

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»**

**МЕЛКОНОВА ІННА ВІКТОРІВНА**



УДК 621.318:621.928.8

**ДИСКОВИЙ МАГНІТНИЙ СЕПАРАТОР  
З ПОКРАЩЕНИМИ УМОВАМИ РОЗВАНТАЖЕННЯ**

Спеціальність 05.09.01 – Електричні машини й апарати

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків–2021

Дисертацією є рукопис.

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

**Науковий керівник**

доктор технічних наук, професор  
**Шведчикова Ірина Олексіївна**,  
Київський національний університет технологій та дизайну Міністерства освіти і науки України,  
професор кафедри комп'ютерної інженерії та електромеханіки.

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, професор  
**Мілих Володимир Іванович**,  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»  
Міністерства освіти і науки України,  
завідувач кафедри електричних машин;

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

Захист відбудеться 06 травня 2021 р. о 12<sup>30</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.08 в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2.

Автореферат розісланий 30 березня 2021 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



Олена ЮР'ЄВА

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** У багатьох галузях промисловості широко використовують дрібнодисперсні сипучі матеріали. Для вилучення небажаних феромагнітних домішок із сипких матеріалів застосовують сепаратори на постійних магнітах, які мають суттєві переваги над своїми електромагнітними аналогами: споживають меншу кількість електроенергії; працюють в умовах підвищеної вологості та запиленості; не потребують корегування технологічного процесу; можуть бути оснащені системами автоматичного розвантаження.

При встановленні над або під транспортуючим органом (наприклад, конвеєрною стрічкою) із сипким матеріалом використовують магнітні сепаратори дискового типу, робочий орган яких має форму диску з торцевою активною поверхнею. Дискові магнітні сепаратори доцільно використовувати для невеликих конвеєрних систем з шириною стрічки 200–650 мм при розміщенні сипких матеріалів на стрічці конвеєра тонким шаром. За цих умов дискові магнітні сепаратори, в яких винесення магнітних матеріалів до зони розвантаження здійснюється обертовими розвантажувальними дисками, мають переваги перед іншими типами магнітосепарувальних пристроїв. У порівнянні з магнітними сепараторами, що мають активну поверхню циліндричної форми (шківні та барабанні сепаратори), торцеві конструкції виграють за рахунок більших розмірів робочої зони вилучення. Відсутність у дискових сепараторах ефекту провисання розвантажувальної стрічки, який є характерним для підвісних стрічкових сепараторів з плоскою формою активної поверхні, дозволяє встановлювати їх в безпосередній близькості від поверхні матеріалу. Робочий орган дискового сепаратора є центрально-симетричною фігурою, через те характер установки сепаратора не залежить від напрямку руху стрічки конвеєра. Малий осьовий розмір дискових магнітних сепараторів забезпечує також їх компактність і зручність в експлуатації, конструктивну сумісність з приводним двигуном.

Однією з актуальних експлуатаційних проблем сепараторів на постійних магнітах є проблема розвантаження вилучених феромагнітних включень. Вирішення зазначеної проблеми пов'язане з розробкою нових конструктивних варіантів магнітних сепараторів, у тому числі дискових, із таким розподілом магнітного поля в робочій зоні, при якому забезпечується самоочищення робочої поверхні сепаратора без застосування додаткових пристроїв, без зупинки робочого процесу та без погіршення ефективності процесу вилучення. Враховуючи вищенаведене, актуальним науковим завданням є покращення умов розвантаження дискових сепараторів із магнітними системами на основі постійних магнітів при вилученні феромагнітних включень із сипких немагнітних середовищ, які транспортуються стрічковими конвеєрами.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконана відповідно до напряму наукових досліджень кафедри електричної інженерії Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, а також є складовою частиною держбюджетної теми, в якій здобувач брав участь як співвиконавець, «Розробка нових приладів для дефектоскопії сталевих колісних пар» (№ держреєстрації 0117U000562), в якій автором проведено чисельно-польові розрахунки магнітного поля, індукованого ступінчастою поверхнею намагніченого об'єкту.

**Мета і задачі дослідження.** Мета роботи полягає у покращенні розвантаження вилучених феромагнітних включень з немагнітних сипких середовищ дисковими магнітними сепараторами шляхом розроблення вдосконалених структур магнітних систем із заданим розподілом магнітного поля в робочій зоні.

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

- аналіз конструктивних та функціональних особливостей сепараторів на основі постійних магнітів, призначених для очищення немагнітних сипких середовищ від небажаних феромагнітних включень, та способів покращення умов їх розвантаження;

- визначення закономірностей структуроутворення магнітних сепараторів дискового типу та синтез їх нових структурних варіантів;

- дослідження закономірностей просторового розподілу силового магнітного поля в робочій зоні дискового магнітного сепаратора з удосконаленою магнітною системою та вибір її основних конструктивних параметрів;

- розрахунково-експериментальні дослідження робочого процесу дискових магнітних сепараторів та визначення напрямків подальших удосконалень їхніх магнітних систем.

*Об'єкт дослідження* – сепарування феромагнітних включень із сипких немагнітних середовищ.

*Предмет дослідження* – вплив розподілу робочого магнітного поля на умови розвантаження дискових магнітних сепараторів, нові технічні рішення.

**Методи дослідження.** Теоретичною та методологічною основою дослідження є фундаментальні положення теорії структурної організації та еволюції електромеханічних систем, теорії електромагнітного поля та теоретичної електротехніки. Для визначення видового різноманіття функціонального класу дискових магнітних сепараторів застосований комплексний аналіз та структурно-системний підхід. Аналіз закономірностей просторового розподілу силового магнітного поля в робочій зоні дискового магнітного сепаратора виконано методом скінченних елементів в двовимірній та тривимірній постановках з використанням пакету прикладних програм COMSOL Multiphysics, для побудови геометрії моделей застосовано програму КОМПАС. Для розв'язання диференційного рівняння, що описує рух феромагнітного тіла через матеріал, задіяний метод Бернуллі. Для перевірки теоретичних положень і наукових результатів використані методи фізичного експерименту, відеофіксації процесів вилучення та розвантаження феромагнітних тіл, статистичної обробки експериментальних даних.

**Наукова новизна одержаних результатів:**

- удосконалено структурно-системний підхід щодо функціонального класу магнітних сепараторів, що дозволило вперше визначити межі існування, кількісний склад і генетичну структуру базових та гібридних видів дискових магнітних сепараторів та здійснити спрямований пошук їх нових структурних різновидів;

- вперше визначено раціональні характеристики (форму та геометричні розміри) постійних магнітів магнітної системи дискового сепаратора нового конструктивного виконання за допомогою методу багатоваріантних чисельно-

польових розрахунків, що дозволило врахувати просторовий розподіл силової функції магнітного поля;

– набув подальшого розвитку математичний опис робочого процесу магнітних сепараторів, на основі якого для дискового магнітного сепаратора отримано аналітичний вираз, що враховує основні геометричні розміри робочого простору сепаратора, матеріал постійних магнітів, параметри сипкого матеріалу та феромагнітних тіл, швидкість руху стрічки конвеєру, що наближує результати розрахунків до реальних процесів.

#### **Практичне значення отриманих результатів:**

– за результатами синтезу розроблено каталоги структур для базових видів магнітних сепараторів, а також каталоги гібридних структур, які використані для вибору нових технічних рішень дискових магнітних сепараторів із покращеними умовами розвантаження;

– експериментально обґрунтовано спрямований вибір конкурентоспроможних технічних рішень щодо вдосконалення конструкції дискового магнітного сепаратора, що дозволило отримати патенти (патенти України №116288, №136362);

– запропоновано використання у дисковому магнітному сепараторі нового конструктивного виконання комбінованої магнітної системи із часткою феритової складової у загальній масі полюсів до 20 %, що дозволить зменшити на 25 % вартість і на 10 % – масу магнітної системи сепаратора;

– результати дисертаційної роботи впроваджено в навчально-методичній роботі на кафедрі електричної інженерії Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля при викладанні дисциплін: «Енергозбереження в електромеханічних установках», «Моделювання електроенергетичних систем», «Сучасні технології та обладнання в електроенергетиці»;

– 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 впроваджено на підприємстві ТОВ «Краєвид» (ЗАТ «Згурівський цукровий завод»).

**Особистий внесок здобувача.** Основні результати, які складають суть дисертаційної роботи, отримано автором самостійно. У публікаціях, що написані в співавторстві, здобувачеві належать: у [1] – комп'ютерні розрахунки магнітного поля; [2, 4–5] – дослідження впливу форми постійних магнітів методом скінченних елементів; вибір раціональних геометричних параметрів; [3, 6] – визначення розподілу силової функції в робочій зоні магнітного дискового сепаратора з використанням програмного пакету COMSOL Multiphysics; [7] – чисельне моделювання магнітного поля в двовимірній постановці; [8] – генетичний синтез дискових магнітних сепараторів; [9] – розробка фізичної моделі дискового магнітного сепаратора, визначення частоти обертання немагнітного розвантажувального диску сепаратора та дальність вильоту вилучених феромагнітних предметів з його поверхні; [11] – визначення напрямків покращення розвантажувальної здатності дискового магнітного сепаратора.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертаційної роботи були представлені й обговорені на Міжнародних симпозиумах та конференціях: «Проблеми електроенергетики, електротехніки та електромеханіки» (Харків, 2016 р., 2017 р.); «Технологія» (Сєверодонецьк, 2016 р., 2017 р., 2018 р.); «Технічні науки в Україні: погляд у майбутнє» (Сєверодонецьк, Київ, 2016 р., 2017 р., 2018 р.); «Університетська наука. Проблеми міжнародної інтеграції» (Люблін, Польща, 2017 р.); International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (Kremenchug, 2017), «Мехатронні системи: інновації та інжиніринг» (Київ, 2018 р.); «Актуальні проблеми життєдіяльності суспільства» (Кременчук, 2019 р.); «Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК» (Київ, 2019 р.); «Електромеханічні та інформаційні системи» (Київ, 2020 р.).

**Публікації.** Основні положення та результати дисертації відображені у 23 друкованих працях, зокрема: 2 статті у закордонному виданні (Естонія), занесеному до міжнародної наукометричної бази даних Scopus; 1 стаття у закордонному виданні (Польща); 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; 5 статей 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» тощо, 10 тез доповідей на конференціях, 2 патенти України на корисну модель. Чотири роботи опубліковано без співавторів.

**Структура та обсяг дисертації.** Повний обсяг дисертації становить 189 сторінок друкованого тексту й містить анотацію, вступ, чотири розділи, висновки, список використаних джерел і п'ять додатків. Основна частина викладена на 156 сторінках. Список використаних джерел складається зі 136 найменування на 14 сторінках. Дисертація містить 54 рисунка і 20 таблиць, з яких 1 рисунок і 2 таблиці на окремих 3 сторінках.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

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

У **першому розділі** дисертаційної роботи проведено аналіз конструктивних та функціональних особливостей сепараторів на постійних магнітах; виконано огляд конструкцій магнітних сепараторів для очищення сипких матеріалів, які транспортуються стрічковими конвеєрами; обґрунтовано вибір методів розрахунку силових магнітних полів сепараторів на постійних магнітах.

Наведено, що в останні роки для поділу сумішей, які складаються з феромагнітних і немагнітних дрібнодисперсних матеріалів, у будівельній, харчовій, фармацевтичній та інших галузях промисловості знайшли застосування сепаратори на основі постійних магнітів. Це пов'язано, перш за все, із зменшенням енерговитрат на створення магнітного поля в робочій зоні сепаратора. На основі аналізу тенденцій

застосування постійних магнітів у магнітних сепараторах встановлено, що найбільше поширення при побудові магнітних систем знайшли феритові магніти, які відрізняються відносно невеликою вартістю, високою стабільністю магнітних властивостей та корозійною стійкістю. З огляду на те, що основним недоліком феритових магнітів є невисока магнітна індукція, то із розповсюдженням нових постійних магнітів на основі рідкоземельних висококоерцитивних матеріалів Sm-Co і Nd-Fe-B феритові магніти використовуються дедалі рідше.

В дисертації доведено, що в сучасних пристроях для магнітної сепарації використовують переважно магніти на основі сплаву Nd-Fe-B, які в 2–4 рази дешевше, ніж магніти Sm-Co. Крім того, постійні магніти сплаву Nd-Fe-B характеризуються достатньо високою залишковою магнітною індукцією  $B_r$  (до  $B_r=1,44$  Тл), температурною стабільністю (до  $150^\circ\text{C}$ ), мають невеликий об'єм, що припадає на одиницю енергії. До недоліків магнітів слід віднести невисоку робочу температуру деяких марок, а також низьку корозійну стійкість, яка усувається покриттям поверхні магнітів захисними шарами міді, цинку, нікелю, хрому. На основі аналізу інформаційних джерел показано, що при побудові магнітних систем сепараторів застосовують також комбінування магнітних матеріалів різних типів. Властивості таких магнітів визначаються як магнітними властивостями та об'ємним змістом їх складових, так і схемою складання. Зроблено висновок про перспективність теоретичного й експериментального вивчення питання щодо впливу матеріалу магнітів та компоновальних рішень магнітних систем на розподіл магнітного поля в робочих зонах магнітосепарувальних пристроїв.

Встановлено, що різноманітність форм, конструктивних компонок і напрямків намагніченості постійних магнітів дозволяє створювати нові магнітні системи магнітосепарувальних пристроїв з необхідним розподілом магнітного поля в робочих проміжках. Так, при використанні багатополюсних підвісних магнітних систем обертового чи поступального руху в робочій зоні створюються локальні обертові чи біжучі магнітні поля, що призводить до розширення функціональних можливостей пристроїв (покращення умов розвантаження, якості очищення сипкої речовини).

За результатами аналітичного огляду конструкцій магнітних сепараторів для очищення сипких матеріалів, що транспортуються стрічковими конвеєрами, встановлено, що за конструктивними ознаками магнітні сепаратори цього типу поділяють на підвісні та шківні. В роботі виокремлено дві основні групи підвісних магнітних сепараторів в залежності від умов розвантаження вилучених феромагнітних включень: з ручним розвантаженням та саморозвантажувальні пристрої. Підвісні сепаратори з ручним розвантаженням застосовують при невеликій кількості феромагнітних частинок у вихідному продукті. Пристрої із самоочищенням забезпечують безперервне (або періодичне) вилучення і розвантаження феромагнітних включень. Саморозвантажувальні магнітні сепаратори містять спеціальні розвантажувальні пристрої (екрани), для яких застосовують: розвантажувальні транспортерні стрічки або немагнітні пластини (рейки) поступального руху; очисники у вигляді скребків та розвантажувальних дисків обертального руху.

Останнім часом дискові магнітні сепаратори для невеликих конвеєрних систем з шириною стрічки 200–650 мм при розміщенні сипких матеріалів, які підлягають сепарації, на стрічці конвеєра тонким шаром витісняють стрічкові сепаратори завдяки більш високій надійності вилучення (через відсутність ефекту провисання розвантажувальної стрічки). Крім того, маса дискових сепараторів, в середньому, при однакових умовах експлуатації зі стрічковими пристроями менше маси останніх в 3–4 рази. Робочий орган дискових сепараторів має форму диску з торцевою активною поверхнею та з розташованою на ній магнітною системою. Робочі характеристики стрічкових магнітних сепараторів визначаються способом їхньої установки над стрічкою основного транспортеру: вздовж або поперек стрічки. Для дискових магнітних сепараторів спосіб їх установки не є суттєвим.

У першому розділі також розглянуто основні методи аналізу силових магнітних полів. Виявлено, що для розрахунку магнітних полів магнітних систем сепараторів загалом застосовуються аналітичні та чисельні методи. Серед чисельних методів переважно використані отримав метод скінченних елементів, який забезпечує більшу точність у розрахунку поля і велику гнучкість в завданні геометрії і джерел поля в порівнянні з іншими чисельними методами.

У другому розділі визначено закономірності структуроутворення дискових магнітних сепараторів та обґрунтовано вибір структури-прототипу. Для дослідження закономірностей структуроутворення дискових магнітних сепараторів було використано методологічні інструменти структурно-системного підходу, що передбачало вирішення задач:

1. Визначення повного видового складу (видової різноманітності) класу дискових магнітних сепараторів – для систематизації інформації та передбачення нових різновидів пристроїв.

2. Генетичне моделювання структуроутворення видів – для пошуку нових структур дискових магнітних сепараторів.

3. Визначення структури-прототипу для проведення подальших досліджень, обґрунтування її переваг перед аналогами.

В дисертаційній роботі визначено видове різноманіття дискових магнітних сепараторів, яке представлено вісьмома видами базового рівня (ТП 0.0у, ТП 0.0х, ТП 0.2у, ТП 2.0х, ТП 2.2у, ТП 2.2х, ТП<sup>2</sup> 2.2у, ТП<sup>2</sup> 2.2х) і чотирма видами гібридного типу або видами-двійниками (ТП 0.0(у×х), ТП(0.2у×2.0х), ТП2.2(у×х), ТП<sup>2</sup>2.2(у×х)), де ТП 0.0у... ТП<sup>2</sup>2.2(у×х) – генетичні коди структур геометричного класу «тороїдні плоскі».

Для підтвердження достовірності отриманих результатів був проведений еволюційний експеримент на історичному рівні, в ході якого ідентифікована генетична інформація документально підтверджених (за результатами патентно-інформаційних досліджень) відомих електромеханічних об'єктів – структурних представників реально-інформаційних видів досліджуваного класу магнітосепарувальних

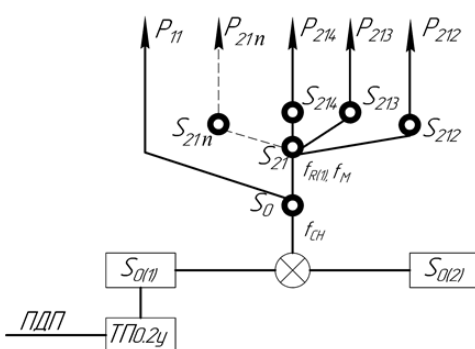


Рисунок 1–Генетична модель структуроутворення базових видів



пристроїв. Показано, що базові види ТП<sup>2</sup> 2.2у і ТП<sup>2</sup> 2.2х, які відносяться до другого великого періоду  $P^2$  ГК, а також види-двійники утворюють структурний потенціал класу. Геномно-історичний експеримент дозволив перейти до практичної реалізації процедури генетичного синтезу структур.

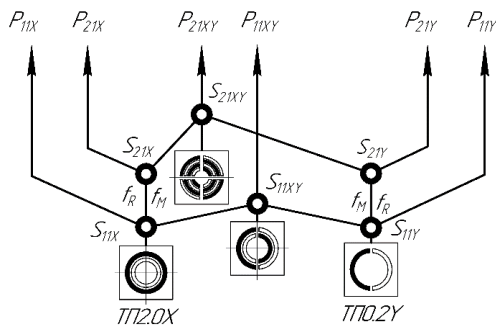


Рисунок 2 – Генетична модель структуроутворення гібридних видів (на прикладі виду ТП (0.2у × 2.0х))

$S_{212}, S_{213}, S_{214}, \dots, S_{21n}$ , визначаючи генетичні властивості популяцій  $P_{212}, P_{213}, P_{214}, \dots, P_{21n}$ , системною ознакою яких є варіанти багатополосних структур тороїдних плоских систем магнітних сепараторів обертального руху.

В дисертації також було розроблено генетичну модель структуроутворення гібридних видів магнітних сепараторів двійникового типу (рис. 2), де  $S_{11x}; S_{11y}$  – електромеханічні структури (x- і у-орієнтованості) або хромосомні набори, що схрещуються, 1-го покоління;  $S_{21x}, S_{21y}$  – електромеханічні структури (x- і у-орієнтованості) або хромосомні набори, що схрещуються, 2-го покоління;  $P_{11x}, P_{21x}$  – структурні популяції базового виду ТП2.0х;  $P_{11y}, P_{21y}$  – структурні популяції базового виду ТП0.2у, структура геному яких представлена двома поколіннями електромагнітних хромосом ( $S_{11xy}, S_{21xy}$ ), які визначають кількісний склад і генетичну інформацію двох структурних популяцій ( $P_{11xy}, P_{21xy}$ ). Достовірність генетичних моделей структуроутворення базових та гібридних видів визначена шляхом порівняння результатів патентно-інформаційного пошуку та результатів синтезу моделей.

Належність ряду синтезованих структур (наприклад, структур  $S_{212}, S_{213}, S_{214}$  базового виду ТП 0.2у) до реально-інформаційних видів підтверджує достовірність прийнятої методики синтезу. Можливість спрямованої генерації нових структур, новизна яких підтверджується

Розроблено генетичну модель структуроутворення базових видів дискових магнітних сепараторів (рис. 1). Показано, що структура геному базових видів представлена хромосомними наборами двох поколінь (рис. 2). Електромеханічна пара  $S_0$  (хромосомний набір 1-го покоління) визначає структуру потенційно можливої популяції  $P_{11}$ , системною ознакою якої є варіанти структур тороїдних плоских систем магнітних сепараторів обертального руху, які містять двополюсний індуктор і феромагнітні робочі тіла, розташовані з одного боку індуктора. Хромосомний набір 2-го покоління представлено структурами

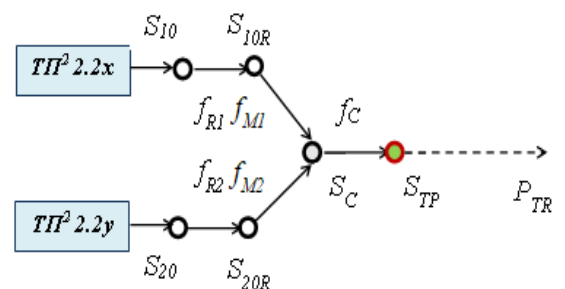


Рисунок 3 – Генетична модель структуроутворення, що задовольняє цільовій функції  $F_{TP}$ :

$f_{R1}, f_{R2}, f_{M1}, f_{M2}, f_S$  – оператори генетичного синтезу;  $S_{10}, S_{20}, S_{10R}, S_{20R}, S_C$  – синтезовані структури хромосом;  $S_{TR}$  – технічне рішення;  $P_{TR}$  – популяція технічних рішень

патентами, свідчить про адекватність генетичних моделей реальним процесам структуроутворення.

В розділі показано, що синтезовані при генетичному моделюванні структурні варіанти дискових магнітних сепараторів складають своєрідний банк технічних рішень, звідки перебором варіантів структур можуть бути знайдені такі, що задовольняють наступній цільовій функції  $F_{TP}$  пошуку, визначеної у відповідності до основних задач дисертаційної роботи,

$$F_{TP} = [TP; (\omega_1 \times \omega_2); L; K_S] \in R^n, \quad (1)$$

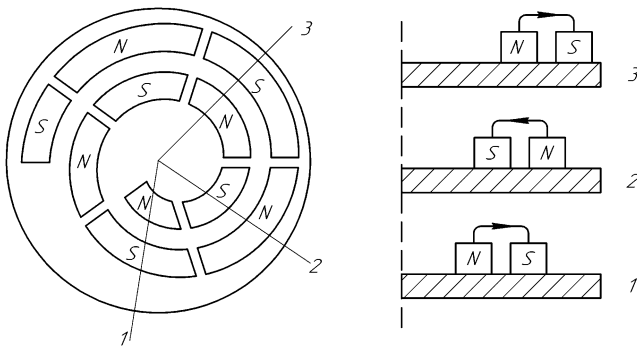


Рисунок 4 – Геометрична модель структури-прототипу гібридного виду ТП<sup>2</sup>2.2(y×x)

де  $TP$  – наявність торцевої односторонньої активної поверхні;  $(\omega_1 \times \omega_2)$  – можливість реалізації певної просторової топології магнітного поля, за умови якої може бути забезпечений необхідний силовий вплив на феромагнітні частки;  $L$  – джерело магнітного поля (збудження магнітного поля від постійних магнітів);  $K_S$  конкурентоспроможність технічного рішення;  $R^n$  – багатовимірний пошуковий простір.

Заданій  $F_{TP}$  ставиться у відповідність генетична модель, зображена на рис. 3 на прикладі гібридного виду ТП<sup>2</sup>2.2(y×x). Синтезованій хромосомі  $S_C$  і відповідним їм популяціям технічних рішень  $P_{TRi}$  можуть бути поставлена у відповідність структурна формула

$$S_{C2} = [(TP^2 \ 2.2x):f_{M1}, f_{R1}(k_R \geq 2)] \times [(TP^2 \ 2.2y):f_{M2}, f_{R2}(k_R \geq 2)] \subset S_{TR3}. \quad (2)$$

В свою чергу, формулі (2) ставиться у відповідність геометрична модель потенційної структури-прототипи дискового магнітного сепаратора, представлена на рис. 4. Як можна бачити з рис. 4, за допомогою перерозподілу магнітного поля у напрямку периферії диска в структурі ТП<sup>2</sup>2.2 (y×x) утворюється радіальна складова магнітної сили, за рахунок якої створюються умови для переміщення видалених феромагнітних предметів у радіальному напрямку, що спрощує процес розвантаження.

Таким чином, проведені дослідження, дозволили визначити закономірності структуроутворення дискових магнітних сепараторів та обрати структуру-прототип гібридного типу, яку покладено в основу розробки конкурентоспроможних технічних рішень дискового магнітного сепаратора.

**Третій розділ** присвячено дослідженню закономірностей просторового розподілу силового магнітного поля в робочій зоні дискового магнітного сепаратора нової конструкції, яка була розроблена на основі обраної в попередньому розділі структури-прототипу (рис. 5). Сепаратор призначений для встановлення над транспортерною стрічкою з сипкою речовиною.

Використання запропонованої конструкції (рис. 5) в порівнянні з іншими аналогами дозволяє поліпшити умови розвантаження витягнутих феромагнітних включень при збереженні високої надійності вилучення.

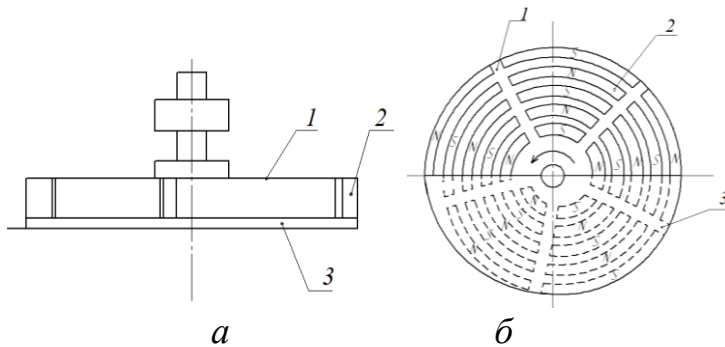


Рисунок 5 – Дисковий магнітний сепаратор:  
загальний вигляд сепаратора (а); вид знизу (б)  
(1 – феромагнітний диск; 2 – магніти;  
3 – немагнітний обертовий диск)

Аналіз силового магнітного поля в робочій зоні обраної конструкції магнітного сепаратора передбачав дослідження впливу таких факторів: формоутворюючих факторів (виконання постійних магнітів за формою та геометричної форми поперечного перерізу магнітів); кількості та геометричних розмірів постійних магнітів; матеріалу постійних магнітів.

Для проведення аналізу силового магнітного поля були застосовані чисельний метод скінченних елементів з використанням програмного комплексу COMSOL Multiphysics та метод фізичного експерименту. Магнітне поле в системі з постійними магнітами при відсутності електричного струму описується системою рівнянь:

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

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

Рівняння стану для постійних магнітів має вигляд

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

де  $\mu_0$  – магнітна постійна;  $\mu_r$ ,  $\mathbf{B}_r$  – відносне значення магнітної проникності та залишкової індукції матеріалу постійного магніту, відповідно. Рівняння магнітного стану для феромагнітних елементів та оточуючого середовища (повітря) може бути записано як

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H}, \quad (5)$$

де  $\mu_r$  – відносне значення магнітної проникності для феромагнітного диску ( $\mu_r = 1000$ ) та повітря ( $\mu_r = 1$ ), відповідно. На основі виразів (3) – (5) може бути отримано диференціальне рівняння для розрахунку векторного магнітного потенціалу  $\mathbf{A}$  ( $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$ )

$$\nabla(\mu_0 \mu_r \nabla \mathbf{A} - \mathbf{B}_r) = 0. \quad (6)$$

Враховуючи, що магнітна система здійснює силовий вплив на багатодоменні феромагнітні частинки, то магнітна сила  $\mathbf{F}_m$  може бути описана як

$$\mathbf{F}_m = V_p \chi \nabla \frac{|\mathbf{B}_0|^2}{2\mu_0} = V_p \chi \mathbf{G}, \quad (7)$$

де  $\mathbf{B}_0$  – вектор магнітної індукції неоднорідного магнітного поля в місці розташування частинки;  $V_p$  – об'єм частинки;  $\chi$  – магнітна сприйнятливості матеріалу частинки.

У виразі (8) виділяють векторну функцію  $\mathbf{G}$

$$\mathbf{G} = \nabla \frac{|\mathbf{B}_0|^2}{2\mu_0}, \quad (8)$$

яка має назву силової функції неоднорідного магнітного поля та є його внутрішньою характеристикою. Для аналізу і порівняння різних типів магнітних систем необхідно попередньо отримати розподіл магнітного поля в їх активній зоні і потім вчислити і побудувати розподіл магнітної силової функції  $\mathbf{G}$ .

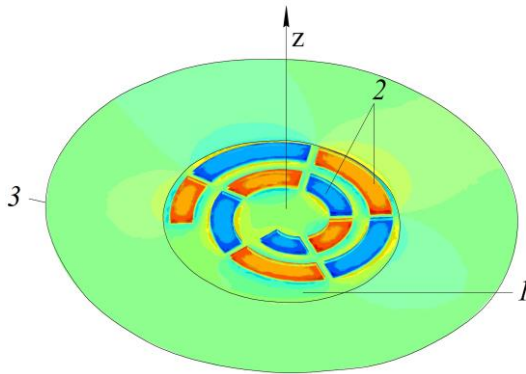


Рисунок 6 – Приклад розрахункової моделі дискового магнітного сепаратора з позначенням граничних умов:

- 1 – ферромагнітний диск;
- 2 – постійні магніти
- 3 – зовнішня границя

залишкова магнітна індукція  $B_r=1,2$  Тл).

Граничними умовами на зовнішніх границях розрахункових областей використовувалася умова магнітної ізоляції  $A=0$  (рис. 6).

В роботі проведено дослідження впливу форми поперечного перерізу постійних магнітів на розподіл індукції магнітного поля в повітряному проміжку. Було розглянуто чотири форми поперечного перерізу полюсів (ширина магнітів  $a$  приймалась однаковою  $a=10$  мм): прямокутник (рис. 7, а); прямокутник зі скошеними кутами (рис. 7, б); трапеція (рис. 7, в); сегмент (рис. 7, з).

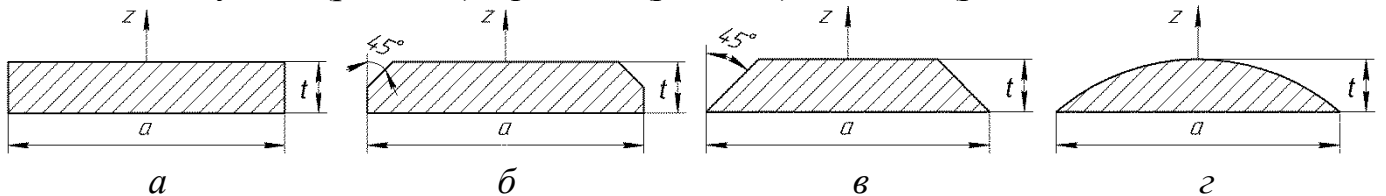


Рисунок 7 – Досліджувані форми поперечного перерізу полюсів: прямокутник (а); прямокутник зі скошеними кутами (б); трапеція (в); сегмент (з)

Встановлено, що при малих відстанях від поверхні постійного магніту ( $0 \leq z \leq 15$  мм) максимальні значення магнітної індукції забезпечують постійні магніти зі сегментною і трапецеїдальною формою поперечного перерізу при значно меншій розрахунковій масі постійного магніту в порівнянні з постійним магнітом прямокутного перерізу. На відносно великих відстанях від поверхні постійного магніту ( $z \geq 20$  мм) інтенсивність магнітного поля, що створюється магнітами

сегментного і трапецеїдального перерізу, істотно нижче, ніж у магнітів з прямокутною і прямокутною зі скошеними кутами формою поперечного перерізу. Тому для подальших досліджень обрано постійні магніти з прямокутною формою поперечного перерізу.

Для дослідження впливу виконання постійних магнітів за формою здійснений порівняльний аналіз розподілу магнітного поля в робочій зоні обраної конструкції дискового магнітного сепаратора з використанням постійних магнітів призматичної та дугоподібної форми з обраною прямокутною формою поперечного перерізу. В роботі розроблені тривимірні розрахункові (комп'ютерні) моделі магнітних систем сепаратора з призматичними та дугоподібними полюсами, рівномірно розміщеними вздовж одного витка спіралі. При побудові моделей приймалося припущення, що всі полюси магнітної системи мають однакові розміри. Для моделі з призматичними магнітами отримані також результати експериментальних досліджень на фізичній моделі (рис. 8), які можуть служити основою для верифікації розрахункових моделей. Вимірювалась магнітна індукція з використанням портативного цифрового тесламетра TD-8620.



Рисунок 8 –  
Фізична модель  
магнітної системи  
дискового  
сепаратора

В роботі встановлено, що магнітна індукція для дугоподібних магнітів, в цілому, вище у порівнянні з призматичними магнітами, як на поверхні магнітів, так й на певній відстані від неї. Так, на поверхні дугоподібних магнітів максимальна магнітна індукція склала 0,97 Тл, на поверхні призматичних – 0,82 Тл, відповідно. Векторна силова функція  $G$  для дугоподібних магнітів також вище у порівнянні з призматичними магнітами. Для прикладу в табл. 1 представлено значення вектору  $|G|_{max}$  на відстані до поверхні магнітів 0–15 мм.

Таблиця 1 – Максимальні значення модуля вектору  $|G|_{max}$

Відстань до активної поверхні магнітів, мм	$ G _{max}$ , Н/м <sup>3</sup>	
	Призматичні магніти	Дугоподібні магніти
0	$9,99 \cdot 10^9$	$14,1 \cdot 10^9$
5	$3,33 \cdot 10^6$	$3,46 \cdot 10^6$
10	$4,57 \cdot 10^5$	$5,28 \cdot 10^5$
15	$8,13 \cdot 10^4$	$8,28 \cdot 10^4$

Таким чином, при дослідженні впливу виконання полюсів магнітної системи за формою на розподіл силового магнітного поля встановлено, що більш високу інтенсивність та неоднорідність магнітного поля в робочих повітряних проміжках забезпечує магнітна система на основі дугоподібних постійних магнітів із прямокутною формою поперечного перерізу, яка приймається для подальших досліджень.

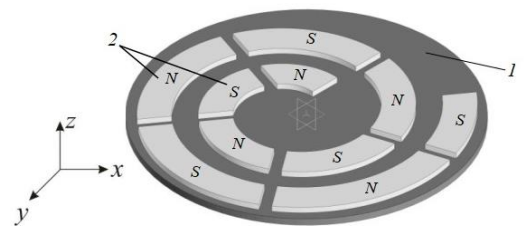
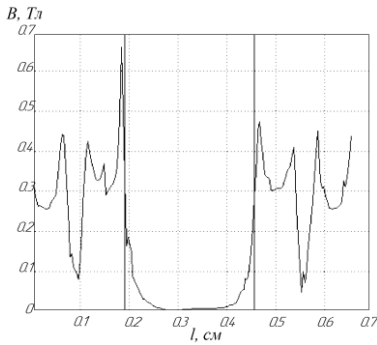
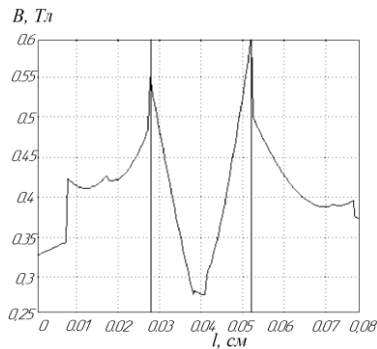


Рисунок 9 – Геометрична модель  
магнітної системи дискового  
сепаратора: 1 – феромагнітний  
диск; 2 – постійні магніти

На наступному етапі проведені дослідження з визначення раціональних геометричних розмірів магнітної системи дискового сепаратора, призначеного для реальних умов експлуатації при встановленні над конвеєрною стрічкою шириною 650 мм. Досліджувався вплив розміру повітряного проміжку та, відповідно, ефективної довжини (тобто довжини вздовж середньої лінії) дугоподібних постійних магнітів на розподіл як магнітної індукції  $B$ , так й силової магнітної функції  $G$ . Дослідження проводились в робочій зоні сепаратора у напрямку розгортання спіралі магнітів в характерних точках, в радіальному напрямку і на різних відстанях від поверхні магнітів (рис. 9).



а



б

Рисунок 10 – Розподіл магнітної індукції на границі розподілу середовищ «ПМ – повітряний проміжок»: в радіальному напрямку (а); в напрямку розгортання спіралі (б)

основі сплаву Nd-Fe-B створює магнітне поле, яке у 2,75–4 рази перевищує інтенсивність магнітного поля від феритових магнітів. Градієнт магнітної індукції

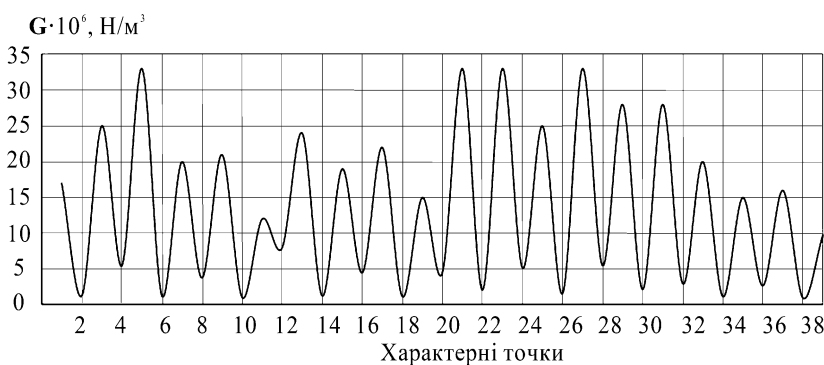


Рисунок 11 – Розподіл векторної силової функції  $G$  на активній поверхні магнітної системи в характерних точках

На етапі досліджень розподілу індукції  $B$  магнітного поля в робочій зоні сепаратора (рис. 10) в якості базової прийнята магнітна система з наступними параметрами: повітряний проміжок  $\delta = 25$  мм, поперечний розмір (ширина) магніту  $a = 67,6$  мм, відстань між сусідніми витками спіралі  $b = 51,7$  мм, товщина (висота) магнітів  $t = 12,5$  мм.

Для остаточного вибору раціональних геометричних параметрів магнітної системи сепаратора, зокрема повітряного проміжку  $\delta$ , проведені системні дослідження розподілу силової функції  $G$  магнітного поля в робочій зоні сепаратора (рис. 11) при варіюванні проміжку  $\delta$  в діапазоні 6,25–25 мм. За результатами дослідження для практичного застосування рекомендована магнітна система з проміжком 12,5 мм.

При виборі магнітів для побудови магнітної системи дискового сепаратора встановлено, що перевагу слід надати сплаву Nd-Fe-B, магнітні властивості якого значно перевищують магнітні властивості феритових магнітів (рис. 12). Так, магнітна система дискового сепаратора на

основі сплаву Nd-Fe-B перевищує, в середньому, в 2–4,3 рази відповідний показник для феритових магнітів. Для здешевлення магнітної системи дискового сепаратора було запропоновано використання комбінованої магнітної системи, зібраної з магнітних

матеріалів різних класів. Доведено, що при частці феритової складової у загальній масі полюсів магнітної системи, яка не перевищує 20 %, в робочій зоні сепаратора забезпечуються достатньо високі магнітні властивості.

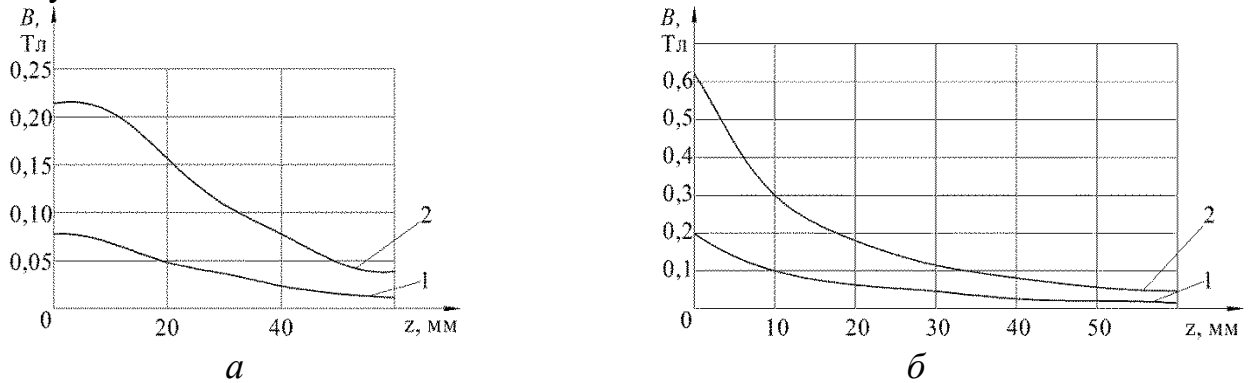


Рисунок 12– Розподіл магнітної індукції вздовж вертикальної осі  $z$  (при побудові магнітної системи на основі: 1 – фериту барію; 2 – на основі сплаву Nd-Fe-B): у повітряному проміжку (*a*); на краю магніту (*б*)

Отже, в результаті дослідження розподілу силового магнітного поля в робочій зоні дискового магнітного сепаратора обрано раціональні форму та геометричні розміри постійних магнітів та запропоновано використання комбінованих магнітів при побудові магнітних систем, що призведе до зменшення маси магнітної системи сепаратора на 10 % та до зниження вартості магнітної системи сепаратора на 25 %.

У **четвертому розділі** наведено результати розрахунково-експериментальних досліджень робочого процесу дискових магнітних сепараторів та визначено напрямки їх подальших удосконалень.

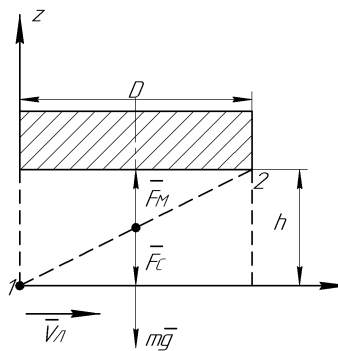


Рисунок 13 – Розрахункова схема вилучення

Виконано постановку та вирішення динамічної задачі про рух вилученого тіла в робочому просторі дискового магнітного сепаратора з розташуванням магнітів сепаратора по спіралі. Для цього була використана розрахункова схема, наведена на рис. 13, де прийняті наступні позначення:  $F_M$  – магнітна сила, що діє на феромагнітну частинку;  $F_C$  – сила опору руху феромагнітної частинки;  $V_n$  – швидкість руху стрічки конвеєра;  $mg$  – сила тяжіння.

Для визначення траєкторії руху частинки була розв'язана наступна система рівнянь:

$$\begin{cases} m \frac{dV_x}{dt} = 0, \\ m \frac{dV_z}{dt} = F_M - mg - F_C, \end{cases} \quad (9)$$

де  $V_z = \frac{dz}{dt}$  – швидкість відносного руху матеріальної точки (феромагнітної частинки) в магнітному полі;  $V_x = \frac{dx}{dt}$  – швидкість переносного руху матеріальної

точки (феромагнітної частинки) в магнітному полі;  $F_C = \gamma V_z = \gamma \frac{dz}{dt}$  – сила опору відносному руху, де  $\gamma$  – коефіцієнт пропорційності, який має фізичний зміст коефіцієнту опору сипучого середовища руху в ньому феромагнітного тіла. Наведений (на одиницю маси) коефіцієнт опору  $\gamma^* = \gamma/m$  для більшості практичних випадків в залежності від форми феромагнітного тіла та матеріалу сипучого середовища знаходиться в межах  $\gamma^* = 100\text{--}500, \text{с}^{-1}$ .

При розв'язанні системи (9) було прийнято припущення, сила  $F_M$  є постійною та дорівнює деякому середньому значенню магнітної сили  $F_{max}$ . Із першого рівняння в системі (9) випливає, що прискорення по осі  $Ox$  нульове, тобто швидкість руху стрічки постійна. Початкові умови:  $t = 0, V_x = V_L, V_z = 0, z = 0, x = 0$ , де  $V_L$  – швидкість руху стрічки транспортера. З урахуванням цього друге рівняння системи (9) може бути записано як

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} = F_M - mg - \gamma \frac{dz}{dt} \quad (10)$$

Для розв'язання рівняння (10) був застосований метод Бернуллі, що дозволило отримати залежність для висоти підвіски  $h$  магнітної системи

$$h = \frac{(k-1)gD}{\gamma^* V_L}, \quad (11)$$

де  $k = F_M / mg, (k > 1)$ .

Співвідношення (11) зв'язує між собою розміри робочого простору дискового магнітного сепаратора, врахування яких дозволяє забезпечити надійне вилучення феромагнітних включень із немагнітного сипучого матеріалу, що підлягає сепарації. Для підтвердження достовірності виразу (11) здійснена його експериментальна перевірка з використанням експериментального стенду сепаратора (рис. 14).

При обробці експериментальних даних використовувався статистичний аналіз. Результати експериментальних досліджень показали, що при переміщенні феромагнітних тіл в робочій зоні магнітної системи зі швидкостями  $V_L = 1,5; 2,0; 2,5$  м/с відстань  $h$ , на якій відбувається вилучення феромагнітних тіл, не перевищує розрахункові значення, що отримані за формулою (11).

На експериментальному стенді (рис. 12) був проведений порівняльний аналіз розвантажувальної здатності дискових

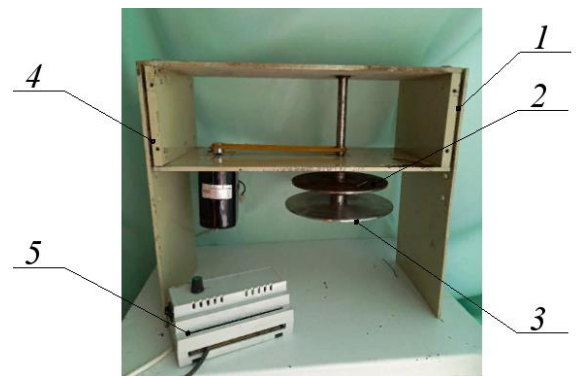


Рисунок 14 – Експериментальний стенд сепаратора: 1 – корпус; 2 – нерухомий феромагнітний диск; 3 – обертовий розвантажувальний немагнітний диск; 4 – двигун; 5 – регулятор частоти обертання двигуна

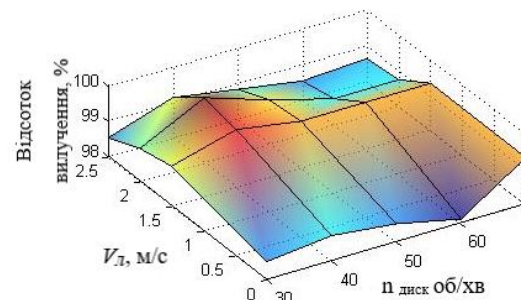


Рисунок 15 – Результати експерименту для шару діаметром 4 мм



сепараторів з магнітними системами різних конфігурацій, визначена частота обертання немагнітного розвантажувального диску, за якої дальність вильоту феромагнітних предметів з поверхні розвантажувального диску не перевищувала порогової величини  $(1-1,5) D$ . При проведенні експерименту оцінювався відсоток вилучення феромагнітних тіл різної форми та розмірів при змінюванні частоті обертання немагнітного диску  $n_{\text{диск}}$ , швидкості стрічки  $V_{\text{л}}$  конвеєру та висоти  $h$  (рис. 15). Процес вилучення та розвантаження феромагнітних тіл фіксувалися за допомогою відеоапаратури.

Запропоновано напрямок удосконалення дискового магнітного сепаратора, зокрема використання комбінованої магнітної системи з феритовими магнітами на периферії диску, що дозволить при незмінній швидкості обертання немагнітного розвантажувального диску зменшити дальність вильоту феромагнітних включень та забезпечити їх попадання до зони розвантаження.

У **додатках** наведено акти впровадження результатів дисертаційної роботи та список публікацій здобувача.

## ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі на підставі отриманих теоретичних і експериментальних результатів вирішене актуальне наукове завдання покращення умов розвантаження дискових магнітних сепараторів при вилученні феромагнітних включень з немагнітних сипких середовищ завдяки використанню удосконалених структур магнітних систем та формуванню робочого магнітного поля з заданим розподілом, що дозволяє уникнути застосування додаткових пристроїв для розвантаження без погіршення ефективності сепарації.

Виконані у дисертаційній роботі дослідження дозволили сформулювати наступні висновки:

1. Виконаний аналіз конструктивних та функціональних особливостей сепараторів на основі постійних магнітів, призначених для очищення немагнітних сипких середовищ, що транспортуються стрічковими конвеєрами, від небажаних феромагнітних включень. В роботі доведено, що магнітні системи сепараторів з постійними магнітами доцільно використовувати там, де потрібно підвищувати якість очищення при мінімальних габаритах сепаратора. Різноманітність форм, конструктивних компоновок і напрямків намагніченості постійних магнітів дозволяє створювати нові магнітні системи магнітосепарувальних пристроїв із необхідним розподілом магнітного поля в робочих проміжках.

Обґрунтовано, що дискові магнітні сепаратори, в яких виніс магнітних матеріалів до зони розвантаження здійснюється обертовими дисками, мають певні переваги перед стрічковими для сепарації матеріалів, розміщених на стрічці конвеєра тонким шаром, завдяки більш високій надійності вилучення (через відсутність ефекту провисання розвантажувальної стрічки). Якщо робочі характеристики стрічкових магнітних сепараторів визначаються способом їх установки над стрічкою основного транспортеру (вздовж або поперек стрічки), то робочі характеристики дискових сепараторів не змінюються при будь-якому розташуванні магнітних систем відносно конвеєрної стрічки.

Однією з актуальних експлуатаційних проблем сепараторів на постійних магнітах є проблема розвантаження вилучених феромагнітних включень. Відомі конструкції магнітних сепараторів характеризуються невисокою ефективністю процесу розвантаження вилучених феромагнітних домішок, що часто призводить до необхідності зупинки робочого процесу сепарації. Вирішення проблеми розвантаження пов'язане з розробкою нових конструктивних варіантів магнітних сепараторів з таким розподілом магнітного поля в робочій зоні, при якому забезпечується умови для полегшення умов розвантаження.

2. Визначено закономірності структуроутворення магнітних сепараторів дискового типу та встановлене видове різноманіття класу дискових магнітних сепараторів яке представлено вісьмома видами базового рівня (ТП 0.0у, ТП 0.0х, ТП 0.2у, ТП 2.0х, ТП 2.2у, ТП 2.2х, ТП<sup>2</sup> 2.2у, ТП<sup>2</sup> 2.2х) і чотирма видами гібридного типу або видами-двійниками (ТП 0.0(у×х), ТП(0.2у×2.0х), ТП2.2(у×х), ТП<sup>2</sup>2.2(у×х)). Для підтвердження достовірності отриманих результатів проведений геномно-історичний експеримент, заснований на використанні результатів історичних і патентних досліджень, який показав: базові види геометричного класу тороїдні плоскі (ТП) відносяться до категорії малочисельних (питома вага в цілому для функціонального класу магнітних сепараторів з відкритою робочою зоною не перевищує 5 %, що свідчить про існуючий потенціал подальшого розвитку класу); різноманітність видів дискових магнітних сепараторів включає представників шести реально-інформаційних видів (50 % від загальної кількості видів); структурний (інноваційний) потенціал класу дискових магнітних сепараторів представлений шістьма неявними видами: базовими видами ТП<sup>2</sup>2.2у і ТП<sup>2</sup> 2.2х, що відносяться до другого великого періоду  $P^2$  ГК, а також чотирма (ТП 0.0(у×х), ТП(0.2у×2.0х), ТП2.2(у×х), ТП<sup>2</sup>2.2(у×х)) видами-двійниками; час еволюції класу дискових магнітних сепараторів становить 115 років.

Розроблено генетичні моделі структуроутворення базових та гібридних видів дискових магнітних сепараторів. За результатами генетичного моделювання складено каталоги структур для базових та гібридних видів, які були використані для пошуку нових технічних рішень при пошуковому проектуванні дискових магнітних сепараторів. У відповідності до прийнятої цільової функції пошуку обрано структур-прототип для подальших досліджень.

3. Досліджено закономірності просторового розподілу силового магнітного поля в робочій зоні дискового магнітного сепаратора. Для цього проведено аналіз впливу формоутворюючих факторів (форми поперечного перерізу постійних магнітів та виконання магнітів за формою) на розподіл силового магнітного поля дискового сепаратора, який показав, що на відстані від поверхні полюсів постійного магніту  $y \geq 20$  мм, де відбувається робочий процес сепарації, інтенсивність магнітного поля вище у магнітів з прямокутною і прямокутною зі скошеними кутами формою поперечного перерізу. Магніти з прямокутною і прямокутною зі скошеними кутами формою поперечного перерізу створюють приблизно однакові за інтенсивністю магнітні поля і відрізняються по масі не більше, ніж на 5 %. Порівняння виконання постійних магнітів за формою довело, що індукція магнітного поля для дугоподібних магнітів вище у порівнянні з призматичними магнітами, як на поверхні магнітів, так й на певній відстані від неї при однаковій

масі магнітних систем. На поверхні дугоподібних магнітів максимальна магнітна індукція не перевищує 0,97 Тл, на поверхні призматичних – 0,82 Тл. Тому за основу дослідження обрано дугоподібні постійні магніти з прямокутною формою поперечного перерізу. Співставлення результатів чисельних розрахунків магнітного поля в робочих повітряних проміжках магнітної системи з експериментальними даними, отриманими на фізичній моделі дискового магнітного сепаратора, підтвердили їх адекватність (максимальна похибка склала 14,3 %).

Досліджено вплив величини повітряного проміжку та, відповідно, ефективної довжини дугоподібних постійних магнітів на розподіл магнітної індукції та силової магнітної функції, обрано раціональні геометричні розміри магнітної системи дискового сепаратора, призначеного для реальних умов експлуатації. Встановлено, що перевагою магнітної системи з проміжком 6,25 мм є більш високе максимальне значення магнітної силової функції, яке в 1,8 разів перевищує аналогічне значення для магнітної системи з проміжком 12,5 мм. У той самий час магнітна система при  $\delta=12,5$  мм відрізняється більшою за розмірами зоною рівномірного розподілу силової функції (за рахунок більшої величини  $\delta$ ) та потребує на 10 % меншої кількості магнітного матеріалу. Тому для практичного застосування рекомендована магнітна система з проміжком 12,5 мм.

У роботі показано, що при виборі магнітів для побудови магнітної системи дискового сепаратора перевагу слід надати сплаву Nd-Fe-B. Магнітна система дискового сепаратора на основі сплаву Nd-Fe-B створює магнітне поле, яке у 2,75–4 рази перевищує інтенсивність магнітного поля від феритових магнітів; градієнт магнітної індукції для системи на основі сплаву Nd-Fe-B перевищує, в середньому, в 2–4,3 рази відповідний показник для феритових магнітів. Встановлено, що інтенсивність магнітного поля в робочій зоні сепаратора залежить від частки феритових магнітів в загальній масі комбінованої магнітної системи. При частці феритових магнітів в загальній масі магнітного полюсу порядку 18–20 % магнітна індукція в робочій зоні магнітної системи з комбінованими магнітами наближається до значень магнітної індукції в магнітній системі Nd-Fe-B.

4. Проведені розрахунково-експериментальні дослідження робочого процесу дискових магнітних сепараторів. Здійснено постановку динамічної задачі про рух феромагнітного тіла в робочому просторі дискового магнітного сепаратора та отримано розрахункове співвідношення, що пов'язує між собою основні геометричні розміри робочого простору, та враховує матеріал постійних магнітів, параметри силючого матеріалу та феромагнітних тіл, швидкість руху стрічки конвеєру. Результати, що отримані, підтверджені експериментально та практикою експлуатації відомих магнітосепарувальних пристроїв з збудженням робочого магнітного поля від постійних магнітів.

Для перевірки умов працездатності дискового магнітного сепаратора нової конструкції розробленні експериментальний стенд та програма експериментальних досліджень. В результаті проведення експериментальних досліджень встановлено, що надійне вилучення робочих феромагнітних тіл забезпечується в діапазоні частот 55-70 об/хв обертання немагнітного диску. При більш високій частоті дальність вильоту феромагнітних предметів перевищує порогової величини в діапазоні (1– 1,5)D. Встановлено також, що феромагнітні кульки діаметром 4,7 мм

вилучаються краще при низьких частотах обертання диска, що становлять 30–40 об/хв. Відсоток вилучення феромагнітних тіл різної форми та розмірів при змінюванні частоті обертання немагнітного диску, швидкості стрічки конвеєру та висоти склав від 93 % до 99 %.

Запропоновано напрямок удосконалення дискового магнітного сепаратора, зокрема використання комбінованої магнітної системи з феритовими магнітами на периферії диску, що дозволить при незмінній швидкості обертання немагнітного розвантажувального диску зменшити дальність вильоту феромагнітних включень та забезпечити їх попадання до зони розвантаження. Таким чином, практична реалізація результатів досліджень дисертаційної роботи відкриває нові напрями в розробці удосконалених конструкцій дискових магнітних сепараторів з потенційною новизною.

### СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

*Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:*

1. Melkonova I., Shvedchykova I., Romanchenko J. Research of magnetic field distribution in the working area of disk separator, taking into account an influence of materials of permanent magnets. *EUREKA: Physics and Engineering*. Estonia, 2020. Vol. 1(9). PP. 87-95. (*Scopus*)
2. Nikitchenko I., Shvedchykova I., Romanchenko J. 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. (*Scopus*)
3. Shvedchykova I., Melkonova I. Research of the force function distribution in the workplace of the magnetic disc type separator intended for the cleaning of bulk substances from the ferromagnetic impurities. *ECONTECHMOD: An International Quarterly Journal on Economics of Technology and Modelling Processes*. Poland, 2019. Vol. 8 (3). PP. 3-10.
4. Никитченко И. В., Gerlici J., Шведчикова И. А., Романченко Ю. А. 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*).
5. Никитченко И. В., Шведчикова И. О., Романченко Ю. А., Gerlici J. 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*).
6. Мелконова И.В., Шведчикова И. А., Мелконов Г.Л. Визначення розподілу силової функції в робочій зоні магнітного дискового сепаратора. *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. 2019. Т. 5, №5 (101). С. 22 – 29. (*Scopus, Index Copernicus, ПИИЦ, Ulrich's Periodicals Directory, DRIVER, BASE, World Cat, Electronic Journals Library, DOAG, EBSCO, Research Bib, American Chemical Society*).
7. Nikitchenko I., Shvedchykova I., Romanchenko J. 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*).
8. Никитченко И. В., Шведчикова И.А. Структурно-системный анализ магнитных сепараторов с торцевой активной поверхностью. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал*. 2016. Вип.

3 (35). С. 57-64. (*Ulrich's Periodicals Directory, Index Copernicus, CiteFactor, Polish Scholarly Bibliography, InfoBase Index, Google Scholar, Universal Impact Factor*).

9. Мелконова І.В., Шведчикова І.О. Експериментальна перевірка працездатності дискового магнітного сепаратора нової конструкції. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2019. № 1 (249). С. 125–130. (*Index Copernicus (ICV 2017: 48.35)*).

10. Мелконова І.В., Шведчикова І. О., Романченко Ю. А. Удосконалення пластинчастої матриці поліградієнтного електромагнітного сепаратора. *Вісник КНУТД*. 2019. №4 (136). С. 9-19. (*Ulrich's Periodicals Directory, EBSCOhost, WorldCat, Index Copernicus, Research Bible, InfoBase Index, Google Scholar*).

11. Мелконова І.В., Шведчикова І.О. Покращення розвантажувальної здатності дискового магнітного сепаратора. *Наукові праці ДонНТУ. Серія: Електротехніка і енергетика*. 2019. №1 (21). С.27-32. (*Index Copernicus, Google Scholar*).

12. Нікітченко І.В., Масляник І.В. Дослідження розвантажувальної здатності дискових магнітних сепараторів. *Майбутній науковець: матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції (Сєверодонецьк, 1 грудня 2017 р.)*. Сєверодонецьк: СНУ ім. В. Даля, 2017. С. 425–426.

13. Никитченко І.В., Шведчикова І. А. Обзор методов расчета магнитных полей, создаваемых постоянными магнитами. *Технологія-2017: матеріали ХХ Міжнародної науково-технічної конференції (Сєверодонецьк 22-23 квітня 2016 р.)*. Сєверодонецьк: СНУ ім. В. Даля, 2017. С. 262 – 265

14. Нікітченко І. В., Шведчикова І. О., Романченко Ю. А. 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. Никитченко І.В., Шведчикова І. А. Построение генетической модели структурообразования магнитных сепараторов с торцевой активной поверхностью. *II Всеукраїнська інтернет-конференція студентів, аспірантів та молодих учених «Технічні науки в Україні: погляд у майбутнє»*. (Сєверодонецьк 27-28 квітня 2017 р.). С. 119-123.

16. Нікітченко І.В. Застосування постійних магнітів нового покоління в технічних пристроях. *Університетська наука. Проблеми міжнародної інтеграції: тези доповідей Міжнародної науково-практичної конференції (Сєверодонецьк, Люблін 3-5 травня 2017 р.)*. 2017. С. 44-47.

17. Никитченко І.В., Шведчикова І.А. Характеристика пакетов прикладних програм для расчета магнитных полей. *III Всеукраїнська інтернет-конференція студентів, аспірантів та молодих учених «Технічні науки в Україні: погляд у майбутнє» (Київ 27-28 квітня 2018 р.)*. С. 30–34.

18. Нікітченко І.В., Шведчикова І.О. Порівняльний аналіз розвантажувальної здатності дискових магнітних сепараторів з магнітними системами різних конфігурацій. *Мехатронні системи: інновації та інжиніринг: збірник тез доповідей II Міжнародної науково-практичної конференції (Київ, 15 червня 2018 р.)*. Київ: КНУТД, 2018. С. 72–73.

19. Мелконова І.В., Застосування магнітної сепарації в екологічних та біологічних технологіях. *Актуальні проблеми життєдіяльності суспільства 2019:*

збірник наукових праць XXVI Міжнародної науково-практичної конференції (Кременчук 24-25 квітня 2019 р.). Кременчук: КрНУ, 2019. С. 264-266.

20. Мелконова І.В. Вплив висоти постійних магнітів на розподіл магнітного поля в дисковому магнітному сепараторі. *V міжнародна науково-практична конференція «ПРЕАП-2019» «Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК»* (Київ 19 грудня 2019 р.). С. 95-98.

21. Мелконова І.В. Порівняльний аналіз магнітосепаруючих систем на постійних магнітах компанії GOUDSMIT MAGNETICS. *Всеукраїнська науково-практична інтернет конференції молодих учених та студентів «Електромеханічні та інформаційні системи»* (Київ 21 квітня 2020 р.). Київ: КНУТД, 2020. С. 133-134.

22. Патент 116288 Україна : В03С 1/24 (2016.01). Пристрій для вилучення феромагнітних включень / І. О. Шведчикова, І.В. Нікітченко, М.О. Морнева; опубл. 10.05.17, Бюл. № 5.

23. Патент 136362 Україна : В03С 1/24 (2006.01). Дисковий магнітний сепаратор / І. О. Шведчикова, І.В. Мелконова, І.О. Солошич; заявл. 20.03.19; опубл. 12.08.19, Бюл. № 15.

## АНОТАЦІЇ

**Мелконова І.В. Дисковий магнітний сепаратор з покращеними умовами розвантаження.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.01 «Електричні машини й апарати» – Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, м. Харків, 2021 р.

Дисертація присвячена вирішенню актуального наукового завдання з покращення умов розвантаження дискових сепараторів з магнітними системами на основі постійних магнітів при вилученні феромагнітних включень з сипких немагнітних середовищ, що транспортуються стрічковими конвеєрами. Умови розвантаження покращуються завдяки використанню удосконалених структур магнітних систем та формуванню робочого магнітного поля з заданою топологією.

У роботі набув подальшого розвитку математичний опис робочого процесу магнітних сепараторів, на основі якого для дискового магнітного сепаратора отримано аналітичний вираз, що враховує основні геометричні розміри робочого простору сепаратора, матеріал постійних магнітів, параметри сипучого матеріалу та феромагнітних тіл, швидкість руху стрічки конвеєру, що наближає результати розрахунків до реальних процесів. Вперше визначено раціональні характеристики (форму та геометричні розміри) постійних магнітів магнітної системи дискового сепаратора нового конструктивного виконання за допомогою методу багатоваріантних чисельно-польових розрахунків з врахуванням просторового розподілу силової функції магнітного поля.

Проведено розрахунково-експериментальні дослідження робочого процесу дискових магнітних сепараторів.

*Ключові слова:* дисковий магнітний сепаратор, силова функція, магнітна система, феромагнітні включення, метод скінченних елементів, постійні магніти.

**Melkonova I. V. Disc Magnetic Separator with Improved Unloading Conditions.** – On the rights of the manuscript.

Dissertation for Candidate of Science Degree in Specialty 05.09.01 – «Electrical Machines and Apparatuses» – National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, 2021

The thesis is devoted to the solution of the current scientific problem of improvement of unloading conditions of Disk Separators with magnetic systems that is constructed on the basis of permanent magnets. Bulk substances are transported by belt conveyors. Unloading conditions are improved due to the using of advanced structures of magnetic systems and shaping of a working magnetic field with a preset topology.

The mathematical description of the operating mode of magnetic separators is taken further development in this paper. Based on this description the Disk Magnetic Separator obtained new-made analytical expression that approximates the results of calculations to real processes and takes into account the basic geometric dimensions of the separator working space, permanent magnets material and parameters of bulk material, conveyor belt speed. For the first time the rational characteristics (shape and geometric dimensions) of the permanent magnets of the magnetic system of the disk separator of new design were determined with using the method of multivariate numerical-field calculations taking into account the spatial distribution of a force function for the magnetic field.

Computational and experimental researches of operating mode of the Disk Magnetic Separators were carried out. The dynamic problem of ferromagnetic solid motion in the working space of the Disk Magnetic Separator is formulated. The calculated relation is obtained which connects the basic geometric dimensions of the working space and takes into account the material of permanent magnets, parameters of bulk material and ferromagnetic solids and conveyor belt speed. The results thus obtained are compatible with experimental results and in practice of the known Magnetic Separation Devices with excitation of the working magnetic field from permanent magnets.

In conclusion the direction of improvement of the Disk Magnetic Separator with the use of the combined magnetic system with ferrite magnets on the peripheral disk is offered. This will reduce the departure range of ferromagnetic inclusions and ensure their entry into the unloading zone at a constant speed of rotation of the non-magnetic unloading disk.

*Key words:* disk magnetic separator, force function, magnetic system, ferromagnetic inclusions, finite element method, permanent magnets.



Підписано до друку 26.03.2021.  
Формат 60x90 1/16. Папір офсетний.  
Друк на різнографі. Умовн. друк. арк. 0,9.  
Тираж 100 прим. Замовлення № 26/03

Надруковано з готового оригінал-макета  
В друкарні ФОП Пронькіна К.В.  
Єдиний державний реєстр юридичних осіб та фізичних осіб-підприємців.  
Запис №23810010001006440 від 25.12.2009 р.  
93110, м. Лисичанськ, вул. Гущенко, 14, тел.: 0663321055  
e-mail: [pronkinakati@gmail.com](mailto:pronkinakati@gmail.com)