у напрямку осі $0z$ ($t=6 \text{ мм}$, рис. 8), тобто визначається співвідношенням $|\overline{A_{de}}| = \Phi/t$, то для визначення величини потенціалу A_{de} був розрахований магнітний потік Φ .

Визначення магнітного потоку Φ у робочих повітряних проміжках проводилося шляхом комп'ютерного 3D-моделювання з використанням модулю Magnet програмного комплексу Infolytica. Побудова геометрії 3D-моделі з метою її імпортування в модуль Magnet здійснена в програмі КОМПАС. На першому етапі досліджень для обґрунтування можливості застосування програмного комплексу Infolytica було вирішене тестове завдання та здійснена верифікація комп'ютерної 3D-моделі базового електромагнітного сепаратора.

За результатами порівняльного аналізу, встановлено, що відносна похибка чисельного розрахунку магнітного поля в робочій зоні 3D-моделі базової конструкції електромагнітного сепаратора у порівнянні з результатами експериментальних досліджень магнітного поля на фізичній моделі сепаратора не перевищувала 10%. Це свідчить про високу узгодженість отриманих результатів.

Для подальшого аналізу шляхом випадкової вибірки, як зазначено вище, обрані три варіанти структури S_4 електромагнітного сепаратора. При моделюванні були прийняті наступні вихідні дані: сила струму в обмотках – 3,2 А; матеріал магнітопроводу, стінок матриці, які паралельні полюсам магнітопроводу, та пластин матриці - Ст.3, двох інших стінок – алюміній. На рис. 9 для прикладу наведено

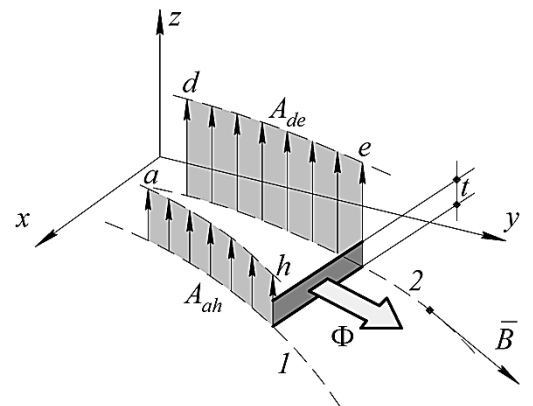


Рисунок 8 – Векторний магнітний потенціал плоско-паралельного магнітного поля

картину магнітного поля в магнітопроводі електромагнітного сепаратора для *варіанту 1* ($\delta=53$ мм).

Розрахункове значення магнітного потоку Φ , що приходиться на одиницю товщини полюса t , склало $\Phi/t=0,0000126111/0,006= 0,00210185$ Вб/м. Гранична умова A_{de} розраховувалась таким чином: $A_{de}=3\Phi/t=3\cdot 0,00210185=0,00630554$ Вб/м. Ця гранична умова приймалася при 2D-моделюванні розрахункової моделі для варіанту 1. Аналогічним чином було здійснено моделювання для варіантів 2 та 3 (відносні похибки не перевищували 14,6% та 10,3%, відповідно). За результатами моделювання був отриманий вираз для визначення векторного магнітного потенціалу A_{de} .

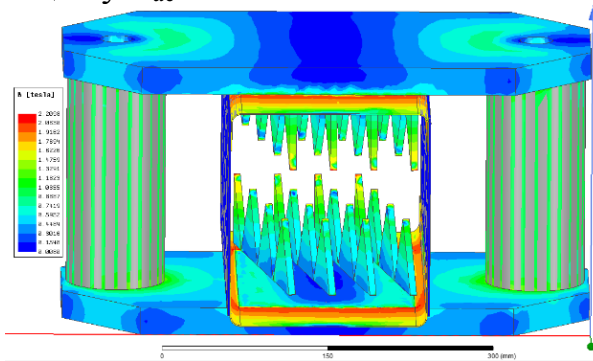


Рисунок 9 – Картина магнітного поля в магнітопроводі сепаратора, отримана при 3D-моделюванні (варіант 1)

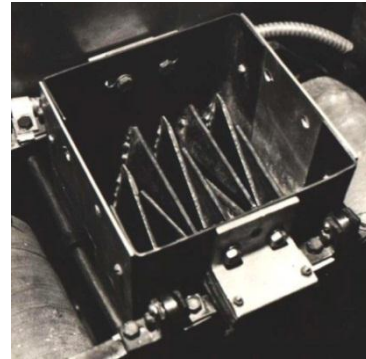


Рисунок 10 – Розташування пластин в матриці удосконаленої конструкції сепаратора

Для забезпечення більш рівномірного розподілу локальних зон високої інтенсивності та підвищення неоднорідності магнітного поля в робочому об'ємі матриці сепаратора запропонована його удосконалена конструкція (рис. 10), в якій суміжні ряди паралельних феромагнітних пластин матриці встановлено із чергуванням трикутних виступів та впадин у протилежних напрямках. Для оцінювання переваг удосконаленої конструкції електромагнітного сепаратора перед базовою проведені дослідження розподілу магнітної індукції в робочій зоні матриці сепаратора. Для вирішення цього завдання також був задіяний метод комп'ютерного 3D-моделювання з використанням програмного комплексу Infolytica. Результати досліджень показали, що інтегральний показник неоднорідності поля для характерних точок склав, відповідно: для базової моделі – 0,9%, для удосконаленої моделі – 14,9%.

З застосуванням фізичної моделі (рис.10) були проведені експериментальні дослідження з визначення ефективності роботи удосконаленої конструкції електромагнітного сепаратора та здійснено порівняння її з базовою. Результати експериментальних досліджень показали, що і базова, і удосконалена конструкції електромагнітного сепаратора забезпечують достатньо високу ефективність вилучення феромагнітних включень (90,3-95,0)% при вихідній концентрації (1-10) г на 1 кг продукту. При невисокій концентрації металевих домішок у пробі (менше 1 г на 1 кг продукту) більш високу ефективність вилучення (94,4 %) металевих включень забезпечує удосконалена конструкція електромагнітного сепаратора.

Для вирішення завдання по дослідженню впливу форми елементів багатокомпонентної пластинчастої матриці електромагнітного поліградієнтного

сепаратора на його силові характеристики були розглянуті елементарні монопластини у формі рівнобедреної трапеції. Проведено чисельно-польовий аналіз розподілу магнітного поля в робочих міжполюсних зонах матриці з поліградієнтним середовищем на основі пластин у формі рівнобедреної трапеції. Розраховувались максимальні значення напруженості H_{\max} , градієнту напруженості $\text{grad}H_{\max}$, приведеної магнітної сили f_{\max} та коефіцієнт ефективної площі γ в робочій зоні сепаратора при зміні відношення основ трапеції. Встановлено, що при незначному погіршенні (приблизно на 5%) максимального значення приведеної магнітної сили f_{\max} , показник ефективної площі робочої зони γ збільшується майже у 2 рази. Тому трапецеїдальна форма пластин матриці, яку можна отримати шляхом незначної механічної доробки, може бути рекомендована для підвищення ефективності роботи сепаратора.

Таким чином, за результатами розрахунково-експериментальних досліджень електромагнітного сепаратора визначені основні напрямки конструктивних удосконалень пластинчастих поліградієнтних матриць.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішене актуальне наукове завдання з визначення удосконалених структур пластинчастих матриць поліградієнтних електромагнітних сепараторів 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 дисертаційної 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 запиленних газів. У той самий час у зв'язку зі зростанням вимог до якості продукції проблема вилучення дрібнодисперсних 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. Розроблено генетичну модель структуроутворення поліградієнтного середовища, за допомогою якої встановлено, що структура генома поліградієнтного середовища, в якості елементарної одиниці якої була прийнята пластина в формі прямокутного трикутника, представлена шістьма породжувальними структурами S_{XR} , S_{YR} , S_{ZR} , S^*_{XR} , S^*_{XZR} , S^*_{XYZR} . З використанням дзеркальної, переносної, центральної

і ковзної операції симетрії синтезовані шість ізомерних композицій ($S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6$) поліградієнтного середовища, які відповідають породжувальній структурі S^*_{XYZR} . В результаті патентно-інформаційного пошуку виявлені структурні представники магнітних сепараторів, поліградієнтні середовища яких можуть бути віднесені до ізомерних композицій S_3 та S_4 , що підтверджує достовірність процедури синтезу. Зокрема, до структури S_4 належить конструкція електромагнітного поліградієнтного сепаратора, яка прийнята в якості базової при подальших дослідженнях. За допомогою генетичного моделювання отримано три нових технічних рішення, захищених охоронними документами.

5. 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.

6. 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 - $X_1=b/a=0,28$, $X_2=\alpha=0,11\pi$), та яка обрана 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.

7. Запропоновано підхід до визначення граничної умови (векторного магнітного потенціалу) на границі *de* двовимірних розрахункових областей, який ґрунтується на дослідженні просторового розподілу магнітного поля в робочій зоні електромагнітного сепаратора. Для трьох тривимірних моделей електромагнітної системи сепаратора (структура S_4), обраних шляхом випадкової вибірки, з використанням модулю Magnet програмного комплексу Infolytica отримані числові значення векторного магнітного потенціалу на границі області. Розрахунок граничних умов для всіх інших моделей, розташованих всередині вибірки, здійснено шляхом інтерполяції.

8. Для забезпечення більш рівномірного розподілу локальних зон високої інтенсивності та підвищення неоднорідності магнітного поля в робочому об’ємі матриці електромагнітного сепаратора запропонована його удосконалена конструкція, в якій суміжні ряди паралельних феромагнітних пластин матриці встановлено із чергуванням трикутних виступів та впадин у протилежних напрямках. Як показали результати комп’ютерного 3D-моделювання, удосконалена конструкція електромагнітного сепаратора у порівнянні з базовою відрізняється більш високим значенням інтегрального показника неоднорідності поля. Інтегральний показник неоднорідності поля для характерних точок склав, відповідно: для базової моделі – 0,9%, для удосконаленої моделі – 14,9%.

9. Експериментальні дослідження на фізичній моделі показали, що удосконалена та базова конструкції електромагнітного сепаратора забезпечують достатньо високу ефективність вилучення феромагнітних включень (90,3-95,0)% при їх вихідній концентрації (1-10) г на 1 кг продукту. У той самий час при невисокій концентрації металевих домішок у пробі (менше 1 г на 1 кг продукту) більш високу ефективність вилучення металевих включень забезпечує удосконалена конструкція електромагнітного сепаратора.

10. Вирішене завдання по дослідженню впливу трапецеїдальної форми елементарних монопластин багатокомпонентної пластинчастої матриці базової конструкції електромагнітного сепаратора ($X_1=b/a=0,28$, $X_2=\alpha=0,11\pi$) на його силові характеристики. Встановлено, що при зміні форми трикутних пластин на трапецеїдальні при незмінному максимальному значенні напруженості магнітного поля у повітряному проміжку параметр γ ефективної площі робочої зони набуває найбільшого значення при відношенні основ трапеції 0,1. При незначному погіршенні (приблизно на 5%) максимального значення приведеної магнітної сили f_{\max} показник γ збільшується майже у 2 рази. Тому трапецеїдальна форма пластин матриці, яку можна отримати шляхом незначної механічної доробки, може бути рекомендована до використання.

11. Практична реалізація досліджень, отриманих в дисертаційній роботі, відкриває нові напрямки в розробці пластинчастих матриць поліградієнтних магнітних сепараторів з потенційною новизною.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Статті у закордонних виданнях:

1. Romanchenko J., Shvedchykova I., Nikitchenko I. Analysis of magnetic field distribution in matrix of magnetic separator with lamellar polygradient medium. *EUREKA: Physics and Engineering*. Estonia, 2017. Vol. 2(9). PP. 40-46.

Статті у журналах України, занесених до міжнародних наукометричних баз даних Web of Science™ Core Collection та Scopus:

2. Романченко Ю. А., Gerlici J., Шведчикова І. О., Нікітченко І. В. Визначення раціональних геометричних параметрів пластинчастих елементів магнітної матриці поліградієнтного сепаратора. *Науково-практичний журнал Електротехніка і електромеханіка*. 2018. № 4. С. 58-62. (*Web of Science™ Core Collection*).

3. Романченко Ю. А., Gerlici J., Шведчикова І. А., Нікітченко І. 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. (*Web of Science™ Core Collection*).

4. Романченко Ю. А., Шведчикова І. А., Луценко І. А. Исследование закономерностей структурообразования полиградиентных сред. *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. 2015. Т. 4, №7 (76). С. 62 – 67. (*Scopus, Index Copernicus, ПИИЦ, Ulrich's Periodicals Directory, DRIVER, BASE, World Cat, Electronic Journals Library, DOAG, EBSCO, Research Bib, American Chemical Society*).

5. Romanchenko J., Shvedchykova I., Nikitchenko I. Comparative analysis of

inhomogeneity degree of magnetic field of polygradient magnetic separators for purification of bulk materials. *Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. 2018. P. 144 – 147. (Scopus).

Статті у журналах України, занесених до міжнародних наукометричних баз даних:

6. Романченко Ю. А., Шведчикова И. А. Классификация полиградиентных магнитных сепараторов. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. 2014. №19 (1062). С. 64-76. (*Ulrich's Periodicals Directory*).

7. Романченко Ю. А., Шведчикова И. А. Структурно-системный анализ полиградиентных магнитных сепараторов. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2015. Т.2, №15. С. 117-125. (*Google Scholar*).

8. Романченко Ю. А., Шведчикова И. О. Генетичне моделювання та синтез нових структур поліградієнтних матриць магнітних сепараторів. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал*. 2016. Вип. 2 (34). С. 17-24. (*Ulrich's Periodicals Directory, Index Copernicus, CiteFactor, Polish Scholarly Bibliography, InfoBase Index, Google Scholar, Universal Impact Factor*).

9. Романченко Ю. А., Шведчикова И. О. Дослідження силових характеристик поліградієнтного електромагнітного сепаратора при зміні форми пластин матриці. *Вісник КНУТД*. 2018. №4 (124). С. 68-77. (*Ulrich's Periodicals Directory, EBSCOhost, WorldCat, Index Copernicus, Research Bible, InfoBase Index, Google Scholar*).

Наукові праці, які свідчать про апробацію матеріалів дисертації:

10. Романченко Ю. А., Шведчикова И. 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.

11. Романченко Ю. А., Шведчикова И. А. Определение видового разнообразия функционального класса полиградиентных магнитных сепараторов. *Сучасні проблеми електроенергетичної та автоматики*: збірник тез доповідей Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів (Київ 2014 р.). Київ: НТУУ «КПІ», 2014. С. 151-153.

12. Романченко Ю. А., Шведчикова И. О. Моделирование внутренней структуры полиградиентных средовищ магнітних сепараторів. *Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика*: збірник наукових праць XVII Міжнародної науково-технічної конференції (Кременчук 17-19 травня 2016 р.). Кременчук: КрНУ, 2016. С. 264-266.

13. Романченко Ю. А., Шведчикова И. А. Конструктивные решения для двухстадийной магнитной сепарации сыпучих материалов. *Технологія-2016*: матеріали XIX міжнародної науково-технічної конференції (Севєродонецьк 22-23 квітня 2016 р.). Севєродонецьк: СХУ ім. В. Даля, 2016. – С. 192-193.

14. Романченко Ю. А., Шведчикова И. О., Нікітченко І. В. Структурно-системний підхід в електромеханіці. *Технічні науки в Україні: погляд у майбутнє*: збірник тез наукових доповідей інтернет-конференції (Севєродонецьк 27-28 квітня 2016 р.). Севєродонецьк: СХУ ім. В. Даля, 2016. – С. 55 – 57.

15. Романченко Ю. А., Шведчикова И. А. Теоретические основы расчета

силового поля магнітного сепаратора. *II Всеукраїнська інтернет-конференція студентів, аспірантів та молодих учених «Технічні науки в Україні: погляд у майбутнє»*. (Севєродонецьк 27-28 квітня 2017 р.). С. 136-139.

16. Романченко Ю. А. Порівняльний аналіз програмних продуктів для розрахунку статичних магнітних полів. *Університетська наука. Проблеми міжнародної інтеграції: тези доповідей Міжнародної науково-практичної конференції* (Севєродонецьк, Люблін 3-5 травня 2017 р.). 2017. С. 22-24.

17. Романченко Ю. А., Шаповал В. С., Шведчикова І. О. Визначення раціональних варіантів пластинчастих поліградієнтних матриць магнітного сепаратора. *Міжнародний науково-технічний журнал молодих учених, аспірантів і студентів «Сучасні проблеми електроенергетехніки та автоматики»* (Київ 2018 р.), С. 355-356.

18. Романченко Ю. А. Шведчикова І. О. Методи пошуку оптимальних параметрів. *III Всеукраїнська інтернет-конференція студентів, аспірантів та молодих учених «Технічні науки в Україні: погляд у майбутнє»* (Київ 27-28 квітня 2018 р.). С. 67-69.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

19. Патент 103156 Україна : В03С 1/00 (2015.01). Електромагнітний сепаратор / І. О. Шведчикова, Ю. А. Романченко; заявл. 05.05.15; опубл. 10.12.15, Бюл. № 23.

20. Патент 107311 Україна : В03С 1/00 (2016.01). Електромагнітний сепаратор / І. О. Шведчикова, Ю. А. Романченко; заявл. 29.12.15; опубл. 25.05.16, Бюл. № 10.

21. Патент 133530 Україна : В03С 1/00 (2019.01). Електромагнітний сепаратор / І. О. Шведчикова, Ю. А. Романченко, А. В. Бушинський; заявл. 16.11.18; опубл. 10.04.19, Бюл. № 7.

АНОТАЦІЯ

Романченко Ю. А. Поліградієнтні електромагнітні сепаратори з удосконаленими структурами пластинчастих матриць. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.09.01 «Електричні машини й апарати» (141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка). – Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського Міністерства освіти і науки України, Кременчук, 2019.

Дисертація присвячена вирішенню актуального наукового завдання з визначення удосконалених структур пластинчастих матриць поліградієнтних електромагнітних сепараторів 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.

У роботі дістали подальшого розвитку структурно-системні дослідження функціонального класу магнітних сепараторів, що дозволило визначити межі існування, кількісний склад і генетичну структуру видів поліградієнтних магнітних сепараторів. Здійснений спрямований пошук нових структурних варіантів пластинчастої поліградієнтної матриці на основі трикутних породжувальних елементів шляхом моделювання процесів структуроутворення функціонального класу магнітних сепараторів. За результатами дослідження розроблено нові технічні

рішення магнітних систем електромагнітного сепаратора, структури яких попередньо були синтезовані за допомогою методів генетичного моделювання та перетворень симетрії, що підтверджено відповідними патентами України.

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.

Запропонована удосконалена конструкція поліградієнтного електромагнітного сепаратора, в якій суміжні ряди паралельних феромагнітних пластин матриці встановлено із чергуванням трикутних виступів та впадин у протилежних напрямках, що забезпечує більш рівномірний розподіл локальних зон високої інтенсивності та підвищення неоднорідності магнітного поля в робочому об'ємі матриці. Встановлено, що при зміні форми трикутних пластин на трапецеїдальні при незмінному максимальному значенні напруженості магнітного поля у повітряному проміжку параметр ефективної площі робочої зони збільшується майже у 2 рази.

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

ABSTRACT

Romanchenko J.A. Polygradient electromagnetic separators with advanced structures of lamellar matrices. – Qualifying scientific work on the rights of manuscripts.

Thesis for a scientific degree of candidate of technical sciences. (Philosophiæ Doctor) according to specialty 05.09.01 – «Electric machines and apparatus» (141 – Power engineering, electrical engineering and electromechanics). – Kremenchug Mykhailo Ostrogradsky National University Ministry of Education and Science of Ukraine, Kremenchuk, 2019.

The dissertation is devoted to solving the actual scientific problem by determination of advanced structures of lamellar matrices of polygradient electromagnetic separators for the extraction of ferromagnetic particles from dispersed media using a combination of systemic methods of synthesis and analysis to increase the efficiency of removal of ferromagnetic impurities up to 1 mm. Structural-system researches of the functional class of magnetic separators received further development, which allowed to determine the boundaries of existence, the quantitative composition and genetic structure of types of polygradient magnetic separators. 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 improved design of a polygradient electromagnetic separator is proposed, which provides a more uniform distribution of local areas of high intensity and increased heterogeneity of the magnetic field in the working volume of the matrix. It has been established that when the shape of triangular plates changes to trapezoidal with a constant maximum magnetic field strength in the air gap, the effective area of the working area increases by almost 2 times.

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

Романченко Юлія Андріївна

**ПОЛІГРАДІЄНТНІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ
СЕПАРАТОРИ З УДОСКОНАЛЕНИМИ
СТРУКТУРАМИ ПЛАСТИНЧАСТИХ МАТРИЦЬ**

(Автореферат)

Підписано до друку 25.10.2019 р.
Формат 60×84 1/16. Папір офсетний. Гарнітура Times.
Друк ризографія. Умов. друк. арк. 1.2. Обл.-вид. арк. 0.9.
Наклад 100 прим. Зам. № 31

Надруковано у видавництві
Східноукраїнського національного університету
імені Володимира Даля
Свідоцтво про реєстрацію: серія ДК № 1620 від 18.12.03 р.
Адреса видавництва: 93406, м. Северодонецьк, пр. Центральний, 59-а
Телефон: (06452) 44-118. Факс: (06452) 40-342
E-mail: uni.snu.edu@gmail.com; <http://snu.edu.ua>

