

СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ МИХАЙЛА ОСТРОГРАДСЬКОГО
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису



РОМАНЧЕНКО ЮЛІЯ АНДРІЇВНА

*дисертації ідентичні за змістом,
смет. вченої ради № 45.052.01,
А. В. Генрихов*

Прим. № _____

УДК 621.318:621.928.8

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

05.09.01 – Електричні машини й апарати

Галузь знань 05 – Технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

 Ю. А. Романченко

Науковий керівник

Шведчикова Ірина Олексіївна
доктор технічних наук, професор

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). – Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, Сєверодонецьк, 2019.

Захист дисертації відбудеться на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 45.052.01 Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського.

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 генетичну структуру, кількісний склад і межі існування 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.

Показано, що збільшення інтенсивності магнітного поля у сепараторах з електромагнітним збудженням має свою межу, обумовлену насиченням елементів магнітопроводу. Також зростання напруженості магнітного поля пов'язане з підвищенням споживаної потужності, що може призвести до більш високої вартості магнітних сепараторів. В той же час збільшення неоднорідності магнітного поля можливо досягти за рахунок оптимізації геометричних розмірів, форми і взаємного розташування елементів багатокомпонентної 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.

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, на відміну від відомих, дозволяє проводити порівняльний аналіз структурних варіантів магнітних систем електромагнітного сепаратора та наближає результати розрахунків до реальних процесів.

Проведений аналіз з використанням методу простого перебору варіантів, за допомогою якого визначена раціональна структура з точки зору високого значення ефективної площі робочої зони, для якої максимальна напруженість та максимальний градієнт напруженості магнітного поля перевищують майже у 3 рази відповідні показники базової структури, а розраховане значення ефективної площі робочої зони майже у 7 разів більше, ніж у базової.

Запропонована удосконалена конструкція поліградієнтного електромагнітного сепаратора, в якій суміжні ряди паралельних феромагнітних

пластин матриці встановлено із чергуванням виступів та впадин трикутної форми 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.

Список публікацій здобувача

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

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, РИНЦ).

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, Directory of Research Journals Indexing, Universal Impact Factor, Research Bible, Scientific Indexing Services, eLIBRARY).

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, ПИНЦ, Index Copernicus, Research Bible, PBN, JIF, OAJI, InfoBase Index, ISI, UIF, CiteFactor, Google Scholar, Crossref).

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 електроенерготехніки 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 магнитных сепараторов. *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 (Сєверодонецьк 22-23 квітня 2016 р.). Сєверодонецьк: СНУ 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 (Сєверодонецьк 27-28 квітня 2016 р.). Сєверодонецьк: СНУ ім. В. Даля, 2016. – С. 55 – 57.

15. Романченко Ю. А., Шведчикова И. А. Теоретические основы расчета силового поля магнитного сепаратора. *II Всеукраїнська інтернет-конференція студентів, аспірантів та молодих учених «Технічні науки в Україні: погляд у майбутнє»*. (Сєверодонецьк 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* (Сєверодонецьк, Люблін 3-5 травня 2017 р.). Сєверодонецьк: СНУ ім. В. Даля, 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 електроенерготехніки 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 : B03C 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 : B03C 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 : B03C 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.

ABSTRACT

Romanchenko J. 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 (Philosophy Doctor) according to specialty 05.09.01 – «Electric machines and apparatus» (141 – Power engineering, electrical engineering and electromechanics). – Volodymyr Dahl East Ukrainian National University Ministry of Education and Science of Ukraine, Severodonetsk, 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.

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.

An improved design of a polygradient electromagnetic separator is proposed, in which adjacent rows of parallel ferromagnetic plates of the matrix are installed with alternating triangular protrusions and depressions in opposite directions, 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.

References

Scientific works, in which the main scientific results of the dissertation are published:

Articles in foreign editions:

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.

Articles in Ukrainian journals included in international science-computer databases Scopus and Web of Science:

2. Romanchenko Ju. A., Gerlici J., Shvedchykova I. O., Nikitchenko I. V. Vyznachennja racional'nyh geometrychnyh parametriv plastynchastyh elementiv magnitnoi' matryci poligradijentnogo separatora. *Naukovo-praktychnyj zhurnal Elektrotehnika i elektromehanika*. 2018. No 4. P. 58-62. (*Web of Science™ Core Collection*).

3. Romanchenko Ju. A., Gerlici J., Shvedchikova I. A., Nikitchenko I. V. Issledovanie vlijanija konfiguracii magnitnoj sistemy separatora na postojannyh magnitah na raspredelenie magnitnogo polja v rabochej zone. *Naukovo-praktychnyj zhurnal Elektrotehnika i elektromehanika*. 2017. №2. C. 13-17. (*Web of Science™ Core Collection*).

4. Romanchenko Ju. A., Shvedchikova I. A., Lucenko I. A. Issledovanie zakonomernostej strukturoobrazovanija poligradijentnyh sred. *Vostochno-evropejskij zhurnal peredovyh tehnologij*. 2015. Vol. 4, No.7 (76). P. 62 – 67. (*Scopus, Index Copernicus, PIIHЦ, Ulrich's Periodicals Directory, DRIVER, BASE, World Cat, Electronic Journals Library, DOAG, EBSCO, Research Bib, American Chemical Society, Cross Ret*).

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).

Articles in Ukrainian journals included in international science-computer databases:

6. Romanchenko Ju. A., Shvedchikova I. A. Klassifikacija poligradientnyh magnitnyh separatorov. *Visnyk Nacional'nogo tehničnogo universytetu «HPI»*. 2014. No 19 (1062). P. 64-76. (*Ulrich's Periodicals Directory*).

7. Romanchenko Ju. A., Shvedchikova I. A. Strukturno-sistemnyj analiz poligradientnyh magnitnyh separatorov. *Praci Tavrijs'kogo derzhavnogo agrotehnologichnogo universytetu*. 2015. T.2, №15. C. 117-125. (*Google Scholar, PIIHL*).

8. Romanchenko Ju. A., Shvedchikova I. O. Genetichne modeljuvannja ta sintez novih struktur poligradientnih matric' magnitnih separatoriv. *Elektromehanichni i energozberigajuchi systemy. Shhokvartal'nyj naukovovyrobnychyj zhurnal*. 2016. Vol. 2 (34). P. 17-24. (*Ulrich's Periodicals Directory, Index Copernicus, CiteFactor, Polish Scholarly Bibliography, InfoBase Index, Google Scholar, Directory of Research Journals Indexing, Universal Impact Factor, Research Bible, Scientific Indexing Services, eLIBRARY*).

9. Romanchenko Ju. A., Shvedchykova I. O. Doslidzhennja sylovyh harakterystyk poligradijentnogo elektromagnitnogo separatora pry zmini formy plastyn matryci. *Visnyk KNUTD*. 2018. No 4 (124). P. 68-75. (*Ulrich's Periodicals Directory, EBSCOhost, WorldCat, PIIHL, Index Copernicus, Research Bible, PBN, JIF, OAJI, InfoBase Index, ISI, UIF, CiteFactor, Google Scholar, Crossref*).

Scientific works, testifying the approbation of dissertation materials :

10. Romanchenko Ju. A., Shvedchikova I. A. Analiz strukturnogo raznoobrazija poligradientnyh magnitnyh separatorov. *Elektromehanichni ta energetychni systemy*,

metody modeljuvannja ta optymizacii': zbirnyk materialiv konferencii' XII Mizhnarodnoi' naukovu-tehnicnoi' konferencii' molodyh uchenyh i specialistiv (Kremenchuk 10-11 april 2014 y.). Kremenchuk : KrNU, 2014. P. 245-246.

11. Romanchenko Ju. A., Shvedchikova I. A. Opredelenie vidovogo raznoobrazija funkcional'nogo klasya poligradiyentnyh magnitnyh separatorov. *Suchasni problemy elektroenergotekhniki ta avtomatyky*: zbirnyk tez dopovidej Mizhnarodnoi' naukovu-tehnicnoi' konferencii' molodyh uchenyh, aspirantiv i studentiv (Kiev 2014 y.). Kiev: NTUU «KPI», 2014. P. 151-153.

12. Romanchenko Ju. A., Shvedchikova I. O. Modeljuvannja vnutrishn'oi' struktury poligradiyentnyh seredovyshh magnitnyh separatoriv. Problemy energoresursozberezhennja v elektrotehnicnyh systemah. *Nauka, osvita i praktyka*: zbirnyk naukovykh prac' XVII Mizhnarodnoi' naukovu-tehnicnoi' konferencii' (Kremenchuk 17-19 may 2016 y.). Kremenchuk: KrNU, 2016. P. 264-266.

13. Romanchenko Ju. A., Shvedchikova I. A. Konstruktyvnye reshenija dlja dvuhstadiynoj magnitnoj separacii sypuchih materialov. *Tekhnologija-2016*: materialy XIX mizhnarodnoi' naukovu-tehnicnoi' konferencii' (Sjevjerodonec'k 22-23 april 2016 y.). Sjevjerodonec'k: SNU im. V. Dalja, 2016. – P. 192-193.

14. Romanchenko Ju. A., Shvedchikova I. O., Nikitchenko I. V. Strukturno-systemnyj pidhid v elektromehanici. *Tekhnichni nauky v Ukrai'ni: pogljad u majbutnje*: zbirnyk tez naukovykh dopovidej internet-konferencii' (Sjevjerodonec'k 27-28 april 2016 y.). Sjevjerodonec'k: SNU im. V. Dalja, 2016. – P. 55 – 57.

15. Romanchenko Ju. A., Shvedchikova I. A. Teoreticheskie osnovy rascheta silovogo polja magnitnogo separatora. *II Vseukrai'ns'ka internet-konferencija studentiv, aspirantiv ta molodyh uchenyh «Tekhnichni nauky v Ukrai'ni: pogljad u majbutnje»*. (Sjevjerodonec'k 27-28 april 2017 y.). P. 136-139.

16. Romanchenko Ju. A. Porivnjaj'nyj analiz programnyh produktiv dlja rozrahunku statychnykh magnitnykh poliv. *Universytets'ka nauka. Problemy mizhnarodnoi' integracii'*: tezy dopovidej Mizhnarodnoi' naukovu-praktychnoi' konferencii' (Sjevjerodonec'k, Ljublin 3-5 travnja 2017 r.). Sjevjerodonec'k: SNU im. V. Dalja, 2017. P. 22-24.

17. Romanchenko Ju. A., Shapoval V. S. , Shvedchykova I. O. Vyznachennja racional'nyh variantiv plastynchastyh poligradijentnyh matryc' magnitnogo separatora. *Mizhnarodnyj naukovo-tehnichnyj zhurnal molodyh uchenyh, aspirantiv i studentiv «Suchasni problemy elektroenergetiki ta avtomatyky»* (Kiev 2018 y.), P. 355-356.

18. Romanchenko Ju. A. Shvedchykova I. O. Metody poshuku optimal'nyh parametriv. *III Vseukrai'ns'ka internet-konferencija studentiv, aspirantiv ta molodyh uchenyh «Tehnichni nauky v Ukraini: pogljad u majbutnje»* (Kiev 27-28 april 2018 y.). P. 67-69.

Scientific works, which additionally reflect the scientific results of the dissertation :

19. Patent 103156 Ukraini : B03C 1/00 (2015.01). Elektromagnitnyj separator / I. O. Shvedchykova, Ju. A. Romanchenko; zajavl. 05.05.15; opubl. 10.12.15, Bjul. № 23.

20. Patent 107311 Ukraini : B03C 1/00 (2016.01). Elektromagnitnyj separator / I. O. Shvedchykova, Ju. A. Romanchenko; zajavl. 29.12.15; opubl. 25.05.16, Bjul. № 10.

21. Patent 133530 Ukraini : B03C 1/00 (2019.01). Elektromagnitnyj separator / I. O. Shvedchykova, Ju. A. Romanchenko, A. V. Bushyns'kyj; zajavl. 16.11.18; opubl. 10.04.19, Bjul. № 7.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	16
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ КОНСТРУКТИВНИХ РІЗНОВИДІВ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ ПОЛІГРАДІЄНТНОЇ МАГНІТНОЇ СЕПАРАЦІЇ ТА ОСНОВНИХ ПІДХОДІВ ДО РОЗРАХУНКУ ЇХ РОБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК.....	24
1.1 Конструктивна різноманітність пристроїв для поліградієнтної магнітної сепарації.....	24
1.2 Методи аналізу магнітних полів у міжполюсних робочих зазорах матриць поліградієнтних сепараторів.....	39
1.3 Огляд існуючого програмного забезпечення для розрахунків магнітних полів методом скінченних елементів.....	50
1.4 Постановка задач дослідження.....	60
РОЗДІЛ 2 СТРУКТУРНО-СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ПОЛІГРАДІЄНТНИХ МАГНІТНИХ СЕПАРАТОРІВ.....	63
2.1 Визначення генетичної програми (повного видового складу) функціонального класу поліградієнтних магнітних сепараторів.....	63
2.2 Проведення геномно-історичного експерименту.....	68
2.3 Генетичні принципи структуроутворення поліградієнтних середовищ магнітних сепараторів.....	71
2.4 Генетичний синтез структурних варіантів поліградієнтного середовища матриці магнітного сепаратора.....	75
2.5 Висновки по розділу 2.....	88
РОЗДІЛ 3 ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ СТРУКТУРНИХ ВАРІАНТІВ МАТРИЦІ ПОЛІГРАДІЄНТНОГО СЕПАРАТОРА.....	90
3.1 Вихідні передумови вирішення завдання по вибору раціональної структури матриці поліградієнтного сепаратора.....	90
3.2 Математичне моделювання магнітного поля в робочих зонах синтезованих структур.....	94

	14
3.2.1 Математична модель стаціонарного магнітного поля.....	95
3.2.2 Розробка розрахункових моделей для попереднього чисельно-польового аналізу.....	96
3.3 Дослідження ступеня неоднорідності магнітного поля в синтезованих структурах.....	100
3.3.1 Показники для оцінуи спектру ступеня неоднорідності магнітного поля.....	100
3.3.2 Порівняльний аналіз ступеня неоднорідності поля в геометрично ідентичних робочих зонах.....	102
3.3.3 Дослідження ступеня неоднорідності поля уздовж характерних ліній робочих зон, інваріантних до перетворень подібності.....	106
3.4 Оцінка спектра силового поля $\mathbf{Hgrad}(\mathbf{H})$ в площині робочих зон досліджуваних структур.....	112
3.4.1 Визначення величини векторного магнітного потенціалу (граничної умови) на границі de	113
3.4.2 Вибір раціональної структури матриці електромагнітного сепаратора.....	118
3.5 Висновки по розділу 3.....	123
РОЗДІЛ 4 РОЗРАХУНКОВО-ЕКСПЕРІМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА НАПРЯМКИ УДОСКОНАЛЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО СЕПАРАТОРА.....	125
4.1 Дослідження просторового розподілу магнітного поля в матриці електромагнітного сепаратора.....	125
4.1.1 Верифікація комп'ютерної 3D-моделі електромагнітного сепаратора.....	127
4.1.2 Визначення розподілу магнітного поля в 3D-моделях електромагнітного сепаратора.....	130
4.2 Удосконалення базової конструкції поліградієнтного електромагнітного сепаратора.....	142

	15
4.3 Дослідження силових характеристик сепаратора при зміні форми пластин матриці.....	151
4.4 Висновки по розділу 4.....	153
ВИСНОВКИ.....	156
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	160
ДОДАТКИ.....	176
Додаток А.....	177
Додаток Б.....	184
Додаток В.....	185
Додаток Г.....	186
Додаток Д.....	187

ВСТУП

Актуальність теми. Важливим етапом технологічних процесів переробки вихідної сировини є поділ сумішей сипких матеріалів, виділення твердої фракції з рідкого або газоподібного середовища. На сьогоднішній день для цього використовуються технічні пристрої – сепаратори. Широке застосування на практиці дістав метод магнітної сепарації, що заснований на використанні відмінностей в магнітній чутливості часток поділених середовищ [1].

Найбільш ефективною технологією, яка спроможна відокремлювати дрібнодисперсні феромагнітні частинки розміром від 0,005 мм до 1 мм, 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, сталевих ват тощо), 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 запиленних газів. У той самий час у зв'язку зі зростанням вимог до якості продукції проблема вилучення дрібнодисперсних феромагнітних часток, які утворюються в процесі зносу обладнання, на теперішній час є актуальною також для сипких матеріалів: цукру, борошна, крохмалю, круп, 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 не досить ефективними при вилученні феромагнітних включень розміром до 1 мм. Наявність в робочих зонах існуючих пристроїв для поліградієнтної сепарації не досить великих за розмірами повітряних зазорів, в яких відбувається сепарація матеріалів, унеможлиблює 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 обмежено насиченням елементів магнітопроводу. Також зростання напруженості магнітного поля пов'язане зі збільшенням потужності, що тягне за собою зростання вартості електромагнітних сепараторів. Разом з цим підвищення неоднорідності магнітного поля можливо отримати за рахунок оптимізації геометричних розмірів, форми та взаємного розташування елементів багатокomпонентної магнітної матриці сепаратора. Дослідження в цьому напрямку представляють найбільший практичний і теоретичний інтерес.

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 напрямку 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 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;

- 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 двовимірні табличні інтерполяції 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, генетичну структуру та кількісний склад 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 яку 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 [3, 28, 85, 101] – систематизація та визначення припустимого структурного різноманіття поліградієнтних магнітних сепараторів; [100] – побудова узагальненої генетичної моделі; [23, 29, 34, 110, 111, 113, 146, 152] – оцінка спектру силового поля; вибір раціональних геометричних параметрів за критерієм ефективної площі; [57] – дослідження впливу форми постійних магнітів чисельним методом скінченних елементів з використанням програмного пакету Elcut; [83] – побудова класифікації магнітних сепараторів, що враховує структурні властивості поліградієнтних середовищ; [102] – генетичний синтез внутрішньої структури поліградієнтного середовища; [89] – визначення повного видового складу функціонального класу поліградієнтних електромагнітних сепараторів; [138] – розрахунки локальних значень магнітної напруженості та коефіцієнту неоднорідності поля; [139] – розробка двовимірних геометричних моделей робочих міжполюсних зон; порівняльний аналіз розподілу індукції і силової функції магнітного поля в робочих зазорах поліградієнтного середовища; [151] – 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 електроенергетехніки 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 Всеукраїнській інтернет-конференції 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.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ КОНСТРУКТИВНИХ РІЗНОВИДІВ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ ПОЛІГРАДІЄНТНОЇ МАГНІТНОЇ СЕПАРАЦІЇ ТА ОСНОВНИХ ПІДХОДІВ ДО РОЗРАХУНКУ ЇХ РОБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК

1.1 Конструктивна різноманітність пристроїв для поліградієнтної магнітної сепарації

Важливим етапом технологічних процесів переробки вихідної сировини є поділ сумішей сипких матеріалів, виділення твердої фракції з рідкого або газоподібного середовища. На сьогоднішній день для цього використовуються технічні пристрої – сепаратори, дія яких заснована на використанні фізичних полів різного походження і фізичних властивостей матеріалів: щільності, електропровідності, діелектричної проникності, намагніченості, змочуваності та адсорбції, відбивної здатності тощо. Широке застосування на практиці дістав метод магнітної сепарації, що заснований на використанні відхилень в магнітній чутливості часток поділюваних середовищ [1].

Магнітні сепаратори розрізняються за типом установки, способом подачі вихідної сировини, функціональністю, можуть мати різний рівень напруженості магнітного поля в зоні сепарації. Сепаратори бувають електромагнітними і виконаними на основі постійних магнітів. Сепаратори можуть мати електромагнітне збудження або бути виконаними на основі постійних магнітів.

Найбільш складним є процес видалення з немагнітних середовищ слабомагнітних і дрібнодисперсних феромагнітних домішок розміром менше 1 мм. Для вилучення таких включень використовуються різноманітні конструкції поліградієнтних магнітних сепараторів. 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 матриці та 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) [3].

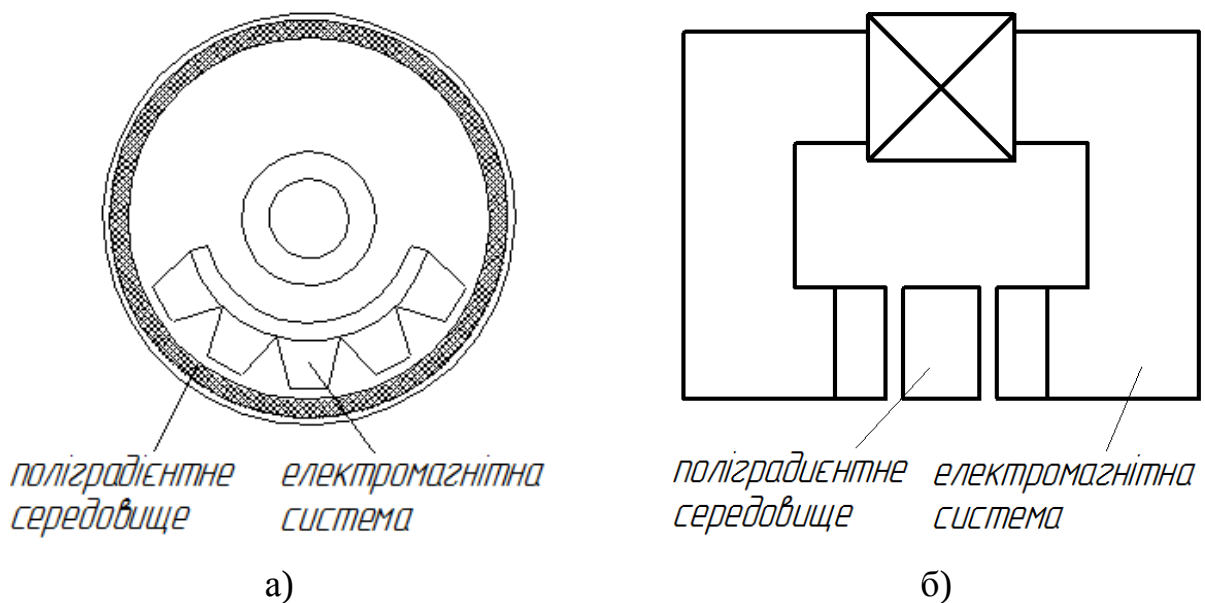


Рисунок 1.1 – Узагальнені схеми електромагнітних систем поліградієнтних сепараторів: а) відкритого типу; б) закритого типу

У робочих зонах електромагнітних систем розміщуються матриці з поліградієнтним середовищем з феромагнітних тіл (куль, циліндрів, стрижнів,

сталевій ваті, 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 [4]. 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 ефективність 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 [5, 6], 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

[7]. Під гетерогенною структурою розуміється неоднорідна система, що складається з двох або більше однорідних частин (фаз). В роботі [7] наведено 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 багатофазними і багатокомпонентними, коли в межах однієї з фаз є кілька фракцій (компонентів) [8]. 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, гальваномагнітні та ін.); за агрегатним станом дисперсійного середовища (газові, рідкі або тверді).

Розглянемо більш докладно основні типи поліградієнтних середовищ, які застосовуються в матрицях поліградієнтних магнітних сепараторів [3]:

1. Стрижневі поліградієнтні середовища [9]. 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 [10], які можуть бути з гладкими або зигзагоподібними пластинами. Поверхня пластин також може бути виконана у вигляді виступів і жолобків, що чергуються [11]. Приклади таких середовищ представлені на рис. 1.3.

3. Кулясті поліградієнтні середовища [12]. 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 поліґрадієнтні середовища [13], 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).

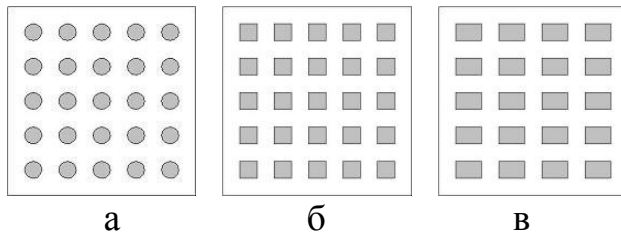


Рисунок 1.2– Стрижневі поліґрадієнтні середовища зі стрижнями круглого (а), квадратного (б) та прямокутного (в) перетину

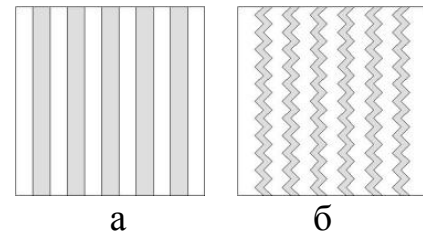


Рисунок 1.3 – Пластинчасті поліґрадієнтні середовища з гладкими (а) та зигзагоподібними (б) пластинами

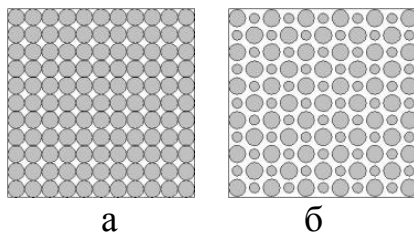


Рисунок 1.4 – Однокомпонентні (а) та двокомпонентні (б) кулясті поліґрадієнтні середовища

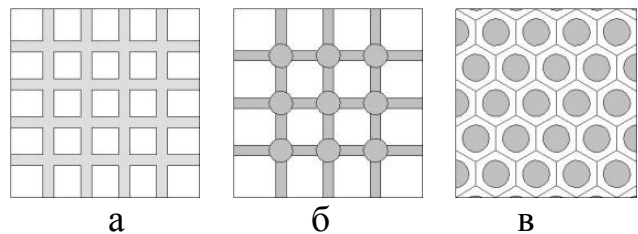


Рисунок 1.5 – Ґратчасті поліґрадієнтні середовища: однокомпонентне (а) середовище; двокомпонентне (б) середовище з прямокутною решіткою; двокомпонентне середовище зі стільниковою решіткою (в)

Таким чином, поліґрадієнтні 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. Максимальне використання на практиці отримали стрижневі, пластинчасті, кулясті і ґратчасті поліградієнтні середовища магнітних сепараторів.

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.

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 [14]. 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.

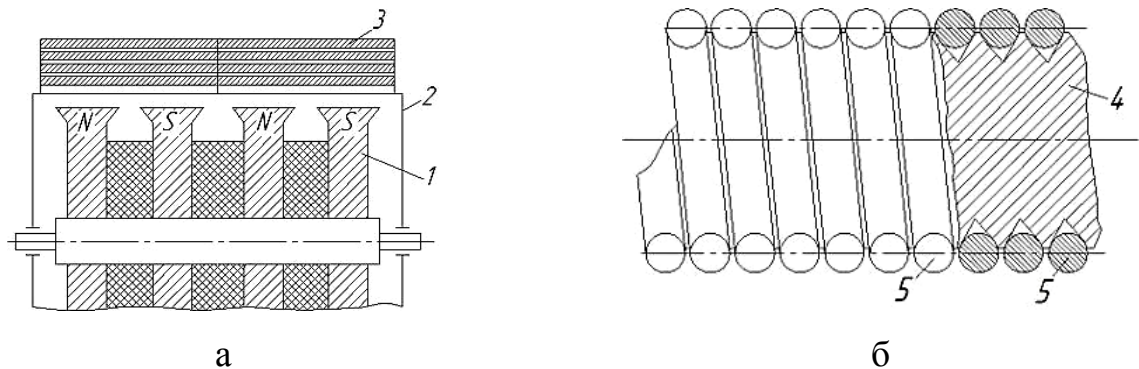


Рисунок 1.6 – Поліградієнтний магнітний сепаратор [14]:

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

Поліградієнтний магнітний сепаратор, який зображений на рис. 1.7, містить матрицю, заповнену феромагнітними тілами трикутного перетину [15].

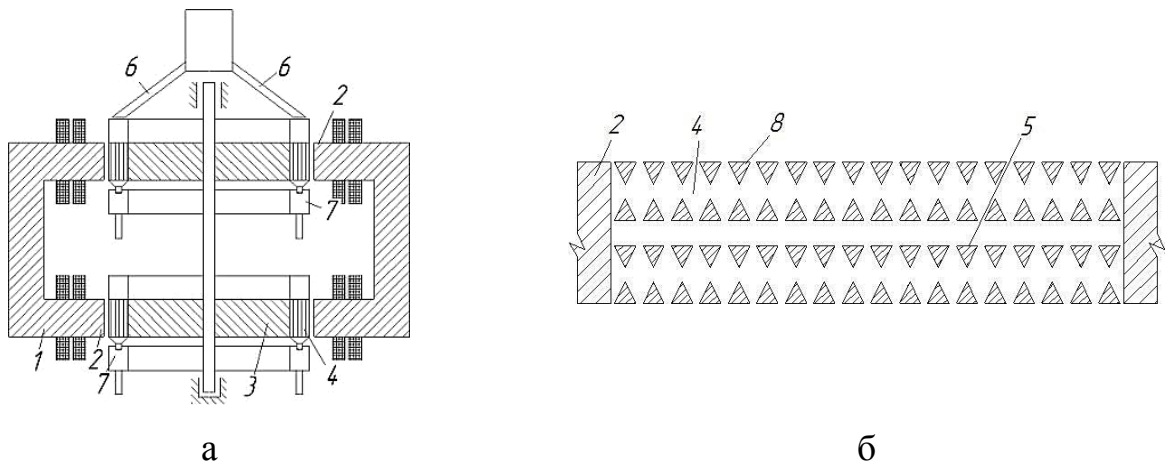


Рисунок 1.7 – Поліградієнтний магнітний сепаратор [15]: загальний вигляд магнітного сепаратора (а) та конструкція матриці (б)

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 притягнутихся магнітних частинок відмиваються налиплі 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 [16]. 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.

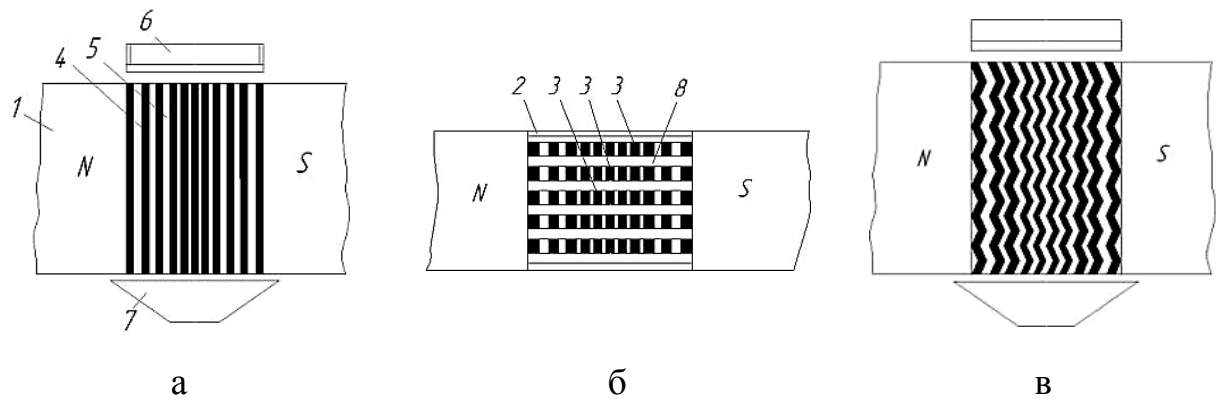


Рисунок 1.8 – Магнітний сепаратор [16]: схема сепаратора (а), розміщення наповнювача з касетами, в яких смуги звернені в бік полюсів своїми площинами (б), схема сепаратора з зигзагоподібними смугами (в)

Сепаратор працює наступним чином. Пульпа матеріалу, який збагачується, з живильника 6 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 слабомагнітні 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 [17].

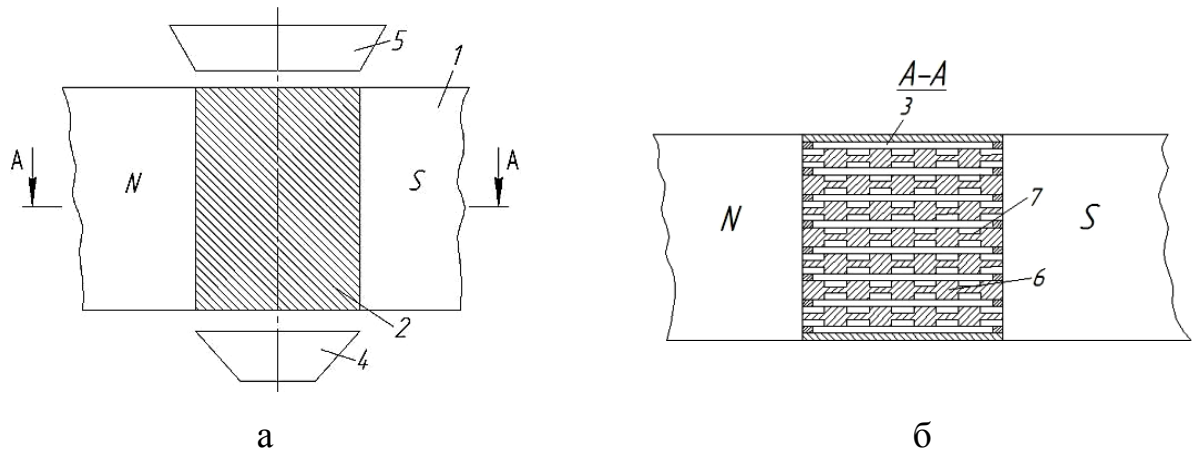


Рисунок 1.9 – Магнітний сепаратор для сепарації слабомагнітних матеріалів [17]: схема сепаратора (а) та розріз А-А (б)

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 6, так і на конусоподібних виступах, утворених зернами залізного порошку на поверхні виступів 6 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 6. При русі пульпи по жолобку магнітні частинки під дією магнітних сил притягуються не тільки до країв виступів 6, 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 6, 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 3 сильномагнітними 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 кулястим поліградієнтним середовищем наведено на рис. 1.10 [18].

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.

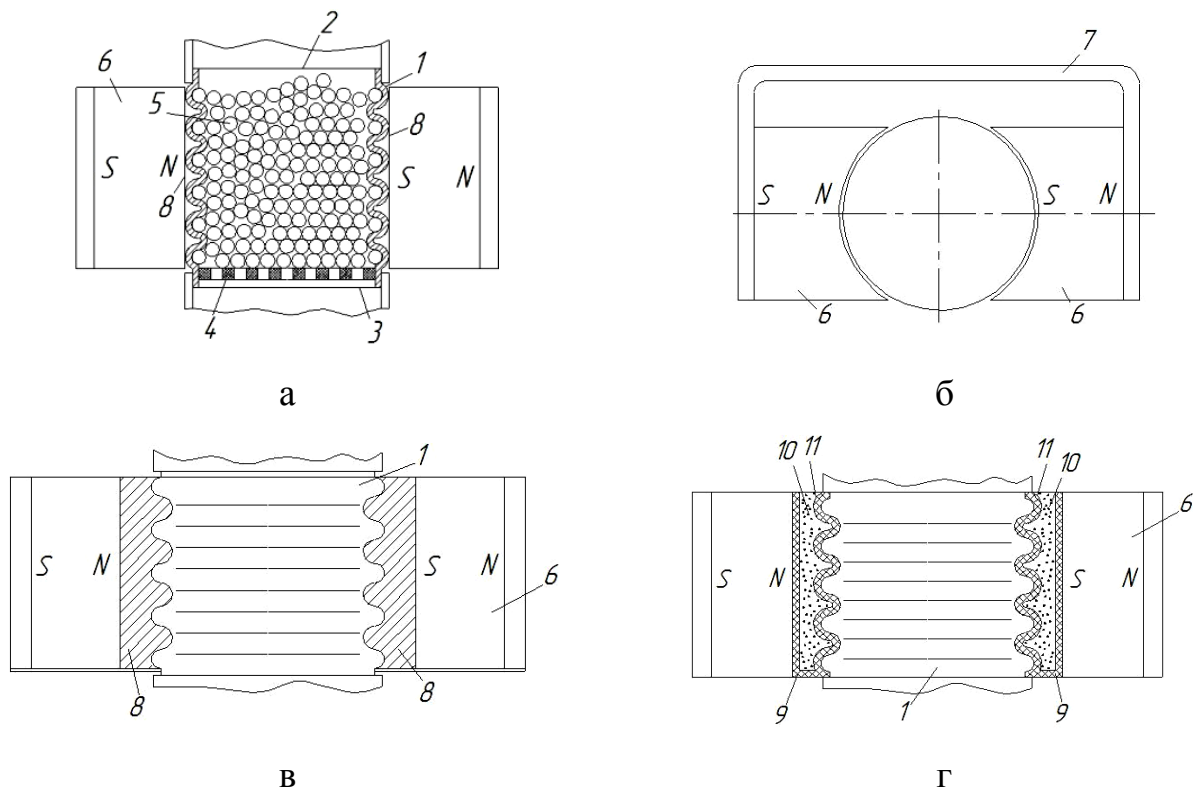


Рисунок 1.10 – Магнітний сепаратор [18]: поперечний розріз (а), вид зверху (б) та приклади виконання (в, г) магнітного сепаратора

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

На рис. 1.11 наведена конструкція сепаратора з поліградієнтним середовищем у вигляді прямокутної решітки [19]. Поліградієнтний сепаратор має електромагнітну систему 2, живильник 3, бризкала 4, приймачі продуктів поділу 5 і робочий орган 1 з розташованим в ньому поліградієнтним середовищем, виконаним у вигляді розміщених одна над іншою решіток 6, 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 бризкал 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.

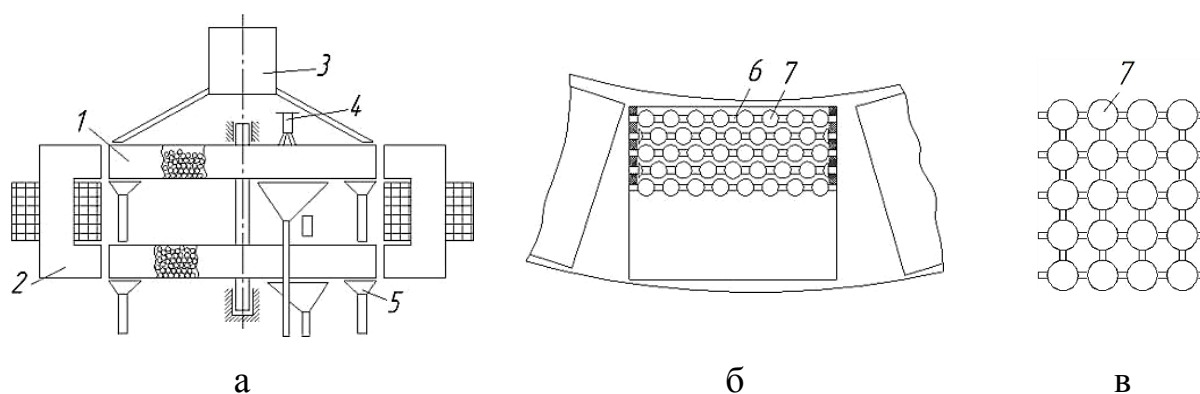


Рисунок 1.11 – Поліградієнтний електромагнітний сепаратор [19]:
загальний вигляд (а), установка решіток в робочому органі (б),
вид решітки (в) сепаратора

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) [20]. 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 грати 5, систему брызгал (форсунок) 6 для змиву і регенерації фільтра, шламоотвідний елемент 7, каплевідбійник 8, магнітну систему 9 (соленоїд) і вихідний патрубок 10.

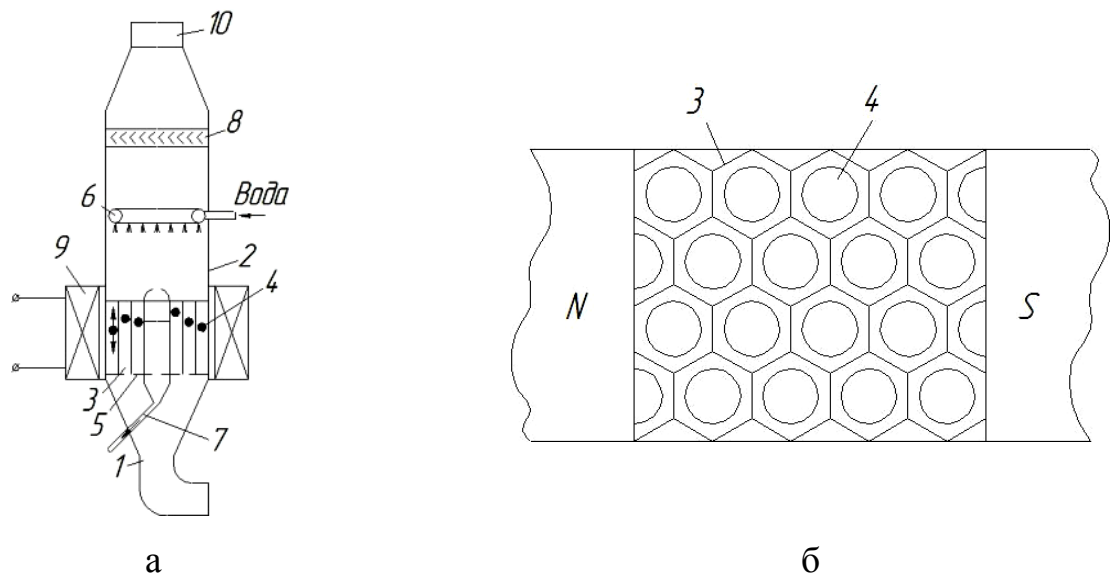


Рисунок 1.12 – Магнітний фільтр [20]: загальний вигляд (а), вигляд решітки (б)

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). Водю з брызгал (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 поліградієнтних магнітних сепараторів призначені для очищення від дрібнодисперсних феромагнітних включень рідинних середовищ або запиленних газів. Проблема видалення дрібнодисперсних феромагнітних домішок, які виникають в процесі зносу обладнання, на сьогоднішній день є актуальною й для сипких матеріалів, у зв'язку зі зростанням вимог до якості продукції [21-23]. Наявність в робочих зонах розглянутих вище пристроїв невеликих повітряних зазорів, в яких і відбувається сепарація матеріалів, унеможливорює 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 не є достатньо ефективними при вилученні феромагнітних включень розміром менше 0,005 мм [22]. На рис. 1.13 наведені для прикладу магнітні системи відкритого типу, які використовуються для очищення від феромагнітних включень сипких речовин сільськогосподарського призначення [24-26].

Таким чином, одним із напрямків підвищення ефективності магнітної сепарації сипких середовищ від дрібнодисперсних феромагнітних включень 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, 27]. Зміст структурно-системного підходу можна представити як послідовність характерних етапів його реалізації [27, 28]: "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 та 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.

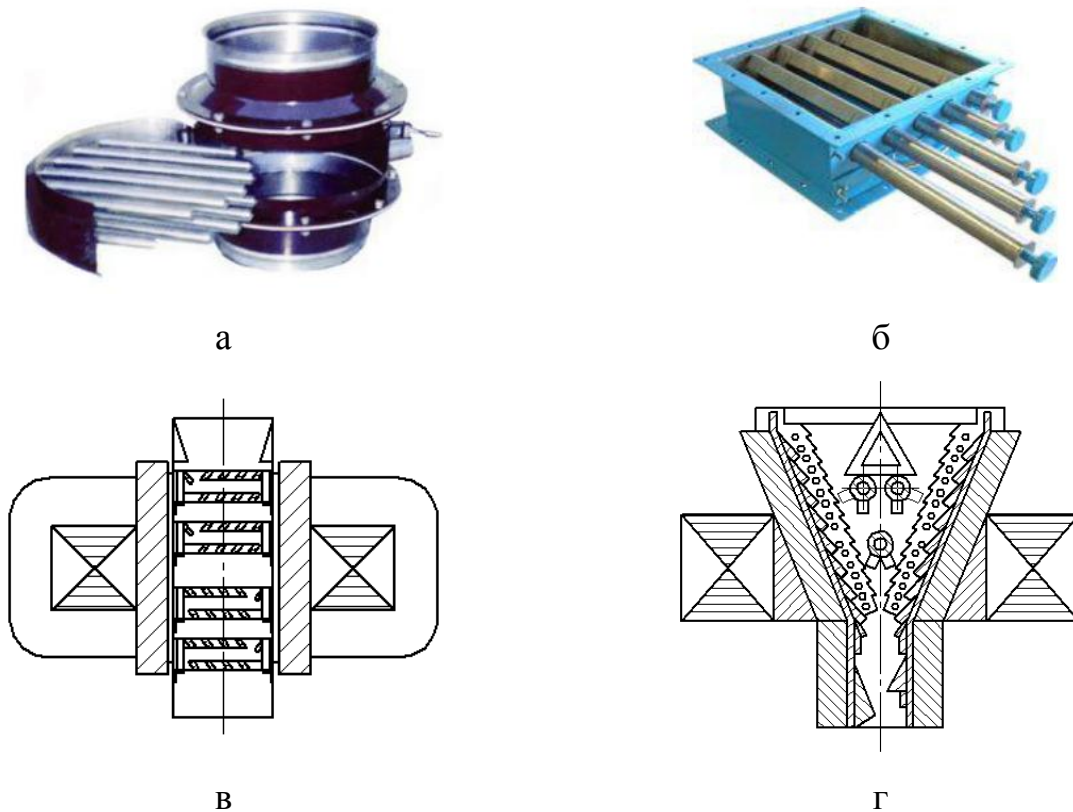


Рисунок 1.13 – Конструктивні різновиди магнітних сепараторів для очищення сипких речовин сільськогосподарського призначення:

поліградієнтні сепаратори на базі постійних магнітів [24] (а, б),
електромагнітний сепаратор УСС-4 [25] (в),
електромагнітний сепаратор УСС-5М [26] (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 [23]

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

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, 29] $\mathbf{H} = -\text{grad}\varphi_m = -\nabla\varphi_m$, 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).

Рівняння (1.1) та (1.2) повинні мати єдине рішення. Для цього 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 функції, тобто $\varphi_m = f_1(x, y, z)$. Точки з координатами (x, y, z) знаходяться на межі. Умова $\varphi_m = 0$ є однорідною.

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

3. Граничні умови третього роду $\partial\varphi_m/\partial n + f_3(\varphi_m) = f_4(x, y, z)$. 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 [30]. На жаль, у науковій літературі питання врахування цих факторів залишаються дискусійними.

Для оцінки силового поля сепаратора в [31] пропонується використовувати векторну функцію $\mathbf{G}(\mathbf{r})$ точки простору $\mathbf{r}$, чисельно рівну магнітній силі, що діє на частинку одиничного об'єму з одиничною магнітною сприйнятливістю, розташовану в цій точці

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

де B_0 – модуль магнітної індукції зовнішнього неоднорідного магнітного поля.

Функція $\mathbf{G}(\mathbf{r})$ називається силовою функцією неоднорідного магнітного поля та є його внутрішньою характеристикою.

При розрахунку магнітної сили F_m , яка діє на тіло об'ємом V , на практиці найбільш часто виходять з виразу [32, 33]

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

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

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

де $\mathbf{M}_{\text{ср}}$, $(\mathbf{H}_0)_{\text{ср}}$ – середні (для об'єму феромагнітного тіла) значення вектора намагніченості $\mathbf{M}$ і вектора напруженості $\mathbf{H}_0$. Відзначимо, що при цьому неявно приймається рівність $\mathbf{H}_0$ модулю вектора $(\mathbf{H}_0)_{\text{ср}}$ і умова малої зміни функції $\text{grad}(\mathbf{H}_0)^2$ всередині об'єму V .

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

$$\mathbf{F}_m = \mu_0 \chi \mathbf{H}_0 \text{grad}(\mathbf{H}_0) V, \quad (1.5)$$

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 приведеної сили f_{np} магнітного поля як добутку напруженості магнітного поля сепаратора на її градієнт [1]

$$f_{np} = \mathbf{F}_m / \mu_0 \chi V = \mathbf{H} \text{grad} \mathbf{H}. \quad (1.6)$$

При дослідженні силових магнітних полів поліградієнтних матриць питома приведена сила f_{np} може служити критерієм здатності магнітних сепараторів до видалення феромагнітних домішок, а, отже, і критерієм їх ефективності.

Зі співвідношення (1.6) випливає, що для отримання більш високих значень сили вилучення f_{np} необхідно збільшувати напруженість $\mathbf{H}$ магнітного поля та її градієнт $\text{grad} \mathbf{H}$. Збільшення інтенсивності $\mathbf{H}$ магнітного поля у сепараторах з електромагнітним збудженням має свою межу, що обумовлена насиченням елементів магнітопроводу сепаратора. Збільшення $\mathbf{H}$ також пов'язане зі зростанням споживаної потужності, що призводить до подорожчання пристроїв. В той самий час збільшення градієнту напруженості $\text{grad} \mathbf{H}$ можна досягти за рахунок оптимізації геометричних розмірів, форми та взаємного розташування елементів багатокomпонентної магнітної матриці

сепаратора [34]. Тому 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 [35-37]:

- 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 [38]). 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 [39].

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 часткових 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 [40].

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 [41].

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 [42].

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 вище аналітичних 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 [43-46]. 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. [47].

Конформне перетворення відображає кожну 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 [48], 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 [32, 35-37, 49-51].

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 [52].

Основна ідея методу скінченних різниць для наближеного чисельного рішення крайової задачі для двовимірного диференційного рівняння в часткових похідних полягає в тому, що [52]:

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-різницевою аналогом;

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

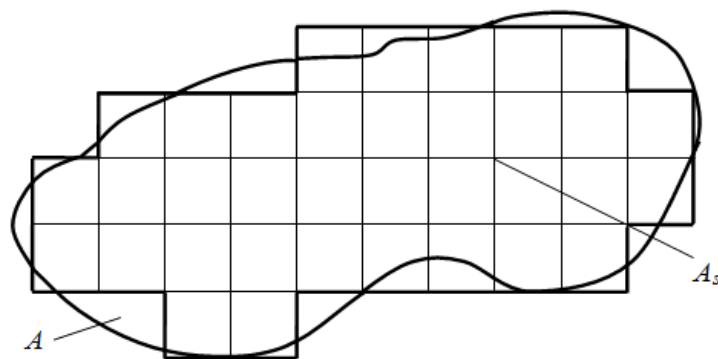


Рисунок 1.14 – Побудова сітки в області розрахунку

Вирішуючи отриману систему скінченно-різницевої 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 [52].

Метод скінченних елементів (МСЕ) – це чисельний метод рішення диференціальних 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 [53, 54].

Основна ідея МСЕ заключається в тому, що:

1) будь-яку безперервну величину (наприклад, напруженість поля, температуру, тиск, переміщення) можна апроксимувати дискретною моделлю. Ця модель будується на кусково-неперервних функціях, що визначені на скінченному числі підобластей (елементів);

2) кусково-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 скінченним числом елементів певного виду. У двовимірному випадку в якості елементів зазвичай вибирають трикутники, в тривимірному – призми.

2. Визначення апроксимуючих функцій елементів.

3. Розв’язання 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 саме метод скінченних елементів [55, 56]. Так, наприклад

в роботі [57] здійснено чисельний розрахунок магнітної сили в робочій зоні у тривимірній постановці з урахуванням реальної конструкції дискового магнітного сепаратора, що дозволило визначити найбільш ефективну магнітну систему при низькій висоті підвіски сепаратора над шаром сипучого матеріалу. Авторами наведено результати попередніх розрахунків поля для декількох геометричних співвідношень маси і активної частини постійних магнітів.

У статті [31] за допомогою методу скінченних елементів 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 сепаратора на основі постійних магнітів і виконано чисельний розрахунок розподілу тривимірного магнітного поля і магнітної сили в активній зоні системи.

Метод граничних елементів [58] – 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 [59] 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 узагальнених аналітичних функцій;

- розрахункові рівняння формуються щодо локального розподілу феромагнітних тіл (фаз гетерогенних структур) в основному паралелограмі періодів;

- для трикутних осередків 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 визначення магнітних характеристик сепараторів знайшли застосування методи експериментального вивчення різних фізичних об'єктів або явищ, засновані на використанні моделі, яка має ту ж фізичну природу, що і досліджуваний об'єкт (фізичне моделювання).

У статті [60] 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 [61] 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 [62] 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 електромагнітних сепараторів застосовуються чисельні, аналітичні та експериментальні методи [34]. 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.

1.3 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>), INFOLYTICA (<http://www.infolytica.com>), які дозволяють робити розрахунки як двовимірних, так й тривимірних магнітних полів [54].

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 [63]. 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 [64]. Основні недоліки: висока вартість, складність в освоєнні.

У статті [65] за допомогою програми ANSYS досліджено вплив форми перетину елементів магнітного середовища на розподіл магнітної індукції та градієнта поля поліградієнтного електромагнітного сепаратора. В 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.

COMSOL Multiphysics (колишній Femlab) – пакет моделювання для розв’язання задачі з області електромагнетизму, теорії пружності, динаміки рідин і газів та хімічної газодинаміки [66]. Даний пакет дає можливість вирішувати 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 частковими диференціальними рівняннями. Програма містить різні вирішувачі, які допомагають 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 [67] була створена тривимірна математична модель, і проаналізовано з використанням COMSOL Multiphysics 3.3 вплив зміни трубчастих дротів високоградієнтного магнітного сепаратора на ефективність захоплення системи.

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 [68].

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

В роботі [69] 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 [70] 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 [71] 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 [72, 73], 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.

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

[74-76]. 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) [76], 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 [76]:

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 незамкнутих 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 напружки та ін.

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

3. Програми `fkern.exe` для магнітних та 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 організовувати 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 [77] 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 [57, 78].

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 (засори, котушки, ядра) може полегшити побудову моделі в ELCUT.
- Автоматизація обчислень певних величин, наприклад: обчислення індукції і втрат електричної машини або ємності системи провідників в багат шаровій 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 [79] 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 досліджувалися два типи конструктивних модифікацій ротора – з радіальним і тангенціальним намагнічуванням постійних магнітів.

У статті [80] 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 [81] був досліджений чисельним методом вплив 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 імпортованої 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 [74].

Основні переваги даного програмного комплексу: дружній призначений для користувача інтерфейс, широкі аналітичні можливості комплексу, простота опису геометричних моделей, широкі аналітичні та графічні можливості комплексу, високий рівень автоматизації операцій. Редактор моделі дозволяє достатньо швидко створити і описати модель досліджуваних об'єктів. Крім цього, є можливість імпортування геометричних фрагментів моделі з графічної системи AutoCAD або інших систем проектування. На заданих лініях, поверхнях або об'ємах користувач може обчислювати інтегральні величини. Недоліки: використовується один вид скінченного елемента, трикутник (немає вибору між типами скінчених елементів), види аналізу задач механіки і теплопередачі обмежені по функціональності і є допоміжними [78].

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. 1.1 [82].

Таблиця 1.1 – 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
	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

№	Можливості пакету	ANSYS	COMSOL	FEMM	Infolytica	ELCUT
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 в рамках дисертаційної роботи доцільним є використання програмного продукту ELCUT версії 5.6 та Infolytica.

1.4 Постановка задач дослідження

На підставі аналізу літературних джерел та представлених в них результатів теоретичних досліджень одержані наступні результати:

1. Визначено основні конструктивні різновиди поліградієнтних магнітних сепараторів, виділені особливості та систематизовані найбільш поширені структурні типи поліградієнтних середовищ.

2. Встановлено, що в робочих органах магнітних сепараторів знайшли переважне застосування стрижневі, пластинчасті, кулясті і ґратчасті поліградієнтні (гетерогенні) середовища, на основі чого було побудовано класифікацію магнітних сепараторів з урахуванням структурних властивостей таких середовищ.

3. Показано, що переважна більшість пристроїв для поліградієнтної магнітної сепарації, які існують на сьогоднішній день, 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 домішок, які виникають в процесі зносу металевих частин обладнання, є досить актуальною також для сипких матеріалів: цукру, круп, борошна, крохмалю, комбікорму, керамічної та фармацевтичної сировини тощо. Отримані результати щодо аналізу конструктивної різноманітності пристроїв для поліградієнтної магнітної сепарації сипких середовищ свідчать про необхідність проведення подальших структурно-системних досліджень даного класу пристроїв.

4. Доведено, що наявність в робочих зонах існуючих пристроїв для поліградієнтної сепарації маленьких за розмірами повітряних зазорів, де саме й відбувається магнітна сепарація матеріалів, унеможлиблює їх застосування для очищення сипких речовин. Пластинчасті безконтактні матриці регенеруються самостійно, вони забезпечують більш високу надійність вилучення феромагнітних включень за рахунок більших зазорів між пластинами. Тому потребують подальших досліджень процеси, що відбуваються в робочому органі сепаратора – матриці з поліградієнтним середовищем.

5. Показано, що збільшення інтенсивності магнітного поля у сепараторах з електромагнітним збудженням обмежене насиченням елементів магнітопроводу. Підвищення напруженості магнітного поля таксамо пов'язане зі зростанням споживаної потужності, що в свою чергу може призвести до більш високої вартості сепараторів. У той самий час збільшення неоднорідності магнітного поля можливо досягти за рахунок оптимізації геометричних розмірів, форми та взаємного розташування елементів багатоконпонентної магнітної матриці сепаратора. Дослідження в цьому напрямку представляють найбільший практичний і теоретичний інтерес.

Таким чином, в дисертаційній роботі вирішується 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.

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

1. Аналіз функціональних особливостей і побудова класифікації магнітних сепараторів з урахуванням структурних властивостей їх поліградієнтних середовищ.

2. Визначення генетичної програми (повного видового складу) функціонального класу поліградієнтних магнітних сепараторів; синтез структурних варіантів поліградієнтних середовищ електромагнітного сепаратора для очищення сипких речовин.

3. 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.

4. Теоретичні та експериментальні дослідження робочого процесу та характеристик електромагнітного поліградієнтного сепаратора з метою підтвердження наукових результатів дисертаційної роботи.

РОЗДІЛ 2

СТРУКТУРНО-СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ПОЛІГРАДІЄНТНИХ МАГНІТНИХ СЕПАРАТОРІВ

2.1 Визначення генетичної програми (повного видового складу) функціонального класу поліградієнтних магнітних сепараторів

Основними структурними елементами поліградієнтного магнітного сепаратора є: електромагнітна (магнітна) система як джерело магнітного поля (індуктор); робочий орган, заповнений поліградієнтним середовищем із заданими електромагнітними властивостями і геометричними параметрами елементарних комірок; вторинне дискретне (технологічне) середовище з металевими включеннями, що підлягає сепарації. Робочий орган зазвичай містить стрижневі, пластинчасті, кулясті, ґратчасті та інші елементи, які намагнічуються під дією магнітного поля, створюваного індуктором. Робочий орган також має назву матриці або касети [3, 83]. Виходячи з положень генетичної теорії структурної організації електромагнітних систем [27, 84], поліградієнтні магнітні сепаратори можуть бути віднесені до класу суміщених систем, в яких структурно об'єднані електромагнітна система і робочий орган, що має свою внутрішню структуру.

Генетична програма на рівні довільного функціонального класу електромеханічних систем визначається у вигляді кінцевої множини парних електромагнітних хромосом, які узагальнюються поняттям області існування породжувальних структур Q . Наявність відповідності між породжувальними джерелами поля і системної категорією Вид дозволяє встановити видовий склад (в генетичних кодах) функціонального класу поліградієнтних магнітних сепараторів [85]. Пошук області Q для магнітних сепараторів досліджуваного функціонального класу здійснюється на елементному базисі генетичної класифікації (ГК), тобто на впорядкованій множині первинних джерел електромагнітного поля S_0 [27, 86].

Для визначення області Q існування породжувальних структур поліградієнтних магнітних сепараторів необхідно виділити їх істотні ознаки, сукупність яких узагальнюється цільовою функцією пошуку F_p ,

$$F_p = (p_1, p_2, p_3). \quad (2.1)$$

До істотних ознак магнітних сепараторів досліджуваного класу відносяться:

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 [87, 88].

Для коректного вирішення завдання пошуку на область Q накладаються наступні обмеження:

1. Функціональна структура розглянутого класу обмежується розглядом різноманітності двох підкласів Q_{ep} і Q_n , що забезпечують можливість реалізації обертового і поступального руху робочого органу, відповідно.

2. Породжувальна структура довільного Виду представляється електромеханічної парою, утвореної 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 ГК $P^I \subset \langle S_0 \rangle$. 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.

Електромеханічні об'єкти з поперечною орієнтацією хвилі електромагнітного поля на циліндричних (ЦЛ), конічних (КН), тороїдальних плоских (ТП), тороїдальних циліндричних (ТЦ) і сферичних (СФ) поверхнях допускають можливість суміщення і функціонування з робочими органами обертального руху.

Електромеханічні об'єкти з поздовжньою орієнтацією хвилі електромагнітного поля на циліндричних (ЦЛ), конічних (КН), тороїдальних плоских (ТП) поверхнях, а також об'єкти з поздовжньою і поперечною орієнтацією хвилі електромагнітного поля на плоских поверхнях (ПЛ) допускають можливість суміщення і функціонування з робочими органами поступального руху.

З урахуванням вищевикладеного, генетична програма макrogenетичного рівня або видове різноманіття функціонального класу поліградієнтних магнітних сепараторів може бути представлено у формі табл. 2.1, 2.2 [89].

Таблиця 2.1 – 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 2.2 – 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	-	-	-

Для функціонального класу поліградієнтних магнітних сепараторів з метою підтвердження достовірності проведених вище досліджень було проведено геномно-історичний експеримент шляхом ідентифікації генетичної інформації відомих реальних і інформаційних Видів електромеханічних систем [90]. Розглянемо особливості процедури ідентифікації генетичного коду об'єктів розглянутого функціонального класу на прикладі електромагнітного сепаратора (рис. 2.1) [1], електромагнітна система якого складається з двох циліндричних осердь 1 з намагнічуючими котушками 2 і двох полюсів 3. У просторі між полюсами встановлена матриця 4, що є робочим органом сепаратора. До стінок матриці зсередини кріпляться кілька рядів похило встановлених пластин 5 з трикутними виступами, зверненими всередину матриці. Ці виступи утворюють на кожній парі пластин, розташованих в одній площині, зигзагоподібний зазор.

Ідентифікація генетичного коду реального об'єкта (рис. 2.1) і генетичний аналіз його структури дозволяють визначити приналежність електромагнітного сепаратора до базового Виду плоских, асиметричних, х-орієнтованих (ПЛ 2.2 х):

- геометричний клас – плоский (ПЛ), визначається геометричною формою активної поверхні полюсів 3 електромагнітної системи;
- орієнтація напрямку поширення хвилі електромагнітного поля – поздовжня (ПЛ х);
- загальна кількість дисиметризуючих факторів (країв) активної поверхні – чотири: два – в поперечному напрямку; два – в поздовжньому напрямку (2.2);
- топологічний клас активної поверхні – орієнтована (х-орієнтація) одностороння поверхня з краями (2.2 х);
- Вид електромагнітної симетрії – поздовжньо-поперечна асиметрія (2.2).

Генетичний код також вказує на приналежність об'єкта до інших надвидових класів, наприклад, до роду і підродина (рис. 2.1).

Структурна різноманітність роду визначається сукупністю генетично споріднених Видів, об'єднаних спільністю просторової геометрії ППП.

Історично сформовані класи сепараторів поступального і обертального руху мають статус підродини, так як об'єднують родові таксони сепараторів, що відповідають характеру просторового руху. Електромагнітний сепаратор (рис. 2.1) (Вид ПЛ 2.2 х) може бути віднесений до роду плоских і підродини сепараторів поступального руху.

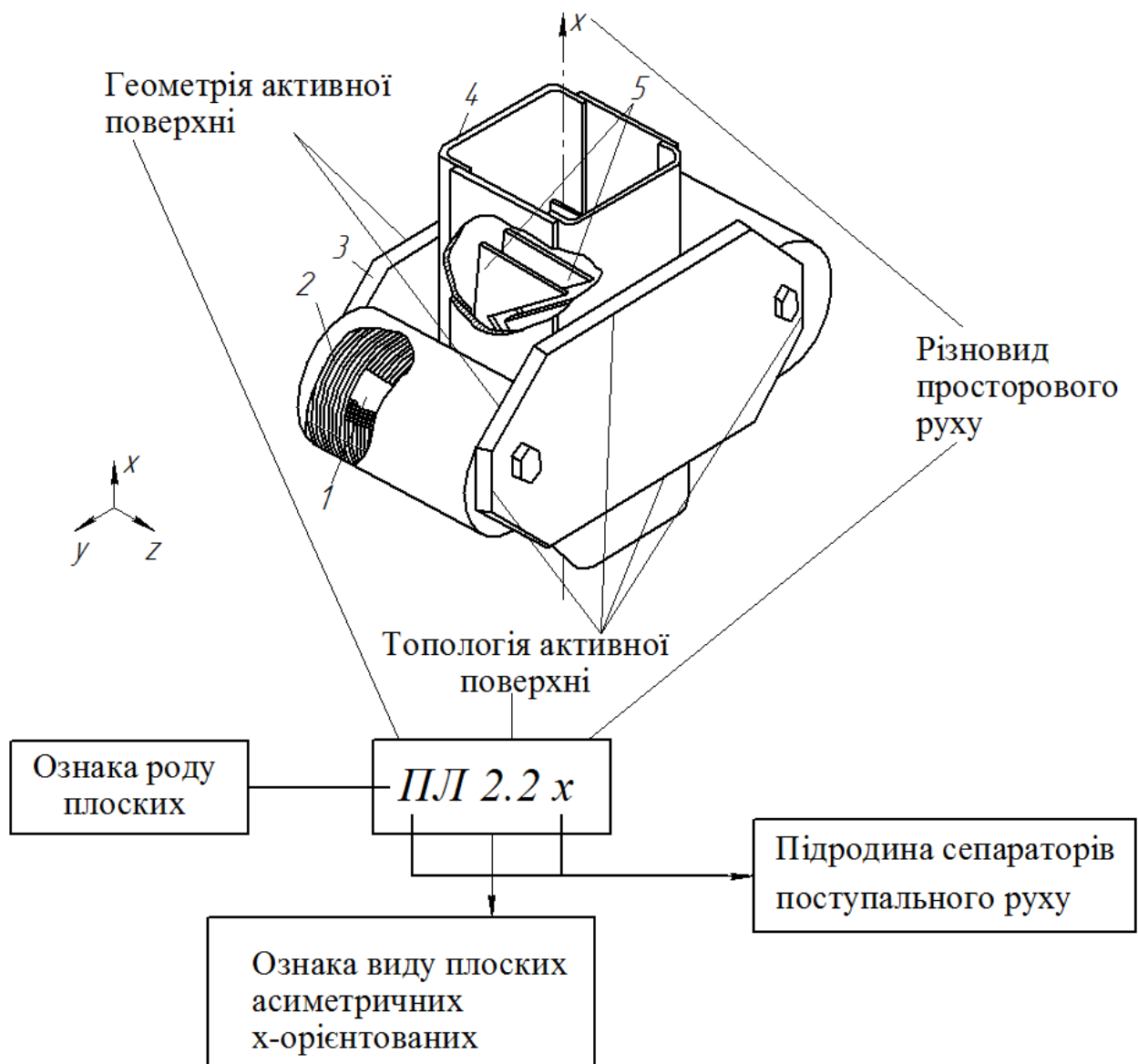


Рисунок 2.1 – Електромагнітний сепаратор як представник Виду ПЛ 2.2х:

- 1 – осердя, 2 – намагнічуючі котушки,
3 – полюс, 4 – матриця, 5 – пластини

Таким чином, проведений уточнений структурно-системний аналіз функціонального класу поліградієнтних магнітних сепараторів та визначено видове різноманіття поліградієнтних магнітних сепараторів обертального і поступального рухів, яке представлене 10 і 8 Видами базового рівня, відповідно.

2.2 Проведення геномно-історичного експерименту

Практична реалізація геномно-історичного експерименту на макрорівні безпосередньо пов'язана з проведенням макрогенетичного аналізу, який дозволяє отримати інформацію про рівень та темпи еволюції існуючого видового різноманіття магнітних сепараторів, а також інформацію про структуру невідомих на даний момент еволюції класу Видів (неявних Видів) [90]. Час еволюції T_E класу поліградієнтних магнітних сепараторів склав $T_E = 80$ років. 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}

$$N_{PI} = (S_{ЦЛ2.0x}, S_{ЦЛ2.2y}, S_{ПЛ2.2y}, S_{ЦЛ0.2y}, S_{ТП2.2x}, S_{ТП2.0x}, S_{СФ2.2y}), \quad (2.2)$$

де $S_{ЦЛ2.0x}, \dots, S_{СФ2.2y}$ — 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 $N_{неявн.}=11$.

Слід зазначити, що в процесі ідентифікації видової приналежності відомих структурних представників класу магнітних сепараторів за результатами історичного і патентного пошуку було проведено, по суті, багаторазовий геномно-історичний еволюційний експеримент, результати якого представлені у вигляді філогенетичної моделі на рис. 2.2.

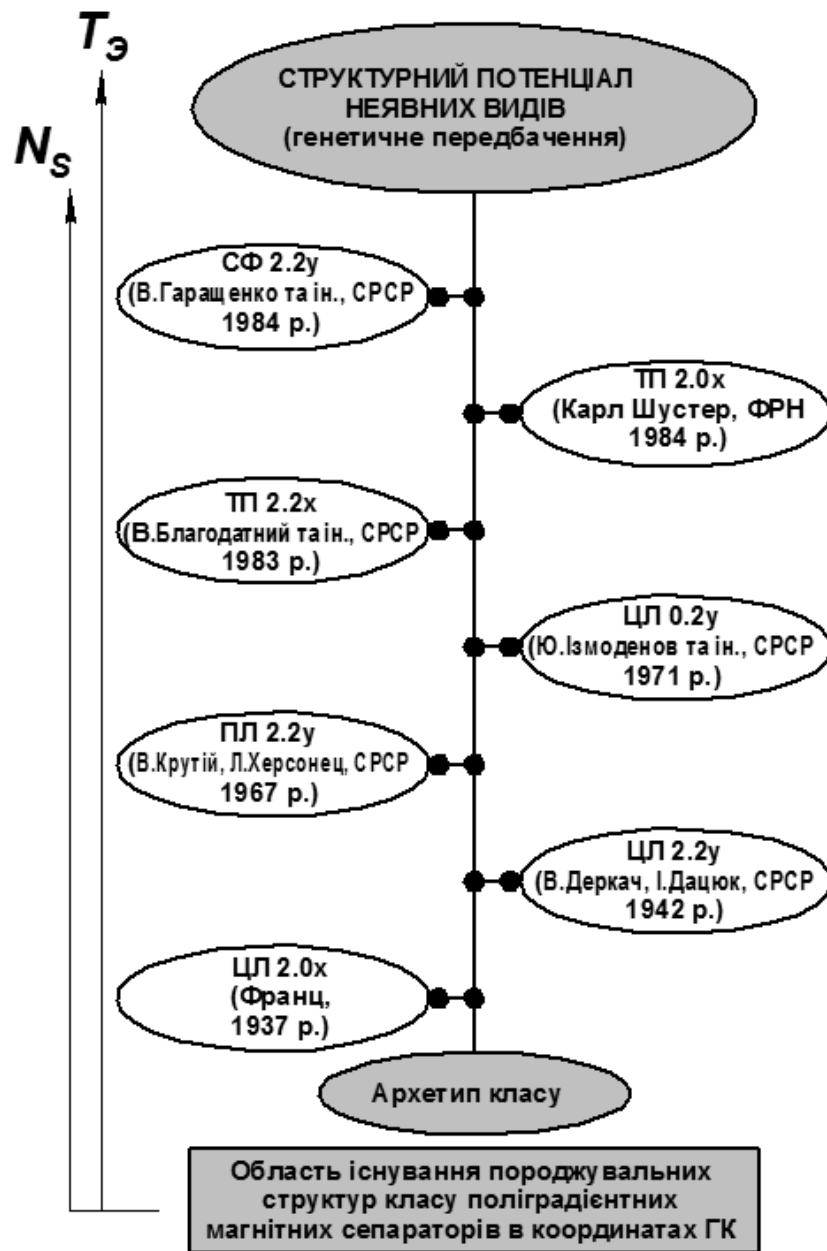


Рисунок 2.2 – Філогенетична модель макроеволюції поліградієнтних магнітних сепараторів (T_E – час еволюції (80 років), N_S – кількість Видів)

Як свідчить рис. 2.2, перший патент на поліградієнтний сепаратор матричного типу отримав Франц у 1937 р. [1, 91]. Запропонований ним пристрій мав вигляд матриці із тонкої сталевий стрічки, яка розміщувалася всередині соленоїду, та отримав назву ферофільтру. Максимальне значення напруженості поля всередині матриці у відсутності соленоїду складало близько 120 кА/м. У той самий час конструктивні особливості матриці забезпечували

достатньо високі значення градієнту напруженості магнітного поля – близько $4,8 \cdot 10^8 \text{ A/m}^2$.

Приклади деяких генетично ідентифікованих структурних представників реально-інформаційних Видів показані на рис. 2.3.

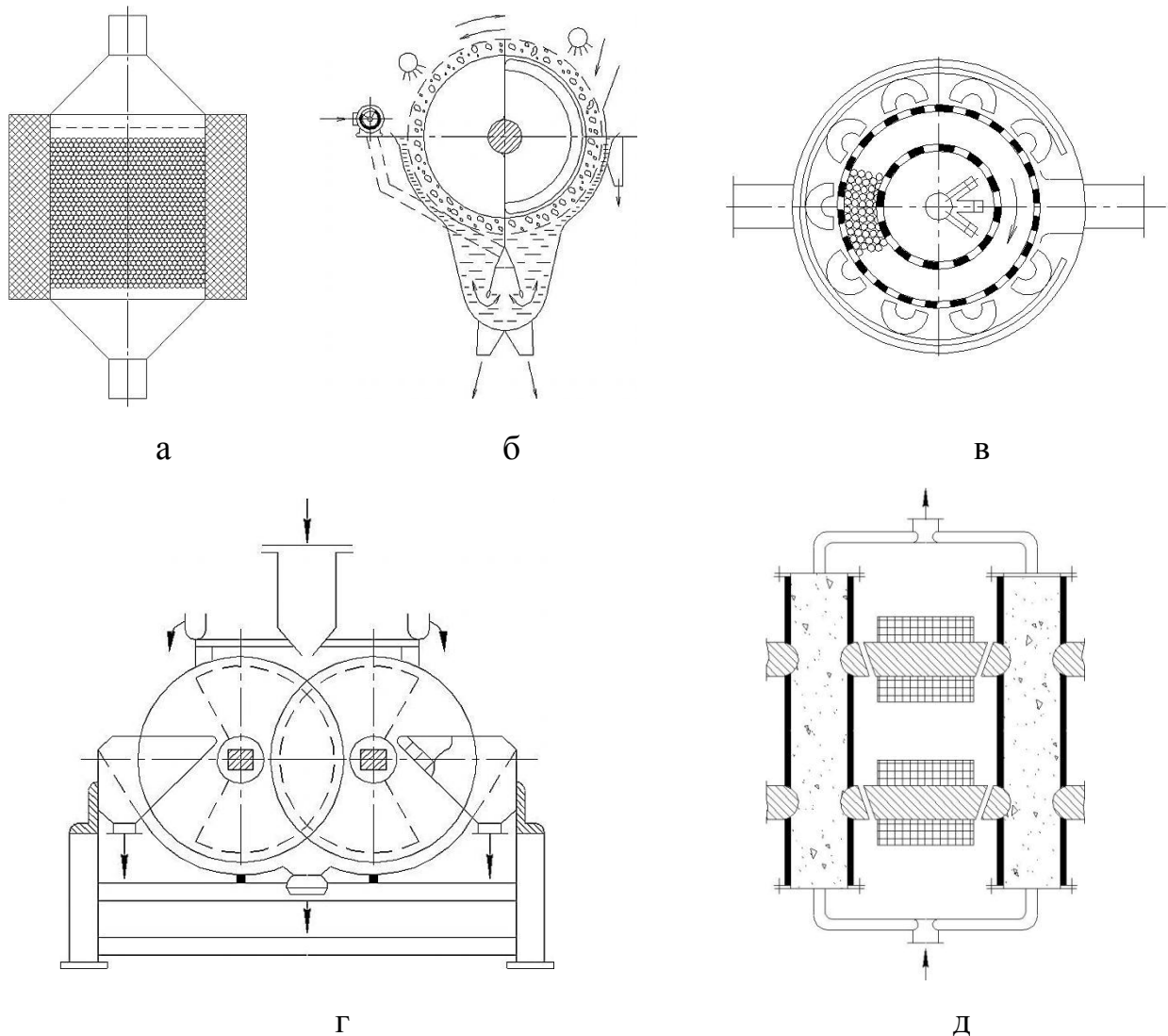


Рисунок 2.3 – Приклади структурних представників реально-інформаційних

Видів поліградієнтних магнітних сепараторів:

ЦЛ 2.0х [92] (а); ЦЛ 2.2у [93] (б); ЦЛ 0.2у [94] (в);

ТП 2.2х [95] (г); СФ 2.2у [96] (д)

Таким чином, геномно-історичний експеримент показав, що різноманітність Видів магнітних сепараторів включає представників 7 реально-інформаційних Видів (39% від загальної кількості Видів), а час еволюції T_E

класу поліградієнтних магнітних сепараторів матричного типу становить $T_E = 80$ років.

2.3 Генетичні принципи структуроутворення поліградієнтних середовищ магнітних сепараторів

Завдання вибору поліградієнтного середовища в робочому органі сепаратора повинно вирішуватися через процедури структурного, а в подальшому, з урахуванням властивостей середовища, і параметричного синтезу. Генетичні принципи синтезу, результати якого ми спостерігаємо в живій природі і в техніці, універсальні [27, 88]. Це вказує на можливість їх застосування до задач синтезу внутрішньої структури поліградієнтних середовищ.

Феромагнітні тверді тіла, як породжувальні елементи внутрішньої структури поліградієнтних середовищ, являють собою елементарні моноструктури різної геометричної форми, наприклад куля, циліндр, паралелепіпед, конус, піраміда, пластини тощо (рис. 2.4). З точки зору генетичної концепції такі елементарні моноструктури представляють собою батьківські хромосоми.

Основу алгоритмів генетичного синтезу утворюють генетичні оператори синтезу [97-99], зокрема, генетичні оператори схрещування, реплікації, мутації і просторової інверсії. При синтезі внутрішньої структури поліградієнтних середовищ ці оператори характеризуються такими особливостями:

1. Генетичний оператор схрещування f_C моделює просторове поєднання двох або більше структур.

2. Генетичний оператор реплікації f_R (з коефіцієнтом реплікації $k_R = 2, 3, \dots$) відповідає за зміну кількісного складу основних елементарних компонентів генетичної структури.

3. Генетичний оператор мутації f_M моделює процеси, пов'язані зі зміною геометричних розмірів і просторової форми елементів структури.

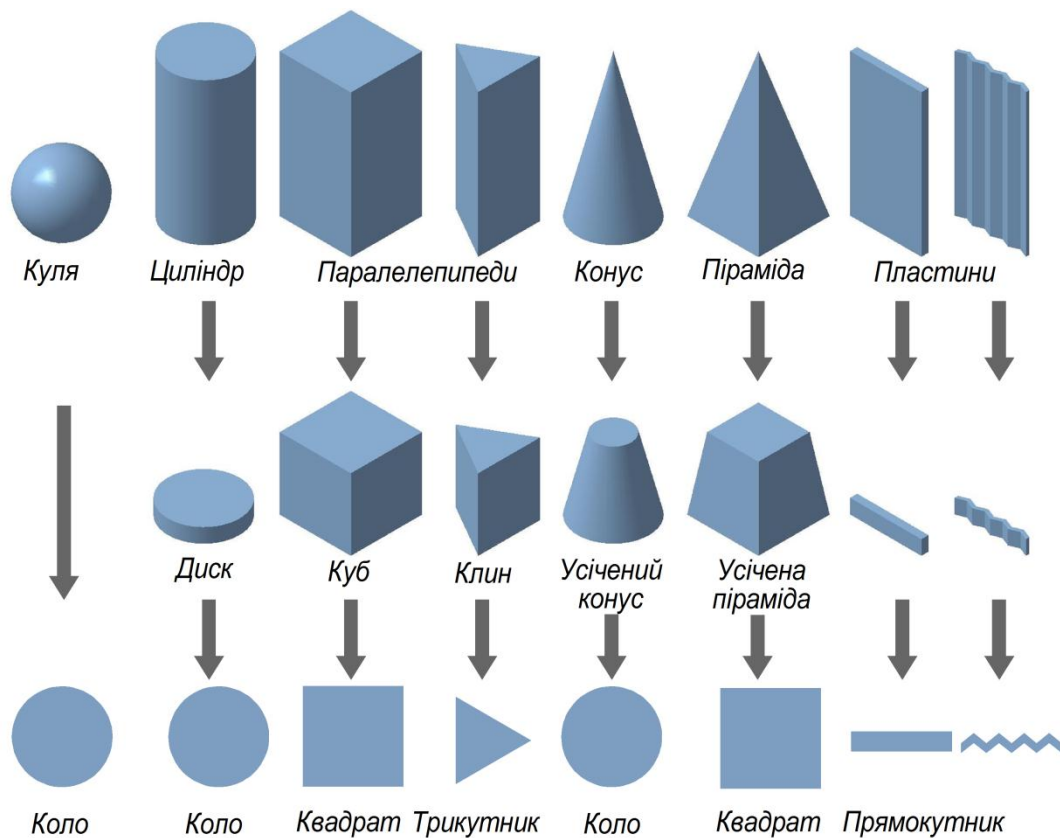


Рисунок 2.4 – Приклади феромагнітних тіл – породжувальних елементів внутрішньої структури поліградієнтних середовищ

4. Генетичний оператор просторової інверсії f_{SI} відповідає за зміну порядку просторового розміщення елементів електромеханічної структури.

Правила розміщення елементарних моноструктур в просторі підпорядковуються принципам симетрії і ізомерії. Якщо симетрія відповідає за порядок (ритм, періодичність), то ізомерія визначає допустимі варіанти просторових форм реалізації цього порядку (при незмінній кількості елементів).

На рис. 1.2 – 1.5 представлені структурні варіанти поліградієнтних середовищ, які можна розглядати як результат дії наступних генетичних операторів синтезу:

- реплікації елементарних моноструктур певної геометрії (рис. 1.2, а-в; 1.3, а, б; 1.4, а);
- спільного застосування операторів реплікації і мутації (рис. 1.3,б; 1.4,б);
- схрещування (гібридні структури на рис. 1.5).

елементарних породжувальних структур S_0 в просторі визначаються геометричним класом (формою) сепараційного каналу сепаратора та підпорядковані принципам симетрії і ізомерії.

Належність сепараційного каналу до того чи іншого геометричного класу визначається просторовою геометрією і топологією полюсних наконечників, тобто на підставі інформації, що міститься в генетичному коді магнітного сепаратора [100]. На рис. 2.6 для прикладу схематично показані сепараційні канали трьох геометричних класів: плоский (PL , рис. 2.6, а), циліндричний (CL , рис. 2.6, б) і сферичний (SF , рис. 2.6, в), суміщені з відповідними системами координат.

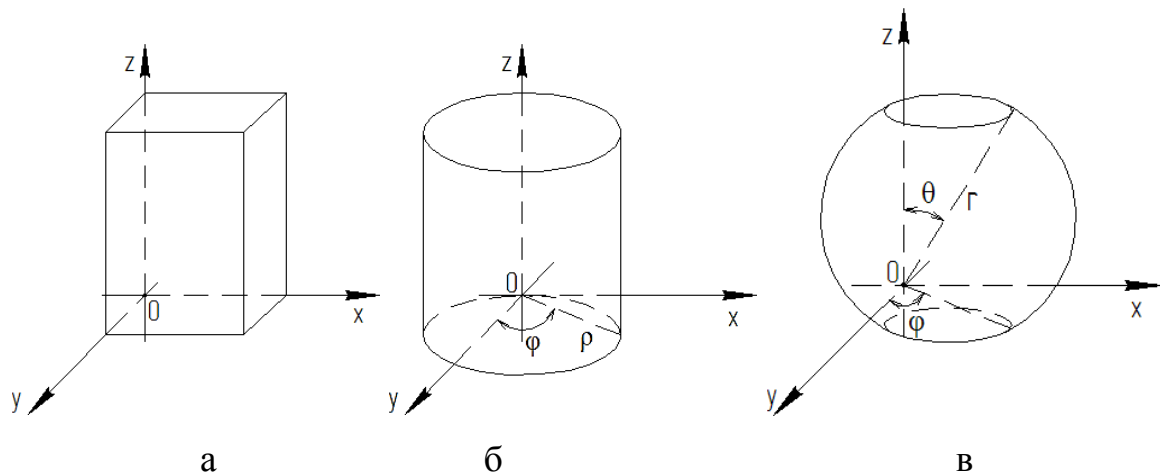


Рисунок 2.6 – Сепараційні канали поліградієнтних сепараторів геометричних класів: плоский PL (а); циліндричний CL (б); сферичний SF (в)

Для зазначених геометричних класів можливі, зокрема, такі варіанти реплікації елементарних породжувальних структур S_0 в просторі каналу [100]:

– геометричний клас плоский PL – реплікації f_{RX} , f_{RY} , f_{RZ} в напрямку координатних осей OX , OY , OZ , відповідно;

– геометричний клас циліндричний CL – реплікації f_{RZ} та/або $f_{R\rho}$ в напрямку координат Z та/або ρ при фіксованих значеннях кута φ з діапазону $0 \leq \varphi \leq 2\pi$;

– геометричний клас сферичний SF – реплікація f_{Rr} в напрямку координати r при фіксованих значеннях кутових координат φ і Θ з діапазонів $0 \leq \varphi \leq 2\pi$, $0 \leq \Theta \leq \pi$, відповідно.

Генетичний синтез внутрішньої структури поліградієнтних середовищ має наступні переваги [103, 104]:

- забезпечує спрямований характер і повноту синтезу структур за умови заданої цільової функції пошуку;
- забезпечує можливість автоматизації трудомістких процедур генерації і візуалізації результатів синтезу;
- визначає стратегію прогнозування нових структурних варіантів поліградієнтних середовищ.

2.4 Генетичний синтез структурних варіантів поліградієнтного середовища матриці магнітного сепаратора

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 [65]. З огляду на це, нижче представлені два варіанти практичної реалізації процедури структурного (генетичного) синтезу структур поліградієнтних середовищ на основі трикутних елементів. Практична реалізація процедури синтезу передбачає визначення цільової функції F_S для отримання i -ої множини можливих варіантів рішення ($S_1, S_2, \dots, S_i$).

Варіант 1.

Виходячи з аналізу відомих проектів, досягнутого технічного рівня і технічних вимог, розглянемо в якості цільової функції пошуку функцію F_{S1} , яка має такі суттєві ознаки:

1. На даному етапі досліджень обмежуємося розглядом поліградієнтних магнітних сепараторів поступального руху базового Виду **ПЛ 2.2х**. Складові генетичного коду **ПЛ 2.2х** визначаються по геометрії і топології активної поверхні, утвореної полюсними наконечниками полюсів пристроїв [89]:

геометричний клас активної поверхні – плоский (ПЛ), топологічний клас активної поверхні – поздовжньо орієнтована (x -орієнтація) двостороння розімкнена поверхня з краями (2.2 x).

2. Форма перетину сепараційного каналу для розміщення поліградієнтного середовища – прямокутна.

3. Елементарна породжувальна моно структура S_0 поліградієнтного середовища – пластина в формі рівнобедреного трикутника, прив'язана до прямокутної декартової системи координат так, як показано на рис. 2.7.

4. Завдання синтезу обмежується результатами генерації структур при обраних коефіцієнтах реплікації $k_{R0x}=2$, $k_{R0y}=4$, $k_{R0z}=3$ по координатних осях $0x$, $0y$ та $0z$, відповідно.

5. Генетичний оператор мутації f_M відповідає за зміну форми елементарної пластини з рівнобедреного трикутника в прямокутний.

6. На даному етапі пошуку виключаємо з розгляду поліградієнтні структури вищих рівнів складності, зокрема, гібридні і суміщені.

7. Результати синтезу повинні включати інформацію про генетично допустиму різноманітність поліградієнтних середовищ, в т.ч. і про потенційно можливі, ще відсутні на даний час технічної еволюції.

8. Отримана інформація повинна забезпечувати гарантовану повноту пошуку.

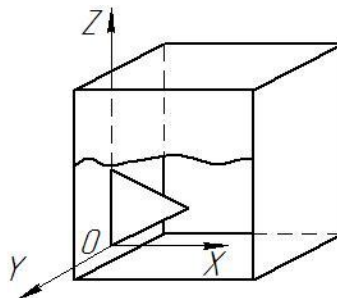


Рисунок 2.7 – Елементарна породжувальна моноструктура S_0 синтезованого поліградієнтного середовища

Таким чином, цільова функція пошуку F_{S1} приймає вигляд [102]

$$F_{S1} = \{V_{var}, R_s, S_0, L_g, Q_\Sigma\}, \quad (2.3)$$

де V_{var} – вимога по виду просторового руху робочого органу магнітного сепаратора; R_s – форма перетину сепараційного каналу; S_0 – елементарна породжувальна структура (трикутна пластина); L_g – обмеження на застосування генетичних операторів синтезу; Q_Σ – вимога повноти пошуку.

Генетичний оператор реплікації f_R є основним джерелом структурного розмаїття поліградієнтних середовищ. Сам термін «поліградієнтний» вказує на наявність безлічі локальних зон високого градієнта. Генерація можливих просторових композицій поліградієнтних середовищ здійснюється шляхом послідовного застосування по відношенню до породжувальної структури S_0 (рис. 2.7) генетичного оператора реплікації f_R по координатних осях Ox , Oy і Oz , відповідно. В результаті генерації, при заданих обмеженнях, накладених на коефіцієнт реплікації k_R , отримуємо кінцеву множину просторових композицій S_X (по x -координаті, рис. 2.8, а), S_Y (по y -координаті, рис. 2.8, б), S_Z (по z -координаті, рис. 2.8, в), синтезованих на основі S_0 ,

$$f_R(S_0) \rightarrow (S_X, S_Y, S_Z). \quad (2.4)$$

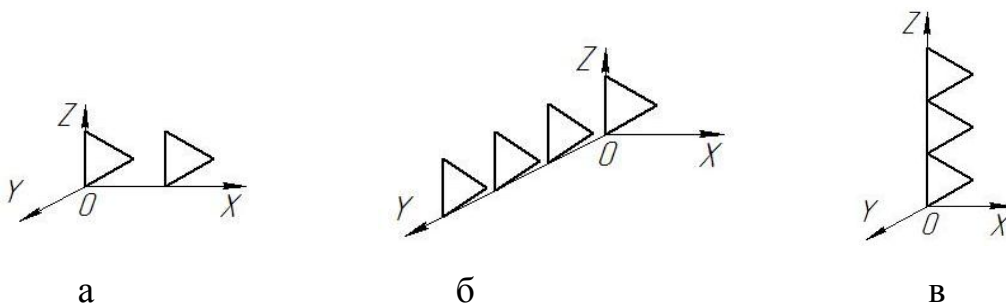


Рисунок 2.8 – Репліковані просторові композиції:

S_X ($k_{R0x}=2$) (а); S_Y ($k_{R0y}=4$) (б); S_Z ($k_{R0z}=3$) (в)

Просторове поєднання реплікованих структур S_X , S_Y , S_Z дозволяє отримати наступний результат (рис. 2.9)

$$f_C(S_X, S_Y, S_Z) \rightarrow S_{XYZ}. \quad (2.5)$$

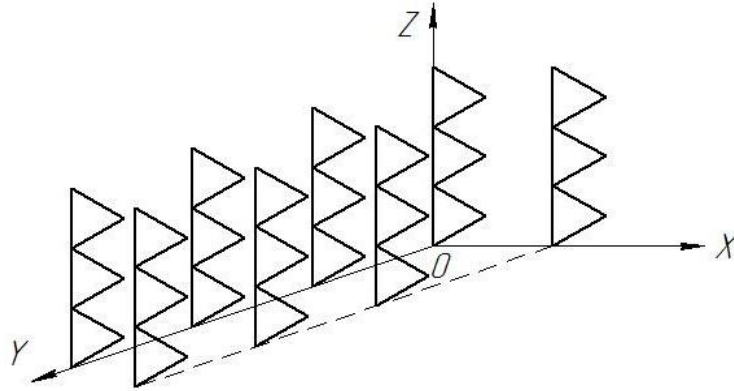


Рисунок 2.9 – Реплікована поєднана структура S_{XYZ}

Композиція S_{XYZ} визначає структурне наповнення популяції реплікованих структур, відмітною ознакою яких є наявність пластинчастого поліградієнтного середовища з односторонньою зубчастістю і з розташуванням виступів однієї пластини навпроти гладкої поверхні іншої.

Для реплікованої структури S_{XYZ} можуть бути отримані інверсні структури S_{XYZ}^* шляхом зміни порядку просторового розміщення елементів (трикутних виступів), зокрема, шляхом зміни знаків просторових координат x, z виступів одного з рядів пластин на протилежні: $x \rightarrow -x, z \rightarrow -z$

$$f_{SI}(S_{XYZ}) \rightarrow S_{XYZ}^*. \quad (2.6)$$

Кінцева множина просторових компонувань або ізомерів реплікованої інверсної структури S_{XYZ}^* має вигляд

$$S_{XYZ}^* = (S_{XYZ}^{X*}, S_{XYZ}^{Y*}, S_{XYZ}^{Z*}, S_{XYZ}^{XY*}, S_{XYZ}^{YZ*}, S_{XYZ}^{XZ*}, S_{XYZ}^{XYZ*}), \quad (2.7)$$

де $S_{XYZ}^{X*}, S_{XYZ}^{Y*}, S_{XYZ}^{Z*}$ – синтезовані інверсні структури, особливістю яких є зміщення одного ряду пластин з трикутними виступами уздовж осей $0x, 0y$ та $0z$ відповідно; $S_{XYZ}^{XY*}, S_{XYZ}^{YZ*}, S_{XYZ}^{XZ*}$ – структури, утворені в результаті попарного

поєднання структур S^{X*}_{XYZ} , S^{Y*}_{XYZ} та S^{Z*}_{XYZ} ; S^{XYZ*}_{XYZ} – структура, утворена в результаті одночасного суміщення структур S^{X*}_{XYZ} , S^{Y*}_{XYZ} , S^{Z*}_{XYZ} .

Таким чином, загальне число просторових композицій, синтезованих на основі реплікованої інверсної структури S^*_{XYZ} , становить 7. Деякі ізомерні композиції представлені на рис. 2.10 (для наочності показані тільки дві пластини розглянутого поліградієнтного середовища).

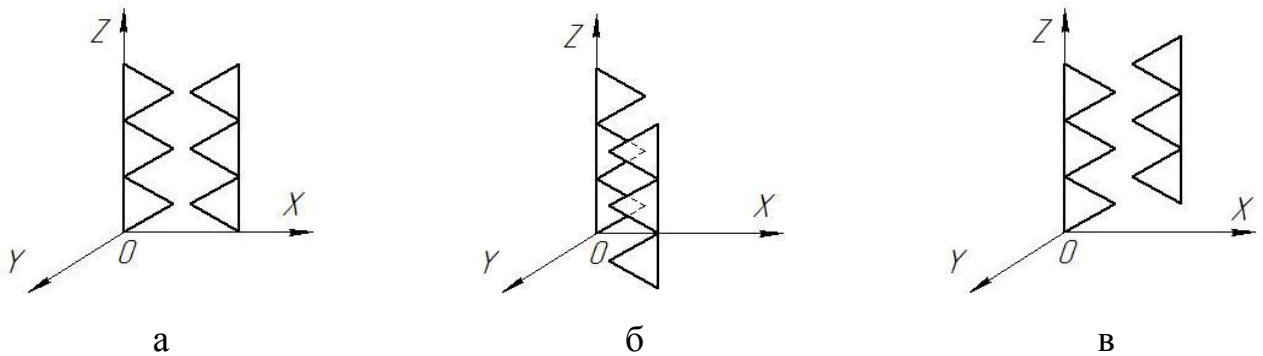


Рисунок 2.10 – Приклади ізомерних композицій реплікованої інверсної структури S^*_{XYZ} : структура S^{X*}_{XYZ} (а); структура S^{Y*}_{XYZ} (б); структура S^{Z*}_{XYZ} (в)

Породжувальна структура S^*_{XYZm} є результатом дії оператора f_M мутації по відношенню до структури S^*_{XYZ} , що полягає в зміні геометричної форми трикутної породжувальної пластини

$$f_M(S^*_{XYZ}) \rightarrow S^*_{XYZm}. \quad (2.8)$$

Мутація може бути повною (зміна форми спостерігається у всіх елементів структури, рис. 2.11, а) або частковою (тільки окремі елементи структури змінюють свою форму, рис. 2.11, б). Це означає, що з кожної інверсної реплікованої структури (формула (2.4)) можуть бути отримані дві нові структури, що відрізняються характером мутації (повна або часткова). Тоді загальна кількість структурних варіантів, синтезованих на основі породжувальної структури S^*_{XYZm} , складе 14.

Варіант 2.

Розглянемо задачу спрямованого пошуку структури матриці поліградієнтного магнітного сепаратора по заданій функції синтезу F_S , яка визначається такою сукупністю вихідних часткових вимог та обмежень [100]:



Рисунок 2.11 – Породжувальна структура S_{XYZm}^* :
повна мутація (а); часткова мутація (б)

1. На даному етапі досліджень обмежимося розглядом сепараційного каналу геометричного класу плоский PL (рис. 2.6, а).

2. Елементарна породжувальна моноструктура S_0 поліградієнтного середовища – пластина в формі прямокутного трикутника, прив'язана до прямокутної декартової системи координат i , відповідно, до стінок сепараційного каналу, як показано на рис. 2.12.

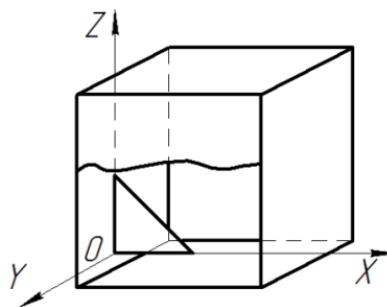


Рисунок 2.12 – Початкове положення елементарної породжувальної моноструктури S_0 в сепараційному каналі

3. Подача речовини (P) в робочу область сепараційного каналу здійснюється в напрямку координатної осі OZ (верхня подача речовини).

4. У робочій області сепараційного каналу встановлена багатошарова матриця (M). Шари матриці розташовані паралельно площині XOZ , а чергування шарів відбувається в напрямку осі OY . Всі шари матриці сепаратора ідентичні.

5. На використання генетичних операторів синтезу накладаються наступні обмеження L_g :

- генетичний оператор мутації f_M не враховується;
- завдання синтезу обмежується результатами генерації структур при обраних коефіцієнтах реплікації $k_{R0x}=2$, $k_{R0y}=4$, $k_{R0z}=4$ за координатними осями OX , OY та OZ , відповідно;
- оператор просторової інверсії f_I відповідає за зміну просторового розміщення реплікованих моноструктур S_0 уздовж осі OX .

6. На цьому етапі пошуку з розгляду виключаються (вимога L_s):

- поліградієнтні структури вищих рівнів складності, зокрема, гібридні;
- не враховуються структури зі складними видами симетрії: гвинтовою (спіральною), осьовою (поворотною) і фрактальною (симетрією самоподібності).

7. Результати синтезу повинні включати інформацію про генетично допустиму різноманітність поліградієнтних середовищ, в тому числі і про потенційно можливі, ще відсутні в даний час технічної еволюції.

8. Одержана інформація повинна повністю забезпечити гарантовану повноту пошуку (Q_Σ).

Виходячи з цього, з урахуванням зазначених обмежень і вимог, інтегральна функція F_{S2} синтезу набуває такого вигляду:

$$F_{S2} = \{PL, P, M, S_0, L_s, L_g, Q_\Sigma\}. \quad (2.9)$$

Заданій сукупності ознак і обмежень (2.9) ставиться у відповідність наступна генетична модель (рис. 2.13), яка визначає загальний порядок застосування операторів синтезу [100].

На рис. 2.13 прийняті наступні позначення [100]: S_{XR} , S_{YR} , S_{ZR} – породжувальні структури, репліковані, відповідно, в напрямку осей OX , OY , OZ ; S^*_{XR} – реплікована в напрямку осі OX інверсна породжувальна структура; S^*_{XZR} – породжувальна структура шару поліградієнтної матриці, утворена в результаті об'єднання реплікованих структур S^*_{XR} та S_{ZR} ; S^*_{XYZR} – породжувальна структура популяції P_2 реплікованих інверсних структур (рис. 2.5).

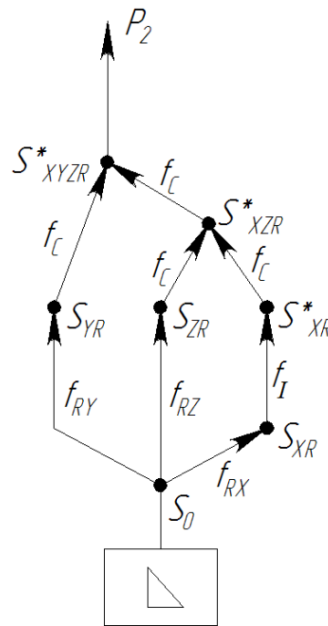


Рисунок 2.13 – Генетична модель структуроутворення полі градієнтної матриці, яка відповідає заданій функції F_S

Приклади просторових композицій, синтезованих на основі породжувальних структур S_{XR} , S_{YR} , S_{ZR} , S^*_{XR} показані на рис. 2.14.

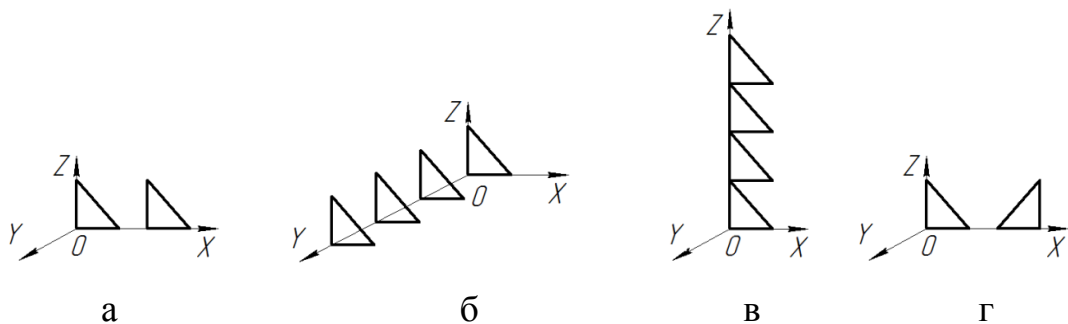


Рисунок 2.14 – Приклади просторових композицій, синтезованих на основі породжувальних структур: $S_{XR}(k_{R0x}=2)$ (а); $S_{YR}(k_{R0y}=4)$ (б); $S_{ZR}(k_{R0z}=4)$ (в); $S^*_{XR}(k_{R0x}=2)$ (г)

Генетична модель (рис. 2.13) може бути описана такою послідовністю перетворень [100]:

$$\begin{aligned} f_R(S_0) &\rightarrow (S_{XR}), k_{R0x}=2 \\ f_R(S_0) &\rightarrow (S_{YR}), k_{R0y}=4 \end{aligned} \quad (2.10)$$

$$\begin{aligned} f_R(S_0) &\rightarrow (S_{ZR}), k_{R0z}=4 \\ f_I(S_{XR}) &\rightarrow (S^*_{XR}), \end{aligned} \quad (2.11)$$

$$f_C(S^*_{XR}, S_{ZR}) \rightarrow S^*_{XZR}, \quad (2.12)$$

$$f_C(S^*_{XZR}, S_{YR}) \rightarrow S^*_{XYZR}. \quad (2.13)$$

Як відомо, при коефіцієнті реплікації $k_R \geq 2$ допускаються різні варіанти просторових композицій (компонуваль, перестановок) структур, кількість яких зі збільшенням значення k_R зростає. Ця властивість має системний характер, так як проявляється на будь-якому рівні структурної організації багатоеlementних електромеханічних структур. Властивість, пов'язана з наявністю множини варіантів просторового розміщення з однакової кількості однотипних елементів, називається ізомерією, а множини їх просторових композицій – просторовими ізомерами [104, 105].

Ізомерні композиції $(S_1, S_2, \dots S_n)$ формуються з урахуванням правил симетрії, тобто закономірної повторюваності фігур або частин самосиметричних фігур [100],

$$f(S^*_{XYZR}) \rightarrow (S_1, S_2, \dots S_n), \quad (2.14)$$

де f – оператор геометричних перетворень (перетворень симетрії); n – кількість ізомерних композицій.

Періодичність просторового розподілу однакових елементарних структурних форм (моноструктур) є проявом симетрії поліградієнтних середовищ. Їх можна віднести до симетричних фігур, які підпадають під дію

законів симетрії, що виявляються за допомогою відомих елементів симетрії [100, 106]:

- центру інверсії – центральна симетрія;
- площини симетрії – дзеркальна симетрія;
- вектора перенесення – переносна симетрія або трансляція;
- площини ковзного відображення – змінна симетрія.

Площина симетрії (m) – уявна площина, що ділить об'єкт на дві дзеркально однакові частини. Можуть мати місце горизонтальна m_g та вертикальна m_v площини симетрії.

Центр інверсії ($\bar{1}^*$) – особлива точка, що характеризується тим, що будь-яка пряма, проведена через неї, по обидві сторони від цієї точки і на рівних відстанях зустрічає відповідні точки фігури.

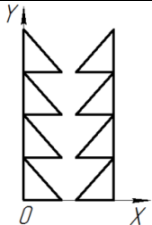
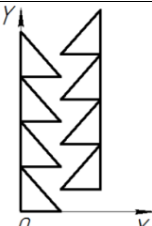
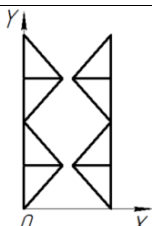
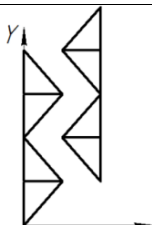
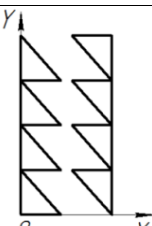
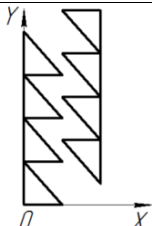
Площина ковзного відображення P_t являє собою композицію площин симетрії і паралельній їй передачі (трансляції) T сукупності об'єктів. З точки зору симетричних операцій ковзання є трансляцією однієї елементарної частини відносно іншої без зміни форми та розмірів.

Переносна симетрія або трансляція являє собою поступальний перенос фігури паралельно самій собі на вектор T (період трансляції), який характеризує напрямок і величину перенесення [100].

Для кінцевих геометричних фігур є строго обмежена кількість видів кінцевої симетрії [106, 107]. У табл. 2.3 представлені результати синтезу просторових ізомерних композицій поліградієнтних середовищ. Для більшої наочності в таблиці показаний тільки один шар поліградієнтного середовища матриці поліградієнтного сепаратора, що відповідає породжувальній структурі S^*_{XZR} на генетичній моделі (рис. 2.13) [100].

Слід зазначити, що композиції (S_2 , S_4 , S_6) отримані з використанням симетричної операції ковзання. При цьому, якщо для структури S_4 період трансляції складає T , то для структур S_2 та S_6 застосований половинний період трансляції $T/2$, тому вони відрізняються більш складною структурою у порівнянні зі структурою S_4 .

Таблиця 2.3 – Результати синтезу просторових ізомерних композицій поліградієнтного середовища

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

Таким чином, з використанням перетворень симетрії отримано множину ($S_1, S_2, \dots, S_n$), що складається з $n = 6$ ізомерних композицій поліградієнтного середовища [100].

Достовірність результатів синтезу поліградієнтних середовищ електромагнітних сепараторів підтверджена за допомогою порівняння результатів патентно-інформаційного пошуку та результатів синтезу.

Під час проведення патентно-інформаційного пошуку виявлені структурні представники електромагнітних сепараторів, поліградієнтні середовища яких можуть бути віднесені до ізомерних композицій S_3 (рис. 2.15, а, б) та S_4 (рис. 2.15, в) [100].

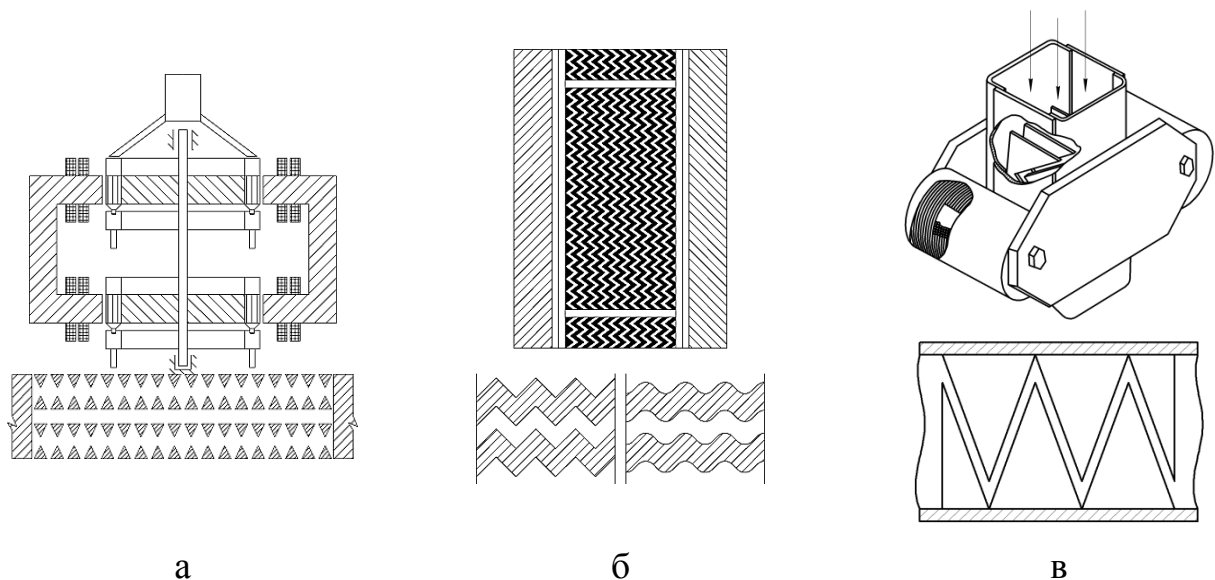


Рисунок 2.15 – Структурні представники магнітних сепараторів з поліградієнтним середовищем, які відносяться до ізомерних композицій:

S_3 [9] (а); S_4 [108] (б); S_4 [109] (в)

Поліградієнтний магнітний сепаратор [9], зображений на рис. 2.15, а, містить дві матриці, які розташовані в міжполюсному проміжку. Кожна з цих матриць виконана дворядною з трикутних феромагнітних тіл, розташованих паралельно один одному в площині матриці. Феромагнітні тіла матриці (рис. 2.15, а) звернені однією зі своїх поверхонь в сторону каналу для

проходження пульпи. Простір між феромагнітними тілами заповнений немагнітним матеріалом.

На рис. 2.15, б показаний електромагнітний сепаратор [108], який включає камеру, електромагнітну систему з полюсами, поліградієнтне середовище, виконане з пластин, прилеглих до стінок камери і пластин, виконаних зигзагоподібними з розміщенням виступів пластин навпроти западин протилежних пластин, зигзаги можуть мати трапецієподібний або трикутний перетин. Можливе виконання вершин зигзагів округленими.

За результатами генетичного моделювання отримано два патенти [110, 111]. Можливість спрямованого пошуку нових патентоспроможних структур поліградієнтних середовищ електромагнітних сепараторів може служити умовою адекватності генетичної моделі (рис. 2.13) реальним процесам структуроутворення.

Поліградієнтний магнітний сепаратор, зображений на рис. 2.15, в, був розроблений у Східноукраїнському національному університеті імені Володимира Даля емпіричним шляхом. Ця конструкція прийнята як базова при подальших теоретичних дослідженнях. Змістовний опис конструкції, принципу дії та основних технічних характеристик базового електромагнітного сепаратора наведений у Додатку А.

До недоліків базової конструкції електромагнітного сепаратора слід віднести:

- недостатньо велику осаджувальну поверхню полюсів: під час робочого процесу основна маса вилучених феромагнітних домішок осідає в невеличкій зоні виступу трикутної пластини-полюсу, де має місце найбільш висока неоднорідність магнітного поля;

- необхідність в частому розвантаженні сепаратора, оскільки повітряні робочі проміжки матриці через їх відносно невеликі розміри можуть забиватися влученими феромагнітними домішками;

- чергування в суміжних рядах паралельних феромагнітних пластин трикутних виступів та западин в одному напрямку, що сприяє нерівномірному

розподілу неоднорідності магнітного поля та локальних зон високої інтенсивності в робочому об'ємі матриці сепаратора.

Таким чином, базова конструкція електромагнітного сепаратора потребує подальшого удосконалення з точки зору покращення її робочих характеристик та ефективності вилучення феромагнітних включень. Форма, геометричні розміри та особливості розташування феромагнітних пластин-полюсів мають переважний вплив на робочі характеристики сепаратора, тому в наступному розділі запропонований підхід до визначення раціональної геометрії пластин-полюсів в робочому об'ємі матриці.

2.5 Висновки по розділу 2

1. Визначено видове різноманіття функціонального класу поліградієнтних магнітних сепараторів обертального і поступального рухів, представлене 10 та 8 базовими Видами, відповідно.

2. Геномно-історичний експеримент, виконаний із залученням результатів історичних і патентних досліджень, показав: різноманітність видів поліградієнтних магнітних сепараторів включає представників 7 реально-інформаційних Видів (17,4% від загальної кількості Видів); потенціал конкурентоспроможності (інноваційний потенціал) класу магнітних сепараторів представлений 11 неявними Видами; час еволюції класу становить 80 років.

3. Розроблено узагальнену генетичну модель структуроутворення поліградієнтного середовища, основним генетичним оператором якого виступає оператор реплікації f_R . Обґрунтовано, що правила розміщення реплікованих елементарних породжувальних структур S_0 в просторі визначаються геометричним класом (формою) сепараційного каналу сепаратора та підпорядковані принципам симетрії та ізомерії.

4. З використанням генетичних операторів синтезу (варіант 1) отримано 21 структурний варіант поліградієнтного середовища, що задовольняють цільовій функції F_{S1} синтезу та елементарною породжувальною

моноструктурою яких є пластина в формі рівнобедреного трикутника. Достовірність результатів генетичного синтезу обґрунтована шляхом порівняння результатів синтезу з результатами патентно-інформаційних досліджень, в ході яких виявлені структурні представники не менше шести синтезованих структур, в т. ч. представники структур S_{XYZ}^* , S_{XYZm}^{Z*} .

5. Для заданої інтегральної функції F_{S2} синтезу (варіант 2) розроблена генетична 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}^* . За допомогою переносної, дзеркальної, центральної і ковзної операцій 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 електромагнітних сепараторів, у яких поліградієнтні середовища можуть бути віднесені до ізомерних композицій S_3 і S_4 . Це підтверджує достовірність процедури синтезу. Зокрема, до структури S_4 належить конструкція електромагнітного поліградієнтного сепаратора, яка прийнята в якості базової при подальших теоретичних дослідженнях.

6. За допомогою генетичного моделювання отримано два нових технічних рішення, захищених охоронними документами.

РОЗДІЛ 3

ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ СТРУКТУРНИХ ВАРІАНТІВ МАТРИЦІ ПОЛІГРАДІЄНТНОГО СЕПАРАТОРА

3.1 Вихідні передумови вирішення завдання по вибору раціональної структури матриці поліградієнтного сепаратора

У попередньому розділі здійснено застосування методів структурно-системного підходу для синтезу структур поліградієнтних середовищ матриць магнітних сепараторів. Для подальших теоретичних досліджень обрані чотири структурних варіанти (композиції) (S_1 , S_3 , S_4 , S_5) пластинчастого поліградієнтного середовища, отримані шляхом генетичного моделювання та послідовного застосування операцій дзеркальної, переносної, центральної та ковзної 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.

Пластинчасті середовища (набори пластин) матриць поліградієнтних сепараторів відносяться до безконтактного типу, основною перевагою яких є те, що вони легко очищаються від витягнутих включень внаслідок досить широких проміжків між елементами, що й зумовлює їх використання для очищення сипучих матеріалів від феромагнітних включень [112, 113].

Основні параметри, що впливають на процес поліградієнтної магнітної сепарації, поділяють на три групи [114]. До першої групи відносять параметри, що характеризують пристрій в цілому, зокрема: напруженість H та градієнт напруженості $\text{grad}H$ магнітного поля в робочій зоні, геометричні розміри елементів матриці, висоту зони сепарації, спосіб регенерації робочої зони. Друга група охоплює параметри, що характеризують фізико-хімічні властивості матеріалу, що підлягає очищенню. Третя група параметрів, наприклад, швидкість подачі матеріалу до робочої зони, характеризує особливості технологічного процесу.

При розробці удосконалених пристроїв для поліградієнтної магнітної сепарації можна впливати на параметри першої групи: напруженість H та градієнт напруженості $\text{grad}H$ магнітного поля в робочій зоні, які приймаються як основні. Параметри другої та третьої груп виступають як вихідні.

Задачами подальших досліджень є:

– вибір з множини синтезованих структур (S_1, S_3, S_4, S_5) допустимих варіантів, при яких формування пластинчастої матриці технічно піддається реалізації;

– визначення раціональних структурних варіантів елементів пластинчастої матриці, які є найкращими з точки зору обраного критерію ефективності.

Зазвичай критерієм ефективності магнітних сепараторів, призначених для вилучення випадкових феромагнітних частинок, служить показник вилучення η_M , який являє собою відношення кількості витягнутих частинок, що утворюють магнітну фракцію, до загальної кількості Q_{ex} магнітних включень в живленні сепаратора [115, 116]

$$\eta_M = (Q_{\text{ex}} - Q_{\text{вих}}) / Q_{\text{ex}}, \quad (3.1)$$

де $Q_{\text{вих}}$ – кількість магнітних включень в матеріалі, що сепарується, на виході магнітної системи сепаратора.

Показник вилучення характеризує ймовірність того, що магнітні частинки будуть вилучені. Очевидно, що ця ймовірність тим вище, чим вище магнітні сили F_M і нижче сили опору F_C , що діють на видобуту частку, тому вираз для η_M може бути записаний у вигляді

$$\eta_M = KF_M / F_C, \quad (3.2)$$

де K – коефіцієнт пропорційності.

При розрахунках ефективності магнітних сепараторів поряд з показником η_M часто використовують показник η_{M1} , який має вигляд

$$\eta_{M1} = Q_{вих} / Q_{вх} = 1 - \eta_M. \quad (3.3)$$

Показник η_{M1} характеризує ту частину магнітних включень, яка залишилася не вилученою, і має назву ступінь пропуску або невилучення сепаратора. Чим менше η_{M1} , тим більш ефективним є сепаратор.

Якщо припустити, що вилучення магнітних частинок з матеріалу є процесом масопередачі і підкоряється закону діючих мас, то можна записати наступний вираз для η_{M1} [6, 117]

$$\eta_{M1} = e^{-t/t_{uz}}, \quad (3.4)$$

де t – час перебування частки в робочому обсязі електромагнітної системи сепаратора; t_{uz} – час, протягом якого частка досягне поверхні полюса.

В якості критерію ефективності магнітної системи сепаратора в процесі експлуатації часто приймають час $t_{виl}$ переміщення часток до полюсів фільтраматриці [118]. Той фільтр, в якому цей час мінімальний, і буде вважатися найкращим. В роботі [119] запроваджено в розгляд конструкційний модуль як критерій ефективності пристрою. Він розраховується, як добуток магнітної індукції B апарату, швидкості V потоку сепарованого середовища та часу t його знаходження в магнітному полі.

Відзначимо, що вибір найкращого пристрою відповідно до вищезазначених критеріїв ефективності може бути здійснений, головним чином, при проведенні експериментальних досліджень на фізичних моделях або натурних зразках.

При дослідженні силових магнітних полів критерієм ефективності магнітосепаруючих пристроїв може служити питома приведена сила (формула (1.6)) $f_{np} = H \text{grad}(H)$, яка не залежить від форми, розмірів вилучаємого тіла, а характеризує тільки властивості магнітного поля пристрою [61]. Очевидно, що на початкових етапах проектування завдання вибору найкращих структур може бути вирішене шляхом проведення варіантних розрахунків силових магнітних

полів сепараторів при варіюванні структури матриці та її геометричних параметрів з використанням обчислювального експерименту. При цьому для найкращих технічних рішень доцільно використовувати поняття раціональних рішень, тому що для їх вибору поряд з формальними можуть бути задіяні експертні (неформальні) оцінки.

Під обчислювальним експериментом будемо розуміти будь-яке використання математичної моделі технічного пристрою, яке дозволяє знайти (як і в звичайному експерименті) певний взаємозв'язок параметрів пристрою або супутніх його роботі процесів. При цьому підтвердження результатів обчислювального експерименту результатами експериментів на натурних зразках або фізичних моделях є надлишковим, оскільки обчислювальний експеримент ґрунтується на повній математичній моделі фізичних процесів в об'єкті [1].

Слід зазначити, що багатоваріантні розрахунки є відносно трудомістким процесом, тому що для кожного з варіантів треба побудувати нові моделі магнітних систем, а розрахунки тривимірних моделей потребують значних витрат часу. Крім того, результати досліджень розподілу магнітного поля в повітряних зазорах синтезованих структур поліградієнтних середовищ різних конфігурацій з метою вибору найкращих з них потребують подальшого узагальнення та аналізу [120].

З урахуванням вищевикладеного, пропонується проводити вирішення задачі по вибору раціональних структурних варіантів поліградієнтних матриць в процесі обчислювального експерименту в два етапи [113]:

1. Попередній чисельно-польовий аналіз синтезованих структур шляхом оцінки ступеня неоднорідності магнітного поля в їх робочих зазорах.

Збільшення інтенсивності H магнітного поля у сепараторах з електромагнітним збудженням має свою межу, обумовлену насиченням елементів магнітопроводу. Зростання H також пов'язане з підвищенням споживаної потужності, в результаті чого збільшується вартість пристроїв. Відомо [1, 121], що для отримання максимального значення магнітної сили F_m ,

що діє на феромагнітні (або слабомагнітні) включення, необхідно прагнути до підвищення ступеня неоднорідності магнітного поля в робочій зоні, тобто до збільшення значення модуля вектору $\text{grad}(\mathbf{H})$. У той самий час збільшення градієнту напруженості $\text{grad}(\mathbf{H})$ можна досягти шляхом оптимізації взаємного розташування, форми та геометричних розмірів елементів багатокomпонентної магнітної матриці сепаратора. Тому на даному етапі мають бути відсічені структури зі слабо неоднорідним полем в робочій зоні, тобто структури, для яких $\text{grad}(\mathbf{H}) \rightarrow 0$.

2. Визначення раціональних структур поліградієнтних матриць шляхом оцінки спектра силового поля $\mathbf{H}\text{grad}(\mathbf{H})$ в площині робочої зони. Слід зазначити, що в структурах, які відрізняються високою неоднорідністю поля, середня напруженість $\mathbf{H}$ поля може бути відносно невисокою. При низькому рівні напруженості $\mathbf{H}$ магнітного поля та високому градієнті $\text{grad}(\mathbf{H})$, як свідчать результати досліджень [122], пондеромоторна сила може бути достатньою для вилучення тонкоподрібнених феромагнітних часток. Але в загальному випадку геометричні розміри, взаємне розташування та форма пластинчастих елементів матриці повинні забезпечувати як високу напруженість магнітного поля в робочому проміжку, так і його максимальну неоднорідність (градієнт напруженості) а, отже, і високі силові характеристики пристроїв в цілому.

Нижче наведені результати досліджень з вибору раціональних конфігурацій пластинчастого поліградієнтного середовища, а також його основних активних розмірів.

3.2 Математичне моделювання магнітного поля в робочих зонах синтезованих структур

Для оцінки ступеня неоднорідності магнітного поля в робочих зазорах поліградієнтних матриць та з метою подальшого визначення їх раціональних конфігурацій та активних розмірів проведено чисельне моделювання розподілу

магнітного поля в робочих міжполюсних зонах синтезованих структур (S_1, S_3, S_4, S_5) в двовимірній лінійній постановці.

3.2.1 Математична модель стаціонарного магнітного поля

Магнітне поле в робочій зоні сепаратора описується системою рівнянь Максвелла у магнітостатичному наближенні у відсутності електричного струму, яка доповнена матеріальними рівняннями, що визначають фізичні властивості матеріалів [31, 123-125],

$$\begin{aligned}\nabla \times \mathbf{H} &= 0, \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0,\end{aligned}\tag{3.5}$$

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

Рівняння, що описує стан феромагнітних елементів та навколишнього середовища (повітря), має вигляд [23]

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H},\tag{3.6}$$

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 відносно векторного магнітного потенціалу $\mathbf{A}$ (здається співвідношення $\mathbf{A} = \text{rot} \mathbf{B}$). Тому стаціонарна крайова задача, що підлягає розв'язанню відносно векторного магнітного потенціалу $\mathbf{A}$, набуває виду [23]

$$\nabla^2 \mathbf{A} = 0.\tag{3.7}$$

Рівняння (3.7) 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.

3.2.2 Розробка розрахункових моделей для попереднього чисельно-польового аналізу синтезованих структур

На рис. 3.1 представлені розрахункові моделі досліджуваних робочих зон, що відповідають поставленій задачі першого етапу досліджень. Нагадаємо, що синтезовані структури (S_1 , S_3 , S_4 , S_5) отримані з використанням наступних операцій симетрії [107]: 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: α – кут при вершині виступу полюса; δ – міжполюсний робочий проміжок, що відповідає мінімальній відстані між пластинами; a – робоча ширина матриці; b – основа виступу полюса.

При проведенні досліджень розподілу магнітного поля в повітряних зазорах матриць поліградієнтних сепараторів використані геометричні співвідношення між елементами магнітної системи [120]. Для досліджуваних областей задавалися наступні співвідношення: $X_1=b/a$ та $X_2=\alpha$ [109]. У цьому випадку результати моделювання мають вигляд залежностей досліджуваних характеристик від відносних величин, що характеризують геометрію полюсів магнітної системи.

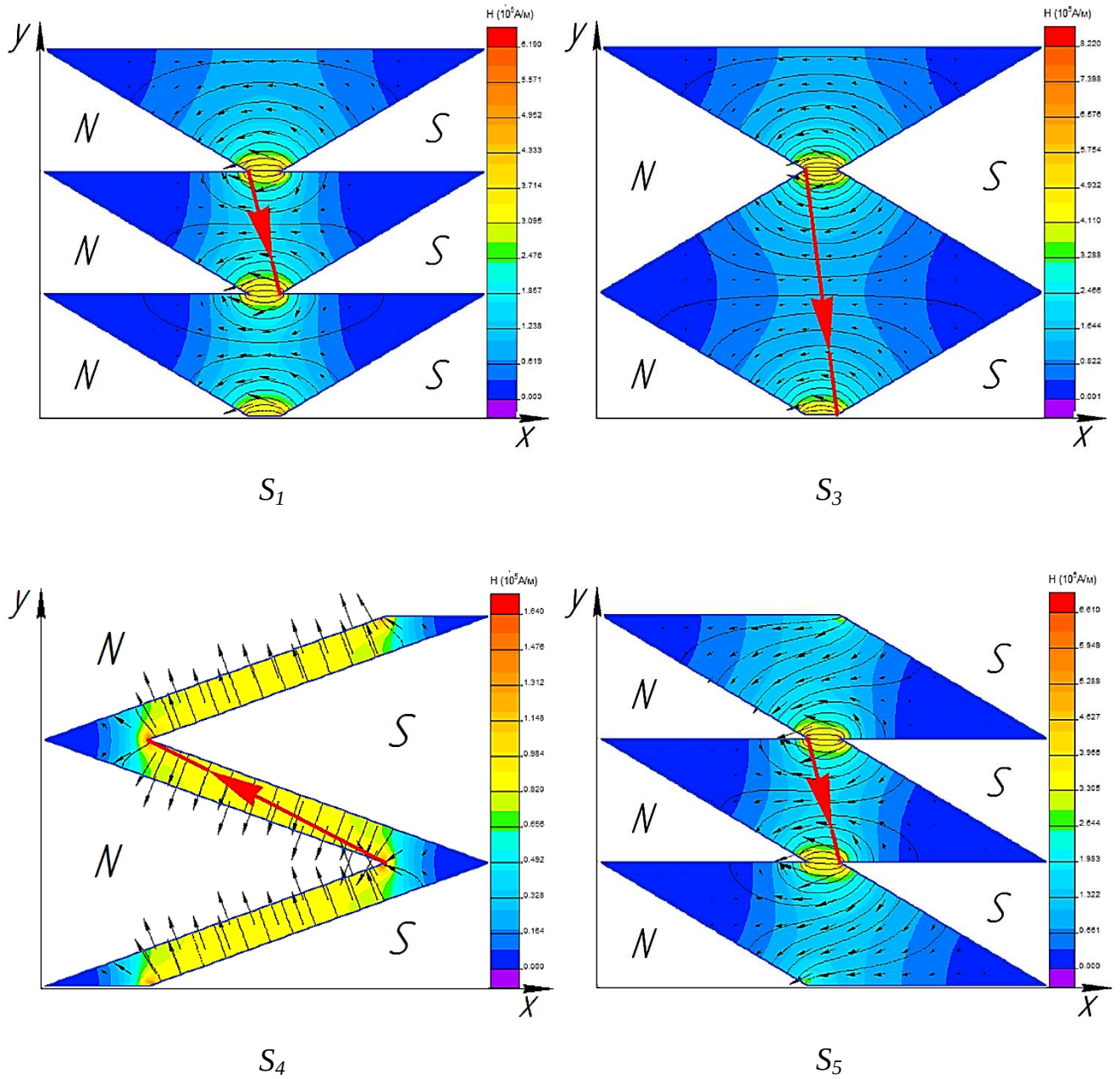


Рисунок 3.1 – Розрахункові моделі робочих зон досліджуваних структур

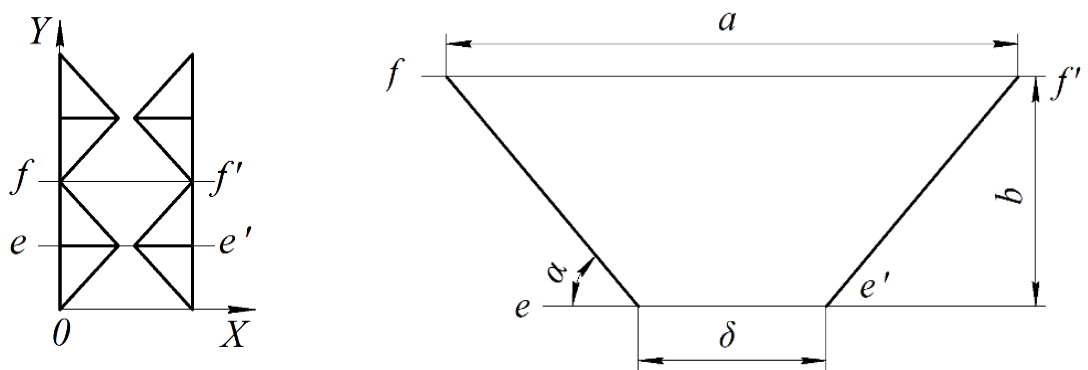


Рисунок 3.2 – Основні геометричні розміри робочої зони на прикладі структури S_3

Діапазони варіювання відношень X_1 та X_2 , які мають практичний інтерес, на першому етапі досліджень склали: $X_1=b/a=0,2\dots0,4$; $X_2=\alpha=0,22\pi\dots0,44\pi$. 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) [109]. 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 були розроблені з урахуванням наступних обмежень та припущень [23, 109]:

1. Магнітне поле є плоскопаралельним в межах робочих міжполюсних зон.
2. Для всіх точок робочої зони вплив тривимірності магнітного поля однаковий. Він залежить тільки від відстані між пластинами в матриці та товщини пластин.
3. В розрахункових моделях робочих міжполюсних зон враховуються три характерні періодично повторювані області.
4. Вплив на розподіл поля геометричних розмірів осердь і котушок намагнічування невеликий, тому їм можна знехтувати.
5. Сталь полюсів має нескінченно велику магнітну проникність (ідеальне залізо).

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 [126]. Експериментальні дослідження базової конструкції сепаратора показали, що максимальне значення магнітної індукції B в сталі полюсів в робочому режимі при струмі в

обмотках $I=3,2\text{A}$ не перевищує $0,95\text{ Тл}$ [109]. При такому значенні магнітної індукції матеріал полюсів є ненасиченим, а магнітна проникність сталі приймає постійне та достатньо велике значення $\mu=995$ [127].

Відносна магнітна проникність повітря, яка задавалася при описі фізичних властивостей задачі $\mu_r=1$.

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: $A=\text{const}$ та $A=0\text{ Вб/м}$ [23]. Аналогічний підхід до задання джерел поля використовується, наприклад, для розрахунків магнітних полів розсіювання намагнічених деталей в магнітній дефектоскопії [128] та утримуючих магнітних полів магніторідинних герметизаторів [129].

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).

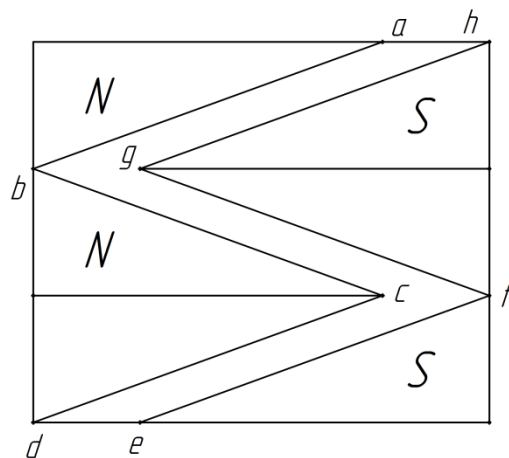


Рисунок 3.3 – Розрахункова модель робочої зони для структури S_4

Розрахункова область для структури S_4 (рис. 3.3) обмежена контуром $abcdefgh$, для якого задавалися наступні граничні умови [23]:

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

de – силова лінія, для якої задається гранична умова Діріхле, яка визначає поведінку нормальної складової індукції на межі. Значення векторного магнітного потенціалу є постійним $A_{de}=const$ на ділянці de . 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. Слід зазначити, що на даному етапі на ділянці de може задаватися довільне значення векторного магнітного потенціалу A_{de} , оскільки ступінь неоднорідності поля оцінюється за відносними значеннями напруженості поля.

ab, bc, cd, ef, fg, gh – границі, які відповідають ідеальним сталевим поверхням та для яких $H_t=0$ (однорідна умова Неймана). Ця гранична умова є природньою, тому що встановлюється за замовчуванням на всіх сторонах, які утворюють зовнішню межу та на яких 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 першого етапу 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.

3.3 Дослідження ступеня неоднорідності магнітного поля в синтезованих структурах

3.3.1 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 [130, 131],

$$k = |\text{grad}H| / H . \quad (3.8)$$

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 [132, 133]. Наприклад, в [133] 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

$$\Delta = \frac{\max_i |H_i - H_0|}{H_0} ; \quad (3.9)$$

– як відношення напруженості поля H_i в розглянутій i -ой точці до базисної напруженості H_0 (наприклад, до середньої напруженості в даній області) [134]

$$k = H_i / H_0 . \quad (3.10)$$

Інтегральна неоднорідність k_i визначається для діапазону значень напруженості магнітного поля за формулою [135]

$$k_i = (H_{\max} - H_{\min}) / (H_{\max} + H_{\min}), \quad (3.11)$$

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

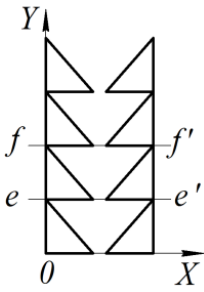
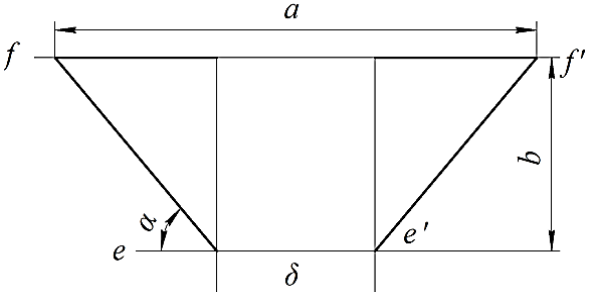
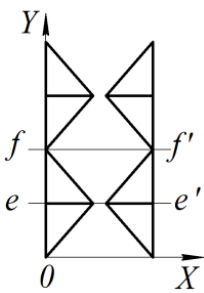
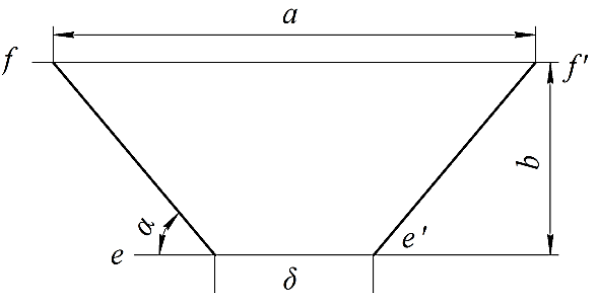
Слід зауважити, що проведення обчислювального експерименту передбачає візуалізацію магнітного поля у вигляді відповідного кольорового зображення розподілу силових ліній. Аналіз структурних (текстурних) властивостей таких зображень також може дати необхідну інформацію для оцінки неоднорідності поля в площині робочої поверхні. Таку неоднорідність можна оцінювати по градієнтам, спектрам Фур'є, дисперсії амплітуд [136]. Однак зазначені методи оцінки неоднорідності поля поки не мають прикладного характеру.

3.3.2 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» [1, 65, 137].

У табл. 3.1 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. 3.1) 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 3.1 – 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 (3.10). 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. 3.4), з однаковими координатами Y . Далі визначалася просторова конфігурація магнітного поля в робочих зазорах синтезованих структур. На рис. 3.5 показані результати моделювання (картини магнітного поля) [138].

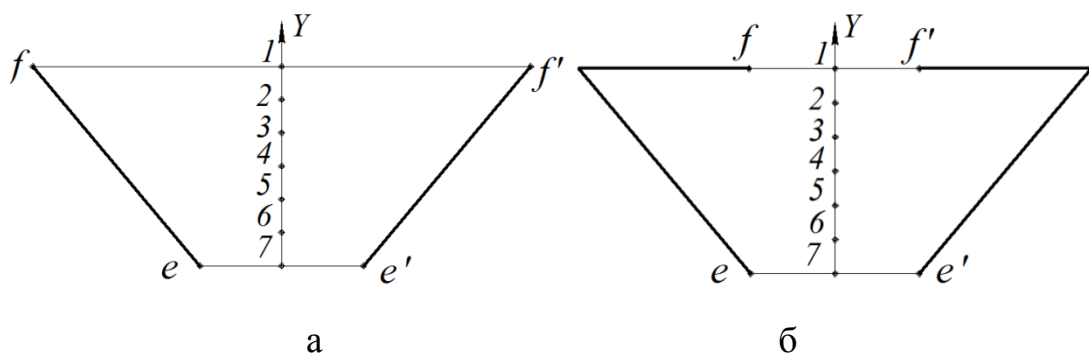


Рисунок 3.4 – Розташування характерних точок
для структури S_1 , (а) та структури S_3 (б)

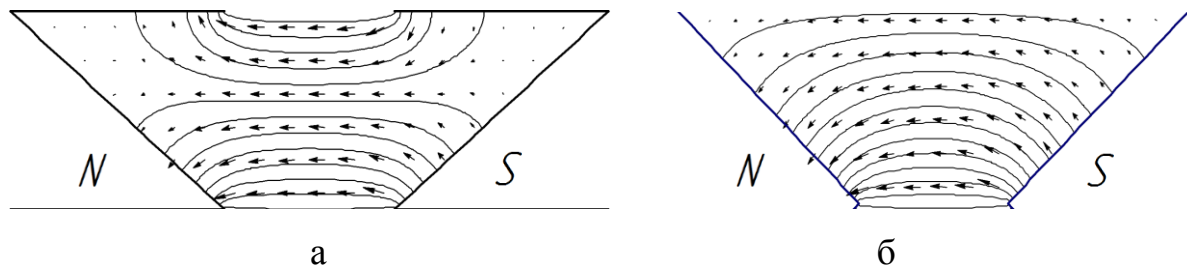


Рисунок 3.5 – Результати моделювання при $b/a=0,3$ та $\alpha=0,22\pi=40^\circ$:
для структури S_1 , (а) та структури S_3 (б)

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. 3.2 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 (3.11) 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. 3.3 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 3.2 – 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 3.3 – 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. 3.6 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. 3.6), 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 .

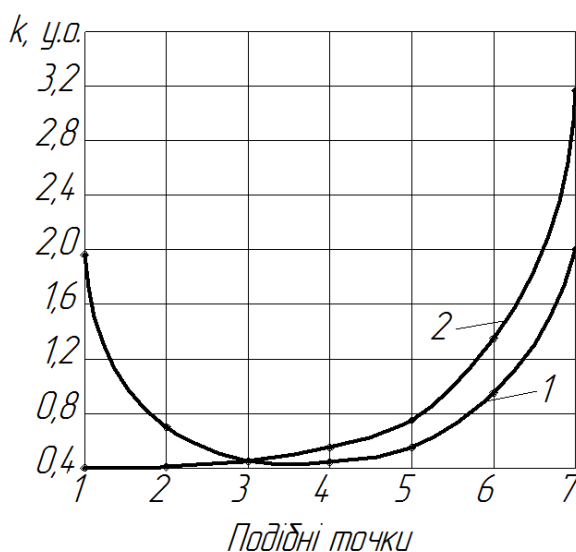


Рисунок 3.6 – Зміна локального коефіцієнта k неоднорідності поля в подібних точках для структур S_1 (крива 1) та S_3 (крива 2) при $X_1=b/a=0,4$, $X_2=40^\circ=0,22\pi$

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 $H_{grad}(H)$.

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.

3.3.3 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 [139]. 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. 3.4 представлені результати розрахунку інтегрального коефіцієнта k_i неоднорідності поля для різних конфігурацій поліградієнтних середовищ. Приймалися наступні геометричні співвідношення: $X_1=b/a=0,2; 0,3; 0,4$; $X_2=\alpha=0,22\pi; 0,28\pi; 0,33\pi; 0,39\pi; 0,44\pi$.

$$H_{відн} = H_i/H_{сер} \quad (3.12)$$

Таблиця 3.4 – Результати розрахунку напруженості магнітного поля у відносних одиницях уздовж характерних ліній

Код струк- тури	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 =α=0,22π									
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 =α=0,22π									
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 =α=0,22π									
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 =α=0,28π									
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 =α=0,28π									
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

Продовження таблиці 3.4

Код струк- тури	Напруженість магнітного поля, відн.од., в точках						δ, мм	k _b , %	V, %
	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0			
X ₁ =b/a =0,4, X ₂ =α=0,28π									
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 =α=0,33π									
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 =α=0,33π									
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 =α=0,33π									
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 =α=0,39π									
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 =α=0,39π									
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 =α=0,39π									
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 =α=0,44π									
S1	1,20	0,91	0,91	0,91	0,91	1,16	166,9	14	14

Продовження таблиці 3.4

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			
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, запропонованої в [140]: $k_i \leq 0,3$ – слабо неоднорідне (або слабо однорідне) 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. 3.4). У математичній статистиці вважається, що, коли значення коефіцієнта V досягає менше ніж 33%, то сукупність даних є однорідною, а коли більше ніж 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 $\bar{x}$ [34, 141]

$$V = \sigma / \bar{x}. \quad (3.13)$$

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. 3.4 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. 3.4 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 структурах (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 від співвідношень $X_1 = b/a$ і $X_2 = \alpha$ із зазначенням кодів структур.

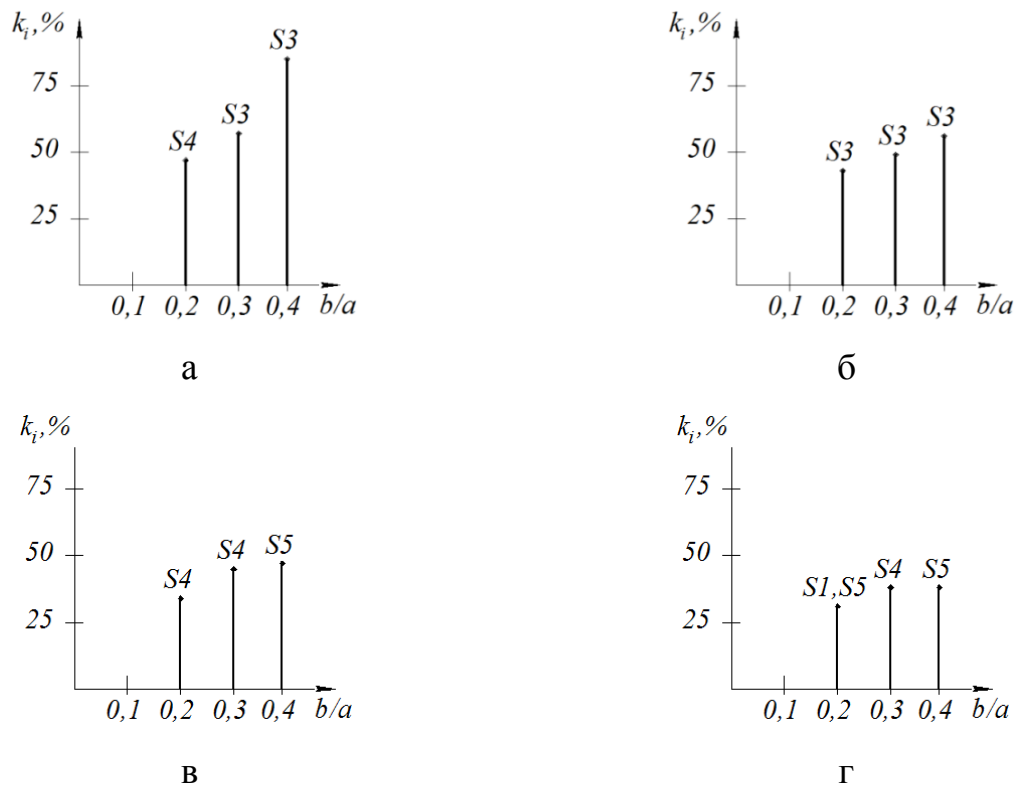


Рисунок 3.7 – Залежності максимальних значень коефіцієнта k_i від співвідношення $X_1=b/a$ при: $X_2=\alpha=0,22\pi$ (а); $X_2=\alpha=0,28\pi$ (б); $X_2=\alpha=0,33\pi$ (в); $X_2=\alpha=0,39\pi$ (г)

Отже, найбільш високі значення коефіцієнту k_i мають структури S_3 та S_4 .

В структурах, що відрізняються високою неоднорідністю поля (рис. 3.7), середня напруженість H поля може бути відносно невисокою. При цьому слід враховувати, що ступінь вилучення ферромагнітних часток суттєво залежить від форми пластинчастих елементів. Так, гострокінцевий полюс має більш високу напруженість поля, ніж тупокінцевий, однак обсяг робочого простору, що охоплюється полем, буде менше [142]. 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 $H_{\text{grad}}(\mathbf{H})$ у всій площині робочої зони.

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

На другому етапі для визначення раціональних варіантів поліградієнтних матриць здійснено оцінку всього спектру силового поля $H_{\text{grad}}(\mathbf{H})$ (в абсолютних одиницях) в площині робочих зон досліджуваних структур у двовимірній постановці.

Для вирішення задачі з оцінки всього спектру силового магнітного поля була розроблена програма із застосуванням мови програмування Java 7 та фреймворку Spring, що на вході опрацьовує результати розрахунку напруженості $\mathbf{H}$ магнітного поля, отримані в програмі Elcut у вигляді Excel файлів. Результатом виконання цієї програми є новий Excel файл з даними розрахунку силової характеристики магнітного поля $H_{\text{grad}}(\mathbf{H})$. Основні етапи обчислювального експерименту наведені на рис. 3.8 [34].

При оцінці спектру силового поля $H_{\text{grad}}(\mathbf{H})$ в розрахунковій області робочої зони (рис. 3.3) має бути задане певне числове значення векторного магнітного потенціалу A_{de} на ділянці de , обумовлене геометричною конфігурацією робочої зони. В роботі для вирішення цього завдання пропонується проведення чисельно-польового 3D-аналізу із застосуванням програмного пакету Infolytika та з врахуванням наступного обмеження. Було вирішено обмежитись розглядом структурних варіантів матриці, які належать до того ж самого структурного коду S_4 , що і базова структура сепаратора, тому що чисельно-польовий аналіз просторового розподілу магнітного поля потребує значних обчислювальних та часових ресурсів.

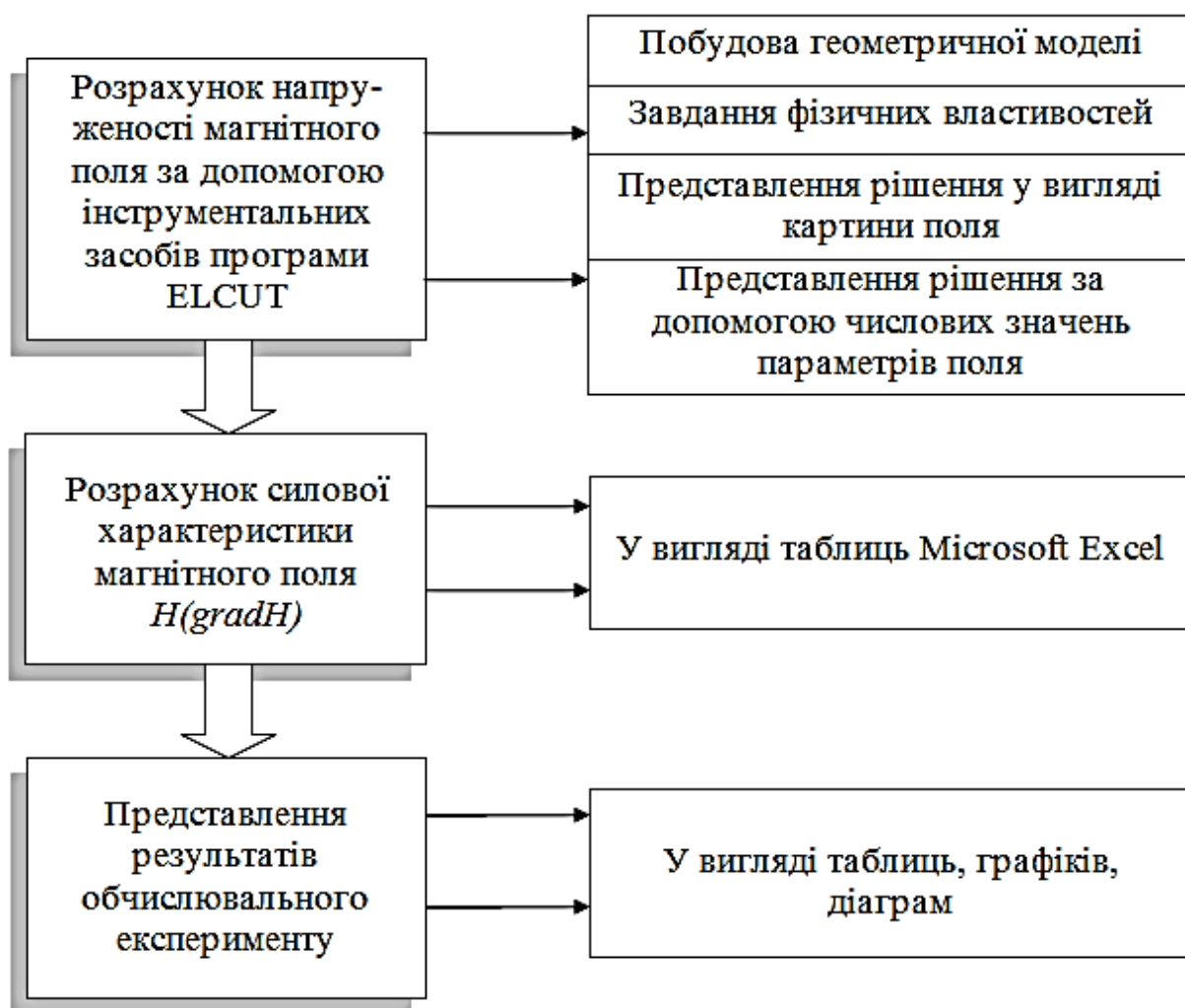


Рисунок 3.8 – Основні етапи обчислювального експерименту

Характеристики базового варіанту сепаратора (рис.2.15, в): код структури S_4 ; геометричні критерії подібності $X_1=b/a=0,28$, $X_2=\alpha=0,11\pi$. Базовий варіант магнітного сепаратора був розроблений емпіричним шляхом і реалізований у вигляді фізичної моделі. Дослідження відображені в [109]. Перевірка на оптимальність для базового варіанту сепаратора не проводилась.

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

Для проведення порівняльного аналізу синтезованих структур, як зазначено вище, необхідно визначитись з числовими значеннями векторного магнітного потенціалу A_{de} на границі de (рис. 3.3) двовимірних областей синтезованих структур з врахуванням результатів дослідження просторового

розподілу магнітного поля в матриці електромагнітного сепаратора, наведених у Розділі 4.

Для визначення векторного магнітного потенціалу A_{de} шляхом випадкової вибірки 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 (рис. 4.10) $\Phi=1,261 \cdot 10^{-5}$ Вб, $A_{de}=6,3 \cdot 10^{-3}$ Вб/м.

Варіант 2: $X_1=b/a=0,40$, $X_2=\alpha=0,18\pi$, розрахункове значення магнітного потоку Φ через площадку S (рис. 4.15) $\Phi=5,581 \cdot 10^{-5}$ Вб, $A_{de}=27,9 \cdot 10^{-3}$ 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 (рис.4.18) $\Phi=6,40 \cdot 10^{-5}$ Вб, $A_{de}=0,032 \cdot 10^{-3}$ Вб/м.

За результатами 3D-аналізу встановлено, що значення векторного магнітного потенціалу A_{de} залежить від наповненості робочого проміжку матриці металевими елементами. Отже, 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,

$$k_m = \frac{b}{a} \operatorname{ctg} \alpha. \quad (3.14)$$

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

Таблиця 3.5 – Коефіцієнт заповнення k_m

b/a α	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. 3.9), 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 до діапазону $0,3532 \leq k_m \leq 0,769$.

Для обчислення значень A_{de} в проміжних точках розглянутого інтервалу $0,3532 \leq k_m \leq 0,769$ була побудована апроксимуюча функція (регресія), яка наближено описує даний процес на основі методу найменших квадратів. 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. 3.10). При підборі лінії тренда Excel автоматично розраховує значення коефіцієнту детермінації R^2 , який характеризує достовірність апроксимації та має знаходитися в межах $R^2=0,85 \dots 1,0$ [143].

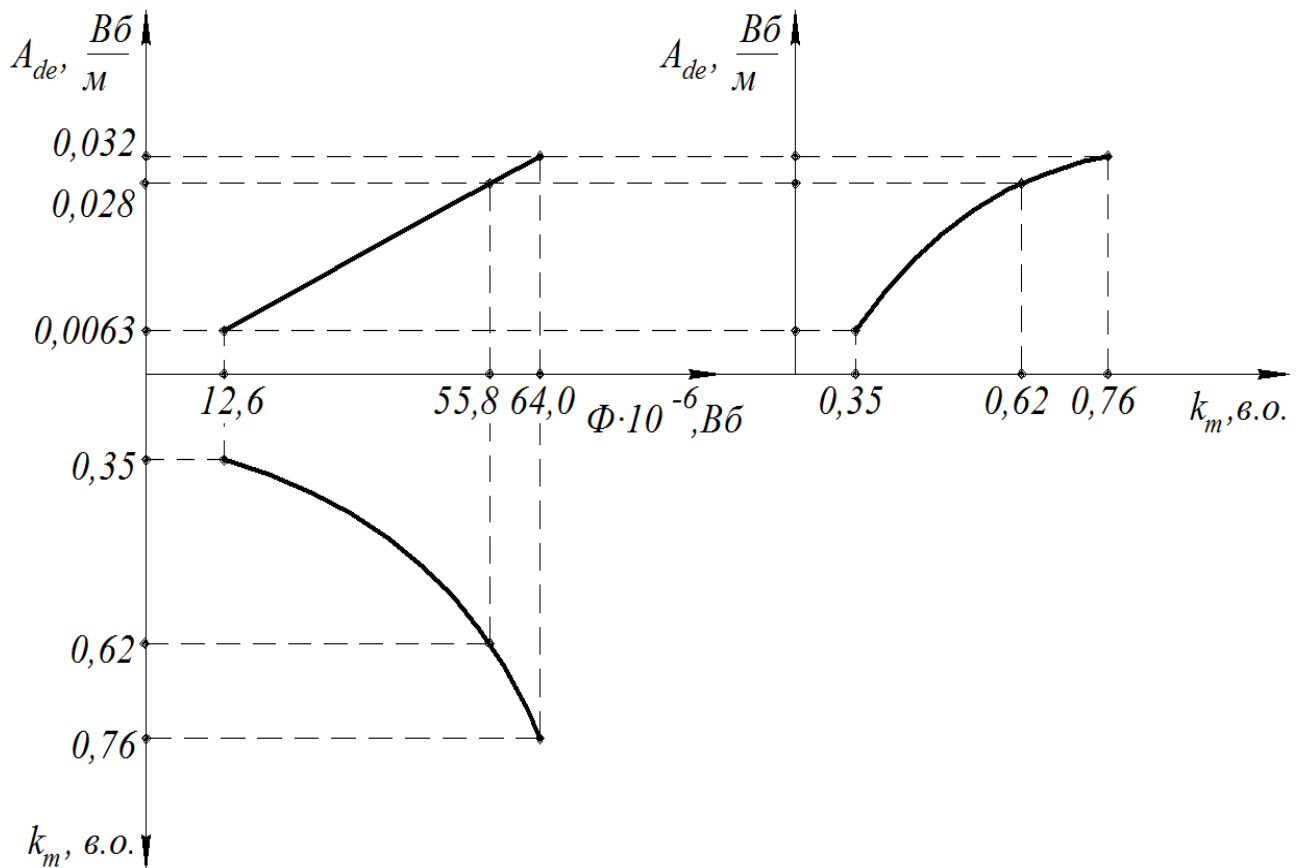


Рис. 3.9 – Залежність векторного магнітного потенціалу A_{de} від коефіцієнту заповнення k_m

Рівняння побудованої регресії, за яким обчислювалися значення векторного магнітного потенціалу A_{de} в проміжних точках розглянутого інтервалу, має вигляд поліноміальної залежності (коефіцієнт детермінації $R^2=0,95$)

$$A_{de} = -0,1349k_m^2 + 0,2132k_m - 0,0522. \quad (3.15)$$

За результатами поліноміальної апроксимації (3.15) був визначений векторний магнітний потенціал A_{de} для різних комбінацій X_1 та X_2 (табл. 3.6). Для наочності результати розрахунку A_{de} наведені також у вигляді об'ємного графіку (рис. 3.11), який побудовано з використанням інструментальних засобів програмного пакету MatLab.

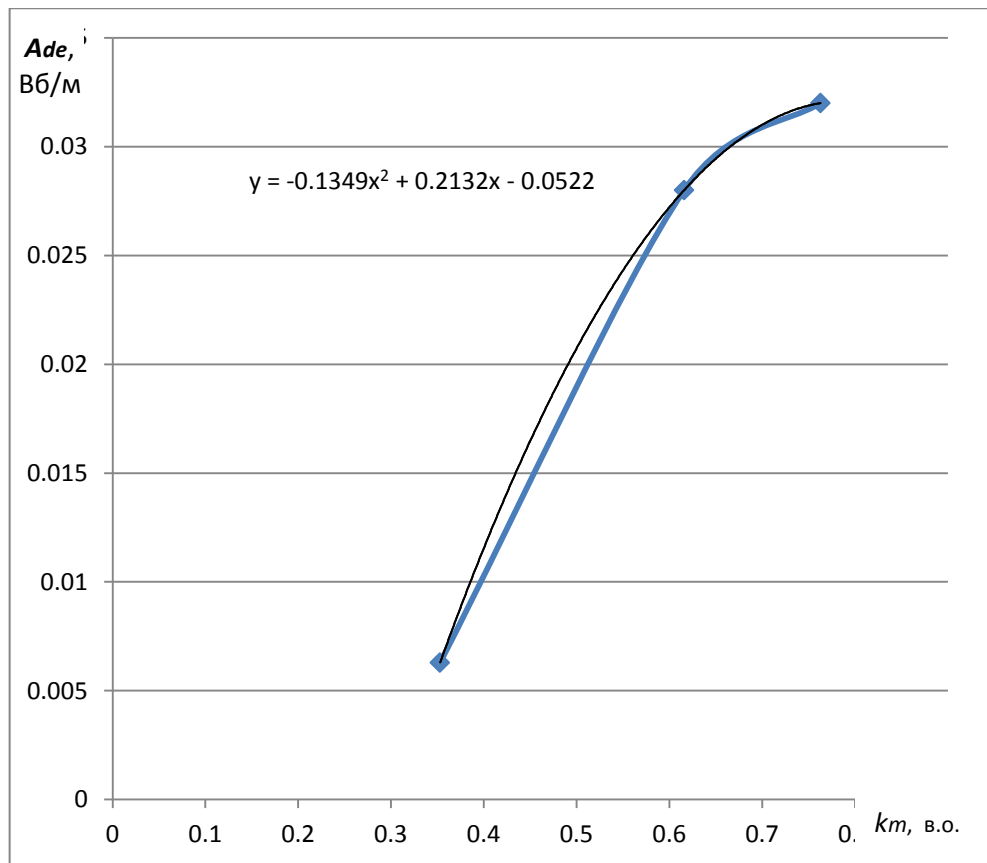


Рис. 3.10 – Поліноміальна апроксимація залежності векторного магнітного потенціалу A_{de} від коефіцієнту заповнення k_m

Таблиця 3.6 – Векторний магнітний потенціал A_{de} (поліноміальна апроксимація)

b/a α	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

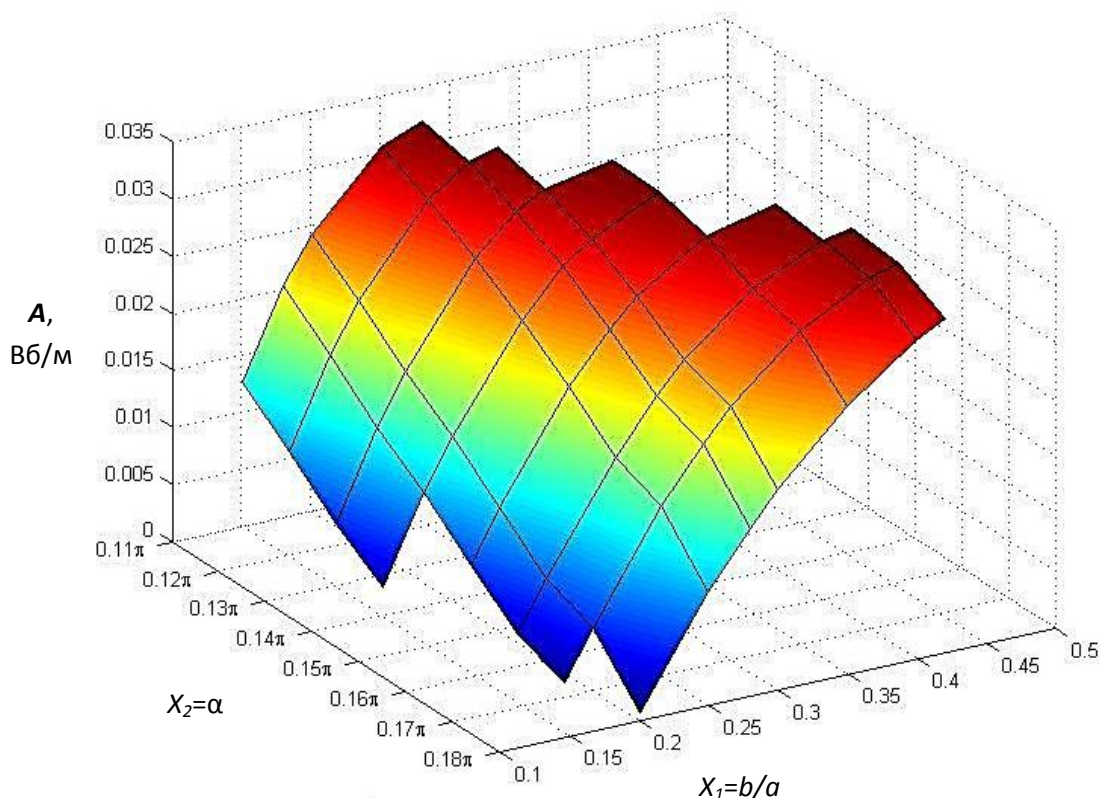


Рисунок 3.11 – Розподіл векторного магнітного потенціалу A_{de}

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 завдання граничних умов в обчислювальному експерименті при виборі раціональної структури матриці електромагнітного сепаратора.

3.4.2 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 $f_{\min} = (\mathbf{H} \text{grad}(\mathbf{H}))_{\min}$, при якій забезпечується, виходячи з досвіду проектування сепараторів, досить висока ефективність вилучення феромагнітних включень (при розрахунках за рекомендаціями [144] 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 $f_{\max}=(H\text{grad}(H))_{\max}=8,6\cdot 10^9 \text{ A}^2/\text{м}^3$. Ця частина площі робочої зони P_b була виражена у відсотках по відношенню до величини P всієї площі робочої області: $\gamma = P_b / P$. При цьому параметр γ значно залежить від геометричних співвідношень X_1 і X_2 та може бути визначений, по аналогії з [145], як ефективна площа робочої зони матриці [34, 146]. Для базового варіанту сепаратора параметр γ склав $\gamma=5,3\%$.

При розрахунках також додатково визначався параметр γ_1 , що характеризує ту частину площі робочої області, де виконується умова $f_{np}>f_{\max}=8,6\cdot 10^9 \text{ A}^2/\text{м}^3$. Деякі результати розрахунків, отримані під час обчислювального експерименту, наведені у табл. 3.7 – 3.14 та рис. 3.12 [34].

Таблиця 3.7 – Результати варіантних розрахунків параметра γ при $X_2=\alpha=0,11\pi$ (20°)

$X_1=b/a$	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	0,0127	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 3.8 – 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 3.9 – 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 3.10 – 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 3.11 – 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 3.12 – 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 3.13 – 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 3.14 – 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

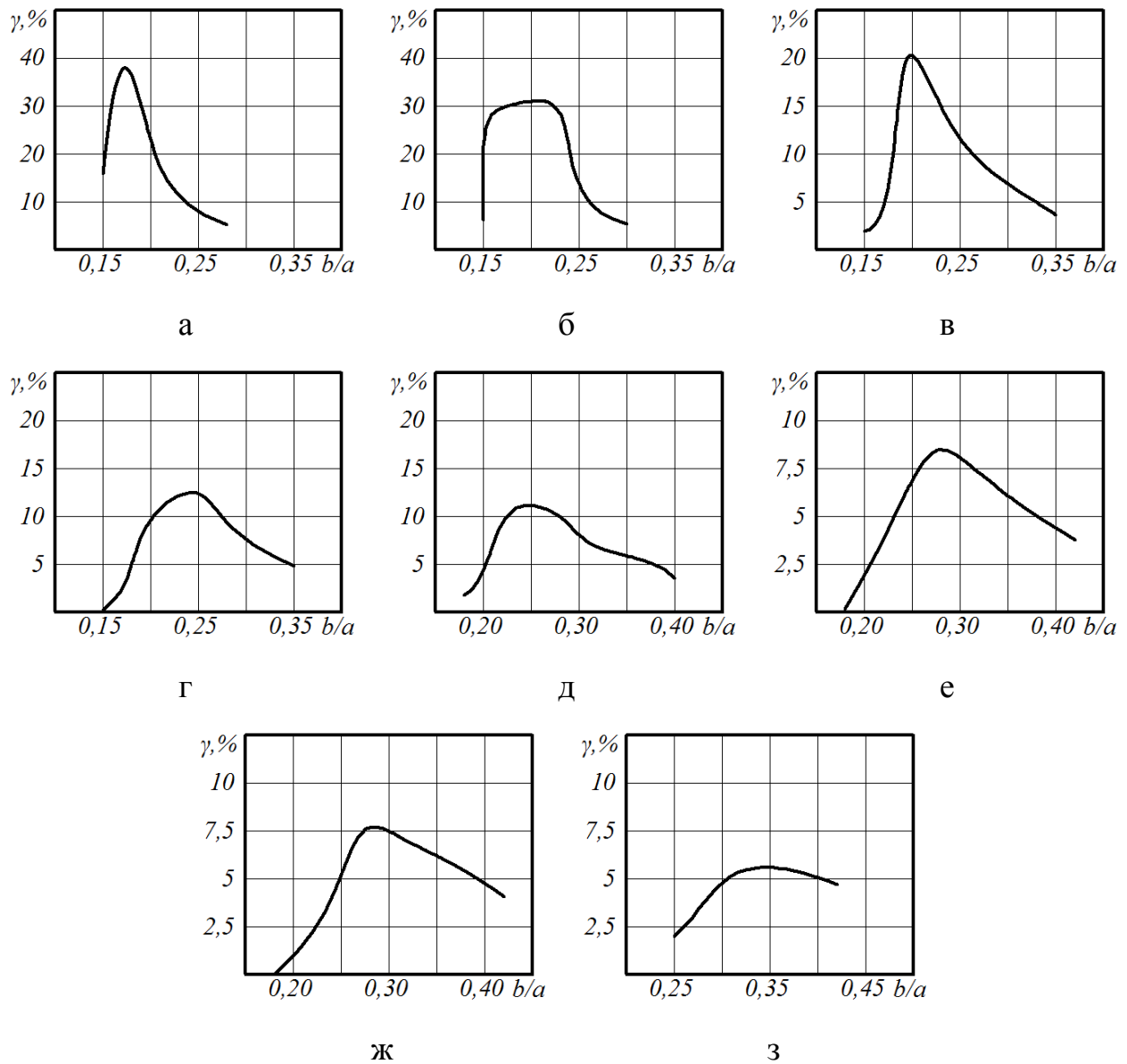


Рис.3.12 – Результати варіантних розрахунків параметра γ :

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 – $X_2 = \alpha = 0,18\pi$

Рациональними будуть вважатися варіанти досліджуваних систем, які задовольняють умові

$$\gamma(X_1, X_2) \rightarrow \max. \quad (3.16)$$

Результати розрахунків, отримані під час обчислювального експерименту, показали, що умові (3.16) 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: $X_1 = b/a = 0,18$ і $X_2 = \alpha = 0,11\pi$.

Достовірність отриманих під час обчислювального експерименту результатів була підтвердження порівнянням з результатами, одержаними іншими дослідниками [65, 147-149]:

1. В роботі [147] визначено, що градієнт та інтенсивність магнітного поля навколо кута трикутного елемента поліградієнтної матриці зростають, коли бісектриса гострого кута паралельна напрямку поля. Отримані в дисертаційній 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 [130] 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.

За оціночними розрахунками продуктивність електромагнітного сепаратора з раціональною структурою пластинчастої матриці збільшиться на 3-5% при незмінній ефективності вилучення феромагнітних включень у порівнянні з базовим варіантом пристрою.

3.5 Висновки по розділу 3

1. Для проведення теоретичних досліджень з метою визначення раціональних структурних варіантів матриці електромагнітного сепаратора обрані чотири структурні композиції (S_1 , S_3 , S_4 , S_5) пластинчастого поліградієнтного середовища, отримані шляхом генетичного моделювання та послідовного застосування операцій дзеркальної, переносної, центральної та ковзної симетрії (з періодом трансляції T). 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. Загальна кількість досліджуваних варіантів структур матриці склала 60.

2. Враховуючи, що для вилучення дрібних феромагнітних часток необхідно забезпечувати високі значення градієнту $\text{grad}(\mathbf{H})$, то попередній аналіз магнітного поля в поліградієнтних середовищах здійснений шляхом порівняння ступеня неоднорідності поля уздовж характерних ліній робочих зон синтезованих структур. Це дозволило відсікти структури зі слабо неоднорідним магнітним полем в робочій області, для яких $\text{grad}(\mathbf{H}) \rightarrow 0$, та зменшити кількість досліджуваних варіантів з 60 до 45.

3. Запропонований підхід до вибору раціонального варіанту поліградієнтної матриці електромагнітного сепаратора, який забезпечує розв'язання задачі за критерієм γ ефективної площі робочої зони.

4. Обґрунтовано раціональний варіант структури поліградієнтного середовища, який відповідає структурі S_4 . Аналіз, проведений з використанням методу простого перебору варіантів, показав, що структура S_4 з параметрами $X_1=b/a=0,18$ і $X_2=\alpha=0,11\pi$ з точки зору найвищого значення ефективної площі γ робочої зони ($\gamma=36,5\%$) може вважатися раціональною.

5. Прийнятий раціональний варіант структури S_4 поліградієнтного середовища з параметрами $X_1=b/a=0,18$ та $X_2=\alpha=0,11\pi$ 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 $\mathbf{H}_{\max}$ та максимальний градієнт напруженості $\text{grad}(\mathbf{H})_{\max}$ магнітного поля раціональної структури перевищують майже у 3 рази відповідні показники базової структури;

- для раціональної структури розрахована величина ефективної площі робочої зони γ майже у 7 разів більше, ніж у базової.

РОЗДІЛ 4

РОЗРАХУНКОВО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА НАПРЯМКИ УДОСКОНАЛЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО СЕПАРАТОРА

4.1 Дослідження просторового розподілу магнітного поля в матриці електромагнітного сепаратора

Вибору раціональної конфігурації матриці електромагнітного сепаратора передувало вирішення завдання по визначенню значень векторного магнітного потенціалу на границі *de* розрахункових областей (рис.3.3) синтезованих структур. Для цього були проведені дослідження просторового розподілу магнітного поля в електромагнітній системі сепаратора з застосуванням комп'ютерного 3D-моделювання, які відображені у даному розділі. Можливість встановлення особливостей розподілу поля в будь якому елементі конструкції електромагнітного сепаратора є безсумнівною перевагою тривимірного моделювання.

Визначення розподілу векторного магнітного потенціалу на ділянці *de* (рис.3.3) здійснювалось у відповідності до наступних вихідних положень.

Як зазначено вище, векторний магнітний потенціал A для плоскопаралельного поля має тільки одну складову, перпендикулярну площині поля. Так, якщо силові лінії досліджуваного магнітного поля розташовані у площині xOy (рис. 4.1), то векторний магнітний потенціал має одну складову A_z : $\overline{A_z} = \overline{1_z} A_z$. В цьому випадку силові лінії поля (лінії *de* та *ah* на рис. 4.1) є «еквіпотенціалами» векторного магнітного потенціалу, тобто вздовж цих силових ліній потенціал має постійне значення $A_z = \text{const}$. При цьому, якщо для векторного магнітного потенціалу A_{z1} прийняти нульове значення $A_{z1} = A_{ah} = 0$, то векторний магнітний потенціал $A_{z2} = A_{de}$ має бути визначеним.

Як відомо [150], різниця значень векторного магнітного потенціалу $|\overline{A_{de}} - \overline{A_{ah}}| = |\overline{A_{de}}|$ дорівнює середньому потоку вектору магнітної індукції (магнітному потоку) Φ у робочому повітряному проміжку, який припадає на

одиницю товщини t полюсу у напрямку осі Oz ($t=6$ мм, рис. 4.1), тобто визначається співвідношенням $|A_{de}| = \Phi/t$. Тому для визначення величини потенціалу A_{de} необхідно розрахувати магнітний потік Φ .

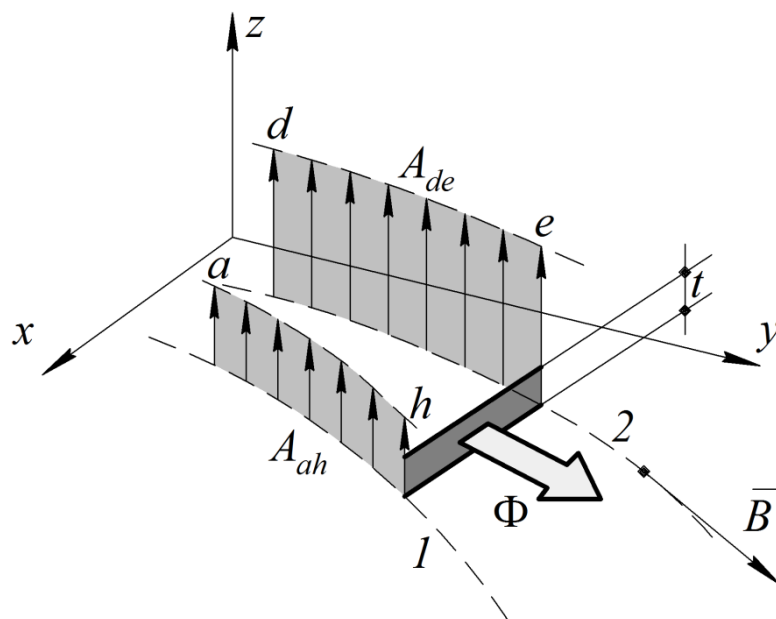


Рисунок 4.1 – Векторний магнітний потенціал
плоскопаралельного магнітного поля

Визначення магнітного потоку Φ у робочих повітряних проміжках проводилося шляхом комп'ютерного 3D-моделювання з використанням модулю Magnet програмного комплексу Infolytica [68]. Побудова геометрії 3D-моделі з метою її імпортування в модуль Magnet здійснена в програмі КОМПАС.

Слід зазначити, що розрахунок просторового розподілу поля в складних тривимірних моделях електромагнітного сепаратора вимагає значних обчислювальних ресурсів та часу розрахунку моделей. Побудувати та дослідити близько 60 моделей, навіть тільки для однієї структури S_4 , виявилось достатньо трудомістким та довготривалим процесом. Тому було вирішено обмежитися побудовою та дослідженням тільки трьох тривимірних моделей електромагнітної системи сепаратора для структури S_4 , обраних шляхом випадкової вибірки. Визначення значень векторного магнітного потенціалу для

всіх інших моделей, розташованих всередині вибірки, було здійснено шляхом інтерполяції.

На першому етапі досліджень для обґрунтування можливості застосування програмного комплексу Infolytica було вирішено тестове завдання та здійснена верифікація комп'ютерної 3D-моделі електромагнітного сепаратора.

4.1.1 Верифікація комп'ютерної 3D-моделі електромагнітного сепаратора

Об'єктом дослідження була обрана базова конструкція електромагнітного сепаратора (рис. 4.2, Додаток А) з параметрами: відстань між сусідніми виступами пластин $b=100$ мм, кут при вершині виступу полюсу $2\alpha=40^\circ$, робочий міжполюсний проміжок $\delta=13,6$ мм, робоча ширина матриці $a=180$ мм, товщина пластин-полюсів $t=6$ мм.

При моделюванні були також прийняті наступні вихідні дані: сила струму в обмотках – 3,2 А; матеріал магнітопроводу – сталь марки Ст.3; матеріал стінок матриці, які паралельні полюсам магнітопроводу (прозорі стінки матриці на рис.4.2, а) - Ст.3, двох інших стінок (непрозорі стінки матриці на рис.4.2, а) – алюміній; матеріал пластин матриці (рис.4.2, б) – Ст.3.

Слід зазначити, що для базової конструкції електромагнітного сепаратора були проведені експериментальні дослідження з використанням фізичної моделі (рис. 4.3), виготовленої у Східноукраїнському національному університеті імені Володимира Даля [109]. Результати досліджень магнітної індукції, отримані під час 3D-моделювання електромагнітного сепаратора, порівнювалися з даними, отриманими експериментальним шляхом, для характерних точок, зображених на рис. 4.4 [109]. До умовної лінії Line 1 (рис.4.5, а) належать точки 1-7; до лінії Line 2 (рис.4.5, б) – точки 1-6, відповідно.

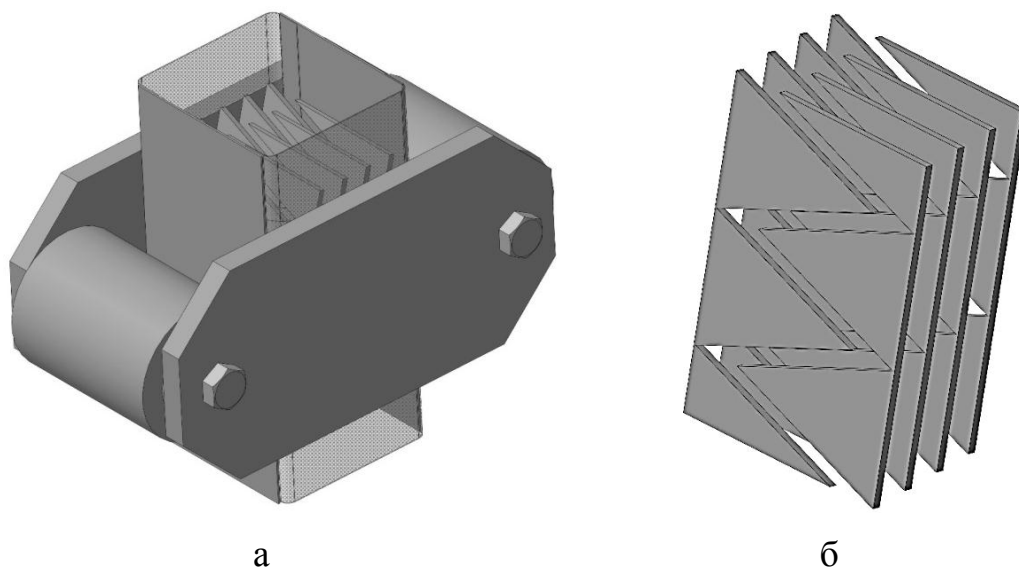


Рисунок 4.2 – Геометрична модель базової конструкції електромагнітного сепаратора: а – загальний вигляд; б – пластини матриці

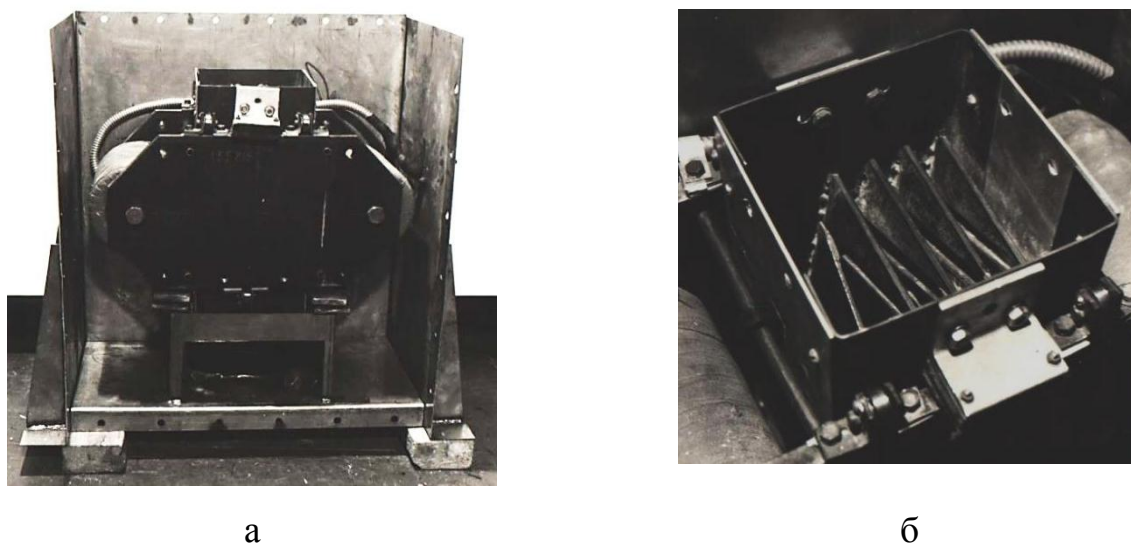


Рисунок 4.3 – Фізична модель електромагнітного сепаратора:
а – вид збоку; б – вид зверху

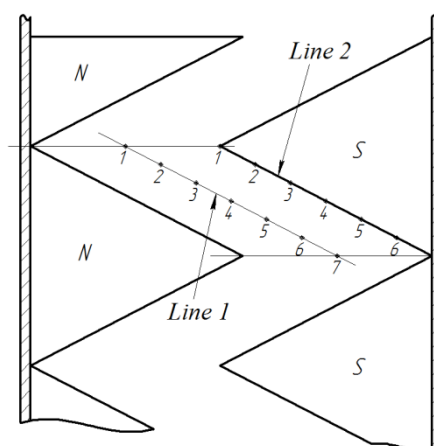


Рисунок 4.4 – Характерні точки в робочій зоні сепаратора

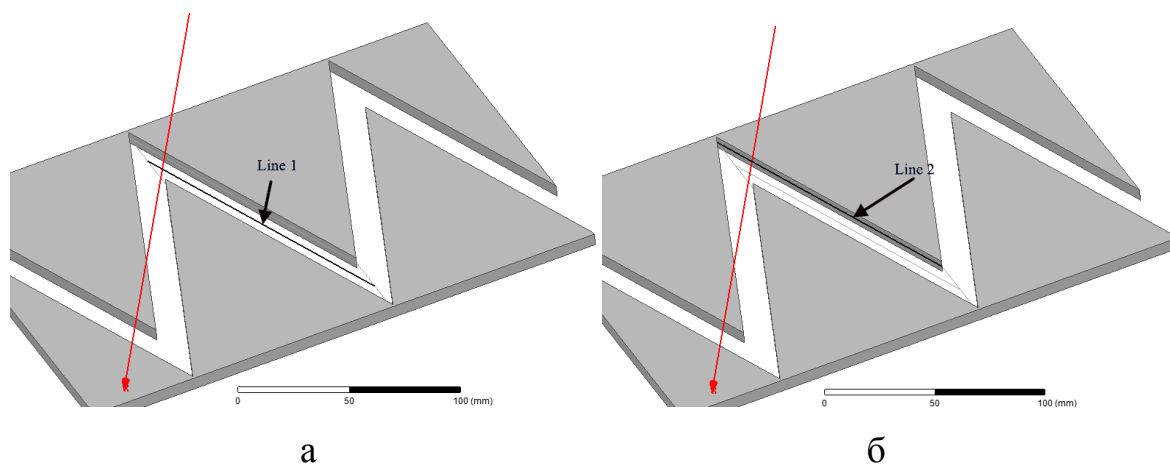
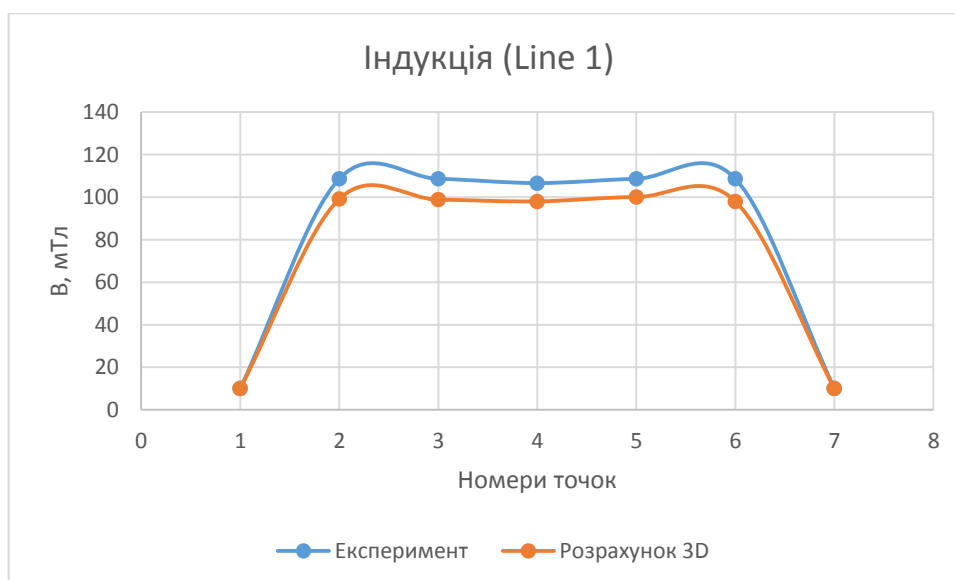


Рисунок 4.5 – Просторове розташування характерних ліній:
а – Line 1; б – Line 2

На рис.4.6 показано порівняння розподілу магнітної індукції вздовж ліній Line 1 и Line 2, отриманого під час фізичного експерименту (Додаток Б) та в результаті розрахунку з використанням 3D-моделі. За результатами порівняльного аналізу, встановлено, що відносна похибка розрахунку магнітного поля в робочій зоні базової конструкції електромагнітного сепаратора вздовж лінії Line 1 (рис.4.6, а) не перевищує 10%. Це свідчить про достатньо високу узгодженість отриманих чисельних результатів при 3D-моделюванні з результатами експериментальних досліджень магнітного поля базової конструкції сепаратора.

У той самий час розбіжності в значеннях магнітної індукції для точок, що належать до лінії Line 2 (рис.4.6, б), значно вище. Експериментальні дані магнітної індукції для Line 2 не можуть служити базою для порівняння, тому що магнітна індукція вимірювалась на певній відстані від поверхні феромагнітного полюсу, враховуючи кінцеві розміри вимірювального перетворювача (датчика Холу).

Таким чином, застосування програми Infolytica для комп'ютерного моделювання магнітного поля дозволяє отримати кількісні та якісні дані про розподіл магнітного поля, які можуть служити базою для подальших досліджень магнітного потоку в робочій міжполюсній зоні електромагнітного сепаратора.



а



б

Рисунок 4.6 – Розподіл магнітної індукції вздовж ліній: а – Line 1; б – Line 2

4.1.2 Визначення розподілу магнітного поля в 3D-моделях електромагнітного сепаратора

Для подальшого аналізу шляхом випадкової вибірки обрані три варіанти структури S_4 електромагнітного сепаратора з наступними параметрами:

– варіант 1: відстань між сусідніми виступами пластин $b=32,4$ мм ($X_1=b/a=0,18$), кут при вершині виступу полюсу $2\alpha=54^\circ$ ($X_2=\alpha=0,15\pi$), робочий міжполюсний проміжок $\delta=53$ мм;

– варіант 2: відстань між сусідніми виступами пластин $b=72$ мм ($X_1=b/a=0,4$), кут при вершині виступу полюсу $2\alpha=66^\circ$ ($X_2=\alpha=0,18\pi$), робочий міжполюсний проміжок $\delta=37$ мм;

– варіант 3: відстань між сусідніми виступами пластин $b=50$ мм ($X_1=b/a=0,28$), кут при вершині виступу полюсу $2\alpha=40^\circ$ ($X_2=\alpha=0,11\pi$), робочий міжполюсний проміжок $\delta=13,6$ мм. Ці параметри відповідають базовій конструкції електромагнітного сепаратора.

Слід зазначити, що для моделей з вибірки повітряний проміжок δ змінюється в достатньо широкому діапазоні: від $\delta=13,6$ мм (для базової моделі сепаратора, варіант 3) до $\delta=53$ мм (для варіанту 1).

Вихідні дані (сила струму в обмотках, матеріал елементів магнітопроводу) при моделюванні приймалися такими, як зазначено у підрозділі 4.1.1.

На рис. 4.7 наведено геометричну тривимірну модель для *варіанту 1* ($\delta=53$ мм) електромагнітного сепаратора, побудовану у програмі КОМПАС-3D. Картина магнітного поля показана на рис. 4.8.

Побудова графіка магнітної індукції була здійснена для внутрішньої пластини матриці (пластина 2 на рис. 4.9). Визначалися розрахункові значення магнітної індукції у повітряному проміжку всередині площадки S , показаної на рис. 4.10. Результати розрахунку магнітної індукції B для 20-ти точок, розташованих на повздовжній лінії симетрії площадки, представлені в табл. 4.1.

Розрахункове значення магнітного потоку Φ через площадку S (рис. 4.10) склало $0,0000126111$ Вб. Відповідно, розрахункове значення магнітного потоку Φ , що приходить на одиницю товщини полюса t , склало $\Phi/t=0,0000126111/0,006=0,00210185$ Вб/м.

Цей результат може бути використаний для визначення граничної умови A_{de} на ділянці de (рис. 3.3) розрахункової двовимірної області (2D-моделі), яка відповідає варіанту 1.

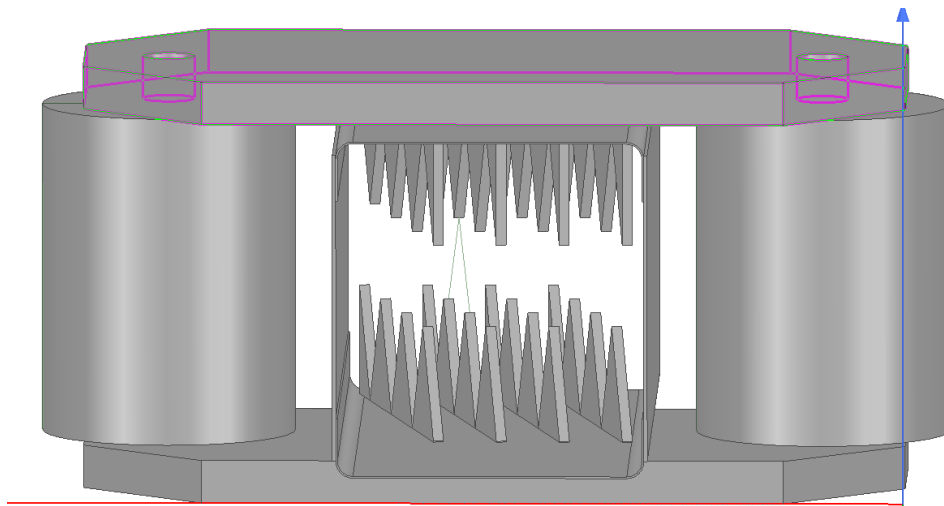


Рисунок 4.7 – Геометрична модель сепаратора (варіант 1)

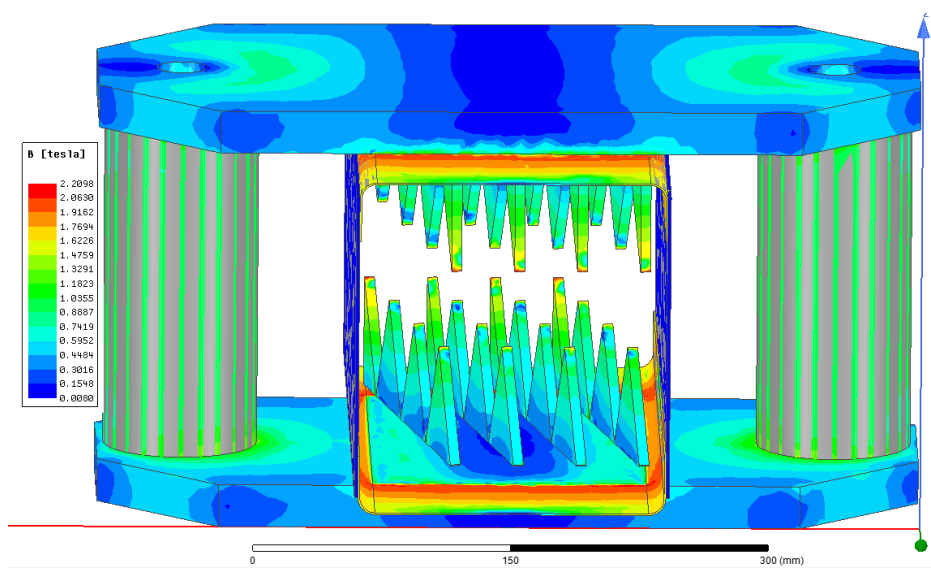


Рисунок 4.8 – Картина магнітного поля, отримана при 3D-моделюванні (варіант 1)

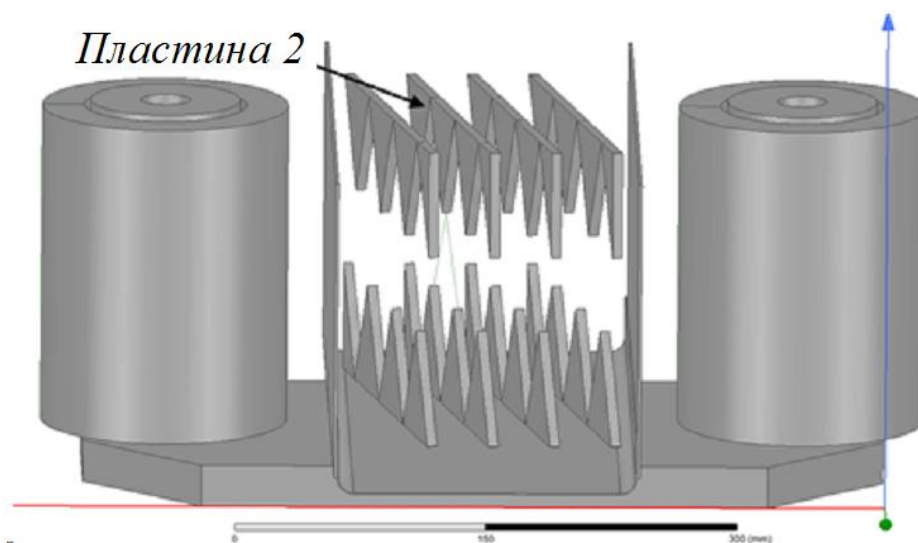


Рисунок 4.9 – Пластина матриці, обрана для розрахунку магнітної індукції

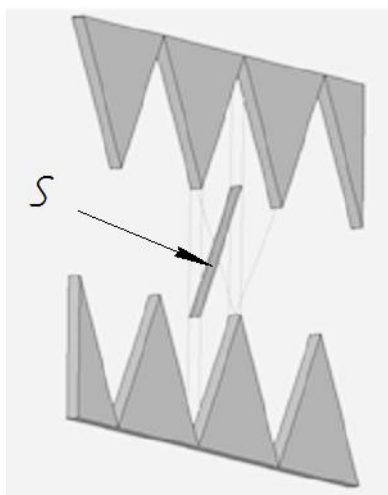


Рисунок 4.10 – Площадка у повітряному проміжку для визначення розрахункового значення магнітного потоку Φ (варіант 1)

Таблиця 4.1 – Розрахункові значення магнітної індукції для 3D-моделі (варіант 1)

№ точки	Відстань, мм	B , мТл	№ точки	Відстань, мм	B , мТл
1	0	46,41	11	37,56	64,19
2	3,76	49,94	12	41,32	64,08
3	7,51	53,32	13	45,07	63,26
4	11,27	55,56	14	48,83	61,88
5	15,02	58,22	15	52,59	60,18
6	18,78	60,99	16	56,34	58,02
7	22,54	62,18	17	60,10	55,65
8	26,29	63,15	18	63,85	53,21
9	30,05	63,98	19	67,61	49,72
10	33,81	64,10	20	71,37	46,46

Враховуючи, що у розрахунковій двовимірній області (рис. 3.3) розташовані три зубця та, відповідно, три ідентичних повітряних проміжки, то сумарне розрахункове значення магнітного потоку Φ , що приходить на одиницю товщини полюса t , та, відповідно, гранична умова A_{de} розраховувалась наступним чином: $A_{de}=3\Phi/t=3\cdot0,00210185=0,00630554$ Вб/м.

Далі було здійснено 2D-моделювання розрахункової моделі для варіанту 1 з прийнятою граничною умовою $A_{de}=0,00630554$ Вб/м (рис. 4.11). Результати розрахунку магнітної індукції для двовимірної моделі для 20-ти характерних точок показані в табл.4.2.

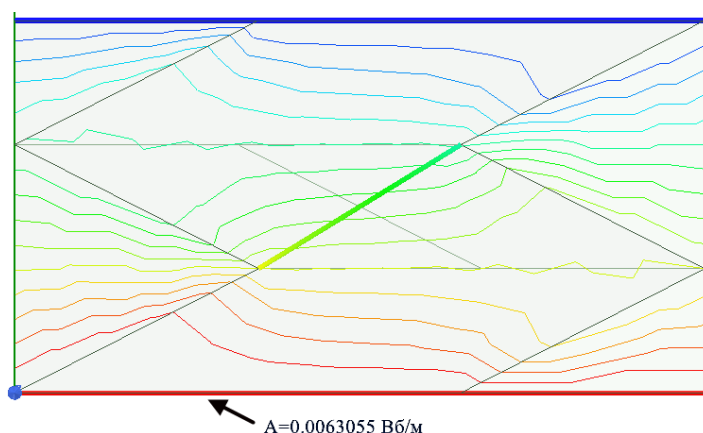


Рисунок 4.11 – Картина магнітного поля,
отримана при 2D-модельованні для варіанту 1

Порівняння результатів розрахунку магнітної індукції, отриманих, відповідно, при 2D- та 3D-модельованні для варіанту 1 та представлених на рис.4.12, свідчить про їх достатньо високу узгодженість. Відносна похибка розрахунку магнітного поля не перевищує 10,6 %.

Таблиця 4.2 – Розрахункові значення магнітної індукції для 2D-моделі (варіант 1)

№ точки	Відстань, мм	B , мТл	№ точки	Відстань, мм	B , мТл
1	0,00	41,98	11	37,56	64,95
2	3,76	46,99	12	41,32	64,84
3	7,51	52,01	13	45,07	64,40
4	11,27	54,95	14	48,83	63,62
5	15,02	57,84	15	52,59	61,19
6	18,78	60,74	16	56,34	58,43
7	22,54	63,12	17	60,10	55,46
8	26,29	63,94	18	63,85	52,31
9	30,05	64,50	19	67,61	47,40
10	33,81	64,79	20	71,37	42,19

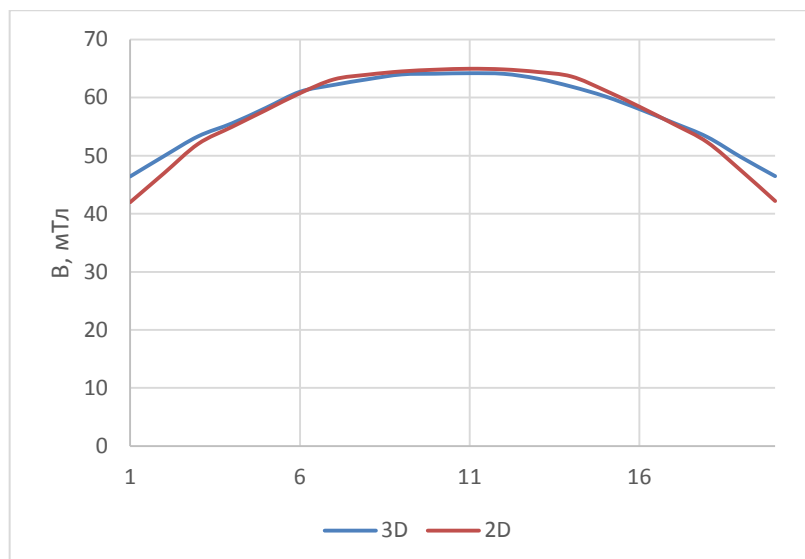


Рисунок 4.12 – Порівняння результатів розрахунку магнітної індукції при 2D- та 3D-моделюванні для варіанту 1

Таким чином, для двовимірної моделі структури S_4 , параметри якої $X_1=b/a=0,18$ і $X_2=\alpha=0,15\pi$ для границі de (рис. 3.3) може бути прийнята наступна гранична умова $A_{de}=0,00630554$ Вб/м.

На рис. 4.13 наведено геометричну тривимірну модель для *варіанту 2* ($\delta=37$ мм) електромагнітного сепаратора, побудовану у програмі КОМПАС-3D. Картина магнітного поля показана на рис. 4.14. Дослідження тривимірної моделі для варіанту 2 проводилося у тому ж порядку, що і для варіанту 1.

Побудова графіка магнітної індукції також була здійснена для внутрішньої пластини матриці (пластина 2 на рис.4.13). Визначалися розрахункові значення магнітної індукції у повітряному проміжку всередині площадки S , показаної на рис. 4.15. Результати розрахунку магнітної індукції B для 20-ти точок, розташованих на повздовжньої лінії симетрії площадки, представлені в табл. 4.3.

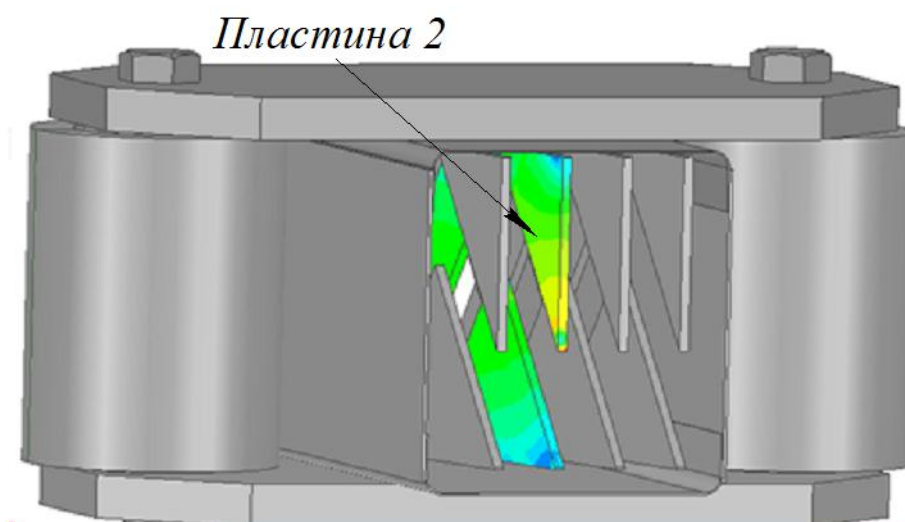


Рисунок 4.13 – Геометрична модель сепаратора (варіант 2)

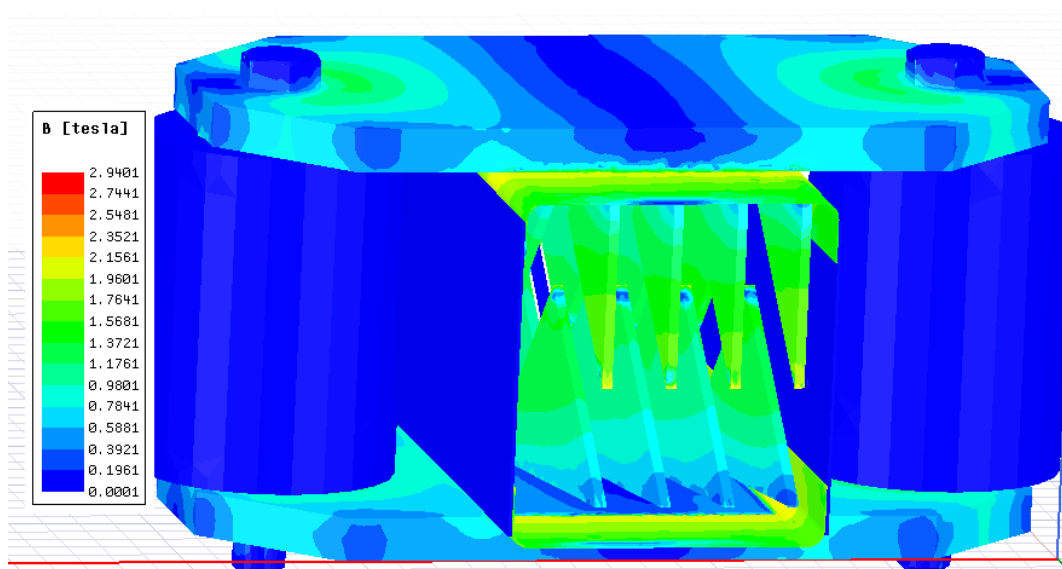


Рисунок 4.14 – Картина магнітного поля, отримана при 3D-моделюванні (варіант 2)

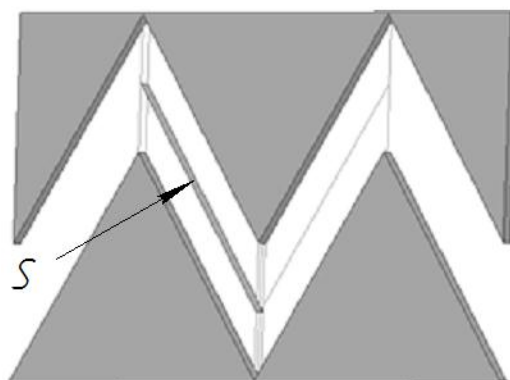


Рисунок 4.15 – Площадка у повітряному проміжку для визначення розрахункового значення магнітного потоку Φ (варіант2)

Таблиця 4.3 – Розрахункові значення магнітної індукції для 3D-моделі (варіант 2)

№ точки	Відстань, мм	B, мТл	№ точки	Відстань, мм	B, мТл
1	0,00	35,28	11	69,63	96,62
2	6,96	44,30	12	76,60	96,16
3	13,93	55,49	13	83,56	95,19
4	20,89	67,75	14	90,53	92,64
5	27,85	79,34	15	97,49	89,45
6	34,82	88,23	16	104,45	80,30
7	41,78	92,43	17	111,42	67,67
8	48,74	95,30	18	118,38	55,05
9	55,71	96,80	19	125,34	44,23
10	62,67	97,05	20	132,31	34,99

Розрахункове значення магнітного потоку Φ через площадку S (рис. 4.15) склало 0,0000558067 Вб. Відповідно, розрахункове значення магнітного потоку Φ , що приходить на одиницю товщини полюса t , склало $\Phi/t=0,0000558067/0,006=0,00930111$ Вб/м. Цей результат використаний для визначення граничної умови A_{de} на ділянці de (рис. 3.3) розрахункової двовимірної області (2D-моделі), яка відповідає варіанту 2: $A_{de}=3\Phi/t=3 \cdot 0,00930111=0,027903332$ Вб/м. Далі було здійснено 2D-моделювання розрахункової моделі для варіанту 2 з прийнятою граничною умовою $A_{de}=0,027903332$ Вб/м (рис. 4.16). Результати розрахунку магнітної індукції для двовимірної моделі для 20-ти характерних точок показані в табл.4.4.

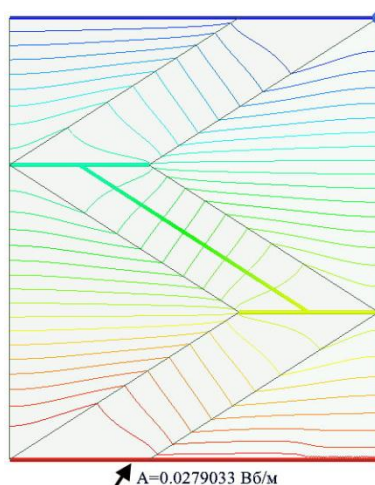


Рисунок 4.16 – Картина магнітного поля, отримана при 2D-моделюванні для варіанту 2

Порівняння результатів розрахунку магнітної індукції при 2D- та 3D- моделюванні для варіанту 2 (рис. 4.17), свідчить про їх високу узгодженість. Відносна похибка розрахунку магнітного поля не перевищує 14,6 %.

Таблиця 4.4 – Розрахункові значення магнітної індукції для 2D-моделі (варіант 2)

№ точки	Відстань, мм	B, мТл	№ точки	Відстань, мм	B, мТл
1	0,00	30,79	11	70,08	92,74
2	7,01	41,35	12	77,08	92,63
3	14,02	53,86	13	84,09	92,23
4	21,02	67,44	14	91,10	91,00
5	28,03	79,64	15	98,11	87,52
6	35,04	87,52	16	105,12	79,64
7	42,05	91,00	17	112,12	67,44
8	49,05	92,24	18	119,13	53,86
9	56,06	92,63	19	126,14	41,34
10	63,07	92,74	20	133,15	30,79

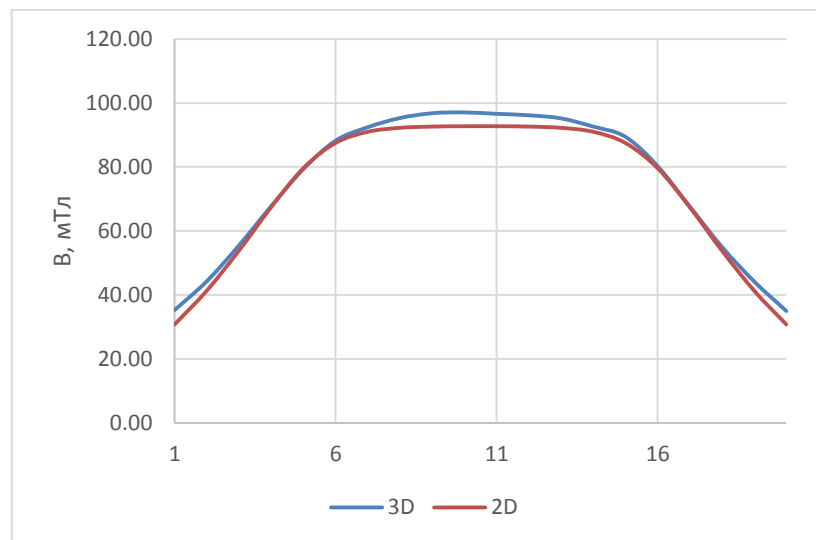


Рисунок 4.17 – Порівняння результатів розрахунку магнітної індукції при 2D- та 3D-моделюванні для варіанту 2

Таким чином, для двовимірної моделі структури S_4 з параметрами $X_1=b/a=0,4$ та $X_2=\alpha=0,18\pi$ для границі de (рис. 3.3) може бути прийнята наступна гранична умова $A_{de}=0,027903332$ Вб/м.

Визначення граничної умови A_{de} на ділянці de (рис. 3.3) розрахункової двовимірної області (2D-моделі), яка відповідає *варіанту 3* (базова модель) було здійснено в аналогічній послідовності. Особливості моделювання цього варіанту відображені в 4.1.1. Результати розрахунку магнітної індукції B для 20-ти точок, розташованих на повздовжньої лінії симетрії площадки S (рис. 4.18) для варіанту 3, представлені в табл. 4.5.

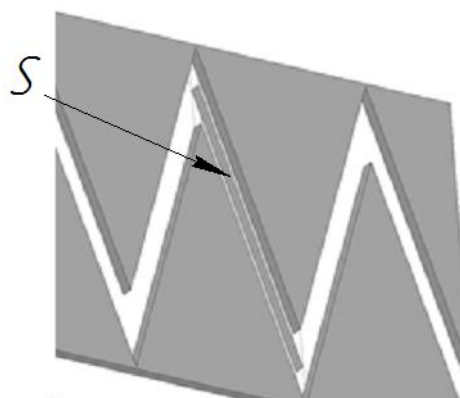


Рисунок 4.18 – Площадка у повітряному проміжку для визначення розрахункового значення магнітного потоку Φ (варіант 3)

Таблиця 4.5 – Розрахункові значення магнітної індукції для 3D-моделі (варіант 3)

№ точки	Відстань, мм	B , мТл	№ точки	Відстань, мм	B , мТл
1	0,00	12,23	11	76,94	90,74
2	7,69	24,71	12	84,64	92,50
3	15,39	59,05	13	92,33	92,30
4	23,08	89,03	14	100,02	94,02
5	30,78	94,43	15	107,72	93,28
6	38,47	93,09	16	115,41	94,36
7	46,17	91,99	17	123,11	89,44
8	53,86	91,96	18	130,80	57,53
9	61,55	91,82	19	138,50	23,19
10	69,25	90,05	20	146,19	10,26

Розрахункове значення магнітного потоку Φ через площадку S для варіанту склало 0,0000640057 Вб. Визначено граничну умову A_{de} на ділянці de (рис. 3.3) розрахункової двовимірної області (2D-моделі), яка відповідає варіанту 3: $A_{de}=3\Phi/t=3\cdot0,0000640057/0,006=0,032002859$ Вб/м.

Результати розрахунку магнітної індукції для двовимірної моделі варіанту 3 для 20-ти характерних точок показані в табл. 4.6. Картина магнітного поля наведена на рис. 4.19.

Таблиця 4.6 – Розрахункові значення магнітної індукції для 2D-моделі (варіант 3)

№ точки	Відстань, мм	B, мТл	№ точки	Відстань, мм	B, мТл
1	0,00	10,97	11	76,94	91,08
2	7,69	24,80	12	84,64	91,08
3	15,39	55,72	13	92,33	91,07
4	23,08	86,20	14	100,02	91,06
5	30,78	90,83	15	107,72	91,04
6	38,47	91,04	16	115,41	90,83
7	46,17	91,06	17	123,11	86,20
8	53,86	91,07	18	130,80	55,74
9	61,55	91,08	19	138,50	24,81
10	69,25	91,08	20	146,19	10,96

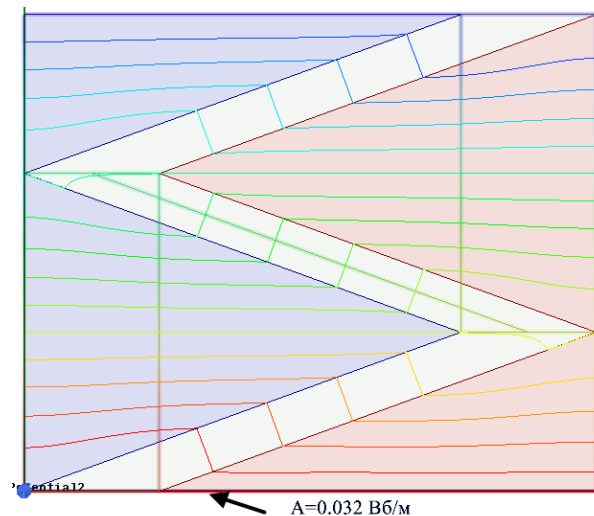


Рисунок 4.19 – Картина магнітного поля, отримана при 2D-моделюванні для варіанту 3

Порівняння результатів розрахунку магнітної індукції при 2D- та 3D-моделюванні для варіанту 3 (рис. 4.20), свідчить про їх високу узгодженість. Відносна похибка розрахунку магнітного поля не перевищує 10,3 %.

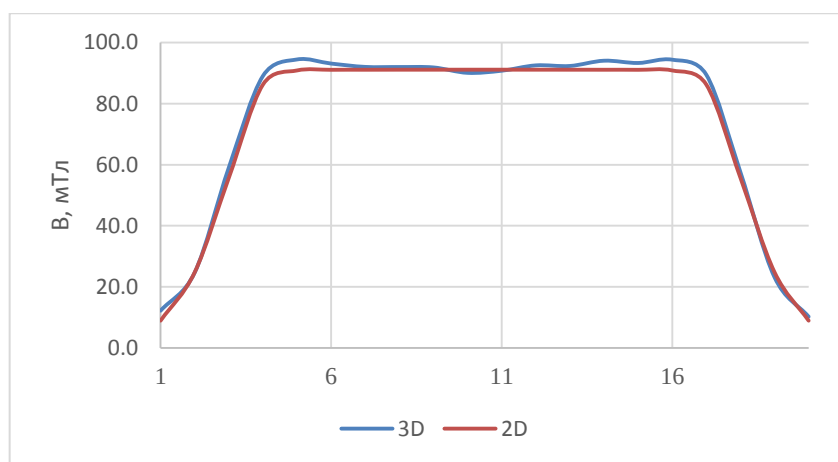


Рисунок 4.20 – Порівняння результатів розрахунку магнітної індукції при 2D- та 3D-моделюванні для варіанту 3

Порівняння отриманих результатів за трьома моделями відображено в табл.4.7 та на рис. 4.21.

Таблиця 4.7 – Порівняння значень магнітної індукції для трьох варіантів

Варіант 1			Варіант 2			Варіант 3		
№ точки	Відстань, мм	B, мТл	№ точки	Відстань, мм	B, мТл	№ точки	Відстань, мм	B, мТл
1	0	46,42	1	0,00	35,28	1	0,00	12,23
2	3,76	49,94	2	6,96	44,30	2	7,69	24,71
3	7,51	53,32	3	13,93	55,49	3	15,39	59,05
4	11,27	55,56	4	20,89	67,75	4	23,08	89,03
5	15,02	58,22	5	27,85	79,34	5	30,78	94,43
6	18,78	60,99	6	34,82	88,23	6	38,47	93,09
7	22,54	62,18	7	41,78	92,43	7	46,17	91,99
8	26,29	63,15	8	48,74	95,30	8	53,86	91,96
9	30,05	63,98	9	55,71	96,80	9	61,55	91,82
10	33,81	64,10	10	62,67	97,05	10	69,25	90,05
11	37,56	64,19	11	69,63	96,62	11	76,94	90,74
12	41,32	64,08	12	76,60	96,16	12	84,64	92,50
13	45,07	63,26	13	83,56	95,19	13	92,33	92,30
14	48,83	61,88	14	90,53	92,64	14	100,02	94,02
15	52,59	60,18	15	97,49	89,45	15	107,72	93,28
16	56,34	58,02	16	104,45	80,30	16	115,41	94,36
17	60,10	55,65	17	111,42	67,67	17	123,11	89,44
18	63,85	53,21	18	118,38	55,05	18	130,80	57,53
19	67,61	49,72	19	125,34	44,23	19	138,50	23,19
20	71,37	46,46	20	132,31	34,99	20	146,19	10,26

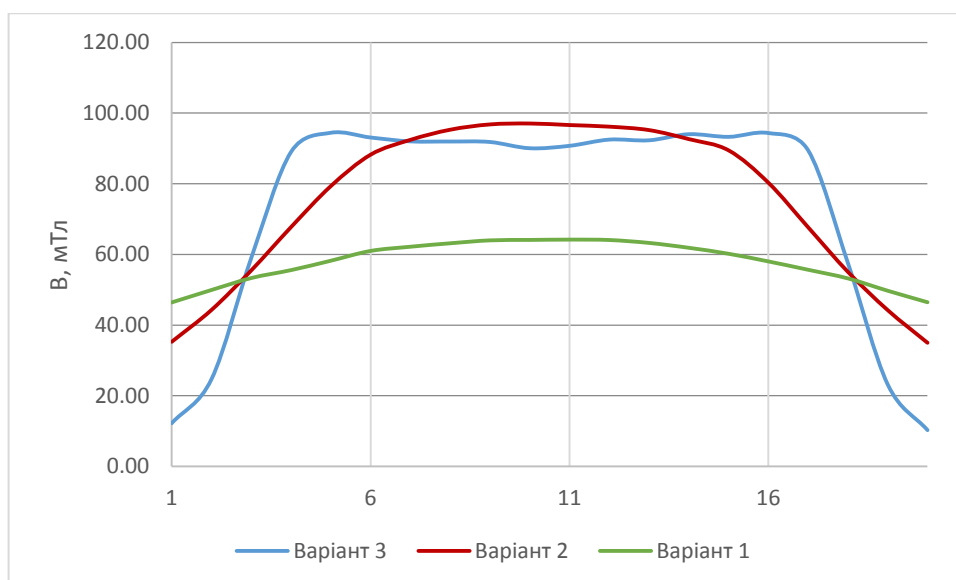


Рисунок 4.21 – Порівняння результатів розрахунку магнітної індукції для трьох варіантів

Таким чином, отримані при 3D-моделюванні значення векторного магнітного потенціалу A_{de} для прийнятих трьох варіантів електромагнітних систем, можуть бути використані для аналізу та обробки.

4.2 Удосконалення базової конструкції поліградієнтного електромагнітного 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 [110, 151].

Електромагнітний сепаратор (рис. 4.22) містить нерухому напівзамкнуту електромагнітну систему, яка включає в себе два циліндричних осердя 1, закріплені на осердях котушки намагнічування 2, полюси 3, які виконані у вигляді пластин зі скошеними кутами та прикріплені до торцевих частин осердь 1, матрицю, яка встановлена з можливістю зворотно-поступального руху у вертикальній площині в проміжку між полюсами 3 і виконану у вигляді короба прямокутного перетину без дна так, що дві протилежні стінки 4 матриці, що паралельні полюсам 3, виконані з феромагнітного матеріалу, а дві інші стінки 5 матриці – з немагнітного. Зсередини до феромагнітних стінок 4 матриці

закріплено декілька рядів паралельних похило встановлених феромагнітних пластин 6, 7 з трикутними виступами, зверненими всередину матриці. Суміжні ряди паралельних феромагнітних пластин 6 і 7 встановлено із чергуванням трикутних виступів та впадин у протилежних напрямках [110].

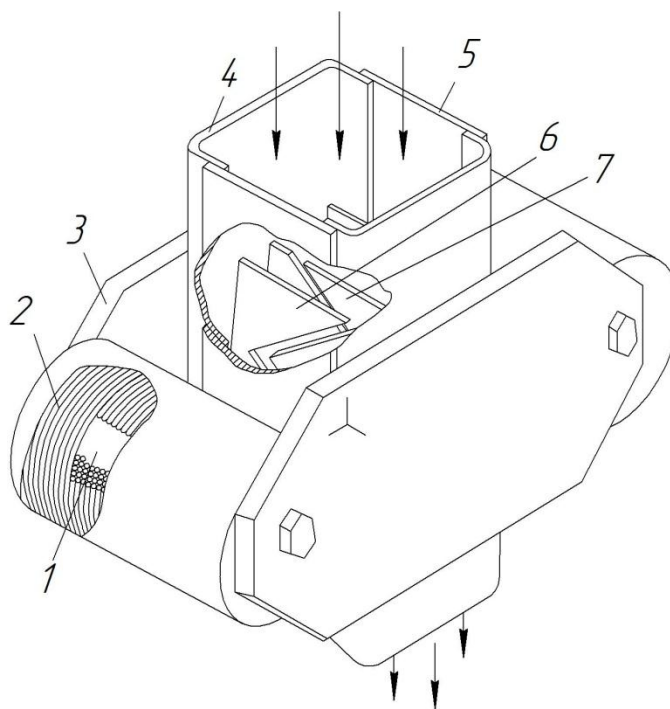


Рис. 4.22 – Електромагнітний сепаратор удосконаленої конструкції

Електромагнітний сепаратор працює наступним чином. У робочому режимі котушки намагнічування 2 підключаються до мережі постійного струму. Під дією сили в просторі між полюсами 3 створюється магнітне поле. Завдяки тому, що обмотки котушок 2 з'єднані зустрічно та магнітні потоки в осердях 1 мають однаковий напрямок, полюса-пластини 3 набувають різну полярність. Немагнітний сипучий матеріал разом зі слабوماгнітними та дрібнодисперсними феромагнітними домішками подається безпосередньо до матриці на паралельні похилі феромагнітні пластини 6, 7. Наявність трикутних виступів та впадин у пластин 6, 7 дає змогу створити в робочому проміжку, що утворений пластинами, неоднорідне магнітне поле. Найбільш великих значень градієнт напруженості магнітного поля буде набувати навколо країв трикутних виступів, де виникають електромагнітні сили, що є достатніми для видалення

слабомагнітних або дрібнодисперсних феромагнітних часток. Чергування трикутних виступів та впадин у протилежних напрямках в суміжних рядах паралельних феромагнітних пластин 6 і 7 створює умови для рівномірного розподілу локальних зон з великою неоднорідністю магнітного поля в робочому об'ємі матриці, що забезпечує істотне збільшення надійності вилучення дрібнодисперсних феромагнітних або слабомагнітних часток [110].

Частинки матеріалу, що подається на похилі пластини 6, 7, вдаряючись з крайками пластин, постійно змінюють напрямки свого руху. Це сприяє кращому перемішуванню матеріалу та полегшує видалення включень з немагнітного матеріалу при проходженні через матрицю. При цьому похилі пластини 6 розташовані під таким кутом, що сепаруємий матеріал проходить через декілька робочих проміжків, які утворені пластинами 6, що збільшує час знаходження матеріалу в області високоградієнтного поля та сприяє більш надійному вилученню феромагнітних домішок.

Таким чином, немагнітна фракція сипкого матеріалу вільно проходить через матрицю сепаратора, а дрібнодисперсні феромагнітні або слабомагнітні частинки під дією сил магнітного поля накопичуються на феромагнітних пластинах 6.

Для періодичного розвантаження вилучених і "налипших" на феромагнітних пластинах 6 дрібнодисперсних феромагнітних або слабомагнітних частинок котушки намагнічування 2 періодично відключаються від мережі живлення. При цьому електромагнітне поле ослаблюється і матриця сепаратора під дією власної ваги різко переміщується вертикально вниз. В результаті відбувається досить ефективне відпадиння вилучених дрібнодисперсних феромагнітних або слабомагнітних домішок [110].

В удосконаленій конструкції електромагнітного сепаратора суміжні ряди паралельних феромагнітних пластин матриці встановлено із послідовним чергуванням трикутних виступів та впадин у протилежних напрямках. Це забезпечить найбільш рівномірний розподіл локальних зон з високою інтенсивністю та неоднорідність магнітного поля в робочому об'ємі матриці

сепаратора у порівнянні з базовою конструкцією та створить умови для збільшення ефективності видалення дрібнодисперсних феромагнітних та слабомагнітних домішок крупністю менше 1 мм [110].

Удосконалена конструкція електромагнітного сепаратора (нове технічне рішення S_{TR}) разом з його базовим варіантом відносяться до структури S_4 , яка є однією з ізомерних композицій, отриманих в результаті процедури генетичного синтезу (формула 2.14). В свою чергу, структуру S_4 також можна представити як множину l просторових ізомерних композицій $(S_4^1, S_4^2, \dots, S_4^l)$, які відрізняються просторовим розміщенням суміжних рядів паралельних феромагнітних пластин, та записати у вигляді

$$S_4 = (S_4^1, S_4^2, \dots, S_4^l) \rightarrow S_{TR} \rightarrow P_{TR}, \quad (4.1)$$

де P_{TR} – популяція технічних рішень.

Розподіл магнітного поля в системі, що містить в якості джерела магнітного поля котушку зі струмом, описується системою диференціальних рівнянь Максвелла, яка для векторного магнітного потенціалу A має вигляд [133]

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu_0 \mu_r} \nabla \times A \right) = J_0, \quad (4.2)$$

де μ_r – магнітна проникність матеріалу магнітопроводу, яка, в загальному випадку, є нелінійною функцією магнітної індукції; μ_0 – магнітна проникність вакууму, яка дорівнює $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; J_0 – вектор щільності струму в перерізі котушки.

Для оцінювання переваг удосконаленої конструкції електромагнітного сепаратора перед базовою проведені дослідження розподілу магнітної індукції в робочій зоні матриці сепаратора. Для вирішення цього завдання був задіяний метод скінченних елементів, реалізований у тривимірній постановці в модулі Magnet програмного комплексу Infolytica [68]. Задавалися щільність струму в обмотці – 2,1 А/мм² та конструктивні параметри магнітної системи, зокрема: робоча ширина матриці сепаратора – 180 мм, відстань між сусідніми виступами

пластин – 100 мм, кут при вершині виступу пластини – 20° , робочий міжполюсний проміжок – 13,6 мм.

При дослідженні приймалося, що магнітопровід електромагнітної системи, включаючи пластини матриці, виготовлений зі магнітом'якої конструкційної сталі. Прийнято припущення про сталість відносної магнітної проникності μ_r матеріалу магнітопроводу ($\mu_r = 1000$ Гн/м). Для стінок матриці (позиція 4 на рис. 1) задавався немагнітний матеріал (алюміній). В якості граничних умов на зовнішніх границях розрахункової області використовувалася умова магнітної ізоляції $A=0$.

На рис.4.23 представлена геометрична модель удосконаленої конструкції електромагнітного сепаратора. Конфігурація основної магнітної системи цього сепаратора така ж сама, як у базової конструкції, але в матриці суміжні ряди паралельних феромагнітних пластин розташовані із чергуванням у протилежних напрямках трикутних виступів і впадин [110].

На рис. 4.24 представлені результати моделювання, отримані для удосконаленої конструкції електромагнітного сепаратора. За результатами моделювання був здійснений розрахунок розподілу магнітної індукції електромагнітного сепаратора в характерних точках 1-7, розташованих вздовж середньої характерної лінії робочого проміжку для внутрішнього ряду феромагнітних пластин. На рис. 4.25 ця лінія позначена стрілкою.

Результати розрахунку розподілу магнітної індукції B електромагнітного сепаратора удосконаленої конструкції в характерних точках 1-7 для внутрішнього ряду пластин показані на рис. 4.26. Крім того, на рис. 4.26 здійснено порівняння отриманих під час 3D-моделювання результатів з результатами експериментальних досліджень розподілу магнітної індукції для внутрішнього ряду пластин базової конструкції електромагнітного сепаратора (Додаток Б).

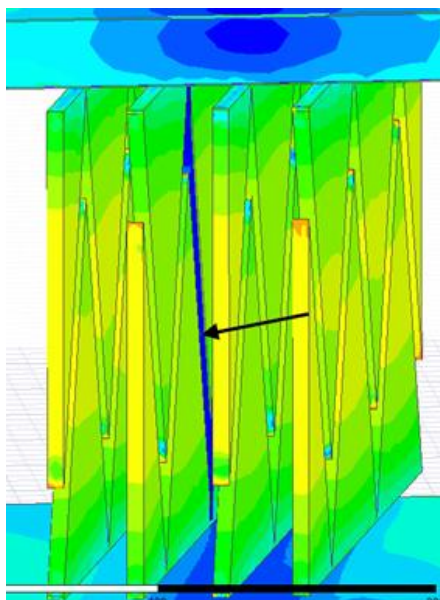


Рис.4.25 – Розташування характерної лінії

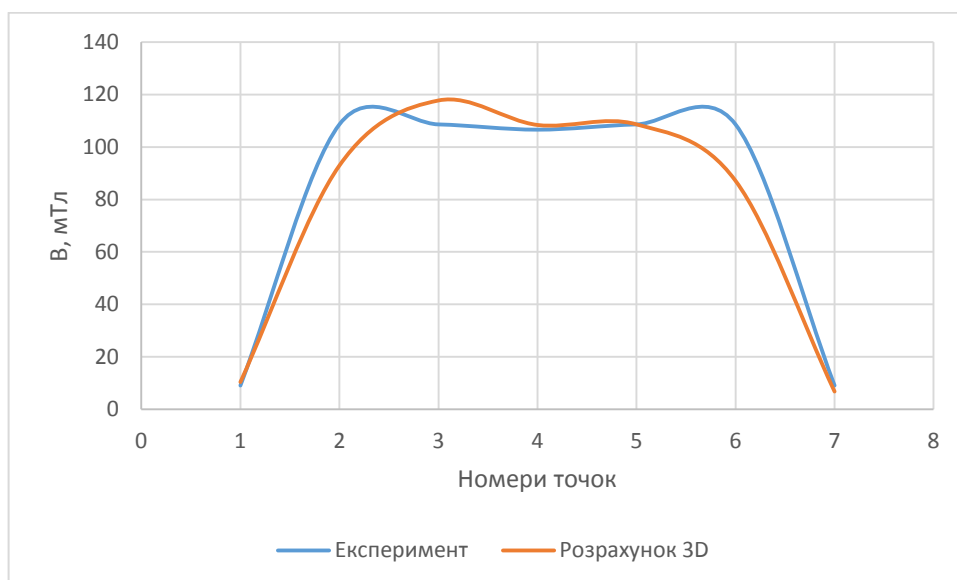


Рис.4.26 – Розподіл магнітної індукції в характерних точках

Максимальне значення магнітної індукції (табл. 4.8) склало, відповідно: для базової моделі – 108,6 мТл, для удосконаленої моделі - 117,7 мТл (відносна похибка – 8,3%). У той самий час, як свідчить рис.4.24, ступінь неоднорідності поля в робочому проміжку вище для удосконаленої конструкції пристрою. Локальний коефіцієнт k_i неоднорідності в точках 2-6 приймає майже однакове значення (1,33-1,36), що свідчить про однорідний характер магнітного поля, в той самий час для удосконаленої конструкції сепаратора коефіцієнт k_i змінюється у межах 1,15-1,55. Розрахований за формулою (3.11) інтегральний

показник неоднорідності поля для характерних точок 2-6 склав, відповідно: для базової моделі – 0,9%, для удосконаленої моделі – 14,9%.

Таблиця 4.8 – Порівняння результатів експериментальних досліджень розподілу магнітної індукції для базової конструкції з результатами чисельних розрахунків для удосконаленої конструкції електромагнітного сепаратора

Номери характерних точок	Базова конструкція (Додаток Б)		Удосконалена конструкція (рис. 4.23)		Відхилення за магнітною індукцією, %
	Магнітна індукція, мТл	Локальний коефіцієнт неоднорідності k_i , в.о.	Магнітна індукція, мТл	Локальний коефіцієнт неоднорідності k_i , в.о.	
1	9,1	0,11	10,4	0,137	+14,3
2	108,6	1,36	92,9	1,22	-16,7
3	108,6	1,36	117,7	1,55	+8,3
4	106,6	1,33	108,4	1,43	+1,7
5	108,6	1,36	108,6	1,433	0
6	108,6	1,36	87,1	1,15	-24,7
7	9,1	0,11	6,8	0,089	-33,8

Далі з застосуванням фізичної моделі (рис. 4.27) були проведені експериментальні дослідження з визначення ефективності роботи удосконаленої конструкції електромагнітного сепаратора та порівняння її з базовою. При цьому всі геометричні та електричні параметри моделі залишалися такими ж, як і для базової конструкції сепаратора згідно рис.4.3 (змінювалось тільки розташування паралельних феромагнітних пластин в суміжних рядах).

Для визначення ефективності роботи електромагнітного сепаратора були використані проби борошна з різною вихідною концентрацією металевих домішок розміром від 0,01 до 5 мм. Вилучений метал зважували на аналітичних вагах та визначали його концентрацію. Експеримент проводився в умовах сталого температурного режиму.

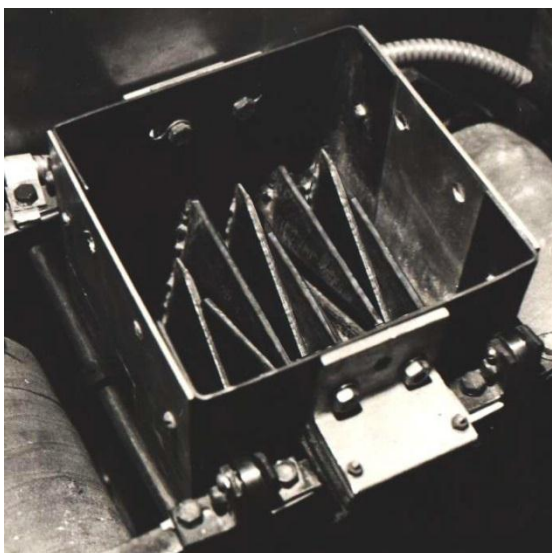


Рисунок 4.27 – Розташування пластин в матриці удосконаленої конструкції електромагнітного сепаратора

Результати експерименту наведені у табл. 4.9, в якій для порівняння також представлені результати з визначення ефективності базової конструкції електромагнітного сепаратора, отримані в [109].

Таблиця 4.9 – Результати експерименту з визначення ефективності електромагнітного сепаратора

Маса проби борошна	Загальна маса металевих включень	Маса металевих включень на 1 кг борошна	Вилучено металевих включень:			
			базова конструкція		удосконалена конструкція	
кг	г	г	г	%	г	%
6	60	10	54,32	90,54	54,16	90,27
6	30	5	28,66	95,53	27,8	92,7
6	6	1	5,61	93,5	5,72	95,3
6	3	0,5	2,79	93,0	2,85	95,0
6	0,09	0,015	0,079	87,28	0,085	94,4

Як свідчить табл. 4.9, і базова, і удосконалена 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.

4.3 Дослідження силових характеристик сепаратора при зміні форми пластин матриці

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 (рис.4.28) [152]. Прийняті наступні діапазони варіювання геометричних розмірів пластин: $d/b=0,05\dots0,2$, де d – верхня основа трапеції.

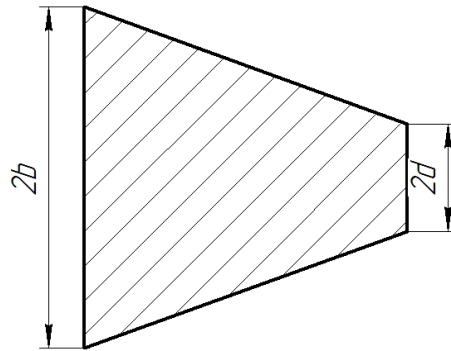


Рисунок 4.28 – Пластина поліградієнтного середовища у формі рівнобедреної трапеції

Був проведений чисельно-польовий аналіз розподілу поля в робочих міжполюсних проміжках матриці з поліградієнтним середовищем у вигляді 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 робочому об'ємі сепаратора при зміні відношення d/b [23]. Задачу було вирішено в двовимірній лінійній постановці у магнітостатичному наближенні шляхом розв'язання рівняння (3.7) для розрахункової області, зображеної на рис.4.29, методом скінченних елементів за допомогою програми ELCUT 5.6. При розрахунках приймалися припущення та граничні умови з п. 3.2.2. Векторний магнітний потенціал A_{de} на ділянці de

(рис. 3.3) обирався таким, щоб максимальне значення напруженості магнітного поля $H_{\max}$ у повітряному проміжку дорівнювало максимальному значенню напруженості магнітного поля базової конструкції $H_{\max}=135,7$ кА/м.

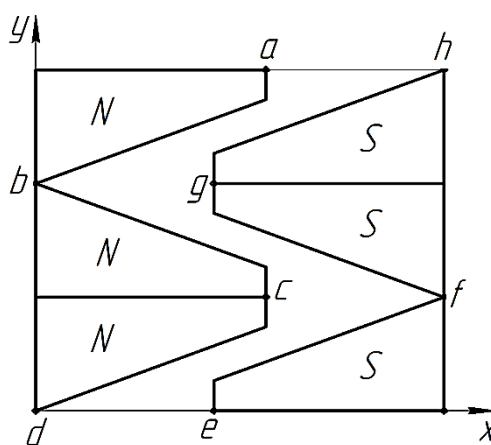


Рис. 4.29. Розрахункова модель робочої зони на прикладі пластин у формі рівнобедреної трапеції

Результати розрахунків силових характеристик ($H_{\max}$, $\text{grad}H_{\max}$, $f_{\max}$, γ) поля для пластин у формі рівнобедреної трапеції наведені в табл. 4.10. Залежність ефективної площі робочого об'єму матриці γ від геометричних розмірів пластин, що досліджуються представлена на рис. 4.30 [23].

Таблиця 4.10 – Результати розрахунків силових характеристик поля пластин у формі рівнобедреної трапеції

d/b	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	0,0320	13,6	0,763	135,7	67,8	8,6	5,3	0
0,05	0,0313	13,6	0,761	135,7	65,7	8,1	6,7	0
0,10	0,0310	13,6	0,756	135,7	69,2	8,2	9,0	0
0,15	0,0275	13,6	0,746	135,7	62,7	7,7	8,0	0
0,20	0,0250	13,6	0,733	135,7	61,2	7,5	7,9	0

Як видно з табл. 4.10, коефіцієнт ефективної площі γ та силові характеристики $H_{\max}$, $\text{grad}H_{\max}$, $f_{\max}$ поліградієнтного електромагнітного сепаратора з матрицею на основі пластин трапецеївидної форми набувають максимального значення при відношенні $d/b=0,1$ та становлять: $\gamma=9,0\%$,

$H_{\max}=135,7$ кА/м; $\text{grad}H_{\max}=69,2$ кА/м²; $f_{\max}=8,2 \cdot 10^9$ А²/м³, відповідно. Залежність ефективної площі робочого об'єму γ від співвідношення геометричних розмірів трапецеївидних пластин d/b має екстремальний характер (рис. 4.30).

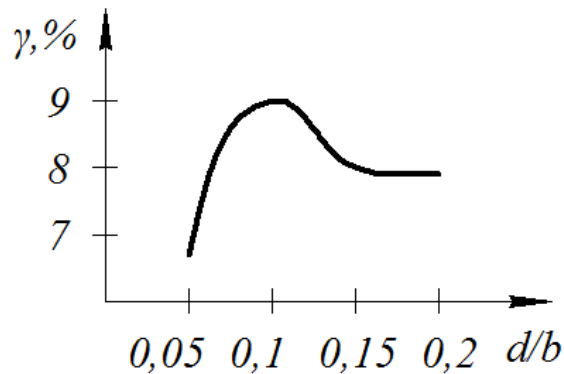


Рис.4.30 – Залежність ефективної площі робочого об'єму поліградієнтної матриці γ від геометричних розмірів трапецеївидних пластин

Для базової конструкції поліградієнтного електромагнітного сепаратора з параметрами $X_1=b/a=0,28$ і $X_2=\alpha=0,11\pi$ (в табл.4.10 строчка з параметрами базового сепаратора виділена кольором) значення ефективної площі γ робочого об'єму та максимальної приведеної магнітної сили $f_{\max}$ становлять, відповідно, $\gamma=5,3\%$ і $f_{\max}=8,6 \cdot 10^9$ А²/м³ [23]. Виходячи з викладеного вище, можна зробити такий висновок. При зміні форми трикутних пластин на трапецеїдальні відбувається незначне погіршення (приблизно на 5%) максимального значення приведеної магнітної сили $f_{\max}$, у той самий час 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 використана для підвищення ефективності роботи сепаратора.

4.4 Висновки по розділу 4

1. Запропоновано підхід до визначення граничної умови (векторного магнітного потенціалу) на границі de двовимірних розрахункових областей, який ґрунтується на дослідженні просторового розподілу магнітного поля в

робочому проміжку 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.

2. 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%.

3. 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.

4. 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 співвідношенні $d/b=0,1$. При незначному погіршенні (приблизно на 5%) максимального значення приведеної магнітної сили $f_{\max}$ показник γ для параметру $d/b=0,1$ збільшується майже у 2 рази. Тому трапецеїдальна форма пластин матриці, яку можна отримати шляхом незначної механічної доробки, може бути рекомендована до використання.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішене актуальне наукове завдання по визначенню 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 поліградієнтних магнітних сепараторів призначені 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 домішок, які утворюються в процесі зносу металевих частин обладнання, є актуальною також для сипких матеріалів: цукру, борошна, круп, крохмалю, комбікорму, керамічної та фармацевтичної сировини тощо.

3. Показано, що збільшення інтенсивності магнітного поля у сепараторах з електромагнітним збудженням обмежене насиченням елементів магнітопроводу. Підвищення напруженості магнітного поля також пов'язане зі зростанням споживаної потужності, що призводить до подоржчання сепараторів. У той самий час збільшення неоднорідності магнітного поля можливо досягти шляхом оптимізації геометричних розмірів, форми та 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 операторів центральної, дзеркальної, переносної, і ковзної 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 електромагнітних сепараторів, поліградієнтні середовища яких можна віднести до ізомерних композицій S_3 і S_4 . Це підтверджує достовірність процедури синтезу. Зокрема, до структури S_4 належить конструкція електромагнітного поліградієнтного сепаратора, яка прийнята в якості базової при подальших теоретичних 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) і забезпечує вирішення задачі за критерієм ефективної площі робочої зони.

6. Аналіз, проведений з використанням методу простого перебору варіантів, показав, що структура S_4 з відповідними параметрами $X_1=b/a=0,18$ і $X_2=\alpha=0,11\pi$ може вважатися раціональною з точки зору найвищого 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;

– розрахована величина ефективної площі робочої зони γ для визначеної раціональної структури майже у 7 разів більша, ніж у базової.

7. Запропоновано підхід до визначення граничної умови (векторного магнітного потенціалу) на границі *de* двовірних 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 співвідношенні $d/b=0,1$. При незначному погіршенні (приблизно на 5%) максимального значення приведеної магнітної сили $f_{\max}$ показник γ для параметру $d/b=0,1$ 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 ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Загирняк М. В., Бранспиз Ю. А., Шведчикова И. А. Магнитные сепараторы. Проблемы проектирования: моногр. Киев : Техніка, 2011. 224 с.
2. Мясников Н. Ф. Полиградиентные магнитные сепараторы: моногр. Москва : Недра, 1973. 160 с.
3. 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.
4. 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.
5. Деркач В. Г. Специальные методы обогащения. Москва : Недра, 1966. 338 с.
6. Кармазин В. В., Кармазин В. И. Магнитные и электрические методы обогащения. Москва : Недра, 1988. 304 с.
7. 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.
8. Островский Г. М. Прикладная механика неоднородных сред. Санкт-Петербург : Наука, 2000. 359 с.
9. Магнитный сепаратор: пат. 1502109 СССР : МКИ В 03 С 1/30 (СССР). № 4129502/23-03; заявл. 03.10.86; опубл. 23.08.89. Бюл. № 31. 3 с.
10. Магнитный сепаратор: пат. 1338895 СССР : МКИ В 03 С 1/30 (СССР). № 4056550/22-03; заявл. 14.04.1986; опубл. 23.09.1987. Бюл. № 35. 4 с.

11. Магнитный сепаратор для обогащения слабомагнитных руд: пат. 1351678 СССР : МКИ В 03 С 1/30 (СССР). № 4079662/22-03; заявл. 23.06.1986; опубл. 15.11.1987. Бюл. № 41. 4 с.

12. Магнитный сепаратор: пат. 1532080 СССР : МКИ В 03 С 1/08 (СССР). № 4393268/22-03; заявл. 16.03.1988; опубл. 30.12.1989. Бюл. № 48. 3 с.

13. Полиградиентный электромагнитный сепаратор: пат. 580905 СССР : МКИ В 03 С 1/08 (СССР). № 1918961/22-03; заявл. 11.05.1973; опубл. 25.11.1977. Бюл. № 43. 3 с.

14. Полиградиентный магнитный сепаратор: пат. 1373443 СССР : МКИ В 03 С 1 / 02 (СССР). № 4107820/22-03 ; заявл. 16.05.1986 ; опубл. 15.02.1988. Бюл. № 6. 5 с.

15. Магнитный сепаратор: пат. 1502109 СССР : МКИ В 03 С 1 / 30 (СССР). № 4129502 / 23-03 ; заявл. 03.10.1986 ; опубл. 23.08.1989. Бюл. № 31. 3 с.

16. Магнитный сепаратор: пат. 1338895 СССР : МКИ В 03 С 1 / 30 (СССР). № 4056550 / 22-03 ; заявл. 14.04.1986 ; опубл. 23.09.1987. Бюл. № 35. 2 с.

17. Магнитный сепаратор для обогащения слабомагнитных руд: пат. 1351678 СССР : МКИ В 03 С 1 / 30 (СССР). № 4079662 / 22-03 ; заявл. 23.06.1986 ; опубл. 15.11.1987. Бюл. № 41. 4 с.

18. Магнитный сепаратор: пат. 1532080 СССР : МКИ В 03 С 1 / 08 (СССР). № 4393268 / 22-03 ; заявл. 16.03.1988 ; опубл. 30.12.1989. Бюл. № 48. 3 с.

19. Полиградиентный электромагнитный сепаратор: пат. 580905 СССР : МКИ В 03 С 1 / 08 (СССР). № 1918961 / 22-03 ; заявл. 11.05.1973 ; опубл. 25.11.1977. Бюл. № 43. 4 с.

20. Магнитный фильтр: пат. 345970 СССР : М. Кл. В 03 С 1 / 30 (СССР). № 1452150 / 23-26; заявл. 15.06.1970 ; опубл. 28.07.1972. Бюл. № 23. 3 с.

21. 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.

22. Чарыков В. И., Евдокимов А. А., Копытин И. И. Инновационные решения при конструировании электромагнитных сепараторов: моногр. Курган : Изд-во Курганского гос. ун-та, 2015. 182 с.

23. Романченко Ю. А., Шведчикова І. О. Дослідження силових характеристик поліградієнтного електромагнітного сепаратора при зміні форми пластин матриці. *Вісник КНУТД*. 2018. №4 (124). С. 68-77.

24. 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.

25. Зуев В. С., Чарыков В. И., Романова В. Д. Электромагнитный сепаратор УСС-4. Техническая документация. Курган : КСХИ, 1988. 122 с.

26. Бобович Б. Б., Девяткин В. В. Переработка отходов производства и потребления: справочное издание. Москва : Интермет Инжиниринг, 2000. 496 с.

27. Шинкаренко В. Ф. Основи теорії еволюції електромеханічних систем. Київ : Наукова думка, 2002. 288 с.

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

29. Романченко Ю. А., Шведчикова І. А. Теоретические основы расчета силового поля магнитного сепаратора. *II Всеукраїнська інтернет-конференція студентів, аспірантів та молодих учених «Технічні науки в Україні: погляд у майбутнє»*. (Сєверодонецьк 27-28 квітня 2017 р.). С. 136-139.

30. 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.

31. 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.

32. Загирняк М. В., Бранспиз Ю. А. Шкивные магнитные сепараторы. Киев : Техніка, 2000. 304 с.

33. Svoboda J., Fujita T. Recent developments in magnetic methods of material separation. *Miner. Eng.* 2003. № 16 (9). P. 785-792.

34. 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*).

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

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

37. 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.

38. Афанасьев А. А., Сидоров Н. С. Тестовый аналитический расчет трехмерного магнитного поля в кольцевом секторе тора. *Вестник ЧГУ*. 2007. №2. С. 15-21.

39. Бессонов А. А. Теоретические основы электротехники: Электромагнитное поле. Москва : Высшая школа, 1978. 231 с.

40. Тихонов А. Н., Самарский А. А. Уравнения математической физики:

Учебное пособие. Москва : Изд-во МГУ, 1999. 798 с.

41. 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.

42. Курносов М. Г., Хорошевский В. Г. Вычислительные методы, алгоритмы и аппаратно-программный инструментальный параллельного моделирования природных процес сов. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2012. 355 с.

43. Бинс К., Лауренсон П. Анализ и расчет электрических и магнитных полей. Москва : Энергия, 1970. 376 с.

44. Карташян В. О., Кузнецов Н. И. Расчет проводимостей электромагнитных сепараторов. *Известия вузов. Электромеханика*. 1984. № 3. С.76-80.

45. Курейчик В. М. Генетические алгоритмы. Таганрог : Издательство ТРТУ, 1998. 185с.

46. Нагасима Т. Современные магнитные сепараторные установки. *Кагаку когаку*. 1981. Т.45. №4. С.226-234.

47. Авхадиев Ф. Г. Конформные отображения и краевые задачи: монография. Москва : Математика, 1996. 216 с.

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

49. 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.

50. Smolkin R. D., Garin Yu. M., Krokhmal 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.

51. Smolkin R. D. Calculation of Magnetic Field Strength and Electromagnetic Ponderomotive Force of Separators. *IEEE Transactions On Magnetics*. Vol. 38. № 3.

P.1528-1533.

52. Мареев В. В., Станкова Е. Н. Основы методов конечных разностей. Санкт-Петербург : Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2012. 64 с.

53. Елисеев К. В., Зиновьева Т. В. Вычислительный практикум в современных САЕ-системах. Санкт-Петербург : Изд-во СПбГПУ, 2008. 112 с.

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

55. Горев И. В. Копцев С. В., Маркин Н. Е. Оценка характеристик электромагнитного сепаратора для сортировки стружки. *Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы*: сборник материалов III международной научно-технической конференции (Екатеринбург 27-29 сентября 2007 г.). Екатеринбург, 2007. С. 231-234.

56. Бахвалов А. Ю. Расчет стационарных и статических магнитных полей шкивных сепараторов. *Известия вузов. Электромеханика*. 2006. №2. С.29-24.

57. 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.

58. Бреббия К., Теллес Ж., Вроубел Л. Методы граничных элементов. Москва : Мир, 1987. 524 с.

59. 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.

60. Казаков Ю. Б., Страдомский Ю. И., Филиппов В. А. Моделирование и

исследование электротехнической системы регулируемой сепарации немагнитных материалов с использованием нанодисперсных магнитных жидкостей. *Вестник ИГЭУ*. 2011. Вып. 2. С. 1-4.

61. Татевосян А. С., Татевосян А. А., Захарова Н. В., Шелковников С. В., Шелковникова Ю. В. Экспериментальное исследование и расчет магнитного поля электромагнита постоянного тока с расщепленными полюсами и полюсными наконечниками в комплексе программ ELCUT. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2016. Т. 327. № 2. С. 133-140.

62. Загирняк М. В., Подорожный 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.

63. 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.

64. ANSYS Theoretical Manual [Электронный ресурс]. – 2018. – Режим доступа : <https://www.ansys.com> (дата звернения: 21.05.2018).

65. 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.

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

67. 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.

68. Infolytica is now part of Mentor, a Siemens Business [Электронный ресурс]. – 2018. – Режим доступа :

<https://www.mentor.com/products/mechanical/infolytica>. (дата звернення: 21.05.2018).

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

70. Гребеников В. В., Приймак 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.

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

72. 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.

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

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

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

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

77. 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.

Электротехника и Электромеханика. 2004. № 3. С. 38-43.

78. ELCUT. Руководство пользователя. Санкт-Петербург : Производственный кооператив ТОР, 2005. 257 с.

79. Гребеников В. В. Сравнительный анализ конструктивных модификаций электрогенератора малой мощности с постоянными магнитами и явнополюсным статором. *Техническая электродинамика*. 2013. №2. С. 64-68.

80. 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.

81. 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.

82. Фризен В. Э., Черных И. В., Бычков С. А., Тарасов Ф. Е. Методы расчета электрических и магнитных полей: учебный комплект. Екатеринбург : УрФУ, 2014. 176 с.

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

84. Шинкаренко В. Ф. Генетические программы структурной эволюции антропогенных систем (междисциплинарный аспект). *Праці Таврійського державного агротехнічного університету*. 2013. Вип. 13, том 4. С. 11-20.

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

86. Шинкаренко В. Ф., Гайдаенко Ю. В., Маляренко С. А., Мошняга А. Т. Генетическая программа управляемой эволюции электрических генераторов

возвратно-поступательного движения. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. 2012. Випуск 1 (17). С. 25-30.

87. Шинкаренко В. Ф., Загирняк М. В., Шведчикова И. А. Макрогенетический анализ и ранговая структура систематики магнитных сепараторов. *Електротехніка і електромеханіка*. 2009. №5. С.33-39.

88. Shinkarenko V. F., Zagirnyak M. V., Shvedchikova I. A. Structural-Systematic Approach in Magnetic Separators Design. *Studies in Computational Intelligence. Computational Methods for the Innovative Design of Electrical Devices*. 2011. Vol. 327. P. 201-217.

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

90. Шведчикова И. А. Эволюционно-экспериментальные исследования функционального класса магнитных сепараторов. *Праці Таврійського державного агротехнічного університету*. 2013. Вип. 13, том 4. С. 96-103.

91. Gerber R., Robert R. B. High Gradient Magnetic Separation. Research Studies Press. 1983. 208 p.

92. Электромагнитный фильтр: пат. 808159 СССР: М. Кл. В 03 С 1 / 30 (СССР). № 2389969 / 23-26; заяв. 23.07.1976, опубл. 28.02.1981. Бюл. № 8. 2 с.

93. Полиградиентный электромагнитный (магнитный) сепаратор: пат. 262785 СССР. МПК В 03с (СССР). № 1234929 / 22-3; заяв. 20.04.1968, опубл. 10.02.1970. Бюл. № 7. 2 с.

94. Магнитный фильтр для очистки воды: пат. 301172 СССР: МПК В 03с 1 / 30 (СССР). № 1367417 / 23-26; заяв. 23.08.1969, опубл. 21.04.1971. Бюл. № 14. 2 с.

95. Полиградиентный магнитный сепаратор: пат. 910202 СССР: М. Кл. В 03 С 1 / 30 (СССР). № 2926000 / 22-03; заяв. 20.05.1980, опубл. 07.03.1982. Бюл. № 9. 3 с.

96. Электромагнитный сепаратор: пат. 1087176 СССР: В 03 С 1 / 02 (СССР). № 3538187 / 23-26; заяв. 10.01.1983, опубл. 23.04.1984. Бюл. № 15. 2 с.

97. Кузнецов Ю. Н., Шинкаренко В. Ф. Генетический подход к созданию сложных технических систем. *Технологічні комплекси*. 2012. № 1, 2 (5,6). С. 21-29.

98. Shinkarenko V. F., Zagirnyak M. V., Shvedchikova I. A. Methods for using intertype homology for synthesizing new structural versions of magnetic separators. *Russian Electrical Engineering*. 2010. Vol. 81, Issue 9. P. 504-508.

99. Загирняк М. В., Шведчикова И. А. Генетический синтез структур магнитных сепараторов. *Техническая электродинамика*. 2010. № 4. С. 43-47.

100. Романченко Ю. А., Шведчикова І. 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.

101. Романченко Ю. А., Шведчикова І. О. Моделювання внутрішньої структури поліградієнтних середовищ 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.

102. Шведчикова И. А., Луценко И. А., Романченко Ю. А. Исследование закономерностей структурообразования полиградиентных сред. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2015. №4/7 (76). С. 62-67.

103. Zagirnyak M., Shvedchikova I., Miljavec D. Forming a genetic record of cylindrical magnetic separator structures. *Przegląd elektrotechniczny (Electrical Review)*. 2011. No. 3. P. 220-223.

104. Zagirnyak M., Shvedchikova I., Tkach S. Automation design of multi-unit electromechanical structures of magnetic separators. *Przegląd elektrotechniczny (Electrical Review)*. 2014. No. 12. P. 292-295.

105. Шинкаренко В. Ф., Августинович А. А., Махновецкая М. А., Лысак В. В. Структурная изомерия и ее моделирование в задачах генетического

синтеза электромеханических структур. *Электротехника и электромеханика*. 2009. № 1. С. 33-36.

106. Шафрановский И. И., Плотников Л. М. Симметрия в геологии. Ленинград : Недра, 1975. 144 с.

107. Урманцев Ю. А. Симметрия природы и природа симметрии. Москва : Мысль, 1974. 229 с.

108. Электромагнитный сепаратор: пат. 828949 СССР: В 03 С 1 / 30 (СССР). № 2464001 / 22-03; заяв. 25.03.1977, опубл. 07.05.1981, Бюл. № 17. 3 с.

109. Шведчикова И.А. Исследование и разработка электромагнитных касетных сепараторов: дис. канд. техн. наук: 05.09.05 / Ворошиловградский машиностроительный институт. Ворошиловград, 1989. 176 с.

110. Патент України 103156 В03С 1/00. Електромагнітний сепаратор / Шведчикова І. О., Романченко Ю. А.; заявл. 05.05.15; опубл. 10.12.15, Бюл. № 23. – 5 с.

111. Патент України 107311 В03С 1/00. Електромагнітний сепаратор / Шведчикова І. О., Романченко Ю. А.; заявл. 29.12.15; опубл. 25.05.16, Бюл. № 10. – 5 с.

112. Мостыка Ю. С., Шутов В. Ю., Ахметшина И. В. Разработка математической модели процесса улавливания слабомагнитных частиц в шаровой рабочей зоне ВГМС. *Теория и практика процессов разделения*. 1994. С. 43-47.

113. 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 електроенерготехніки та автоматики»* (Київ 2018 р.), С. 355-356.

114. Тыртыгин В. Н. Повышение эффективности процесса очистки промышленного сырья от парамагнитных примесей магнитным методом: автореф. дис. канд. техн. Наук / Ивановский государственный химико-технологический университет. Иваново, 2010. 20 с.

115. Нестеренко А. П., Капустянов В. Н., Шведчикова И. А. Эффективность работы транспортного магнитносепарирующего комплекса. *Вестник Восточноукраинского государственного университета*. 1996. С. 159-165.
116. Шведчикова И. А. Технические параметры магнитных сепараторов. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2006. №6 (100). Ч.2. С.35-39.
117. Кармазин В. И. Современные методы магнитного обогащения руд черных металлов. Москва : Госгортехиздат, 1962. 659с.
118. Евдокимов А. А., Чарыкин В. И. Теоретическое обоснование критерия эффективности извлечения ферромагнитных частиц из потока жидкости в электромагнитном сепараторе УМС-4М. *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2013. № 9 (107). С. 106-110.
119. Антонов С. Н., Шарипов И. К., Шемякин В. Н., Адошев А. И. Моделирование магнитных систем с использованием систем автоматизированного проектирования. *Достижения науки и техники АПК*. 2010. №10. С. 75-78.
120. Антонов А. Е. Электрические машины магнитоэлектрического типа. Киев : НАН Украины, Институт электродинамики, 2011. 216 с.
121. Wei Ge, Armando Encinas, Elsie Araujo, Shaoxian Song. Magnetic matrices used in high gradient magnetic separation (HGMS): A review. *Results in Physics*. 2017. №7. P.4278-4286.
122. Кармазин В. В., Сыса П. А. Расширение объемов сырья бездоменного производства стали за счет получения высококачественных магнетитовых концентратов. *Сбраник Академіи горних наук України*. 2014. Режим доступа: <http://agnu.com.ua/sbornik/2014/PDF/6.pdf>.
123. Сильвестер П., Феррари Р. Метод конечных элементов для радиоинженеров и инженеров-электриков. Москва : Мир, 1986. 229 с.
124. Пантелят М. Г., Шульженко Н. Г. Использование векторного магнитного потенциала в конечноэлементном анализе нестационарных

трёхмерных электромагнитных полей в проводящих средах. *Электротехника и электромеханика*. 2007. № 5. С. 42 – 47.

125. Bíró O., Preis K. On the use of the magnetic vector potential in the finite element analysis of three-dimensional eddy currents. *IEEE Transactions on Magnetism*. 1989. v. 25, No. 4. P. 3145 – 3159.

126. Гольдберг О. Д. Проектирование электрических машин. Москва : Высшая школа, 1984. 432 с.

127. Голенков Г. М., Бондар Р. П., Макогон С. А., Подольцев А. Д., Богаенко М. В., Попков В. С. Численный расчет магнитного поля и основных характеристик электровибратора на основе коаксиально-линейного двигателя с постоянными магнитами. *Електротехніка і Електромеханіка*. 2007. №1. С.8-12.

128. Шведчикова І. О., Жидков А. Б. Магнітні методи неруйнівного контролю технічних об'єктів. Сєверодонецьк: вид-во СНУ ім. В. Даля. 2018. 196 с.

129. Полетаев В. А., Перминов С. М., Пахолкова Т. А., Перминова А. С. Исследование магнитного поля рабочего зазора магнитожидкостного герметизатора классической конструкции. *Вестник ИГЭУ*. 2011. Вып.5. С. 42– 46.

130. Деркач В.Г. Специальные методы обогащения. Москва : Недра, 1966. 338 с.

131. Шведчикова И. А., Бранспиз Ю. А. Коэффициент неоднородности магнитного поля для магнитных сепараторов с многополюсными цилиндрическими системами. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2011. № 7 (161). Ч.1. С.164-169.

132. Щерба А. А., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. и др. Математическое моделирование и численный расчет неоднородных электрических полей, удельных потерь и плотности поверхностных зарядов в полиэтиленовой модифицированной изоляции высоковольтных силовых кабелів. *Техн. Електродинаміка. Тем. вип.: Силова електроніка та енергоефективність*. 2006. Ч.2. С. 85-89.

133. Подольцев А. Д., Кучерявая И. Н. Многомасштабное моделирование в электротехнике: моногр. Киев : Институт электродинамики НАН Украины, 2011. 239 с.

134. Перминов С. М. Исследование магнитного поля около шероховатой магнитопроводящей поверхности. *Вестник ИГЭУ*. 2012. Вып. 1. Режим доступа: http://portalnew.ispu.ru/files/str_24-27_0.pdf.

135. Логунова Г. Л. Анализ основных показателей медицинских гамма-камер. *Штучний інтелект*. 2010. № 4. С. 245-252.

136. Николов Н. А. Количественный критерий пространственной неоднородности электромагнитного поля в ближней точке рамочного излучателя. *Кибернетика и системный анализ*. 2013. № 2. С. 170-177.

137. Толмачев С. Т., Бондаревский С. Л. Некоторые вопросы полиградиентной магнитной сепарации. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. 2012. Вип. 1 (17). С. 31–36.

138. 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.

139. Shvedchykova I., Romanchenko J., 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)*. Kremenchug, 2018. P. 144-147. doi: [10.1109/MEES.2017.8248873](https://doi.org/10.1109/MEES.2017.8248873).

140. Мацкевич Е. П. Исследование неоднородности изображений в пространственной области. Режим доступа: <http://elib.bsu.by/bitstream/123456789/9664/1/3.pdf>.

141. Ивченко Г. И., Медведев Ю. И. Введение в математическую статистику: Учебник. Москва : Издательство ЛКИ, 2010. 600 с.

142. Масюткин Е.П. Извлечение ферромагнитных примесей из сыпучих сельскохозяйственных материалов. *Вестник КрасГАУ*. 2016. № 11. С. 54-60.

143. Пащенко И. Г. Excel. Шаг за шагом. Москва : Эксмо, 2007. 352 с.

144. Shvedchikova I. Estimation of magnetic field parameters of electromagnetic devices for granular materials processing by numerical method. *Proc. Of 21 Seminar on Fundamentals of Electrotechnics and Circuit theory SPETO'98*. Poland, Gliwice-Ustron. 1998. p. 141-143.

145. Тагунов П. Е. Создание высокоградиентных сепараторов на постоянных магнитах для извлечения измельченных слабомагнитных минералов: дис. канд. техн. наук: 25.00.13 / Московский государственный горный университет. Москва, 2012. 125 с.

146. 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.

147. Song C. C., Ning G. H., Yuan Z. Y., Jing L. X., Hui C. C., Yao M.S. Investigation of the influence of different matrix rotation angles on the surrounding magnetic field in a uniform magnetic field. *Ming Metall Eng.* 2014. 34. P. 290-294.

148. Svoboda J. Magnetic Techniques for the Treatment of Materials. *Kluwer Academic Publishers*. 2004. P. 99

149. Shun Z. Y., Liang S. C., Juan W.H., Yue W. F. Experimental study on magnetic separation by conical flux gathering media and optimization of its cone angle. *Min Process Equip.* 2012. P. 74-79.

150. Нейман Л. Р., Демирчян К. С. Теоретические основы электротехники. В 2-х т. Т. 2. Ленинград : Энергоиздат, 1981. 416 с.

151. Романченко Ю. А., Шведчикова І. А. Конструктивні рішення для двохстадійної магнітної сепарації сыпучих матеріалів. *Технологія-2016: матеріали XIX міжнародної науково-технічної конференції* (Сєверодонецьк 22-23 квітня 2016 р.). Сєверодонецьк: СНУ ім. В. Даля, 2016. – С. 192-193.

152. Патент 133530 Україна : B03C 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.

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

ДОДАТКИ

ТЕХНІЧНИЙ ОПИС БАЗОВОЇ КОНСТРУКЦІЇ 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, які мають скошені кути і прикріплені до торцевих частин осердь 1; матрицю, встановлену з можливістю зворотно-поступального руху у вертикальній площині в проміжку між полюсами 3 і виконану у вигляді короба прямокутного перетину без дна. Дві протилежні стінки 4 матриці, що паралельні полюсам 3, виконані з феромагнітного матеріалу, а дві інші стінки 5 – з немагнітного, при цьому до феромагнітних стінок 4 кріпляться зсередини декілька рядів паралельних похило встановлених феромагнітних пластин 6 з трикутними виступами, зверненими всередину матриці, 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 матрицею сепаратора, і висувного немагнітного приймального бункера 10, що встановлюється під сепаратором [109, 110].

Пристрій працює наступним чином. У робочому режимі висувний приймальний бункер 10 відсувається в сторону від матриці (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), внаслідок того, що обмотки котушок намагнічування 2 з'єднані зустрічно та в осердях 1 магнітні потоки направлені однаково. Це дозволяє значно збільшити напруженість магнітного поля в зоні 1 (на рис. А.4

зона 1 відзначена пунктиром), тобто в місці розташування матриці для проходження сипучого матеріалу, за рахунок додавання магнітних полів від обох намагнічуючих котушок [109, 110].

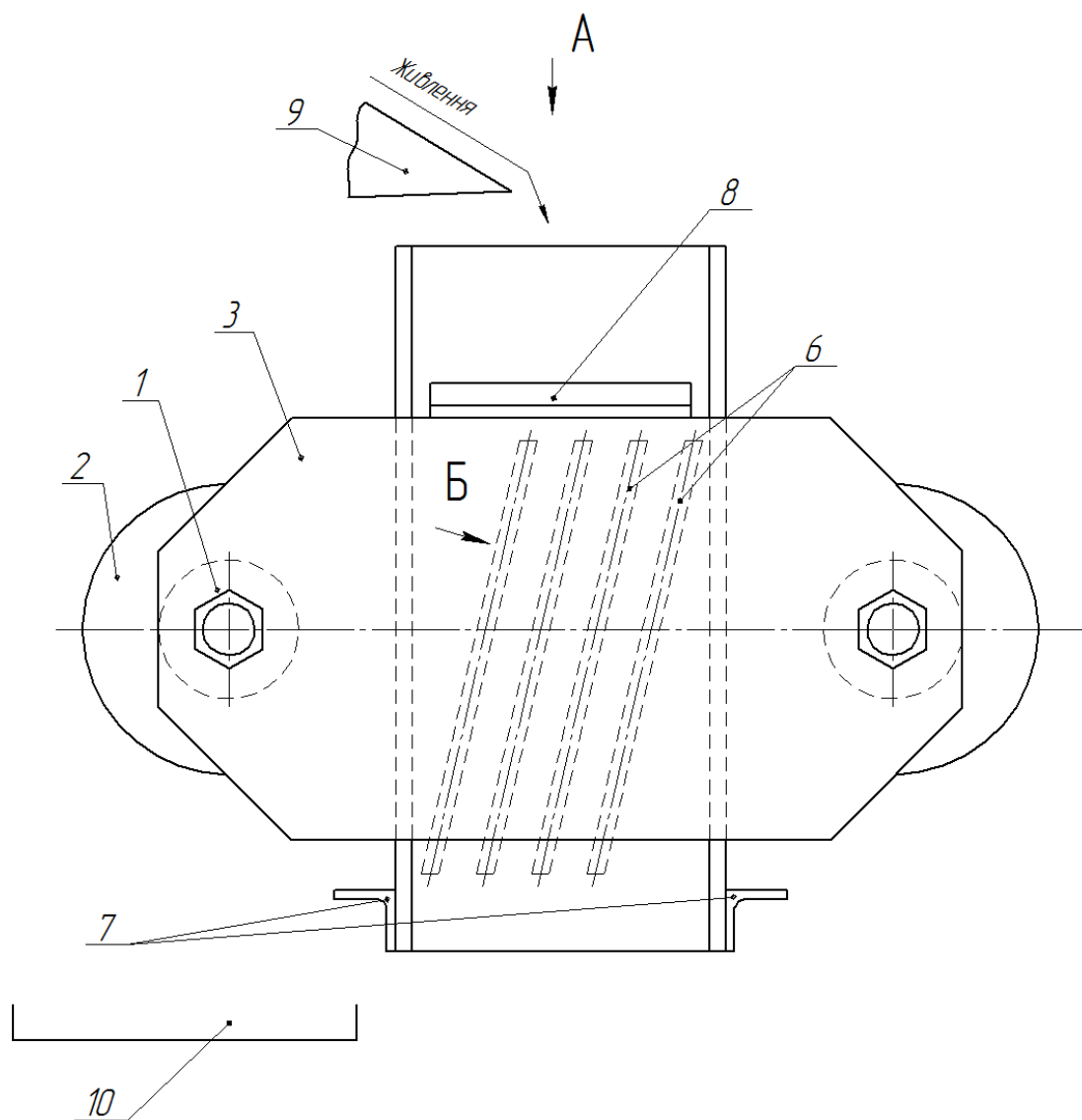


Рисунок А.1 – Зовнішній вигляд електромагнітного сепаратора

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

Немагнітний сипкий матеріал разом з дрібнодисперсними феромагнітними або слабомагнітними включеннями, які містяться в ньому,

подається за допомогою живильника 9 безпосередньо в середину матриці на похилі паралельні пластини 6 з трикутними виступами, зверненими всередину матриці [109, 110].

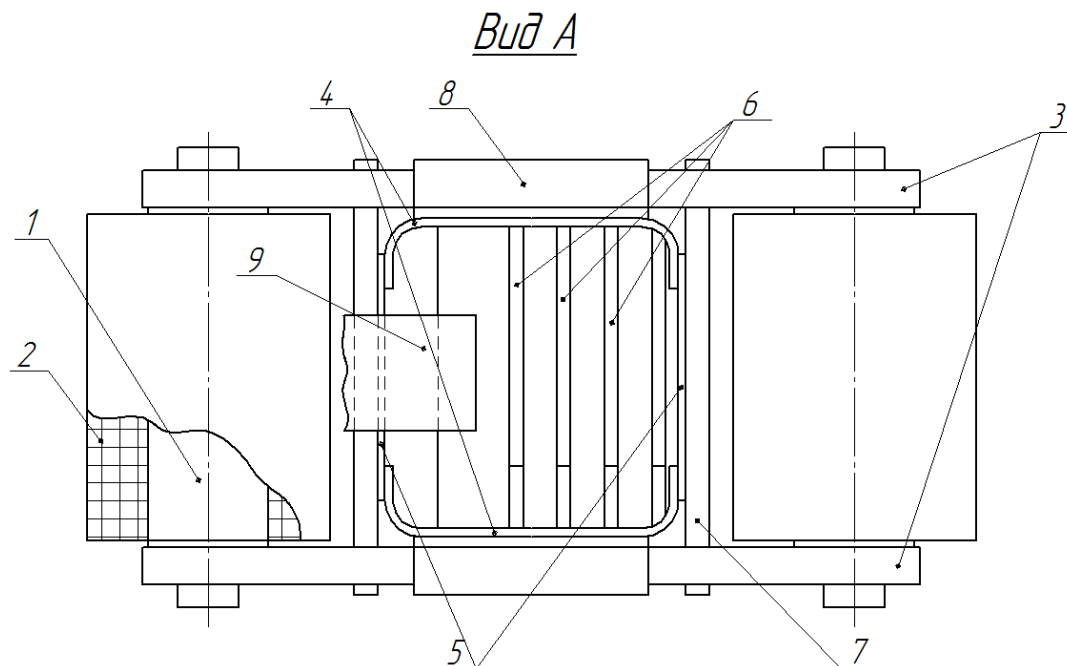


Рисунок А.2 – Зовнішній вигляд електромагнітного сепаратора (вид А)

Наявність односторонніх трикутних виступів та впадин у пластин 6 дозволяє отримати в робочому проміжку, що утворений пластинами, електромагнітне поле з високою неоднорідністю. Найбільші значення градієнт напруженості магнітного поля набуватиме у кромek трикутних виступів [109, 110]. 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 забезпечить істотне зростання надійності вилучення дрібнодисперсних феромагнітних або слабомагнітних часток.

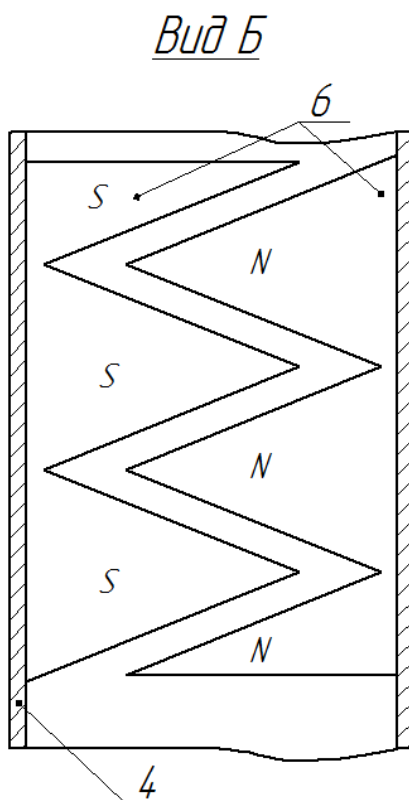


Рисунок А.3 – Полюса-пластини

Сипкий матеріал подається на похило встановлені пластини 6 в підвішеному стані. Частки матеріалу, вдаряються з кромками пластин, в наслідок чого постійно змінюють напрямки свого руху. Це сприяє більш інтенсивному перемішуванню матеріалу. Перемішування та зважений стан матеріалу під час проходження через матрицю сепаратора полегшують видалення феромагнітних включень з немагнітного матеріалу. При цьому похило встановлені пластини 6 розташовані під таким кутом, щоб сепаруємий матеріал проходив через декілька робочих проміжків, що утворені пластинами 6. Це збільшує час перебування сипкого матеріалу в області магнітного поля з високим градієнтом та сприяє більш надійному витягненню магнітних домішок.

Одже, в робочому режимі немагнітна фракція сипкого матеріалу вільно проходить через матрицю сепаратора, а дрібнодисперсні феромагнітні або слабомагнітні частки під дією магнітних сил "налипають" та накопичуються на феромагнітних пластинах 6 [109, 110].

Для періодичного розвантаження вилучених і "залипших" до феромагнітних пластин 6 слабомагнітних та дрібнодисперсних феромагнітних частинок котушки 2 відключаються від мережі, а приймальний бункер 10 встановлюється під матрицю. При цьому магнітне поле різко послаблюється і матриця 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.

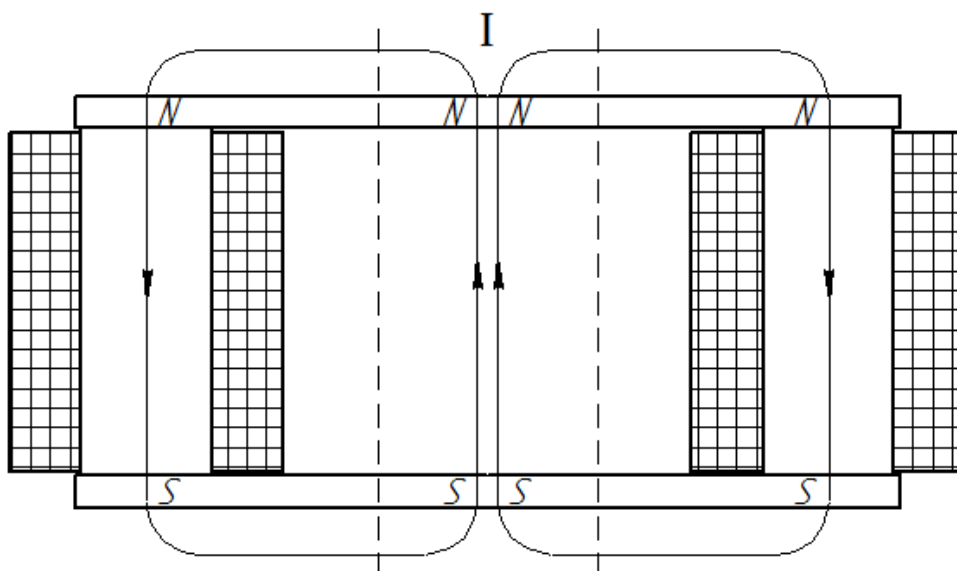


Рисунок А.4 – Схема електромагнітної системи

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.

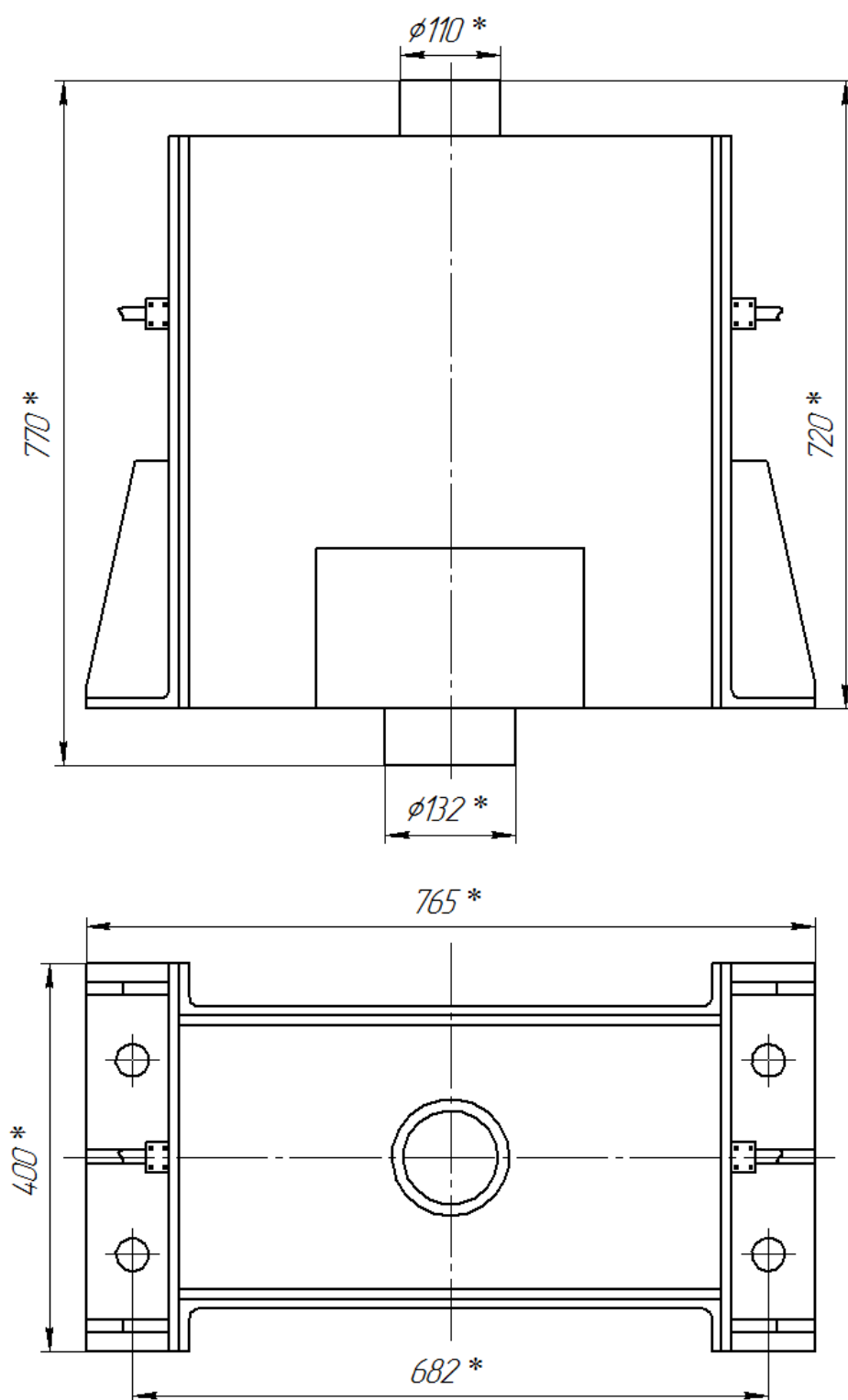


Рисунок А.5 – Загальний вигляд сепаратора і геометричні розміри

Технічні характеристики сепаратора наведено у табл. А.1.

Таблиця А.1 – Технічні характеристики електромагнітного сепаратора базової конструкції

№	Найменування параметрів	Показник
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

Таблиця Б.1 – Значення індукції магнітного поля, виміряні на дослідному зразку поліградієнтного електромагнітного сепаратора

Точки	Ряд пластин	Індукція магнітного поля	
		мТл	відн. од.
1	внутрішній	9,1	1,04
	крайній	9,4	0,92
2	внутрішній	108,6	10,97
	крайній	88,5	9,75
3	внутрішній	108,6	10,97
	крайній	88,5	9,75
4	внутрішній	106,6	10,8
	крайній	90,5	9,97
5	внутрішній	108,6	10,97
	крайній	88,5	9,75
6	внутрішній	108,6	10,97
	крайній	88,5	9,75
7	внутрішній	9,1	1,04
	крайній	9,4	0,92

"ЗАТВЕРДЖУЮ"

Директор ДП "Станично-Луганське

ДЛІМГ

Чегринцев Сергій Миколайович

ГОСПОДАРСТВО

код 00900036

«25»

2019 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ
наукових результатів дисертаційної роботи
Романченко Юлії Андріївни
«Поліградієнтні електромагнітні сепаратори з удосконаленими
структурами пластинчастих матриць»
на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук
за спеціальністю 05.09.01 «Електричні машини й апарати»

Результати дисертаційної роботи Романченко Юлії Андріївни «Поліградієнтні електромагнітні сепаратори з удосконаленими структурами пластинчастих матриць» впроваджені на підприємство, що дає можливість відокремлювати дрібнодисперсні феромагнітні частинки розміром від 0,005 мм до 1 мм з дисперсних середовищ.

Впровадження поліградієнтного магнітного сепаратора забезпечує підвищення якості вихідного продукту та його екологічність.

Результати досліджень випробувані на діючому виробництві та підтверджують достатню точність математичного моделювання й основні висновки дисертаційної роботи.

Директор
ДП "Станично-Луганське ДЛІМГ"



Чегринцев С. М.

"ЗАТВЕРДЖУЮ"

Проректор з наукової роботи

Східноукраїнського національного
університету імені Володимира Даля

проф. Потапенко Е.В.



14 "березня" 2019 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

наукових результатів дисертаційного дослідження Романченко Ю.А. на тему «Поліградієнтні електромагнітні сепаратори з удосконаленими структурами пластинчастих матриць» на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.01 «Електричні машини і апарати»

Голова та члени комісії у складі декана факультету інженерії к.т.н., доц. Кудрявцева С. О., завідувача кафедри електричної інженерії к.т.н., доц. Морозова Д. І., д.т.н., проф. Кириченко І. О. та к.т.н., доц. Філімоненко Н. М. засвідчили, що результати дисертаційної роботи Романченко Ю. А. на тему «Поліградієнтні електромагнітні сепаратори з удосконаленими структурами пластинчастих матриць» впроваджені в навчальний і науковий процес Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. Результати використовуються в лабораторних та практичних заняттях, науково-дослідній роботі студентів, у курсовому проектуванні дисциплін «Моделювання електромеханічних систем», «Системне проектування електромеханічних пристроїв», «Організація, планування та проведення експерименту», «Технологія виробництва електротехнічного обладнання», «Електричні апарати», «Спеціальні питання теорії електричних машин та апаратів», «Основи теорії структур електромеханічних систем». Результати дисертаційної роботи використовуються в науково-дослідній роботі студентів та при виконанні дипломних робіт бакалаврів зі спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.

Комісія встановила відповідність роботи вимогам експлуатації лабораторного обладнання та освітнім програмам спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.

Голова комісії

Члени комісії:

С. О. Кудрявцев

Д. І. Морозов

І. О. Кириченко

Н. М. Філімоненко

Список публікацій здобувача

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, Cross Ret*).

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, РИНЦ*).

8. Романченко Ю. А., Шведчикова І. 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, Directory of Research Journals Indexing, Universal Impact Factor, Research Bible, Scientific Indexing Services, eLIBRARY*).

9. Романченко Ю. А., Шведчикова І. 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, РИНЦ, Index Copernicus, Research Bible, PBN, JIF, OAJI, InfoBase Index, ISI, UIF, CiteFactor, Google Scholar, Crossref*).

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 електроенерготехніки 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 І. О. Моделювання внутрішньої структури поліградієнтних середовищ 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* (Сєверодонецьк 22-23 квітня 2016 р.). Сєверодонецьк: СНУ ім. В. Даля, 2016. – С. 192-193.

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

15. Романченко Ю. А., Шведчикова И. А. Теоретические основы расчета силового поля магнитного сепаратора. *II Всеукраїнська інтернет-конференція студентів, аспірантів та молодих учених «Технічні науки в Україні: погляд у майбутнє».* (Сєверодонецьк 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 (Сєвєродонецьк, Люблін 3-5 травня 2017 р.). Сєвєродонецьк: СНУ ім. В. Даля, 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 електроенерготехніки 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 : B03C 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 : B03C 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 : B03C 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.