

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій
(повна назва)

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Пояснювальна записка

другий (магістерський)
(рівень вищої освіти)

Розроблення моделі характеристик електромеханічного дезінтегратора для автоматизації подрібнення різноманітних матеріалів

(тема)

Виконав:

студент 2 курсу, групи АУТПм-20-1
Перепелиця Д.В.
(прізвище, ініціали)

Спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми Освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Автоматизоване управління технологічними процесами
(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. Грицюк В.Ю.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту
Зав. кафедри КІТАМ

(підпис)

Невлюдов І. Ш.
(прізвище, ініціали)

2021р.

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій
 Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки
 Рівень вищої освіти другий (магістерський)
 Спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
 Тип програми Освітньо-професійна
 Освітня програма Автоматизоване управління технологічними процесами
 (шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри КІТАМ _____

(підпис)

«_____» _____ 2021р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Перепелиці Дмитру Вячеславовичу
 (прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення моделі характеристик електромеханічного дезінтегратора для автоматизації подрібнення різноманітних матеріалів

Затверджена наказом по університету від _____ 2021 р. № 1699 Ст.

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 13.12.2021 р.

3. Вихідні дані до роботи Електричні параметри дезінтегратора: – споживана потужність – 1 кВт; – номінальний струм фази індуктора – 20 А; – число полюсів – 4. Геометричні розміри активної частини: – ширина індуктора – 105 мм; – висота індуктора – 80 мм; – довжина індуктора – 250 мм; – висота ярма – 55 мм; – повітряний проміжок – 45 мм. Геометричні розміри робочої камери: – ширина – 100 мм; – висота – 40 мм; – довжина – 250 мм. Робочі феромагнітні тіла: циліндри, матеріал – підшипникова сталь, діаметр – 2 мм, довжина – 25 мм. Маса робочих феромагнітних тіл в робочій камері – 120 г (2% від об'єму робочої камери).

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі Аналіз технічного завдання; Вступ; Аналіз сфер застосування та конструкцій пристроїв для подрібнення матеріалів, управління режимами їх роботи; Створення комп'ютерної моделі електромеханічного дезінтегратора за методом кінцевих елементів; Розрахунок процесів та характеристик електромеханічного дезінтегратора для автоматизації подрібнення різноманітних матеріалів; Питання охорони праці та безпека дослідницької діяльності; Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій Демонстраційний матеріал представлений у вигляді презентації PowerPoint (*.ppt) - 13 арк. формату А4

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технічного завдання, вступ	21.05.21	виконав
2	Аналіз сфер застосування та конструкцій пристроїв для подрібнення матеріалів, управління режимами їх роботи	10.09.21	виконав
3	Розрахунок процесів та характеристик електромеханічного дезінтегратора для автоматизації подрібнення різноманітних матеріалів	24.09.21	виконав
4	Створення комп'ютерної моделі електромеханічного дезінтегратора за методом кінцевих елементів	15.10.21	виконав
5	Оформлення пояснювальної записки	19.11.21	виконав
6	Подання роботи на перевірку Інтернет-сервісом Unichesk		виконав
7	Подання роботи на рецензію		виконав
8	Подання роботи на підпис зав. кафедри		виконав
9	Подання роботи в ЕК		виконав

Дата видачі завдання _____.2021 р.

Студент

_____ (підпис)

Перепелиця Д.В.

_____ (прізвище, ініціали)

Керівник роботи

_____ (підпис)

доц. Грицюк В.Ю.

_____ (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 96 с., 5 табл., 44 рис., 2 дод., 26 джерел.

АВТОМАТИЗАЦІЯ, ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИЙ ДЕЗІНТЕГРАТОР, ІНДУКТОР МАГНІТНОГО ПОЛЯ, МАГНІТНА ІНДУКЦІЯ, ПОДРІБНЕННЯ МАТЕРІАЛА, РОБОЧИ ФЕРОМАГНІТНІ ТІЛА, ЧАСТОТНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ.

Об'єкт дослідження – електромагнітні процеси, що протікають в електромеханічному дезінтеграторі багатофакторної дії для автоматизації подрібнення різноманітних матеріалів.

Предмет дослідження – електромагнітні характеристики та електромагнітні зусилля в активній зоні електромеханічного дезінтегратора багатофакторної дії.

Мета дослідження – розробка конструкції електромеханічного дезінтегратора багатофакторної дії для автоматизації подрібнення різноманітних матеріалів за результатами дослідження електромагнітних характеристик та електромагнітних зусиль.

Методи дослідження – розв'язання диференційних рівнянь в часткових похідних методом кінцевих елементів на базі теорії електромагнітного поля.

В процесі досліджень було опрацьовано перелік питань, що стосуються теми магістерської кваліфікаційної роботи, а саме:

– здійснено аналіз сфер застосування та конструкцій пристроїв для подрібнення матеріалів;

– створено кінцево-елементу комп'ютерну модель електромагнітних характеристик електромеханічного дезінтегратора;

– виконаний розрахунок електромагнітних характеристик та електромагнітних зусиль електромеханічного дезінтегратора для автоматизації подрібнення різноманітних матеріалів;

– розглянуто питання охорони праці та безпеки дослідницької діяльності.

Результати кваліфікаційної роботи апробовані в ході проведення V Міжнародної Конференції «Виробництво & Мехатронні Системи» (M&MS).

ABSTRACT

Explanatory note: 96 pp., 5 tabl., 44 figs., 2 app., 26 sources.

AUTOMATION, ELECTROMECHANICAL DISINTEGRATOR, MAGNETIC FIELD INDUCTOR, FREQUENCY CONVERTER, MAGNETIC INDUCTION, MATERIAL CRUSHING, WORKING FERROMAGNETIC BODIES, FREQUENCY CONVERTER.

The object of research is electromagnetic processes that take place in an electromechanical disintegrator of multifactor action to automate the grinding of various materials.

The subject of research is electromagnetic characteristics and electromagnetic forces in the core of an electromechanical disintegrator of multifactor action.

The purpose of the study is to develop the design of an electromechanical disintegrator of multifactor action to automate the grinding of various materials based on the results of the study of electromagnetic characteristics and electromagnetic forces.

Research methods - solving differential equations in partial derivatives by the finite element method based on the theory of electromagnetic field.

In the process of research, a list of issues related to the topic of master's qualification work was developed, namely:

- analysis of areas of application and design of devices for grinding materials;
- created a finite element computer model of electromagnetic characteristics of electromechanical disintegrator;
- calculation of electromagnetic characteristics and electromagnetic forces of electromechanical disintegrator for automation of grinding of various materials is performed;
- the issues of labor protection and safety of research activities are considered.

The results of the qualification work were tested during the V International Conference "Manufacturing & Mechatronic Systems" (M&MS).

ЗМІСТ

Перелік скорочень	10
Вступ.....	11
1 Подрібнення різноманітних матеріалів, промислових і побутових відходів ..	13
1.1 Огляд сфер застосування розробок, що пропонуються до розгляду за темою магістерської кваліфікаційної роботи.....	13
1.2 Аналіз конструкцій обладнання, призначеного для подрібнення твердих матеріалів	15
1.3 Огляд конструкцій електромеханічних дезінтеграторів.....	18
1.4 Пристрої автоматизації і управління режимами роботи ЕМД.....	30
1.5 Постановка завдань дослідження	38
1.6 Висновки до розділу 1	39
2 Розробка комп'ютерної моделі електромагнітних характеристик електромеханічного дезінтегратора	40
2.1 Фізичні процеси, що виникають в електромеханічних дезінтеграторах...	40
2.2 Постановка задачі.....	43
2.3. Опис параметрів трифазного електромеханічного дезінтегратора для створення його комп'ютерної моделі	44
2.4 Основні етапи створення комп'ютерної моделі ЕМД.....	47
2.5 Результати обчислень	56
2.6 Висновки до розділу 2	62
3 Розрахунок процесів та характеристик електромеханічного дезінтегратора ..	63

3.1 Принцип дії індуктора магнітного поля і магнітний стан його робочої камери.....	63
3.2 Енергетичні параметри індуктора магнітного поля	63
3.3 Оцінка зусиль в активній зоні електромеханічного дезінтегратора	65
3.4 Охорона праці та безпека дослідницької діяльності	70
3.4.1 Характеристика приміщення і робочого місця.....	70
3.4.2 Виробнича санітарія у приміщенні дослідницької лабораторії	72
3.4.3 Освітлення	74
3.4.4 Промислова безпека у приміщенні учбової лабораторії.....	76
3.4.5 Пожежна безпека.....	76
3.5 Висновки до розділу 3	77
Висновки	79
Перелік джерел посилання	80
Додаток А Демонстраційний матеріал.....	83
Додаток Б Відомість кваліфікаційної роботи.....	97

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АІН – автономний інвертор напруги;

АМП – абсолютна магнітна проникність;

АР – амплітудне регулювання;

БНС – безпека в надзвичайних ситуаціях;

ВМП – векторний магнітний потенціал;

ДБН – державні будівельні норми;

ЕМД – електромеханічний дезінтегратор;

ЕММ – електромагнітний момент;

ЕРС – електрорушійна сила;

ІМП – індуктор магнітного поля;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

МІ – магнітна індукція;

МП – магнітне поле;

МРС – магнітна рушійна сила;

РК – робоча камера;

ФРТ – феромагнітні робочі тіла;

ШІМ – широтно-імпульсний модулятор.

ВСТУП

Процеси подрібнення твердих матеріалів з метою збагачення, підвищення реологічної активності, збільшення контактної поверхні, виділення корисного компонента, та інтенсифікації ряду фізико-хімічних процесів є найбільш поширеними технологічними операціями промислового виробництва різних матеріалів. Одним із способів, що дозволяють здійснювати різні технологічні процеси тонкого і надтонкого подрібнення, гомогенного перемішування рідких і твердих порошкових речовин (приготування емульсій, суспензій), прискорення деяких хімічних реакцій, є застосування принципово нового класу електромеханічних перетворювачів енергії – електромеханічних дезінтеграторів багатofакторної дії.

Актуальним напрямом застосування таких пристроїв може бути переробка відходів діяльності людини, нейтралізація та утилізація промислових, побутових і сільськогосподарських відходів. Існуючі традиційні технології нейтралізації та утилізації промислових і побутових стоків технічно недосконалі, споживають велику кількість енергії, займають величезні площі та екологічно небезпечні. Насправді коло використання зазначеної технології подрібнення досить широке, так як може бути складовою частиною процесів, що застосовуються в різноманітних лабораторних дослідженнях, фармакології, хімічній та харчовій промисловості, видобувній галузі, виробництві будівельних матеріалів та фарб і виходить далеко за межі досліджень даної роботи.

Таким чином, тема магістерської кваліфікаційної роботи «Розроблення моделі характеристик електромеханічного дезінтегратора для автоматизації подрібнення різноманітних матеріалів» є актуальною а її метою є розробка конструкції електромеханічного дезінтегратора.

Об'єкт дослідження – електромагнітні процеси, що протікають в електромеханічному дезінтеграторі багатofакторної дії для автоматизації подрібнення різноманітних матеріалів.

Предмет дослідження – електромагнітні характеристики та електромагнітні зусилля в активній зоні електромеханічного дезінтегратора багатофакторної дії.

Мета дослідження – розробка конструкції електромеханічного дезінтегратора багатофакторної дії для автоматизації подрібнення різноманітних матеріалів за результатами дослідження електромагнітних характеристик та електромагнітних зусиль.

Методи дослідження – розв’язання диференційних рівнянь в часткових похідних методом кінцевих елементів на базі теорії електромагнітного поля.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- здійснити аналіз сфер застосування та конструкцій пристроїв для подрібнення матеріалів;

- створити кінцево-елементу комп’ютерну модель електромагнітних характеристик електромеханічного дезінтегратора;

- виконати розрахунок електромагнітних характеристик та електромагнітних зусиль електромеханічного дезінтегратора для автоматизації подрібнення різноманітних матеріалів;

- розглянути питання охорони праці та безпеки дослідницької діяльності.

Роботу виконано згідно [1–3]. Результати дослідження опубліковані у [4].

1 ПОДРІБНЕННЯ РІЗНОМАНІТНИХ МАТЕРІАЛІВ, ПРОМИСЛОВИХ І ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ

1.1 Огляд сфер застосування розробок, що пропонуються до розгляду за темою магістерської кваліфікаційної роботи

Сучасні соціально-економічні умови України дозволяють інтенсивно розвивати малі і дрібносерійні виробництва, як основу малого і середнього підприємництва. Головною особливістю таких виробництв є їх гнучкість: здатність швидко перенастроюватися на випуск того або іншого виду продукції, що має попит у споживача [5]. Використання інноваційних технологій, ґрунтованих на вимогах енерго- і ресурсозберігання, можливість виробництва широкого спектру матеріалів і виробів роблять актуальним розвиток цього напрямку.

Машинобудівна галузь, що включає виробництво устаткування, обладнання, машин і агрегатів, грає одну з провідних ролей в економіці держави. Стан і розвиток підприємств цієї галузі служить одним з показників економічного і інноваційного розвитку держави, що обумовлює потребу в проектуванні, виробництві і застосуванні сучасних приладів. При цьому неминуче виникає потреба у використанні нових технологій і принципів в процесі їх розробки і виробництва.

Придбання зарубіжних аналогів обладнання є невиправданим і дорогим, а вітчизняні зразки, часто, не задовольняють високим вимогам, що висувуються до них. Тому потрібний розвиток сучасних наукомістких технологій виробництва матеріалів різного призначення: в керамічній, лакофарбній, скляній галузях, в різноманітних лабораторних дослідженнях, фармакології, хімічній та харчовій промисловості, видобувній галузі, виробництві будівельних матеріалів тощо, основу яких складають високодисперсні порошки та емульсії. Найбільш запитуваним напрямом застосування таких пристроїв може бути переробка відходів діяльності людини, нейтралізація та утилізація

промислових, побутових і сільськогосподарських відходів. Усі ці чинники сприяють активній розробці і впровадженню у виробництво інноваційних технологій і сучасного устаткування, що дозволяє, у свою чергу, робити дешево, швидко і якісно, але при цьому бути надійним, універсальним і простим в експлуатації.

Прикладами промислового застосування апаратів для інтенсифікації процесів можуть бути [6]:

- приготування харчових емульсій;
- приготування багатокomпонентних суспензій вулканізуючих і желатинуючих агентів (сірка, окис цинку, сажа, каолін, кремнефтористий натрій) у виробництві латексної губки; отримання суспензій двоокису титану, що застосовується для матування хімічних волокон;
- очищення стічних вод, що містять кислоти, луги, сполуки шестивалентного хрому, нікелю, заліза, цинку, міді, кадмію, інших важких металів, ціаністі сполуки та інші забруднюючі речовини;
- отримання пластичних мастил і емульсолів;
- емульгування гасу в воді, приготування силіконової емульсії у виробництві гумотехнічних виробів.

За допомогою апаратів можуть подрібнюватися такі речовини, як кам'яне вугілля, алюмовмісні шлаки, кварцовий пісок, технічні алмази, целюлоза, крейда, деревне борошно, фторопласти та ін.

Також апарати використовуються для знезараження, наприклад, продуктів життєдіяльності сільськогосподарських тварин [7].

Широке використання матеріалів тонкого і надтонкого помолу призвело до створення великого числа подрібнювачів різних видів (кульові, вібраційні, планетарні, роторно-відцентрові, струминні та ін.). У кожному окремому агрегаті створюються певні умови для подрібнення, які базуються на різних способах фізичного впливу на матеріал. На сьогодні основним способом обробки матеріалів залишається механічне руйнування, що визначає специфіку

використання сучасних агрегатів для переробки дрібних фракцій матеріалів з різними фізико-механічними характеристиками [8].

1.2 Аналіз конструкцій обладнання, призначеного для подрібнення твердих матеріалів

Подрібнення матеріалу робиться за допомогою спеціальних подрібнюючих машин (дробарок і млинів), які можуть класифікуватися: за призначенням (машини попереднього і залишкового подрібнення), способу подрібнення (різальні машини (траворізки для сільських), машини (валяння, бігуни, жорна), що давлять і стирають, ударно-центробіжні млини (молоткові, дезінтегратор, дисмембратор), ударно-стираючі млини (кульові і стержневі), машини надтонкого подрібнення (вібромлини, колоїдні і струминні млини)), мірою подрібнення матеріалу (дробарки великого, середнього і дрібного дроблення, млина тонкого і колоїдного подрібнення), характером робочого інструменту (машини дискові, кульові, ножові, роторні і так далі).

Залежно від призначення і принципу дії в машинах для подрібнення можуть використовуватися різні види навантажень: роздавлювання (стискування шматка), злам (вигин), розколювання (еквівалентно розтягуванню), стирання і удар (рис. 1.1) [9].

Як правило, перераховані види силових навантажень в процесі подрібнення діють одночасно, наприклад, роздавлювання і стирання, удар і стирання та ін.

Необхідність в різних видах навантажень, а також в різних за принципом дії конструкціях і розмірах машин викликана різноманітністю властивостей і розмірів подрібнюваних матеріалів і різними вимогами до початкового матеріалу і готового продукту.

Проте при роботі подрібнювачів залежно від їх конструкцій переважає той або інший спосіб подрібнення.

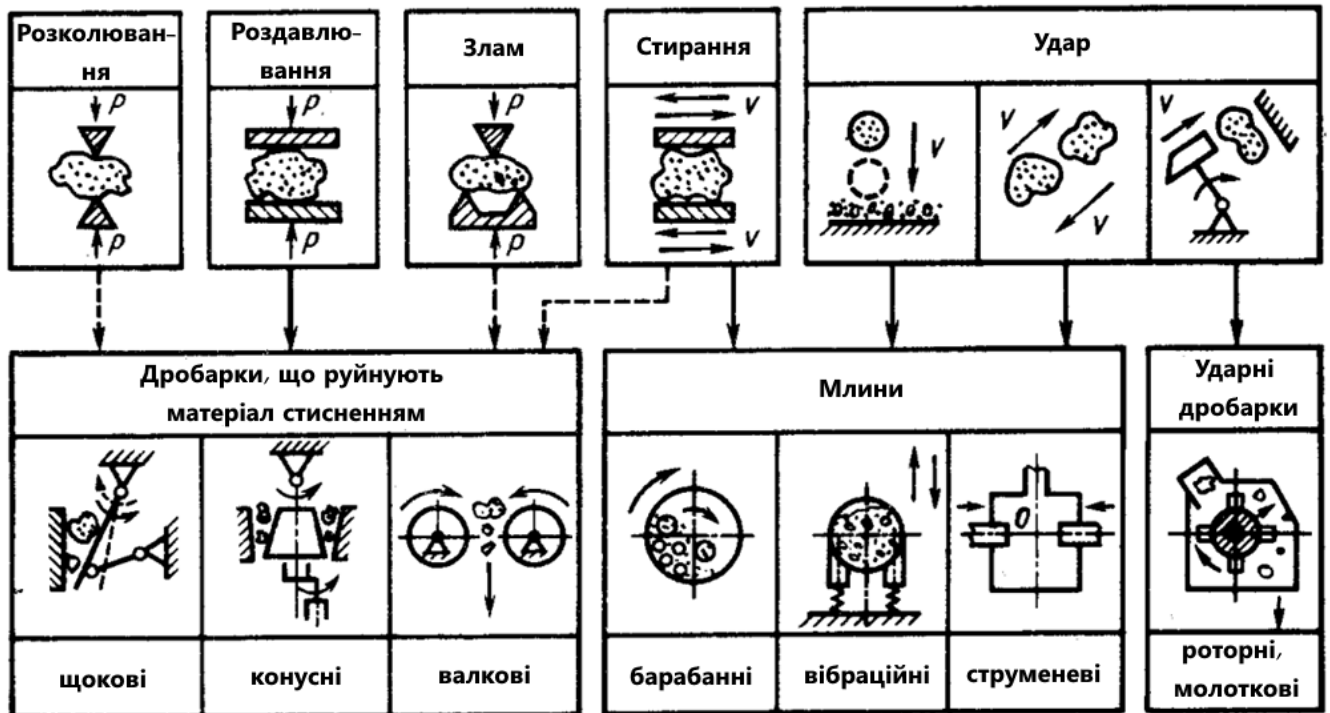


Рисунок 1.1 – Способи механічного руйнування матеріалів, що реалізуються в дробарках і млинах

Є практичні рекомендації по використанню відповідних видів навантажень залежно від типу подрібнюваного матеріалу. Так, дроблення міцних і крихких матеріалів доцільно здійснювати роздавлюванням і зломом, а міцних і в'язких – роздавлюванням і стиранням. Велике дроблення м'яких і крихких матеріалів переважно виконувати розколюванням, середнє і дрібне – ударом. У промисловості дроблення матеріалів проводять, як правило, сухим способом. Рідше застосовують мокре дроблення, коли в завантажувальні облаштування машин розбризкують воду для зменшення пилоутворення. Помел твердих матеріалів здійснюють ударом і стиранням. Також як і дроблення, помел може бути сухим і мокрим. В порівнянні з сухим, мокрий помел екологічно досконаліший і продуктивніший. Проте мокрий помел може застосовуватися тільки тоді, коли допускається контакт подрібнюваного матеріалу з водою.

За способом впливу на подрібнюваний матеріал розрізняють дробарки, що руйнують матеріал стискуванням (щічні, конусні і валки дробарки) і ударом (роторні і молоткові дробарки). У щічних дробарках подрібнення матеріалу відбувається, в основному, роздавлюванням в камері між щоками при періодичному їх зближенні. При відході рухливої щоки від нерухомої подрібнений матеріал випадає з дробарки.

Одночасно при стискуванні шматків має місце їх відносне переміщення, внаслідок чого шматки стираються. При рифлених робочих поверхнях щік подрібнення шматків матеріалу може супроводжуватися також розколюванням і зломом. У конусних дробарках руйнування матеріалу відбувається роздавлюванням, зломом і стиранням при обкатуванні рухливого конуса усередині нерухомого. При цьому відбувається періодичне зближення і відхід від робочих поверхонь конусів, в принципі, як в щічних дробарках. У дробарках валків матеріал подрібнюється в просторі, що звужується, між валяннями, що обертаються один назустріч одному, шляхом роздавлювання. При використанні рифлених і зубчастих валків матеріал подрібнюється також розколюванням і зломом. У роторних і молоткових дробарках ударної дії подрібнення матеріалу відбувається за рахунок удару по шматках бияків, що обертаються, або молотків, а також зіткнення відкинутих шматків з відбивними елементами машин.

У кульових барабанних млинах матеріал подрібнюється у барабані, що обертається, шляхом удару тіл, що мелють, падають з деякої висоти. Крім того, при відносному русі тіл, що мелють, і часток матеріалу відбувається стирання останніх. У вібраційних млинах подрібнення матеріалу здійснюється у барабані, заповненому тілами, що мелють, ударом і стиранням при високочастотних коливаннях корпусу. У струминних млинах подрібнення матеріалу відбувається стиранням при зіткненні часток між собою і із стінками робочої камери при хаотичному русі часток в газовому потоці високої турбулентності. Машини для подрібнення ділять на дробарки і млини. За конструктивними ознаками розрізняють дробарки: щічні, валки, конусні,

ударної дії (роторні і молоткові). Пальцьові подрібнювачі і бігуни займають проміжне положення між дробарками і млинами, оскільки їх можна застосовувати як для дрібного дроблення, так і для крупчастого помелу. Млини ділять на барабанні (тихохідні), роликові, маятникові, кільцеві і інші (середньоходові), молоткові, вертикальні, шахтні (ударні), вібраційні і струминні (рис. 1.2).



Рисунок 1.2 – Класифікація машин подрібнення

1.3 Огляд конструкцій електромеханічних дезінтеграторів

З метою дотримання необхідних умов технологічних процесів виробництва матеріалів і виробів із заданими властивостями, підвищення ефективності процесу подрібнення, зниження вартості тонкоподрібненого продукту і питомих енерговитрат на його виробництво, металоємності устаткування, збільшення його довговічності і надійності необхідно розробляти нові конструкції агрегатів, що поєднують в собі новітні технології, комбіновані

функції і що задовольняють технологічним вимогам сучасних виробництв та енергозбереження.

Виконаний огляд різних джерел інформації з цього питання показує, що нині для підвищення енергоефективності процесів диспергування матеріалів все більше місце знаходять розробки, що стосуються електромеханічних подрібнювачів, які забезпечують рух тіл, що мелють, в робочій камері за рахунок змінного магнітного поля [10]. Ці пристрої забезпечують зменшення енергоємності процесу диспергування у зв'язку з відсутністю необхідності в додаткових джерелах електроенергії для створення сил, що руйнують матеріал.

Отже заслуговують на увагу конструкції дезінтеграторів, що побудовані за принципом електромеханічного впливу на речовину феромагнітних робочих тіл (ФРТ), які перебувають в активній зоні біжучого магнітного поля.

Розглянемо основні конструкції апаратів даного принципу дії.

Однією із перших розробок, що відноситься до вищезазначеного класу пристроїв є апарат з вихровим шаром феромагнітних елементів (апарат вихрового шару).

Він складається з робочої камери (трубопроводу) діаметром від 60 мм до 330 мм, яка розташована в індукторі обертового електромагнітного поля. В робочій зоні трубопроводу містяться циліндричні феромагнітні елементи діаметром від 0,5 мм до 5 мм та довжиною від 5 мм до 60 мм у кількості від декількох десятків до декількох тисяч штук (від 0,05 кг до 20 кг) в залежності від об'єму робочої зони апарату [11]. У основі роботи апарату лежить принцип перетворення енергії електромагнітного поля в інші види енергії.

Реакційна камера апаратів вихрового шару (рис. 1.3) є трубою з немагнітного матеріалу 1, встановлену в розточуванні індуктора циліндричної форми 2, поміщеного в корпус 3. За допомогою індуктора 2 в робочій камері генерується електромагнітне поле, що обертається. Робочими тілами є феромагнітні частки 5, що обертаються під впливом поля в робочій зоні змінної вставки з немагнітного матеріалу 4.

Електромагнітні апарати з вихровим шаром феромагнітних елементів були запропоновані в 1967 році Д. Д. Логвиненком і О. П. Шеляковим [12]. Це і стало початком досліджень і розробок таких пристроїв. У монографії [13], яка була написана цими авторами, показана можливість ефективного застосування апаратів у різноманітних процесах подрібнення.

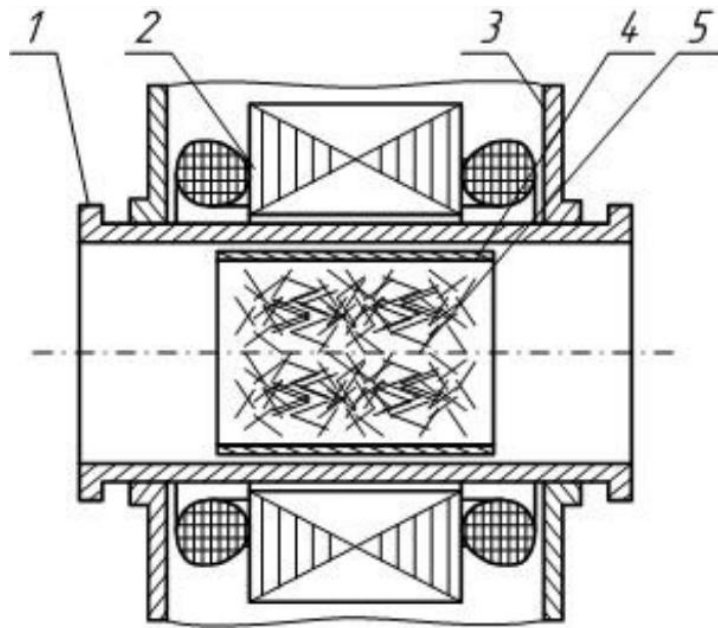


Рисунок 1.3 – Апарат вихрового шару

У подальшому апарати даного класу набули розвитку в роботах багатьох дослідників [14].

Ефект інтенсифікації технологічних процесів і хімічних реакцій досягається за рахунок комплексної дії на оброблювані речовини інтенсивного перемішування і диспергування компонентів, які обробляються, акустичної й електромагнітної обробки, тертя, високого локального тиску, електролізу й т.п. Застосування апаратів з вихровим шаром феромагнітних елементів дозволяє прискорити хімічні реакції від 1,5 раз до 2 раз й скоротити витрату реагентів та електроенергії на 20 % [15].

Ефект подрібнення визначається характером руху феромагнітних елементів у робочій зоні апарата. Подрібнення частинок забезпечується як їх

вільними спільними ударами, так і в результаті ударів між двома елементами або елементом і корпусом. Ступінь подрібнення складає 0,5 мкм (при початковому розмірі фракції 20 мм) [16].

В подальшому відбувалися постійні дослідження процесів, що стосуються функціонування таких апаратів, а також розроблялися вдосконалені їх моделі, які забезпечували більш ефективне використання використаної енергії, підвищувалася продуктивність, якість та інтенсивність подрібнення, змінювалося призначення тощо.

Розглянемо принципи роботи деяких із них [17].

В електромеханічному пристрої для обробки матеріалів, що містить паралельно розташовані магнітопроводи з трифазними розподіленими обмотками, які створюють зустрічні біжучі електромагнітні поля, і робочу камеру з дискретними робочими тілами, розташовану в міжіндукторному проміжку, трифазна обмотка виконана концентричною з радіальним напрямом чергування фаз відносно осі симетрії магнітопроводів, причому магнітопроводи виконано секціонованими з кількістю елементарних магнітопроводів кратною $kmN\tau$ (m – число фаз, τ – полюсне ділення, N – кількість полюсів), а однойменні фази концентричної обмотки укладено на суміжних елементарних магнітопроводах зі зміщенням на одну зубцеву поділку, а кожна крайня фаза на зовнішньому діаметрі елементарного магнітопроводу електрично з'єднана з однойменною фазою на внутрішньому діаметрі суміжного елементарного магнітопроводу, при цьому локальні ділянки зміщення і з'єднання фаз виконано в радіальних проміжках між суміжними елементарними магнітопроводами.

Суть роботи пристрою пояснюється рисунками, де показано основні конструктивні вузли електромеханічного пристрою. На рис. 1.4, на прикладі індукторів тороїдної просторової форми, показано загальний вигляд основних вузлів електромеханічного пристрою; на рис. 1.5 подано поперечний переріз індукторної системи з секціонованими елементарними магнітопроводами; на рис. 1.6 зображено розгортку електричної схеми з'єднань і вказано порядок чергування фаз концентричної обмотки в межах елементарних магнітопроводів.

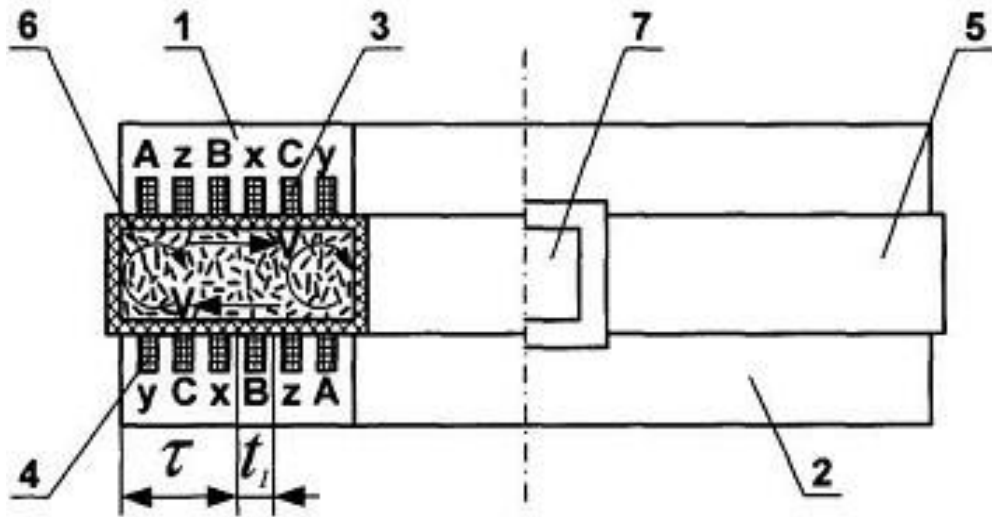


Рисунок 1.4 – Загальний вигляд основних вузлів електромеханічного пристрою

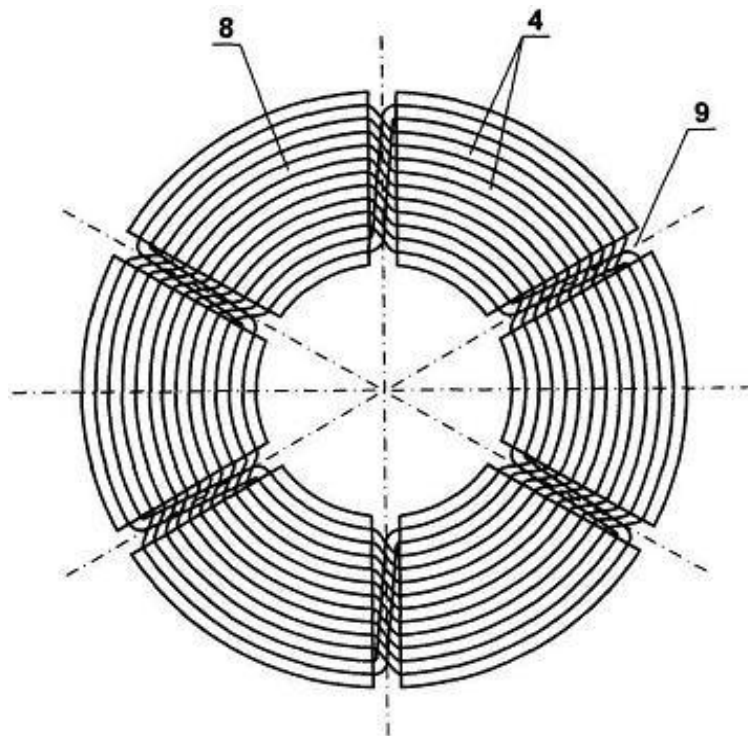


Рисунок 1.5 – Поперечний переріз індукторної системи з секціонованими елементарними магнітопроводами

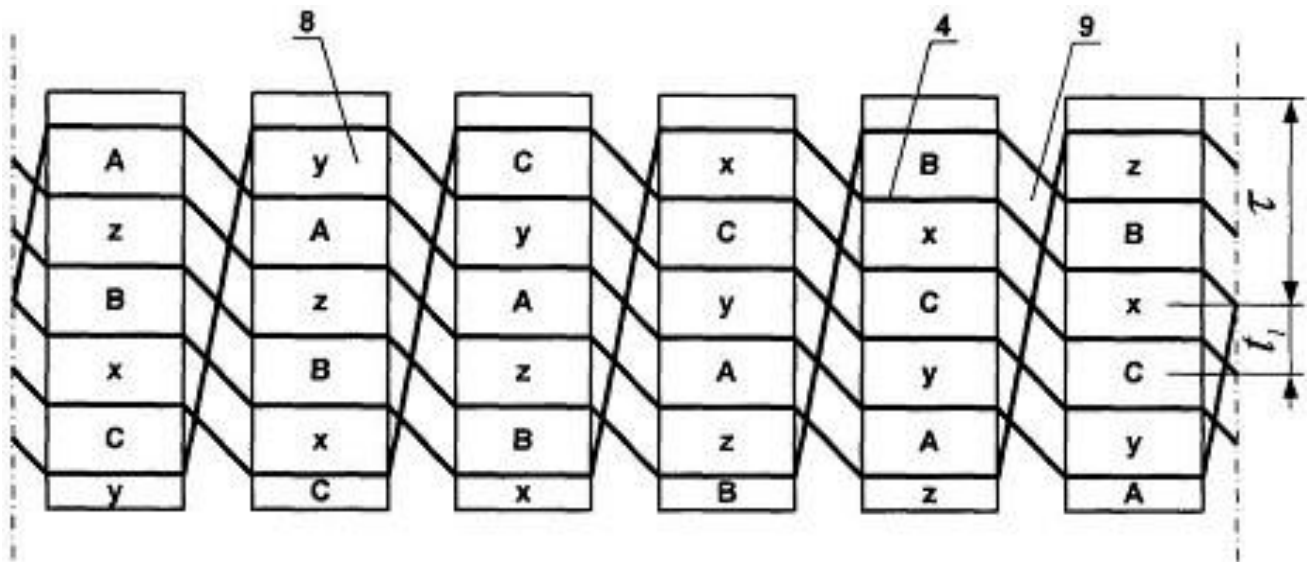


Рисунок 1.6 – Розгортка електричної схеми з'єднань

Електромеханічний пристрій для обробки матеріалів містить верхній 1 і нижній 2 індуктори, які представляють собою магнітопроводи, в пазах яких укладено трифазні концентричні обмотки 3 і 4, що створюють на активних поверхнях індукторів 1 та 2 зустрічні біжучі поля, орієнтовані за радіальним напрямом (рис. 1.4).

В міжіндукторному проміжку розташована робоча камера (РК) 5, яка виготовляється з немагнітного зносостійкого матеріалу.

В об'ємі робочої камери 5 знаходяться робочі тіла 6, функцію яких можуть виконувати дискретні феромагнітні частинки нерівновісної форми.

Робоча камера 5 може мати один або декілька технологічних люків 7, призначених для завантажування технологічної сировини та вилучення готової продукції.

З метою отримання рівномірного розподілу індукції на активних поверхнях індукторів кожний з індукторів 1 та 2 може бути виконаний секціонованим (рис. 1.5).

На рис. 1.7, рис. 1.8, рис. 1.9 та рис. 1.10 представлено можливі варіанти виконання просторової форми індукторної системи електромеханічного дезінтегратора з використанням запропонованого технічного рішення.

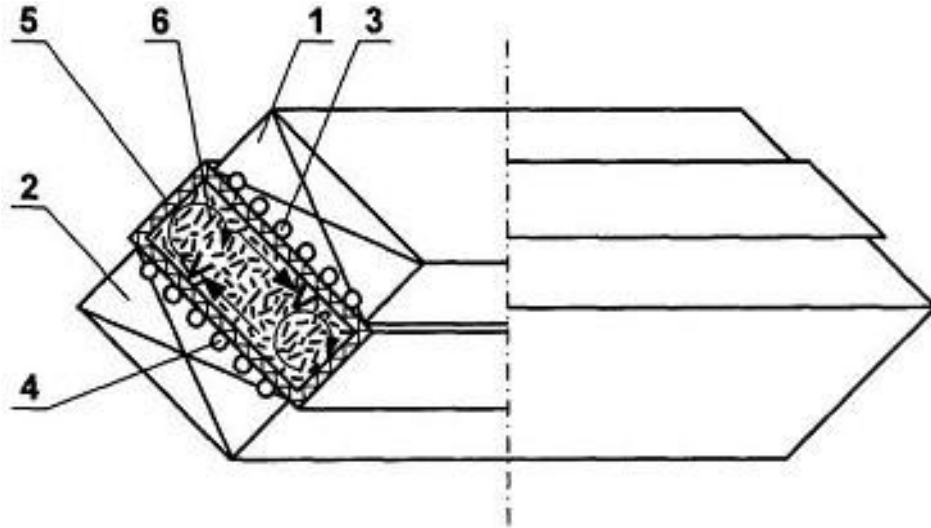


Рисунок 1.7 – Конічна форма активної поверхні індуктора

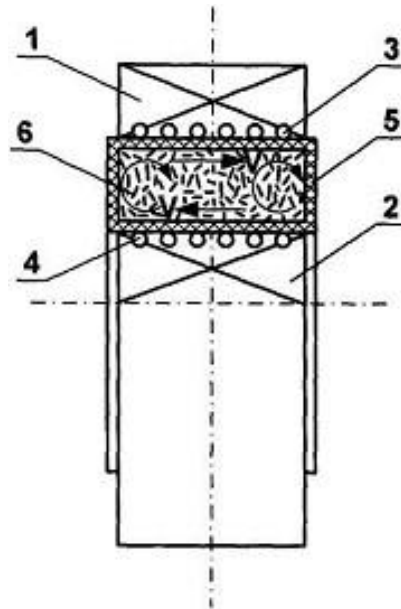


Рисунок 1.8 – Циліндрична форма активної поверхні індуктора

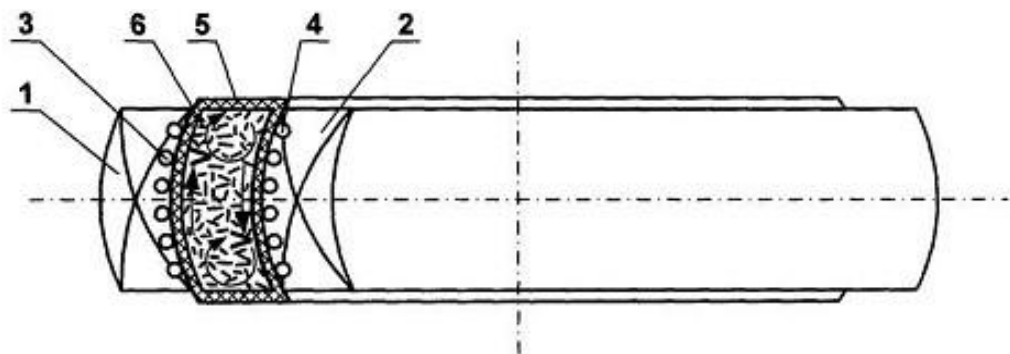


Рисунок 1.9 – Сферична форма активної поверхні індуктора

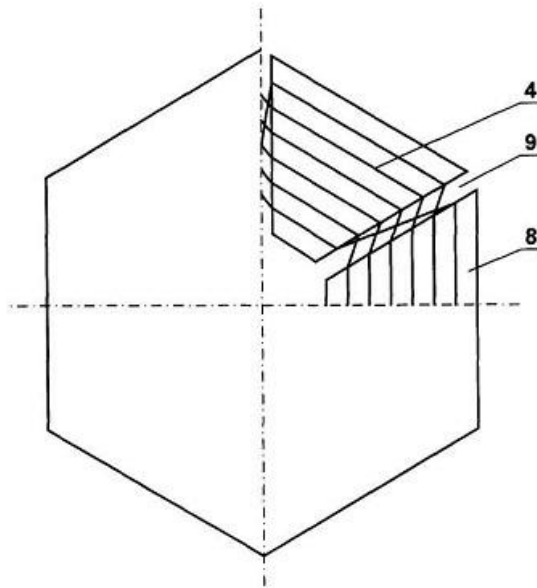


Рисунок 1.10 – Багатогранна форма активної поверхні індуктора

Електромеханічний пристрій, в залежності від його призначення і конкретних умов реалізації технологічного процесу, може бути виготовлений також з конічною (рис. 1.7), циліндричною (рис. 1.8), сферичною (рис. 1.9) або багатогранною (рис. 1.10) просторовими формами активних поверхонь індукторів.

Пристрій працює наступним чином. При живленні концентричних обмоток 3 і 4 трифазним струмом на протилежних активних поверхнях індукторів виникають зустрічні біжучі електромагнітні поля. Під дією зустрічних полів, за умови, що чергування фаз верхньої 3 і нижньої 4 обмоток в межах полюсного поділу τ задовольняє послідовності А – z – В – х – С – у (рис. 1.4), в робочій камері 5 в межах кожного полюсного поділу τ виникає результуюче обертове поле (на рис. 1.4 напрям результуючого обертового поля показано круговою стрілкою), під дією якого відбувається інтенсивний вихровий рух робочих тіл 6, які здійснюють технологічну обробку речовин, що знаходяться або транспортуються через робочу камеру 5. Радіальне зміщення однойменних фаз концентричної обмотки 4 в межах суміжних елементарних магнітопроводів 8 зумовлює відповідне зміщення результуючих обертових полів за радіальним напрямком, що сприяє інтенсифікації руху дискретних робочих тіл, що підвищує продуктивність пристрою.

Технічний результат вищевикладеного полягає в:

- зменшенні витрат активних матеріалів при виготовленні обмоток;
- зменшенні електричних втрат потужності;
- підвищенні інтенсивності обробки матеріалів і її ефективності.

Недоліком даного пристрою є недостатня інтенсивність руху робочих тіл в середній частині робочої камери і низька продуктивність дезінтегратора. Це зумовлено неповним використанням активного об'єму пристрою, суттєвим ослабленням індукції в центральній частині міжіндукторного проміжку і обмеженим корисним об'ємом робочої камери, який при заданій активній довжині визначається діаметром активної поверхні статора. Перевищення критичного діаметра (для частоти обертання поля 3000 об/хв він становить близько 160 мм) призводить до того, що під дією відцентрових сил і сил електромагнітного тяжіння робочі тіла притискаються до поверхні робочої камери і припиняють свій рух.

Іншим різновидом апаратів для подрібнення є однообмотковий електромеханічний дезінтегратор [18], магнітна система якого містить магнітопровід з трифазною розподіленою кільцевою обмоткою, секції якої укладені таким чином, що на протилежних активних поверхнях активної зони утворюють зустрічні магнітні поля, а також розташовану в активній зоні робочу камеру. Магнітна система виконана просторово магнітозамкненою, роз'ємною у вигляді двох симетричних частин. Кільцева обмотка виконана неперервною з концентричних секцій, які на внутрішній частині замкненого магнітопроводу утворюють об'ємну активну зону з еквідистантними активними поверхнями. Секції кільцевої обмотки розміщені в паралельних площинах, перпендикулярних до осі симетрії магнітної системи, а однойменні фази, що розміщені на протилежних активних поверхнях, з'єднані між собою послідовно. Окрім того магнітопровід виконано секціонованим, у вигляді замкнених елементарних магнітопроводів, механічно закріплених між собою за допомогою кільцевих немагнітних ободів. На рис. 1.11 показана магнітна система однообмоткового дезінтегратора з об'ємною активною зоною.

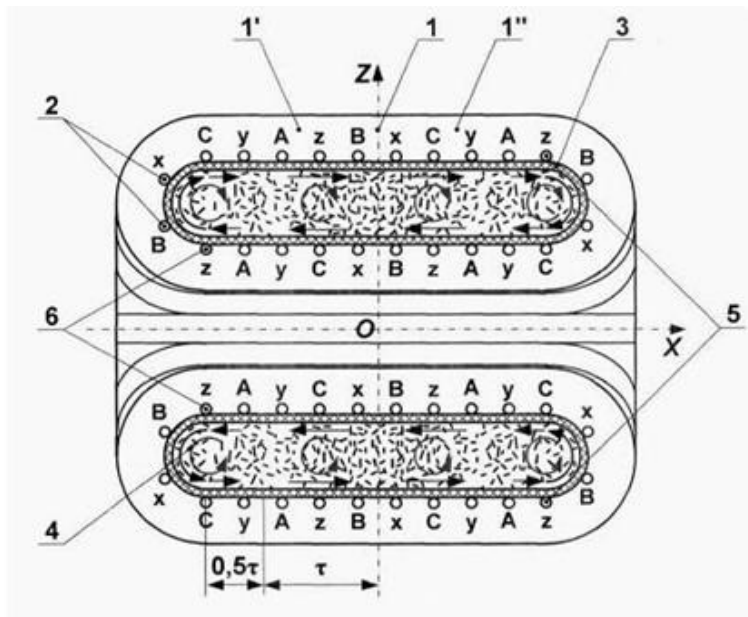


Рисунок 1.11 – Магнітна система однообмоткового дезінтегратора

Суть роботи пристрою пояснюється рисунками.

На рис. 1.12, рис. 1.13, рис. 1.14, рис. 1.15 – варіанти компоувальних схем дезінтеграторів з циліндричною (рис. 1.13), тороїдною пласкою (рис. 1.12), пласкою (рис. 1.14) об'ємними активними зонами.

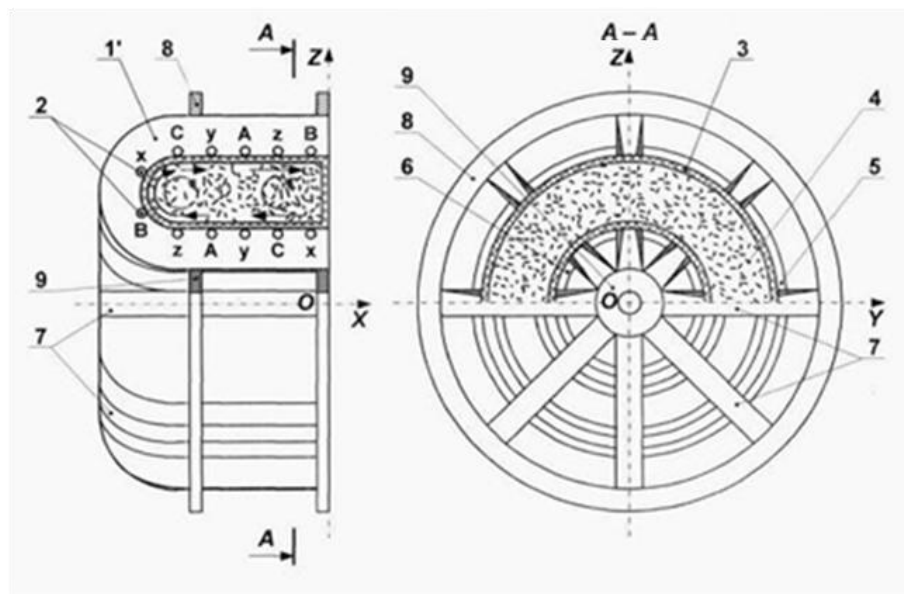


Рисунок 1.12 – Схема дезінтегратора з тороїдною пласкою активною зоною

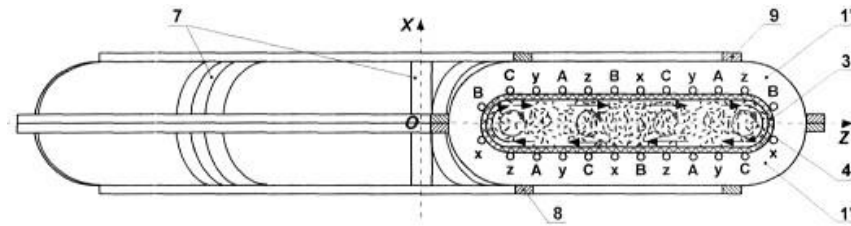


Рисунок 1.13 – Схема дезінтегратора з циліндричною активною зоною

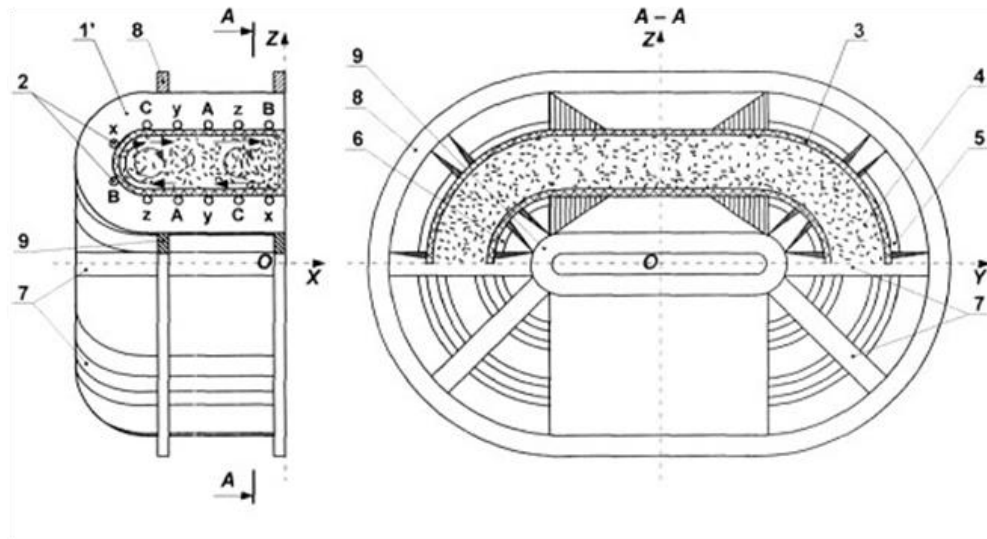


Рисунок 1.14 – Схема дезінтегратора з пласкою активною зоною

Магнітна система однообмоткового електромеханічного дезінтегратора конструктивно складається з замкнутого магнітопроводу 1, трифазної розподіленої кільцевої обмотки 2 і робочої камери 3 з дискретними феромагнітними робочими тілами 4. Зовнішні 5 і внутрішні 6 секції кільцевої обмотки 2 виконані концентричними і розміщені послідовно в паралельних площинах відносно площини симетрії ZOY , перпендикулярної до осі симетрії OX магнітної системи дезінтегратора з утворенням внутрішньої активної зони об'ємного типу. В межах кожного полюсного поділу τ порядок чергування фаз між зовнішніми 5 і внутрішніми 6 секціями обмотки 2 задовольняє послідовності $A - z - B - x - C - y$ (для обмотки з кутом фазної зони 60° ел.). Однйменні фази обмотки 2 електрично з'єднані між собою послідовно, що забезпечує вирівнювання фазних струмів за умови наявності різних електричних опорів в зовнішніх 5 і внутрішніх 6 секціях обмотки 2. Для доступу

та обслуговування робочої камери 3, замкнений магнітопровід 1 виконано роз'ємним у вигляді двох дзеркально симетричних відносно площини ZOY частин 1' та 1". Електричні з'єднання між секціями обмотки правої 1' та лівої 1" частин виконуються, наприклад, з використанням штекерних роз'ємів, або клемних коробок (не показані). Для забезпечення технологічності і уніфікації конструкції магнітопроводу 1 та з можливістю безпосереднього охолодження обмотки 2, магнітопровід 1, за радіальним напрямом OZ , виконано секціонованим, у вигляді елементарних шихтованих плоских магнітопроводів 7 (рис. 1.12), які механічно закріплені між собою за допомогою немагнітних ободів 8 і 9. Заявлена корисна модель може бути технічно реалізована з тороїдною пласкою (рис. 1.12), пласкою (рис. 1.13), а також з тороїдною циліндричною, конічною та сферичною об'ємними активними зонами. За необхідністю, права 1' та ліва 1" частини магнітопроводу 1, а також робоча камера 3 можуть бути виконані герметичними.

Пристрій працює наступним чином.

За умови живлення обмотки 2 трифазним струмом, під дією зустрічних біжучих полів обмотки 2, в об'ємній активній зоні дезінтегратора виникають результуючі обертові електромагнітні поля, під дією яких, в межах кожного полюсного поділу τ , відбувається інтенсивний вихровий рух дискретних робочих тіл 4, під дією якого здійснюється технологічна обробка речовин, що знаходяться або транспортуються через робочу камеру 3. Відсутність поздовжніх і поперечних кінцевих електромагнітних ефектів і максимальне використання активного об'єму забезпечує високу ефективність технологічної обробки матеріалів та підвищення продуктивності дезінтегратора.

Запропонована модель пристрою дозволяє:

– ліквідувати негативний вплив поздовжніх і поперечних кінцевих електромагнітних ефектів (за рахунок виконання магнітної системи просторово магнітозамкненою, а обмотки неперервною);

- забезпечити максимальне (100 %) використання об'єму активної зони дезінтегратора (за рахунок виконання кільцевої неперервної обмотки з поперечною орієнтацією концентричних секцій обмотки);
- забезпечити технологічність, уніфікацію та підвищити ефективність охолодження магнітної системи дезінтегратора.

1.4 Пристрої автоматизації і управління режимами роботи ЕМД

Існує два шляхи управління процесами, що відбуваються в активній зоні електромеханічного дезінтегратора. Перший спосіб – параметричне регулювання – пов'язаний зі зміною будь-яких параметрів дезінтегратора: активних або активно-індуктивних опорів в колі індуктора, числа полюсів машини, зміні геометричних розмірів. Він полягає в виборі конструктивних особливостей апарату, застосуванні різноманітних матеріалів для виготовлення його складових частин (магнітопровід), зміні геометричних розмірів, кількості і порядку розташування обмоток, кількості і виду робочих феромагнітних елементів, але існують певні ускладнення для динамічної зміни для зазначених характеристик у процесі роботи апарату.

Другий шлях управління процесом, що відбувається в робочій зоні пов'язаний зі зміною параметрів джерела живлення за рахунок зміни характеристик електричного струму, що проходить через його обмотки. Зміна потужності, імпульсна зміна живлення, сили струму, його частоти і фази дозволить змінювати характеристики магнітного поля в активній частині дезінтегратора та впливати на кінцевий результат його роботи. Серед відомих пристроїв, що дозволяють виконувати зазначені функції відомі перетворювачі частоти, які перетворюють вхідну синусоїдну напругу фіксованої частоти та амплітуди у вихідну імпульсну напругу змінної частоти та амплітуди за допомогою широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). Таким чином, плавно збільшуючи частоту і амплітуду напруги, що подається на електромеханічний

подрібнювач, можна забезпечити плавне регулювання його робочих характеристик.

Режими регулювання робочих характеристик пов'язані з тривалим відхиленням параметрів машини від номінальних значень. Тому виявляються дуже важливі втрати енергії, ККД і коефіцієнт потужності установки.

При введенні додаткових симетричних активних опорів (реостатне регулювання) їх величину можна змінювати плавно тільки у апаратів малої потужності, а для пристроїв середньої і великої потужності необхідно використовувати контактні (контактори) або безконтактні ключі. Тому число ступенів буде обмежено і рівномірного регулювання робочих режимів отримати неможливо.

З розвитком напівпровідникової техніки та цифрових технологій широкого застосування набули системи частотного регулювання.

Електронний перетворювач частоти складається зі схем (рис. 1.14), до складу яких входить тиристор або транзистор, які працюють в режимі електронних ключів. В основі керуючої частини лежить мікропроцесор, який забезпечує управління силовими електронними ключами, а також вирішення великої кількості допоміжних завдань (контроль, діагностика, захист).

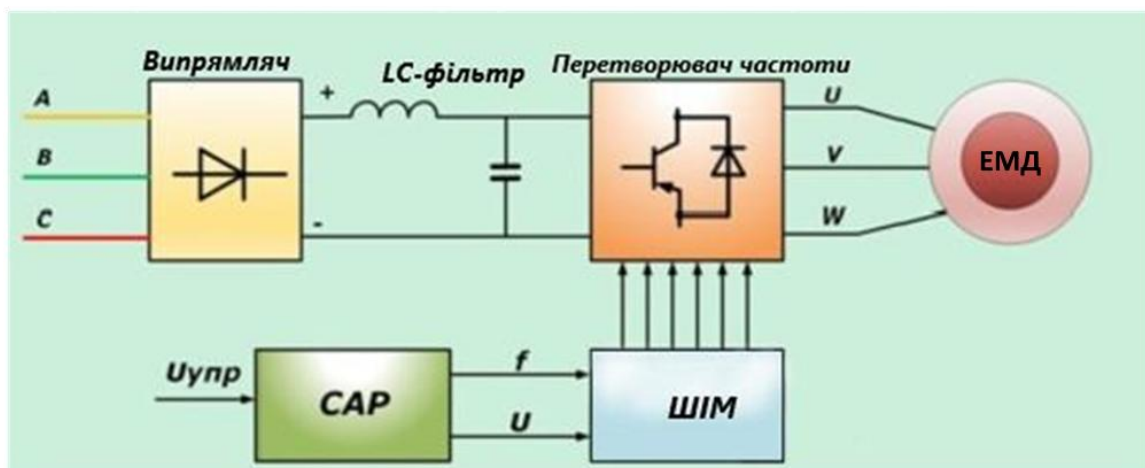


Рисунок 1.14 – Принцип частотного регулювання зі зворотнім зв'язком

Частотний перетворювач з ШІМ являє собою інвертор з подвійним перетворенням напруги. Спочатку мережева напруга 220 В або 380 В випрямляється вхідним діодним мостом, потім згладжується і фільтрується за допомогою конденсаторів. Це перший етап перетворення. На другому етапі постійна напруга надходить на інвертор, який у зворотному напрямку перетворює струм із постійного на змінний необхідної частоти та амплітуди за допомоги схеми управління і вихідних мостових ключів. Зазвичай це відбувається за допомогою методу широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) (рис. 1.15).

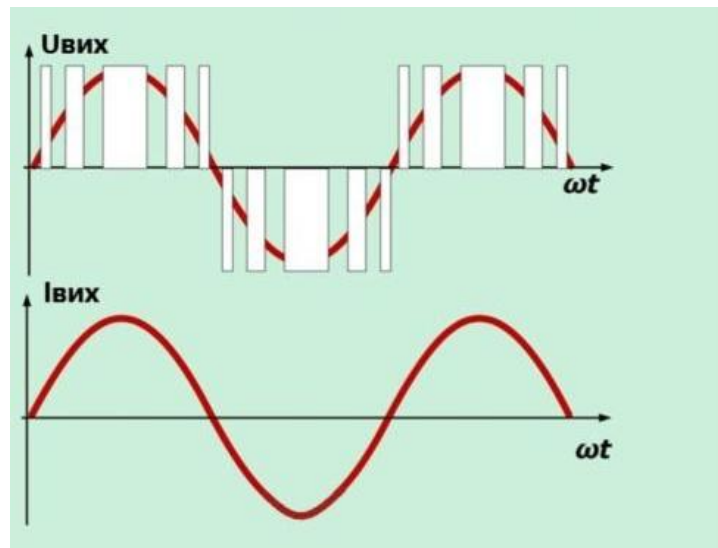


Рисунок 1.15 – Широтно-імпульсна модуляція

Принцип цього методу простий – пристрій формує сигнали певної частоти, які з врахуванням індуктивності навантаження стають схожими на синусоїдальну напругу, завдяки якій і змінюється режим роботи підключеного до вихідних клем пристрою.

Широтно-імпульсне управління характеризується періодом модуляції, усередині якого обмотка вихідного пристрою підключається по черзі до позитивного і негативного полюсів випрямляча.

Тривалість цих станів всередині періоду ШІМ модулюється за синусоїдальним законом. При високих (зазвичай від 2 кГц до 15 кГц) тактових частотах ШІМ, в обмотках навантаження, внаслідок їх фільтруючих властивостей, течуть синусоїдальні струми.

Таким чином, форма кривої вихідної напруги являє собою високочастотну двополярну послідовність прямокутних імпульсів. Частота імпульсів визначається частотою ШІМ, тривалість (ширина) імпульсів протягом періоду вихідної частоти автономного інвертору напруги (АІН) промодульована за синусоїдальним законом. Форма кривої вихідного струму практично синусоїдальна.

Регулювання вихідної напруги інвертора можна здійснити двома способами: амплітудним регулюванням (АР) за рахунок зміни вхідної напруги U_B і широтно-імпульсним (ШІМ) за рахунок зміни програми перемикання вихідних вентилів при $U_B = \text{const}$.

Другий спосіб отримав поширення в сучасних перетворювачах частоти завдяки розвитку сучасної елементної бази (мікропроцесори, IGBT-транзистори).

Більшість сучасних перетворювачів частоти побудовано за схемою подвійного перетворення (рис. 1.16) [19].

Вони складаються з наступних основних частин: ланки постійного струму (некерованого випрямляча), силового імпульсного інвертора і системи управління. Ланка постійного струму складається з некерованого випрямляча і фільтра. Змінна напруга мережі живлення перетвориться в ньому в напругу постійного струму. Силовий трифазний імпульсний інвертор складається з шести транзисторних ключів. Кожна обмотка дезінтегратора підключається через відповідний ключ до позитивного і негативного виходу випрямляча. Інвертор здійснює перетворення випрямленої напруги в трифазну змінну напругу потрібної частоти і амплітуди, яка прикладається до обмоток дезінтегратора. У вихідних каскадах інвертора в якості ключів використовуються силові IGBT - транзистори.

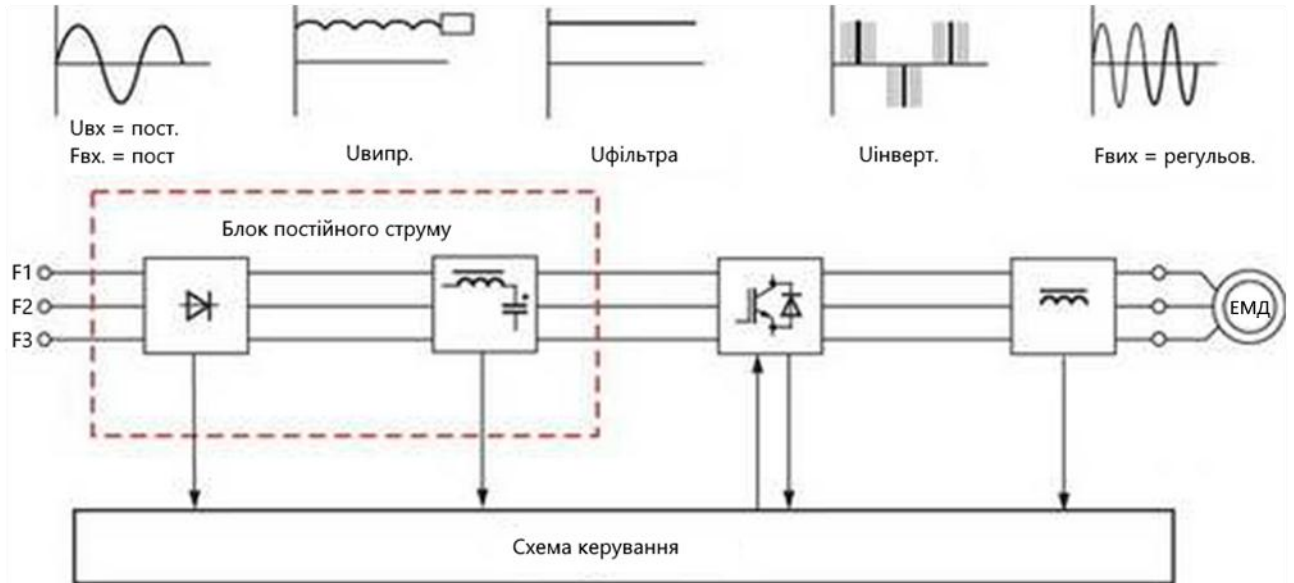


Рисунок 1.16 – Структура частотного перетворювача

У порівнянні з тиристорами вони мають більш високу частоту перемикання, що дозволяє виробляти вихідний сигнал синусоїдальної форми з мінімальними спотвореннями.

Перетворювач частоти складається з некерованого діодного силового випрямляча, автономного інвертора, системи управління ШІМ, системи автоматичного регулювання, дроселя L_B і конденсатора фільтра C_B . Регулювання вихідної частоти $F_{вих}$ і напруги $U_{вих}$ здійснюється в інверторі за рахунок високочастотного широтно-імпульсного управління.

Коли виникає потреба обрати перетворювач частот є декілька моментів, які потрібно врахувати.

Тип управління. Їх є два – векторний та скалярний. Векторний дозволяє керувати більш точно, максимально знижуючи, а то й зовсім уникаючи виникнення помилок. Скалярний режим, в свою чергу, лише підтримує сталий взаємозв'язок між вихідним струмом та його частотою.

Потужність. Перетворювач частот обирається в залежності від номінальної потужності дезінтегратора. Потрібно обирати таку модель, номінальна напруга якої не менша номінальної напруги певного дезінтегратора.

Рекомендуємо звертати увагу на максимальний показник спожитого струму від перетворювача частот, з урахуванням перевантажувальної можливості перетворювача.

Межі регулювання частоти. Необхідно перевірити, чи обраний частотний перетворювач матиме змогу працювати в таких межах частот, на яку розрахований дезінтегратор.

Кількість входів управління. Дискретні входи використовуються для введення управлінських команд, таких як “пуск”, “стоп”, “реверс”, “зміна завдання”, “аварійна зупинка” та ін. Аналогові входи потрібні для введення команд зворотного зв'язку (налаштування в момент роботи) та сигналів завдання. Цифрові входи потрібні для введення високочастотних сигналів від цифрових датчиків положення (енкодерів) та швидкості.

Кількість вихідних сигналів. Дискретні виходи застосовуються для виходу ознак різних обставин (наприклад, перегрів, висока або низька вхідна напруга, сигнал помилки, аварія і т.д.). Аналогові виходи потрібні для побудови систем автоматизованого управління із зворотними зв'язками.

Спосіб реагування на перевантаження. Схеми перевантаження оберігають пристрій від поломок. При першому включенні потужність частотного перетворювача необхідно налаштовувати на 10 % вищою за потужність даного дезінтегратора. Напруга частотного перетворювача має бути вищою за номінальну напругу дезінтегратора і небагато більшою струму можливих перевантажень. Якщо у привода є пікові (ударні) навантаження, які тривають кілька секунд, то необхідно вибирати перетворювач частот по піковому струму. Практично завжди в інструкції є вказано струми перевантажень і час їх дії на кожен механізм, тому перед використанням потрібно ознайомитись зі всією документацією, яка додається в комплекті, аби уникнути помилок в налаштуванні та поломок в майбутньому.

Місце встановлення. Якщо частотний перетворювач буде стояти окремо, на стіні чи підлозі, то потрібно дізнатись ступінь захисту конкретного перетворювача частот. Якщо захист IP00 – перетворювач частот дозволено

встановлювати тільки в шафі чи спеціальній кімнаті, оскільки захист від враження електричним струмом відсутній. IP20 дозволяє встановлювати частотний перетворювач в місцях загального доступу, а захист IP54 дозволяє ставити в кімнатах з високою вологістю/кількістю пилу у навколишньому середовищі.

Якщо передбачувана ділянка встановлення частотного перетворювача – електрошафа, то потрібно переконатися чи є навколо приладу вільний простір та достатня кількість повітря для охолодження. Також необхідно врахувати, як буде виводитися тепло, що віддаватиме частотний перетворювач (до 7 % від потужності перетворювача частот).

Є ще важливий момент – якщо вихідний кабель між перетворювачем та дезінтегратором більший потрібної довжини, то є імовірність встановлення особливого дроселя.

До переваг відносимо:

- захист дезінтегратора від перевантаження, коротких замикань, перегріву, перепадів напруги тощо;
- висока точність регулювання частоти;
- економія електроенергії у випадку роботи дезінтегратора з неповним навантаженням;
- у випадку стрибків струму – стабілізація встановленого робочого режиму;
- коли зникне напруга – автоматичне включення;
- відсутність пускових струмів.

Недоліки:

- деякі моделі частотних перетворювачів є джерелом перешкод;
- високі вимоги до точності вимірювальних приладів та датчиків струму, внаслідок чого вартість частотних перетворювачів зростає.

Одним із таких пристроїв, що за своїми технічними параметрами може бути використаний для регулювання режимами роботи електромеханічного

дезінтегратора є частотний перетворювач PI500 7R5G3 (POWTRAN).
Потужність – 7,5 кВт, живлення - 3-ф ~380 В.

Векторний частотний перетворювач. Управління реалізовано на спеціалізованому DSP-процесорі Texas Instruments. Режими роботи:

- скалярний (U/f);
- векторний із зворотним зв'язком (шифратором) PG-control;
- векторний без зворотного зв'язку (sensorless).

Вихідна частота – від 0 Гц до 320 Гц у векторному режимі, від 0 Гц до 3200 Гц у режимі U/f, автоматичний режим компенсації ковзання.

Поліпшена функція підтримки підвищеного моменту на низьких частотах:

- 0,5 Гц, 180 % (скалярний режим U/f);
- 0,25 Гц, 180 % (векторний без зворотного зв'язку (sensorless));
- 0,00 Гц, 180 % (векторний зі зворотним зв'язком (шифратором) PG-control).

Передбачений захист від:

- підвищеної та зниженої напруги;
- токовий захист по перевантаженню (150 % – 1 хв, 180 % – 2 с);
- перегрів IGBT-транзисторів;
- перехід у режим зупинки під час подачі зовнішнього логічного сигналу аварії.

Управління напрямом та частотою струму:

- потенціометр на клавіатурі;
- зовнішніми дискретними сигналами на клемний блок приводу;
- зовнішніми аналоговими сигналами (від 0 В до 10 В, від 0 мА до 20 мА);
- по мережі MODBUS (RS-485).

Діапазон робочих температур – від -10 °С до +40 °С.

Допускає програмування шістнадцяти встановлених частот, які можна запускати по послідовній циклограмі або вибирати за допомогою подачі дискретних сигналів. Повний опис характеристик PI500 наведено у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Характеристики частотного приводу серії PI500 (POWTRAN)

Номінальна вхідна напруга	380 В
Номінальний струм	17 А
Номінальна вихідна напруга	від 380 В до 400 В
Номінальна потужність	7500 Вт
Перевантажувальна здатність	150 %
Мінімальна робоча температура навколишнього середовища	-10 °С
Максимальна робоча температура довкілля	40 °С
Види індикації	Світлова
Колір світлодіода	Червоний
Захист від перевантажень	Так
Захист від перегріву	Так
Захист від короткого замикання	Так
Ступінь захисту IP	20
Кількість фаз живлення	3

1.5 Постановка завдань дослідження

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- здійснити аналіз сфер застосування та конструкцій пристроїв для подрібнення матеріалів;
- створити кінцево-елементу комп'ютерну модель електромагнітних характеристик електромеханічного дезінтегратора;
- виконати розрахунок електромагнітних характеристик та електромагнітних зусиль електромеханічного дезінтегратора для автоматизації подрібнення різноманітних матеріалів;
- розглянути питання охорони праці та безпеки дослідницької діяльності.

1.6 Висновки до розділу 1

У першому розділі наведений огляд сфер застосування розробок, що пропонуються до розгляду за темою магістерської кваліфікаційної роботи, визначені перспективні напрямки використання пристроїв зазначеного класу а також проведено ретельний аналіз конструкцій обладнання, призначеного для подрібнення твердих матеріалів.

Також розглянуті існуючі конструкції дезінтеграторів, що побудовані за принципом електромеханічного впливу на речовину феромагнітних робочих тіл, які перебувають в активній зоні біжучого магнітного поля, їх недоліки та обмеження. Запропоновані шляхи удосконалення конструкцій апаратів даного класу.

Додатково виконано огляд пристроїв автоматизації і управління режимами роботи електромеханічними дезінтеграторами, їх влаштування і особливості роботи. Для практичного використання з метою управління режимами роботи ЕМД за допомогою регульованих перетворювачів частоти обрано відповідний зразок промислового виробництва, що за своїми характеристиками відповідає визначеним у завданні робочим параметрам ЕМД.

2 РОЗРОБКА КОМП'ЮТЕРНОЇ МОДЕЛІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ДЕЗІНТЕГРАТОРА

2.1 Фізичні процеси, що виникають в електромеханічних дезінтеграторах

Розглянемо роботу ЕМД, що складається з двох пласких індукторів з трифазними обмотками, які утворюють біжучі магнітні поля з протилежним порядком чергування фаз, і робочої камери з феромагнітними робочими тілами (ФРТ), розташованої в міжіндукторному зазорі.

Зустрічні біжучі поля утворюють в межах кожного полюсного поділу індуктора локальні зони з інтенсивним вихровим рухом ФРТ (наприклад, голчастого типу), за допомогою яких і відбувається обробка вихідної речовини.

Вихровий шар ФРТ може бути створений як при тиску, так і в вакуумі, в рідкому, газоподібному або гетерогенному середовищі [15].

Досліджуваний ЕМД це багатофункціональний пристрій, як з точки зору реалізації різних технологічних процесів, так і з точки зору конкретних видів фізичного впливу на оброблювану середу (рис. 2.1).

Крім безпосередньої механічної дії ФРТ і самого електромагнітного поля, на оброблювану речовину впливає також ряд супутніх ефектів: нагрів, механоактивація, електризація, широкий спектр локальних акустичних тисків, а при певних умовах також кавітація і електроліз (для рідких речовин).

В результаті такої комплексної обробки багато процесів прискорюються в десятки і сотні разів, а деякі процеси можуть протікати тільки в ЕМД.

Безліч чинників, що дозволяють впливати на оброблювану речовину з необхідною інтенсивністю і в потрібному напрямку, вимагає, перш за все, знання фізичної суті явищ, що відбуваються в вихровому шарі. Незважаючи на те, що апарати з вихровим шаром вже знайшли застосування в різних галузях промисловості, складні фізичні та механохімічні явища, що відбуваються в вихровому шарі, залишаються недостатньо вивченими.

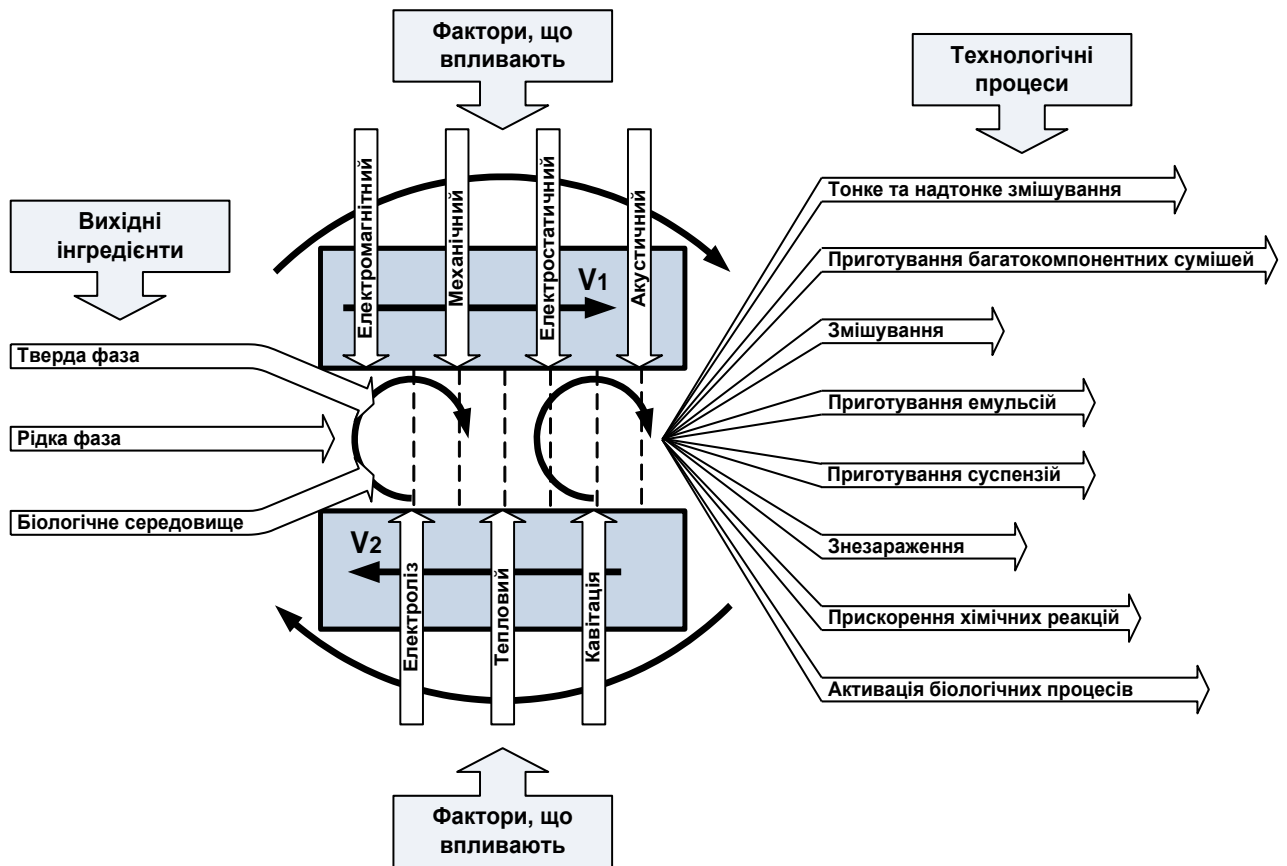


Рисунок 2.1 – Комплекс факторів в ЕМД, що впливають на оброблювану речовину

Крім того, існуючі роботи [16, 20, 21] присвячені розгляду зусиль і моментів, що виникають в пристроях, вихровий шар яких створюється обертовим магнітним полем.

Джерелом МП, що обертається в ІМП, є трифазна симетрична система струмів в пазах фазних обмоток індуктора:

$$\begin{aligned}
 i_A &= I_m \cos(\omega t + \beta), \\
 i_B &= I_m \cos\left(\omega t - \frac{2}{3\pi} + \beta\right), \\
 i_C &= I_m \cos\left(\omega t + \frac{2}{3\pi} + \beta\right).
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

$I_m = \sqrt{2}I_s$ – амплітуда струмів в пазах обмотки (рис. 2.2) індуктора при діючому значенні фазних струмів I_s ; $\omega = 2\pi f_s$ – кутова частота; t – час; β – початкова фаза струмів, яка задає необхідне для конкретного режиму розрахунку МП кутове зміщення напряму магнітної рушійної сили (МРС) обмотки індуктора F_s від вісі y .

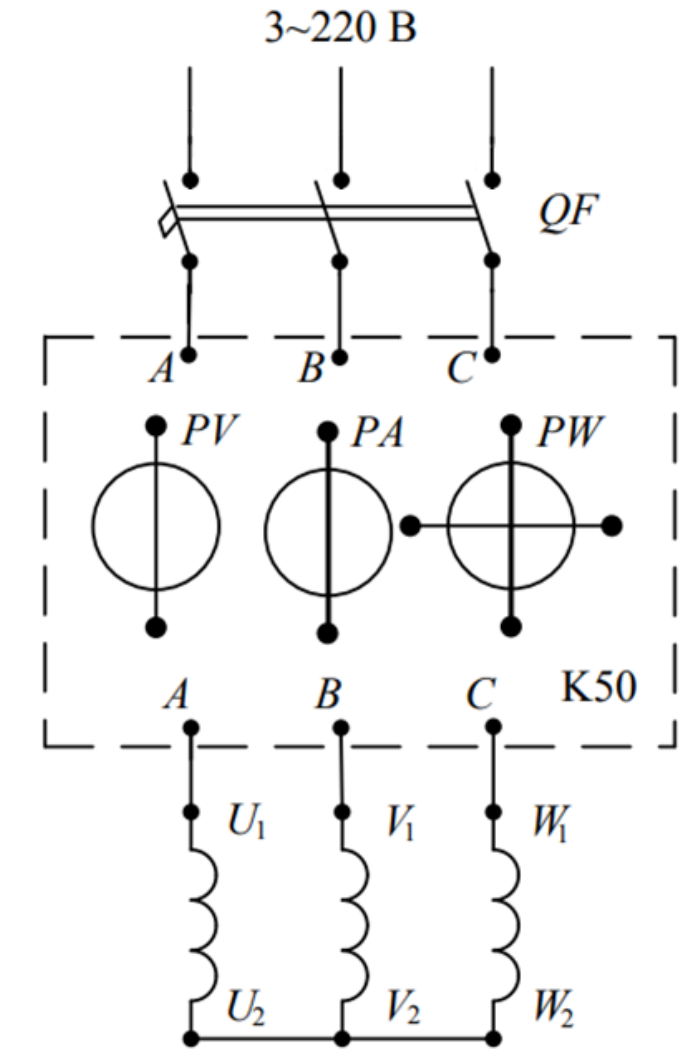


Рисунок 2.2 – Електрична схема підключення ЕМД для зняття його робочих характеристик

При протіканні електричного струму в обмотках генерується змінне магнітне поле, що призводить до спрямованого руху завантаження, що меле, у вигляді феромагнітних тіл роликподіної (циліндричної) форми, які здійснюють складні коливальні і обертальні рухи і взаємне зіткнення в робочій

камері подрібнювача, де знаходиться і матеріал, що підлягає диспергуванню на дрібніші компоненти. Диференціальне рівняння електромагнітного поля в часткових похідних відносно векторного магнітного потенціалу представляється як:

$$\operatorname{rot} \left(\frac{1}{\mu} \cdot \operatorname{rot} \bar{A} \right) - \gamma \cdot \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} - \operatorname{rot}(\bar{v} \cdot \operatorname{rot} \bar{A}) = -\overline{J_{\text{стор}}}, \quad (2.2)$$

де $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$ – абсолютна магнітна проникність;

γ – питома електрична провідність;

\bar{v} – вектор швидкості руху електропровідного середовища відносно джерела магнітного поля;

$J_{\text{стор}}$ – густина сторонніх струмів.

Для областей, що не проводять, справедливе рівняння Пуассона, що має вигляд:

$$\operatorname{rot} \left(\frac{1}{\mu} \cdot \operatorname{rot} \bar{A} \right) = -\overline{J_{\text{стор}}}, \quad (2.3)$$

де A, J – складові векторного магнітного потенціалу (ВМП) і густини струму;

μ_e – абсолютна магнітна проникність (АМП).

Інструментом досліджень, які представляються, є чисельні розрахунки МП методом кінцевих елементів. При розрахунку МП розподіл АМП в шихтованому сталевому осерді та немагнітному просторі враховується загальновідомим методом. В ІМП новою виявляється проблема розрахунку магнітних властивостей середовища, що знаходиться в РК.

2.2 Постановка задачі

Серед численних програм, що реалізують метод кінцевих елементів, Comsol Multiphysics по відгуках багатьох користувачів є найбільш відкритим

для розуміння і формування фізико-математичної сторони розрахункового завдання. Comsol Multiphysics має дуже широкі можливості при обчисленні завдань, що містять процеси різної фізичної природи, наприклад, електромагнетизм, механіку суцільного середовища і теплопередачу. Крім того, Comsol Multiphysics має найбільш легкий і компактний інтерфейс користувача, що у багато разів скорочує терміни його освоєння в порівнянні, наприклад, з широко відомою програмою Ansys.

Розглянемо створення моделі електромеханічного дезінтегратора із заданими характеристиками для визначення його робочих параметрів і проведення відповідних досліджень.

Конструкція розроблюваної моделі має вигляд двох пласких індукторів з трифазними обмотками, які утворюють біжучі магнітні поля з протилежним порядком чергування фаз, і робочої камери з ФРТ, розташованої в міжіндукторному зазорі. Зустрічні біжучі поля утворюють в межах кожного полюсного поділу індуктора локальні зони з інтенсивним вихровим рухом ФРТ (наприклад, голчастого типу), за допомогою яких і відбувається обробка вихідної речовини. Для побудови і розрахунку моделі визначимо, що вихровий шар ФРТ в робочій камері створений при звичайних умовах в повітряному середовищі.

Робоча камера виготовлена з немагнітного матеріалу і розміщена у внутрішньому просторі індуктора магнітного поля (ІМП). Зовнішній розмір РК відповідає розміру, який дозволив помістити її в ІМП, таким чином щоб забезпечити посадку, що не допускає переміщення РК.

2.3 Опис параметрів трифазного електромеханічного дезінтегратора для створення його комп'ютерної моделі

У якості ІМП використовуються два пласких індуктора з трифазними обмотками, які утворюють біжучі магнітні поля з протилежним порядком чергування фаз. Він розрахований на номінальну напругу 380 В, лінійну

напругу 220 В і струм індуктора $I_{IN} = 20$ А при частоті $f_s = 50$ Гц. Він має кількість фаз $m_s = 3$ і кількість полюсів $p = 4$. Споживана потужність – 1 кВт, активний опір фазної обмотки індуктора $R_{s\theta a} = 0,575$ Ом, схема з'єднання – «зірка».

Геометричні розміри активної частини: ширина індуктора – 105 мм; висота індуктора – 80 мм; довжина індуктора – 250 мм; висота ярма – 55 мм; повітряний проміжок – 45 мм. Геометричні розміри робочої камери: ширина – $a_a = 100$ мм; висота – $b_a = 40$ мм; довжина $l_a = 250$ мм, матеріал – немагнітна неіржавіюча сталь з товщиною стінки 2 мм.

Робочі феромагнітні тіла: циліндри, матеріал – підшипникова сталь, діаметр – 2 мм, довжина – 25 мм. Маса робочих феромагнітних тіл в робочій камері – $m_{Fe} = 120$ г (2 % від об'єму робочої камери).

На практиці одна із конструкцій електромеханічного подрібнювача може мати вигляд, що зображено на рис. 2.3 і складається з корпусу зі змонтованими в ньому обмотками збудження (рис. 2.4) змінного магнітного поля.

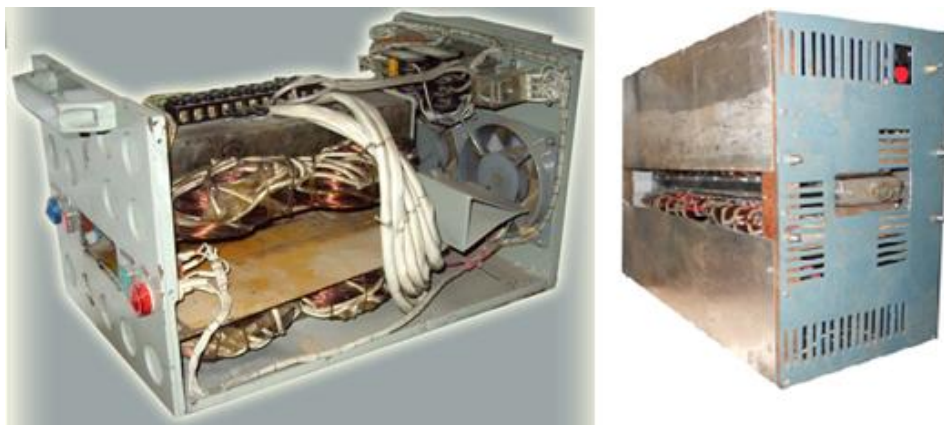
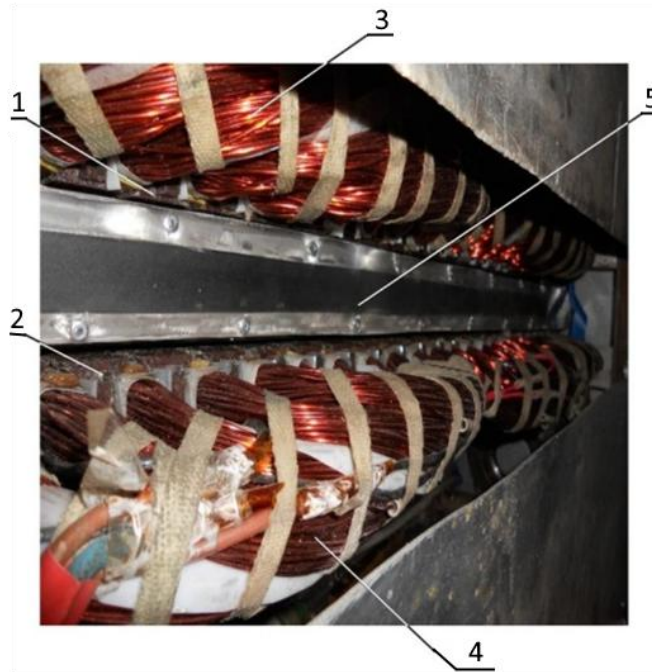


Рисунок 2.3 – Експериментальний зразок електромеханічного дезінтегратора

Для розміщення у внутрішньому просторі індуктора магнітного поля зовнішній розмір РК відповідає розміру, який дозволив помістити її в ІМП, таким чином щоб забезпечити посадку, що не допускала переміщення РК. З

одного торця до РК прикріплена захисна прозора стінка оргскла, а іншого боку знімна заглушка.



1, 2 – індуктори змінного магнітного поля; 3, 4 – трифазні обмотки;
5 – робоча камера

Рисунок 2.4 – Внутрішнє влаштування (вид на електромагнітні котушки)

Таким чином, довжина РК відповідає активній довжині індуктора, тобто $l_c = l_a = 0,25$ м. Внутрішній об'єм РК:

$$V_c = l_c \times a_a \times b_a = 0,25 \times 0,04 \times 0,1 = 0,001 \text{ м}^3. \quad (2.4)$$

При живленні трифазної обмотки індуктора змінною напругою, з діючим значенням фазної напруги U_s по ній протікають фазні струми з діючим значенням I_s , які створюють біжуче магнітне поле. Під його дією ФРТ, розміщені в РК, приводяться до хаотичного руху, орієнтуючись за магнітним полем. ФРТ в РК розташовуються по силових лініях магнітного поля, тобто розвивається електромагнітний момент, що впливає на них.

2.4 Основні етапи створення комп'ютерної моделі ЕМД

Створення розроблюваної моделі Electromechanical desintegrator (електромеханічний дезінтегратор) розпочнемо з побудови двохвимірної вісесиметричної постановки (рис. 2.5), яку виконаємо за допомогою вбудованого графічного редактору.

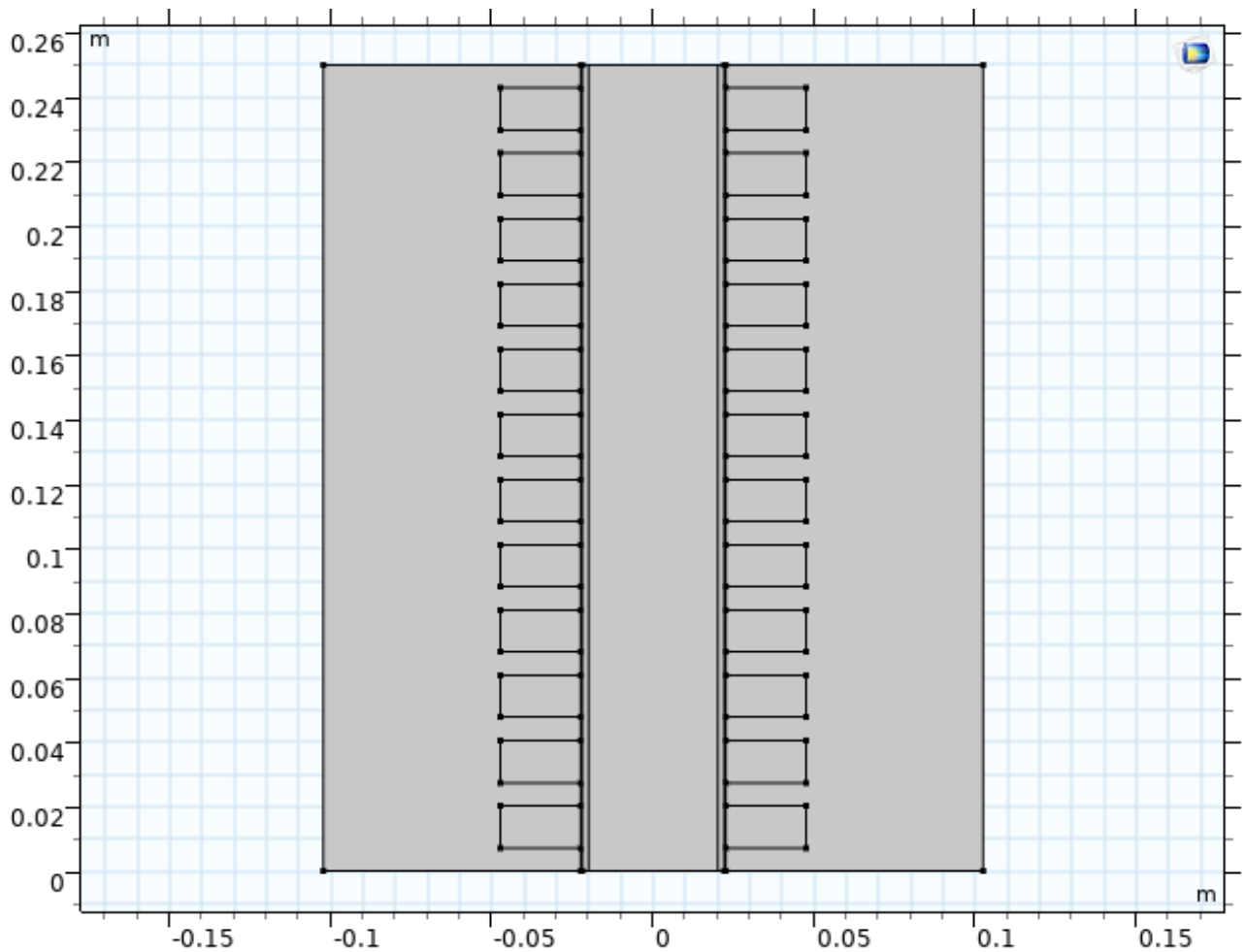


Рисунок 2.5 – Загальний вид геометрії моделі

Для переходу до тривимірної просторової моделі (рис. 2.6) використаємо інструмент Extruder і створимо два (індуктор і ФРТ) просторових об'єднання (unions).

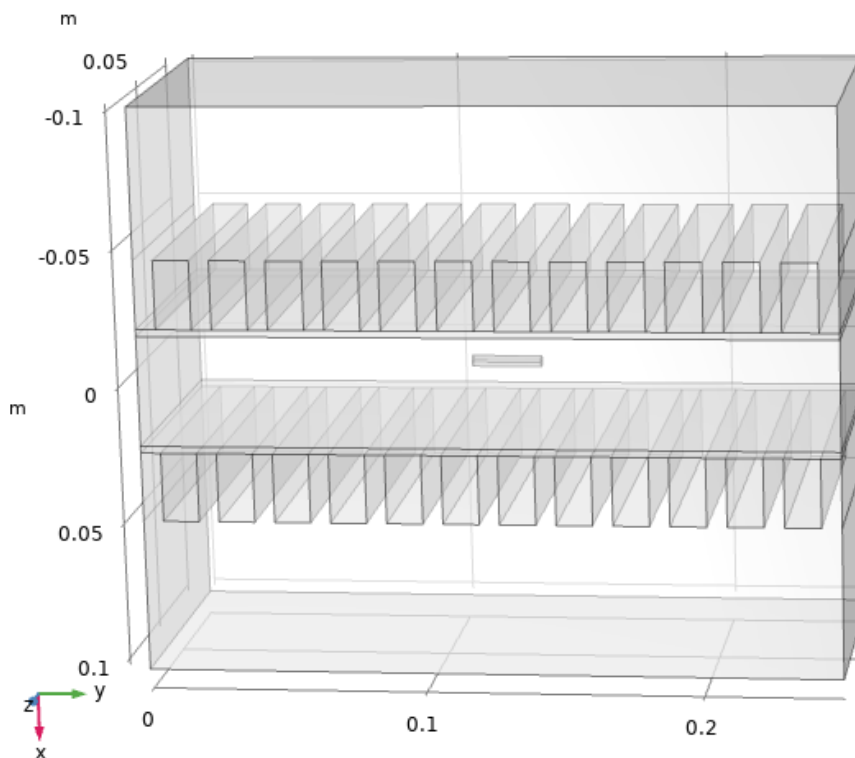


Рисунок 2.6 – Повнорозмірна тривимірна модель

Геометрія фіналізується шляхом створення складання (операція Form Assembly) між об'єднаннями для індуктора і ФРТ.

Далі, задамо параметри моделі в Global Definitions > Parameters (глобальні визначення > параметри), як показано на рис. 2.7.

Parameters				
Name	Expression	Value	Description	
t	0.007[s]	0.007 s	время	
Spaza	3.2514E-4 [m ²]	3.2514E-4 m ²	сечение паза	
S_coil	3.2514E-4 [m ²] /N_coil	1.6257E-6 m ²	сечение провода	
omega	0[1/s]	0 1/s	угловая частота вращен...	
omeg	2*pi*nu	314.16 Hz	угловая частота вращен...	
nu	50[Hz]	50 Hz	частота тока	
N_coil	200	200	число витков	
Jmax	20*sqrt(2)[A]	28.284 A	амплитудное значение...	
Jc	Jmax*cos(omeg*t-120[deg])	28.129 A	ток обмотки С	
Jb	Jmax*cos(omeg*t+ 120[deg])	-11.504 A	ток обмотки В	
Ja	Jmax*cos(omeg*t)	-16.625 A	ток обмотки А	

Рисунок 2.7 – Вхідні параметри для обчислень

Перерахуємо інші компоненти дезінтегратора :

- індуктор магнітного поля;
- трифазна багатовиткова котушка;
- робоча камера з немагнітної неіржавіючої сталі;
- феромагнітні робочі тіла.

У таблиці 2.1 приведені властивості матеріалів, які використовуються в цій моделі.

Таблиця 2.1 – Властивості матеріалів

Матеріал	Електрична провідність (σ)	Відносна проникність (μ_r)
Мідь в обмотках	5,998e7 [См/м]	1
Магнітопровід індуктора	0 [См/м]	Задано кривою намагнічування
Повітря	0 [См/м]	1

Для моделювання електромагнітних полів в моделі використовуватимемо фізичний інтерфейс Magnetic Fields (магнітні поля), а також виберемо дослідження – Time Dependent (нестационарне в часовій області).

Оскільки магнітні і електричні властивості частини матеріалів пристрою будуть визначені як лінійні, доданий за замовчуванням вузол Ampère's Law (закон Ампера) залишаємо без змін.

Щоб вказати те, що індуктор і ФРТ зроблені з нелінійного магнітного матеріалу, виберемо матеріальну модель H – B curve (H – B крива намагнічування) (рис. 2.8) у вузлі Ampère's Law (закон Ампера), який треба додатково додати в інтерфейс.

Для ФРТ, виконаного з підшипникової сталі (iron) проведемо аналогічну операцію. Звернімо увагу, що у такому разі, маючи два різні вузли Ampere's Law, можна використати для індуктора і ФРТ різні матеріальні моделі при необхідності.

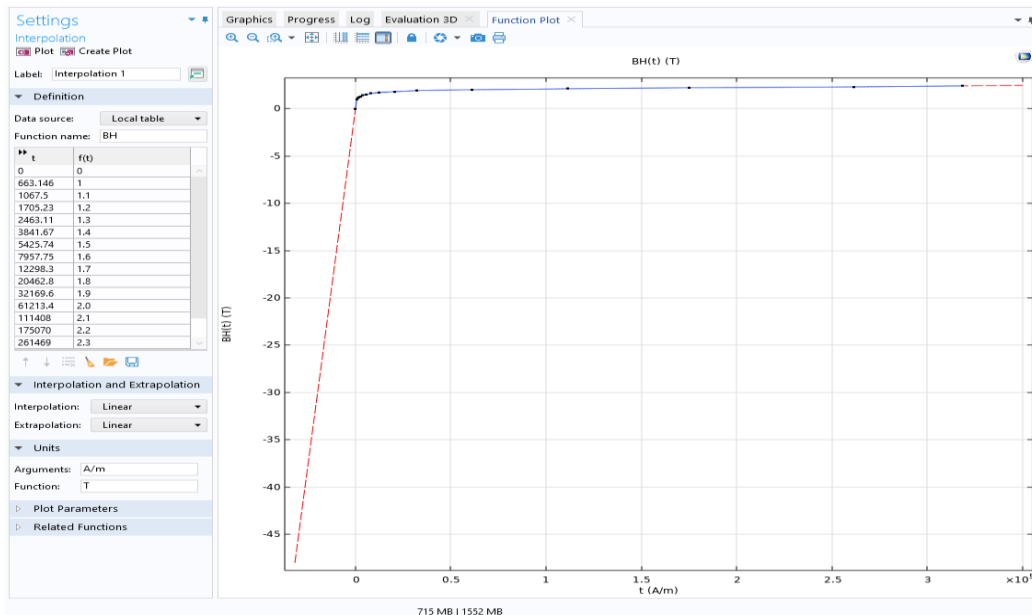


Рисунок 2.8 – Н – В– крива намагнічування нелінійного матеріалу індуктора

Електромагнітну силу, що виникає в ФРТ, розрахуємо на основі тензора напруги Максвелла, що реалізовано у вузлі Force Calculation (розрахунок сили). За допомогою вузла Multi-Turn Coil (багатовиткова котушка) додамо в модель фазні обмотки Фаза А, Фаза В і Фаза С, а змінний струм, що протікає через них, задамо як тригонометричні функції.

Для моделювання трифазних обмоток використовуватимемо умову Homogenized Multi-Turn Coil (Однорідна багатовиткова котушка) (рис. 2.9). Число витків в обмотці рівне N_{coil} . Кожен багатожильний провід проводить струм близько J_a, J_b, J_c , який зміщений на 120° між фазами. Запишемо вирази для кожної з фаз:

$$\begin{aligned}
 J_a &= J_{max} * \cos(\omega \times t), \\
 J_b &= J_{max} * \cos(\omega \times t + 120[deg]), \\
 J_c &= J_{max} * \cos(\omega \times t - 120[deg]),
 \end{aligned}
 \tag{2.5}$$

де J_{max} – амплітудне значення струму.

Щоб його отримати, множимо значення діючого струму на $\sqrt{2}$.

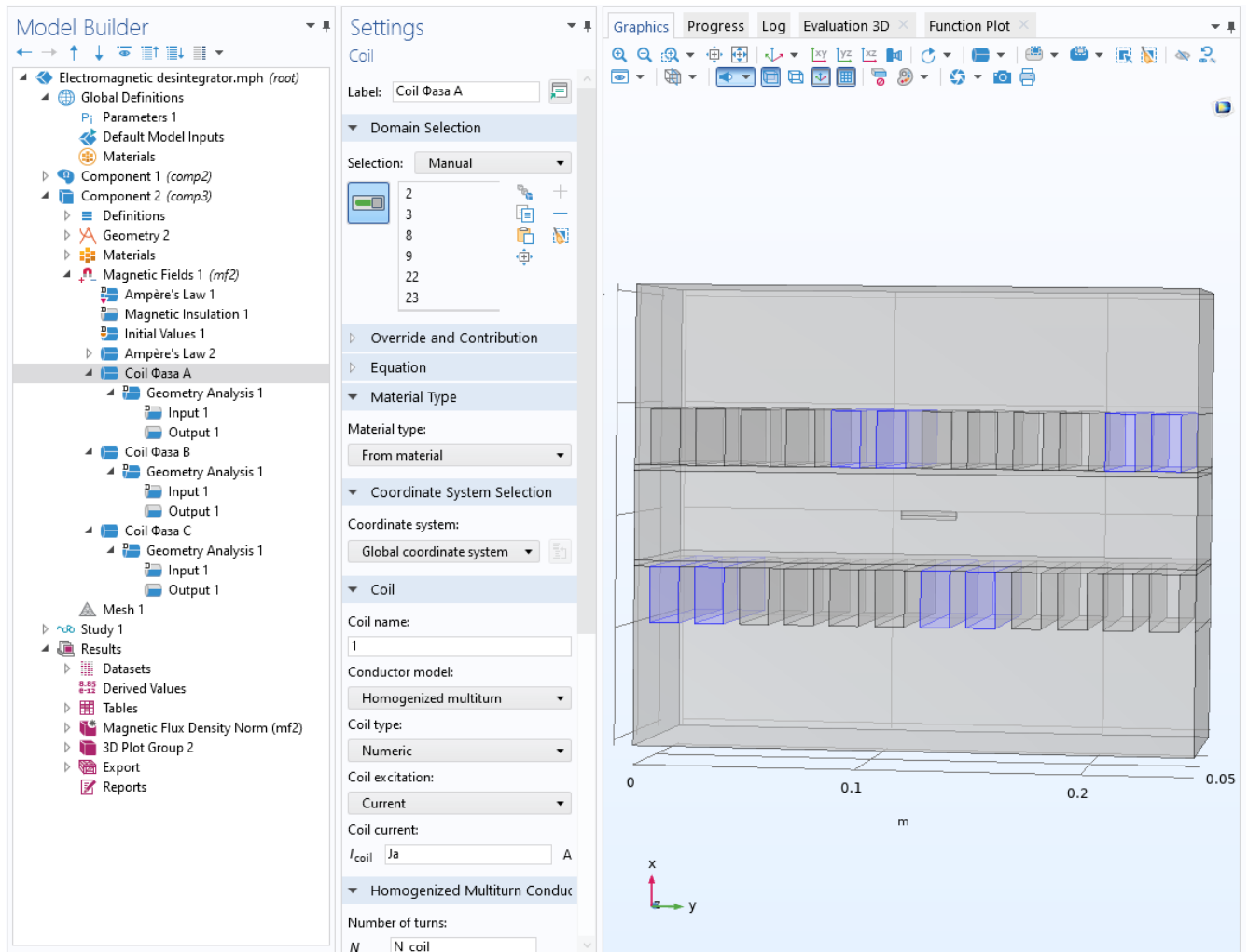


Рисунок 2.9 – Вікно налаштувань вузла Multi-Turn Coil (багатовиткова котушка)

Напрямки струмів у провідниках обмоток задаються через встановлення вхідної і вихідної межі руху струму в опису параметрів Geometry Analysis (геометричний аналіз) вузлів:

- Coil Фаза А;
- Coil Фаза В;
- Coil Фаза С (рис. 2.10).

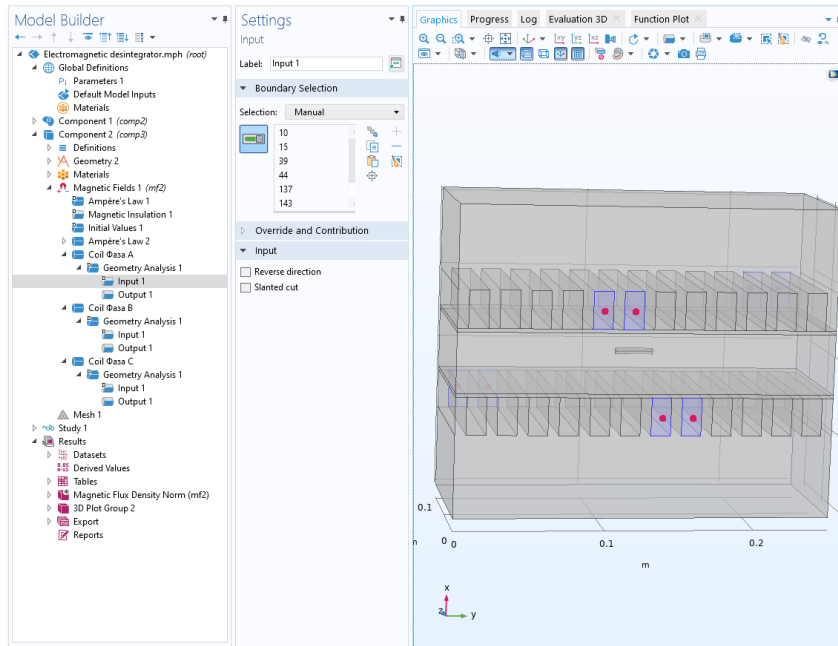


Рисунок 2.10 – Вікно налаштувань вузла Input (вхід)

Кінцево-елементне розбиття для моделі дезінтегратора, де продемонстровано послідовне звуження структурованої сітки в першу чергу для меж повітряної області продемонстровано на рис. 2.11.

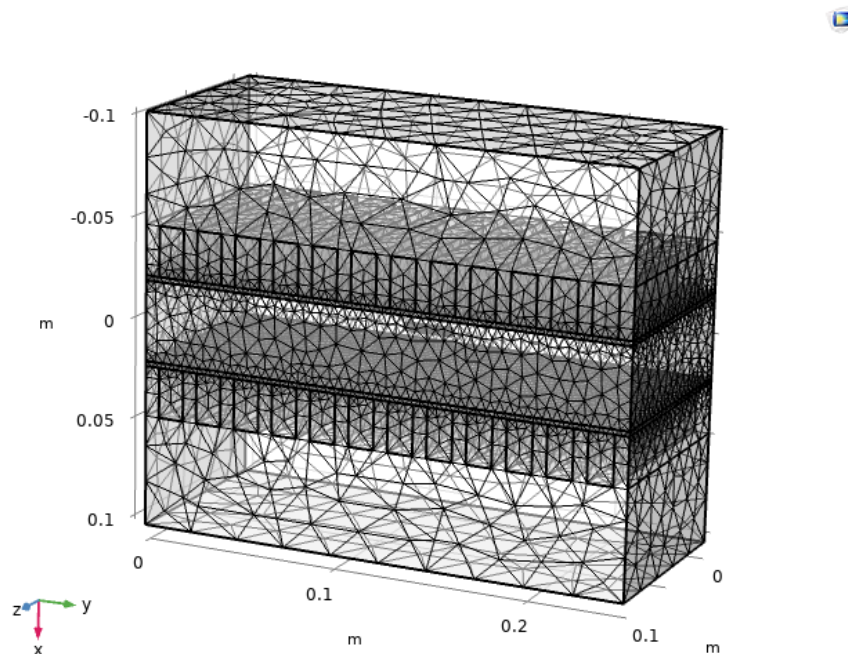


Рисунок 2.11 – Кінцево-елементне розбиття (mesh) для моделі дезінтегратора

Щоб завершити налаштування та визначити напрямки струму в обмотках, а також перевірити правильність заданих параметрів при їх моделюванні необхідно додати до елемента Study перший крок – Coil Geometry Analysis (аналіз геометрії котушки) (рис. 2.12). Дослідження Coil Geometry Analysis (аналіз геометрії котушки) використовується для обчислення розподілу струму, коли до моделі додається Coil Domain (домен котушок), і це може знадобитися перед запуском інших підтримуваних аналізів магнітних полів. Для моделі провідника Homogenized multiturn (гомогенізований багатовитковий) це необхідно, коли для типу котушки встановлено значення Numeric (числовий), і він виробляє густину струму, що відповідає пучку провідних проводів, з'єднаних послідовно. У випадку з одним провідником він виробляє постійний струм цього об'ємного провідника. У аналізах, що йдуть після аналізу геометрії котушки, ефекти індукованих струмів автоматично включаються.

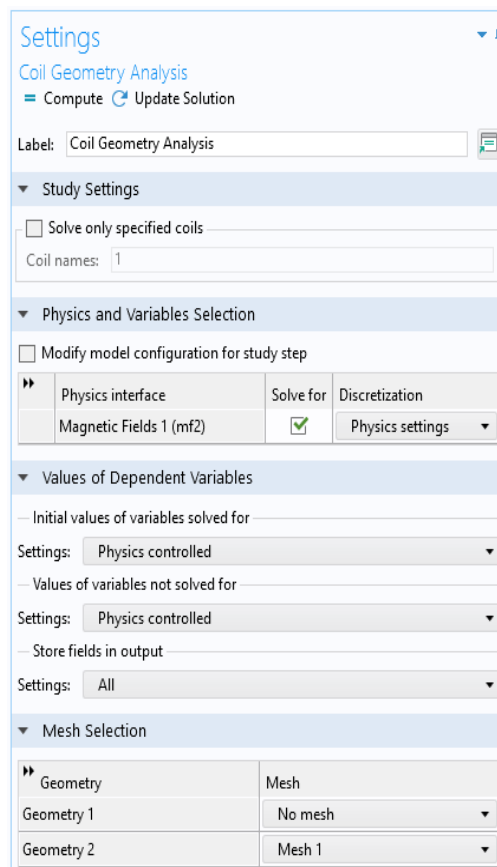


Рисунок. 2.12 – Налаштування кроку Coil Geometry Analysis (аналіз геометрії котушки)

Відсутність помилок в процесі його роботи свідчатиме про те, що задані для обрахунку параметри обмотки дезінтегратора знаходяться в межах реальних фізичних величин. В подальшому додаємо до елементу Study (дослідження) крок Stationary (статичний) (рис. 2.13) для визначення параметрів розроблюваної моделі при заданих конкретних значеннях вхідних даних для розрахунку в статичному стані. Він використовується для обчислення статичних електричних або магнітних полів, а також постійних струмів. Також можна обчислити кілька рішень, наприклад, кількість випадків навантаження, або відстежити нелінійну реакцію на повільно змінювану навантаження.

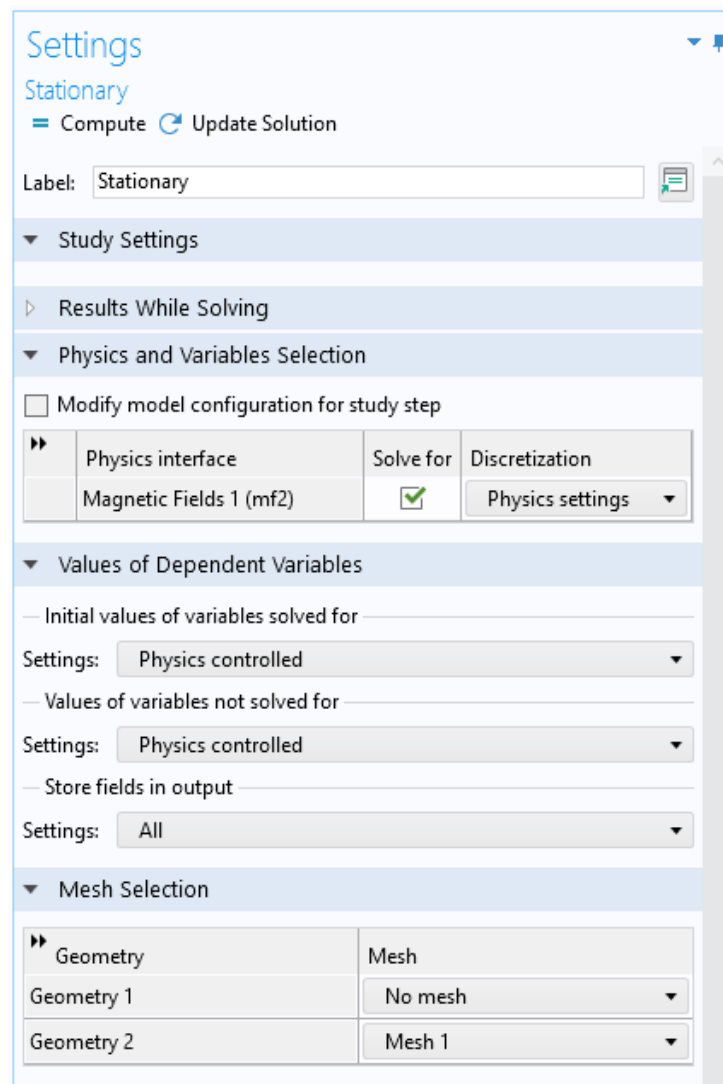


Рисунок 2.13 – Налаштування кроку Stationary (статичний)

В процесі виконання даного кроку ми отримуємо можливість провести необхідні розрахунки створеної моделі певної миті із заданими частотно-часовими характеристиками. З метою проведення досліджень та визначення поведінки моделі з плином часу в динаміці необхідно підключити до елемента Study (дослідження) крок Time Dependent (залежність від часу) (рис. 2.14) дослідження, що залежить від часу, використовується, коли змінні поля змінюються з часом. Він використовується для обчислення перехідних електромагнітних полів, включаючи поширення електромагнітних хвиль у часовій області. Дане дослідження використовує результати кроку Stationary (статичний) для подальшого розрахунку моделі, що залежить від часу.

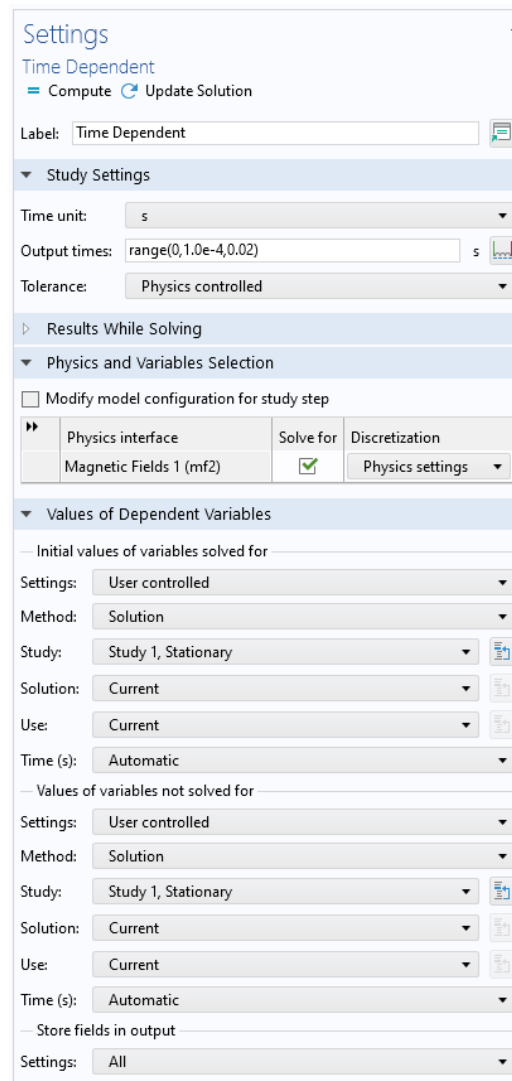
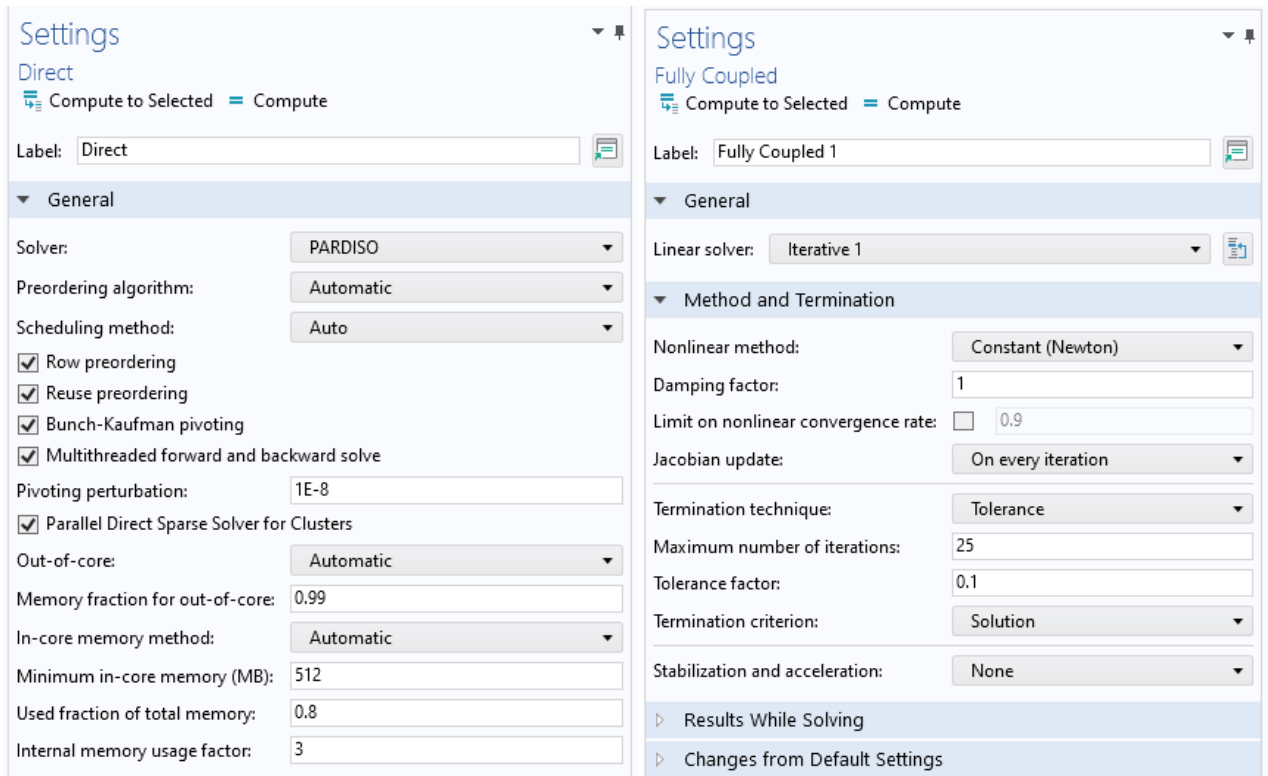


Рисунок 2.14 – Налаштування кроку Time Dependent (залежність від часу)

В послідовності Direct (прямий) (рис. 2.15 (а)) присвоїмо параметр Solver (вирішувач) PARDISO. Це дозволить зменшити використання оперативної пам'яті під час виконання розрахунків. В послідовності Fully Coupled (повністю з'єднаний) (рис. 2.15 (б)) присвоїмо параметр Jacobian update (оновлення Якобі) On every iteration (на кожній ітерації), виставимо максимальне число ітерацій – 25 та фактору толерантності – 0,1.



а

б

Рисунок 2.15 – Налаштування послідовності обчислювача: Direct (прямий) (а) та Fully Coupled (повністю з'єднаний) (б) для кроку Time Dependent (залежність від часу)

2.5 Результати обчислень

Модель розв'язується шляхом обчислення Solver Configurations (конфігурації вирішувача) – схеми для обчислення рішення.

Простіше кажучи, конфігурація вирішувача складається з одного або кількох Solution nodes (вузлів рішення), і кожен вузол рішення складається з послідовності підвузлів, що визначають спосіб обчислення рішення.

Як правило, така конфігурація вирішувача містить інформацію про те, який фізичний інтерфейс і геометрію використовувати, які змінні розв'язувати і які вирішувачі використовувати для виконання типу дослідження.

Розв'язати модель також можливо шляхом обчислення дослідження; це визначає послідовність конфігурацій вирішувача і, в деяких випадках, послідовність конфігурацій завдання.

Елемент Results (результати) в Comsol Multiphysics дерева моделі містить інструменти для подальшої обробки і аналізу результатів від моделювання, включаючи візуалізацію, анімацію, аналіз даних і звіти.

Головний вузол Results (результати) містить усі вузли, які створюються для таких цілей. Вікно Settings (налаштування) містить такі розділи: Update of Plots (оновлення графіків) та Save Data in the Model (збереження даних у моделі).

За замовчуванням усі графіки оновлюються автоматично, коли, наприклад, перераховується рішення, активується вузол графіка або змінюється таблиця кольорів для графіка.

Є можливість зберегти дані графіка в моделі.

Елемент Results (результати) групує інструменти в категорії.

Розподіл магнітного поля чи індукції є дуже важливим чинником під час проектування електричних машин і являється ключовим параметром для дослідження, а найбільшу цікавість для досліджень представляє просторовий розподіл магнітної індукції в повітряному зазорі камери.

За результатами обчислень були створені графічні, часові та просторові інтерпретації фізичних явищ, що відбуваються в активній зоні побудованої моделі.

Для переведення дезінтегратора в робочий режим, його обмотки підключаються до промислової трифазної мережі змінної напруги, внаслідок чого через них протікають струми, форма яких показана на рис. 2.16.

В результаті проходження струму через обмотки індуктор створює біжуче магнітне поле, характеристики якого продемонстровано на рис. 2.17.

Графік містить силові лінії магнітної індукції, вздовж яких орієнтуються ФРТ.

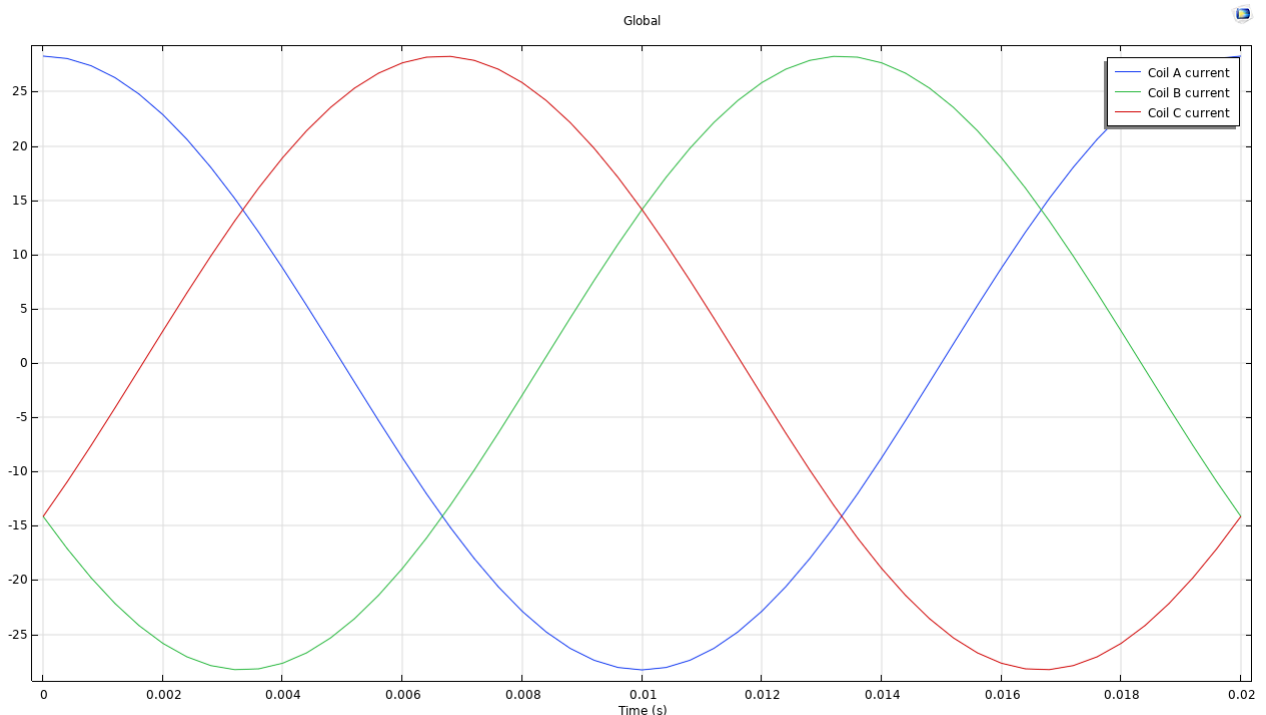


Рисунок 2.16 – Графік залежності сили струму від часу в фазних обмотках

Щільність та напрямок струму відображається графічними елементами у вигляді червоних стрілок, кількість та напрямок яких залежить від характеристик струму в обмотці.

Значення магнітної індукції знаходиться в межах від 0 Тл до 0,47 Тл.

Дію сили Лоренца продемонстровано її розподілом в ФРТ, яке перебуває в РК, що відображено миттєвими її значеннями.

Її значення знаходиться в межах від $-0,06 \text{ Н/м}^3$ до $0,29 \text{ Н/м}^3$.

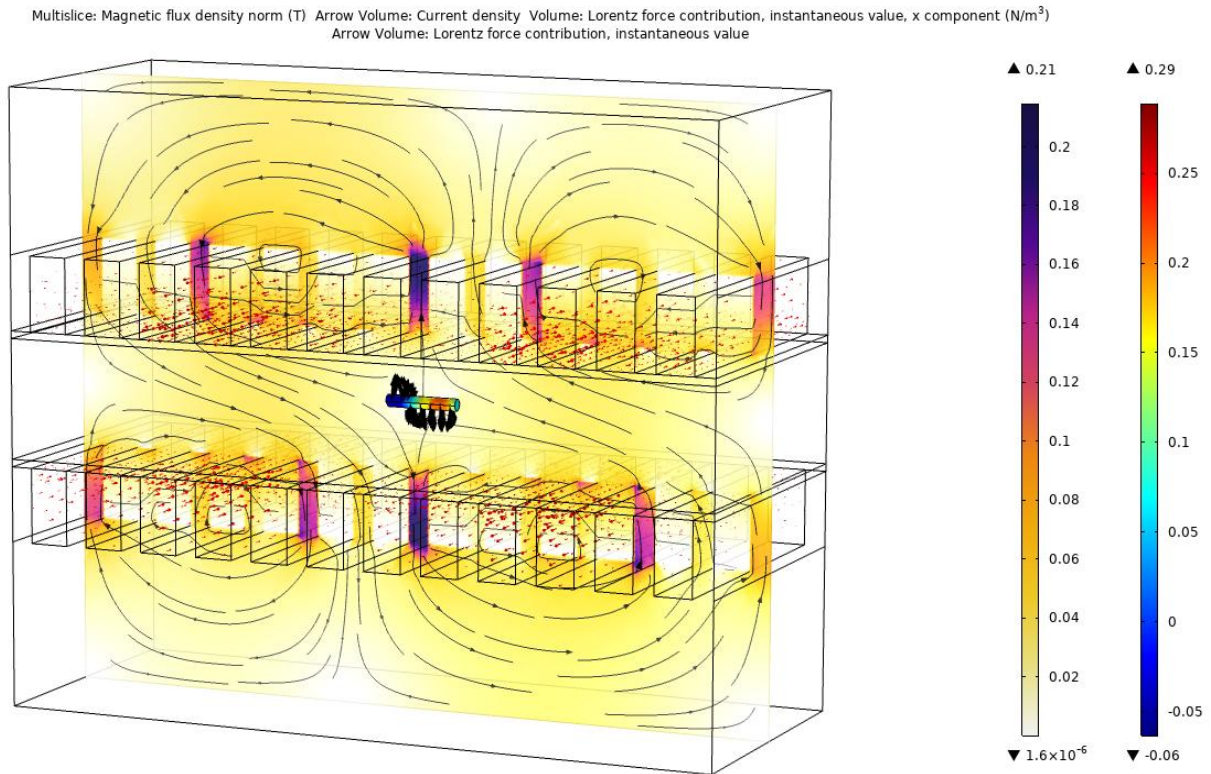


Рисунок 2.17 – Тривимірний графік розподілу інтенсивності магнітної індукції, густини струму та дії сили Лоренца на ФРТ

Зазначену картину можна спостерігати в часовій залежності, що продемонстровано на рис. 2.18.

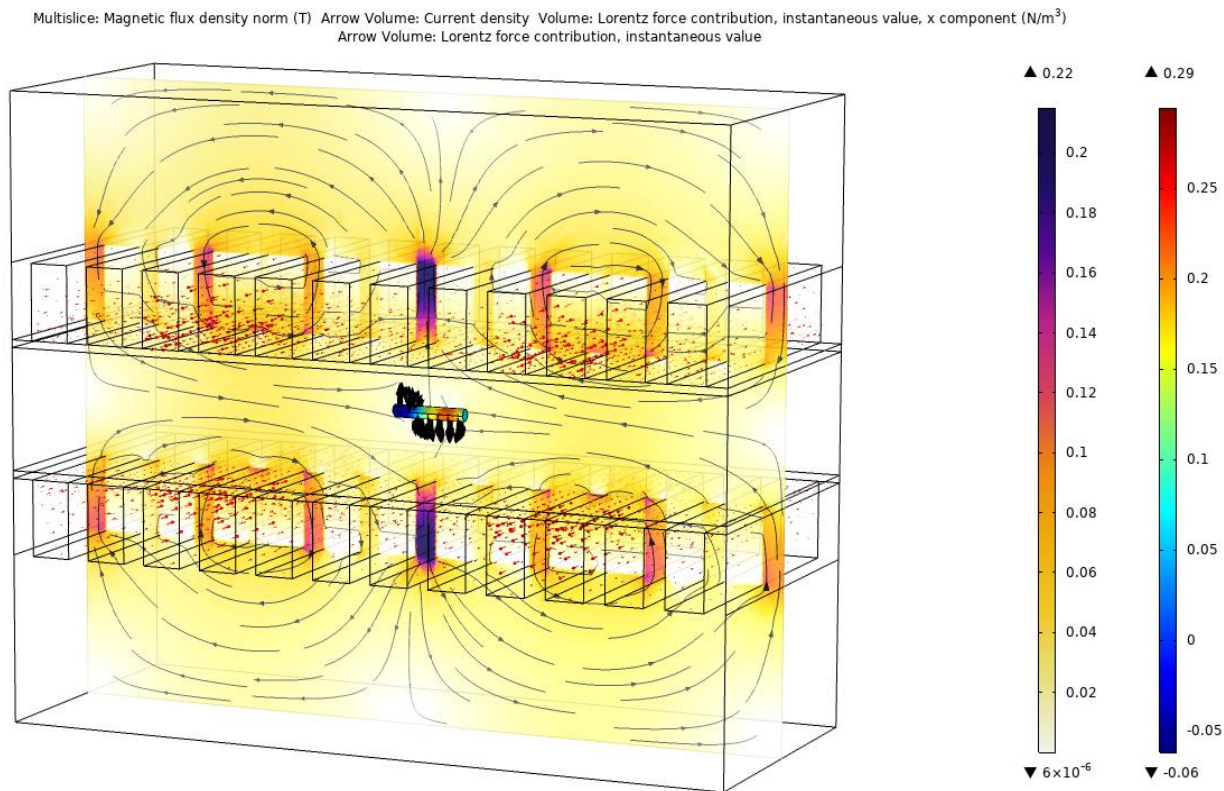


Рисунок 2.18 – Тривимірний графік розподілу інтенсивності магнітної індукції, густини струму та дії сили Лоренца на ФРТ
($t = 0,0116$ с)

Слід зазначити, що для обчислень частота коливань змінного струму в обмотках дезінтегратора складала 50 Гц, тому для повного розрахунку достатньо було дослідити роботу пристрою за один період коливань, тобто 0,02 с.

Тривимірне зображення розподілу магнітної індукції має наступний вигляд – рис. 2.19.

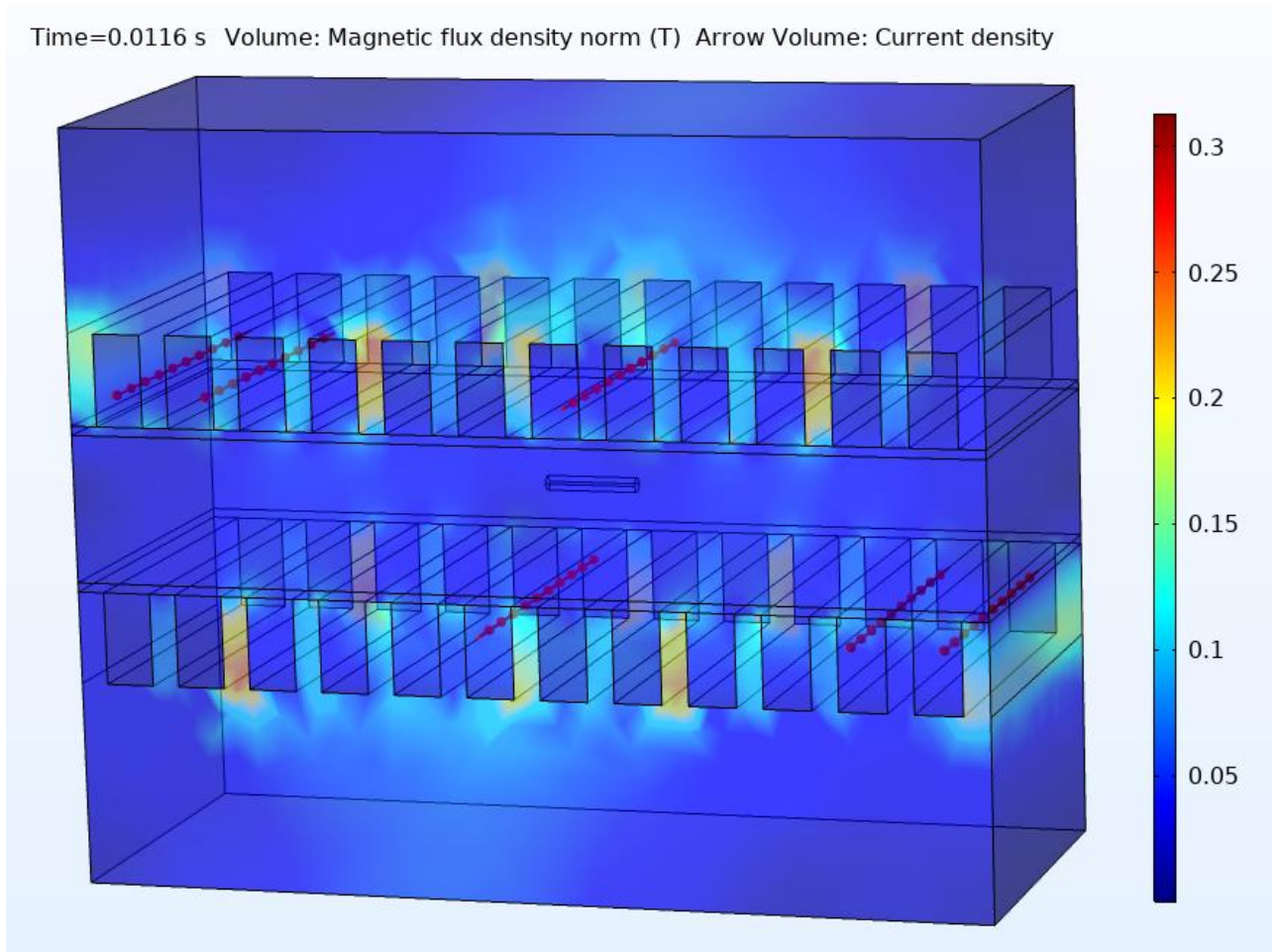


Рисунок 2.19 – Тривимірний графік розподілу інтенсивності магнітної індукції і густини струму

Розподіл силових ліній, що діють на ФРТ зображено на рис. 2.20.

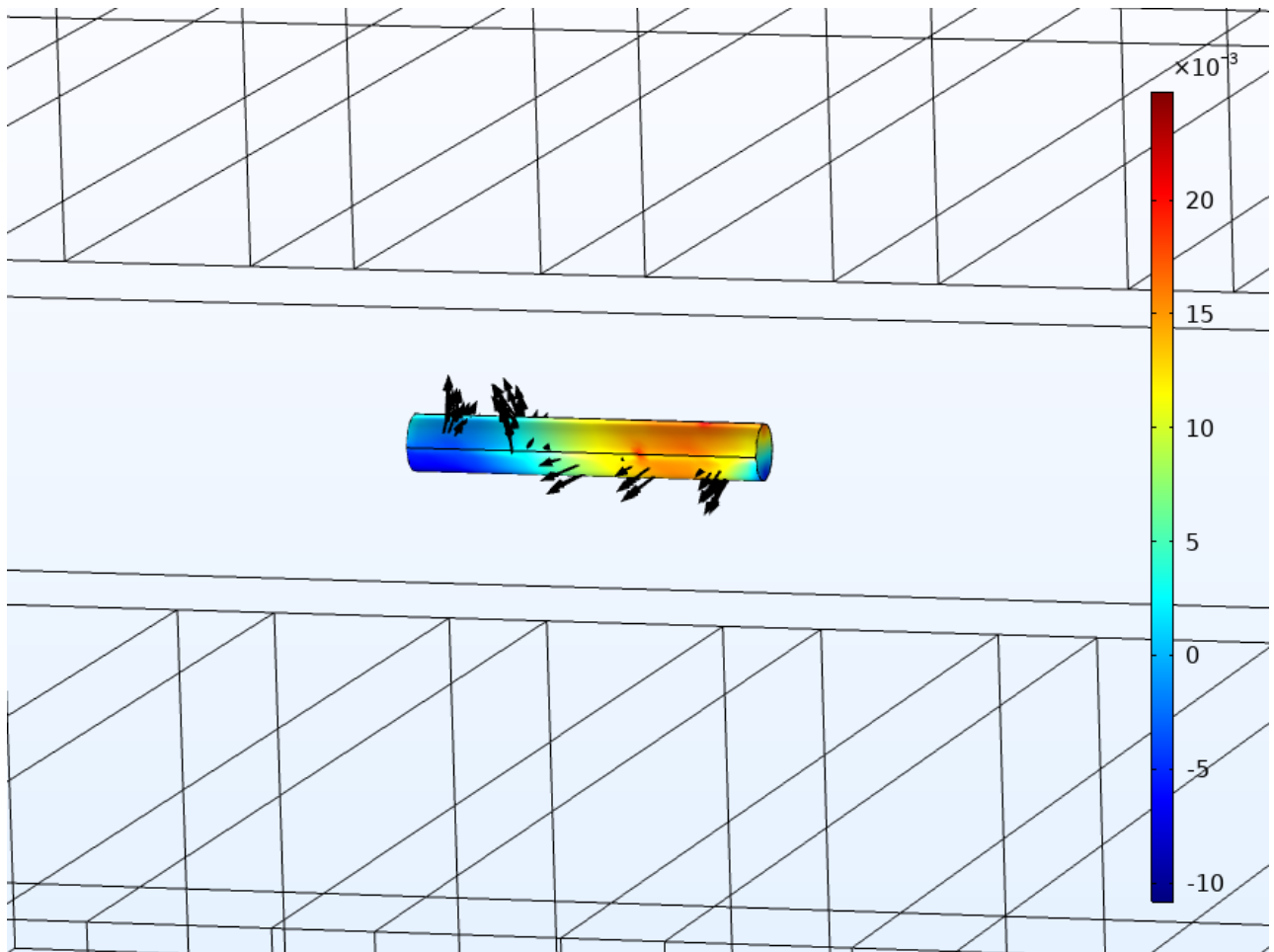


Рисунок 2.20 – Тривимірний графік розподілу сили Лоренца у ФРТ

За результатами моделювання було створено анімації, що демонструють роботу пристрою.

2.6 Висновки до розділу 2

В другому розділі роботи реалізовано метод кінцевих елементів для проведення необхідних розрахунків та описано створення на його основі моделі електромеханічного дезінтегратора засобами середовища Comsol Multiphysics. Це дозволило змодельовати пристрій з заданими характеристиками для визначення його робочих параметрів і проведення відповідних досліджень.

3 РОЗРАХУНОК ПРОЦЕСІВ ТА ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ДЕЗІНТЕГРАТОРА

3.1 Принцип дії індуктора магнітного поля і магнітний стан його робочої камери

Продовгуваті ФРТ в РК прагнутимуть розташовуватися по силових лініях МП і, значить, по напрямку векторів M . Проте під впливом гальмівної дії оброблюваного середовища між напрямками магнітного поля і елементами, що обертаються повинне утворитися деяке кутове зміщення. Це є умовою виникнення електромагнітного моменту (ЕММ) M_{em} , що впливає на ФРТ, від чого залежать інтенсивність і якість технологічної обробки різномірних матеріалів. По суті, ЕММ в ІМП є реактивним, а принцип дії ІМП відповідає принципу дії синхронного реактивного двигуна [22]. По аналогії з синхронними машинами, по напрямку орієнтації ФРТ призначається подовжня вісь d , а перпендикулярно їй – поперечна вісь q . У сталому режимі, що встановився осі обертаються разом з цими елементами і МП.

Масив погоджено орієнтованих ФРТ приведе до відмінності магнітних властивостей усередині РК по різних напрямках, що виражається магнітною анізотропією. По подовжній d і поперечною q осям, виявляються різні значення складових АМП μ_d і μ_q . Вони залежать від конфігурації, взаємного розташування і концентрації ФРТ.

3.2 Енергетичні параметри індуктора магнітного поля

Набір електричних величин, що враховується, у фазній обмотці індуктора представимо за допомогою схеми заміщення, яка зображена на рис. 3.1.

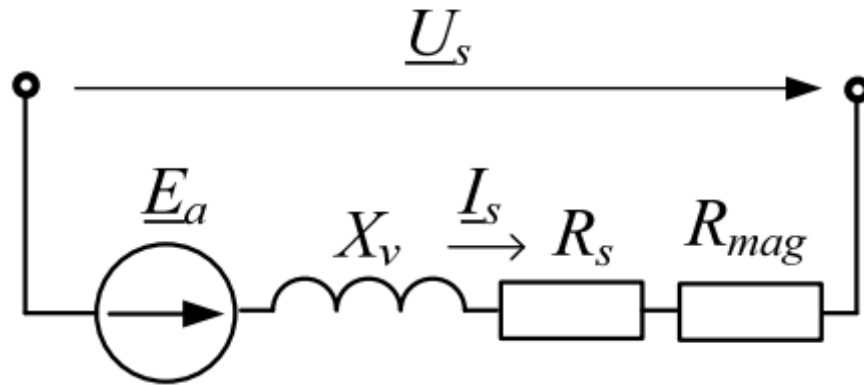


Рисунок. 3.1 – Електрична схема заміщення фазної обмотки індуктора

Окрім фазних напруги U_s і струму I_s на рис. 3.3 розташовано ідеальне джерело електрорушійної сили (ЕРС) E_a , а також ідеальні індуктивний і резистивний елементи, що характеризуються відповідними опорами: активні опори R_s і R_{mag} відображають електричні і магнітні втрати потужності, реактивний опір X_v - лобове розсіяння МП обмотки індуктора.

Маючи розрахунки МП і визначення кількісних і фазових співвідношень електромагнітних величин досить просто можна вичислити енергетичні параметри ІМП. Потужність електромагнітна P_{em} , розрахована через електричні параметри:

$$P_{em} = m_s \cdot E_a \cdot I_s \cdot \cos\varphi_{Ea}, \quad (3.1)$$

де m_s – кількість фаз дорівнює 3;

φ_{Ea} – кут фазового зрушення електрорушійної сили E_a .

З іншого боку, потужність електромагнітна в механічному вираженні може розглядатися як вихідна або корисна потужність:

$$P_{em} = P_{out} = M_{em}\Omega_s, \quad (3.2)$$

де M_{em} – значення електромагнітного моменту;

Ω_s – фазна кутова швидкість МП.

Потужність вхідна або витрачена:

$$P_s = m_s U_s I_s \cos \varphi_s, \quad (3.3)$$

де $\cos \varphi_s$ – коефіцієнт потужності, що визначається за обчисленим фазовим зрушенням напруги і струму обмотки індуктора.

Втрати потужності складаються з потужності електричних втрат в обмотці індуктора

$$P_{el} = m_s R_s I_s^2. \quad (3.4)$$

Потужності магнітних втрат P_{mag} в осерді індуктора.

Коефіцієнт корисної дії (ККД) ІМП :

$$\eta = P_{out}/P_{in}. \quad (3.5)$$

3.3 Оцінка зусиль в активній зоні електромеханічного дезінтегратора

Проведемо моделювання та оцінку зусиль, що виникають в робочій зоні ЕМД багатofакторної дії.

Складний характер руху ФРТ, велика кількість чинників, що впливає на процес обробки матеріалу, ускладнюють теоретичний розгляд даного питання. Траєкторія немагнітної частинки, що рухається через вихровий шар, об'ємна і визначається сукупністю численних факторів. Явище, що впливає на ФРТ крутного моменту, пояснюється наступним чином. У неоднорідному магнітному полі на феромагнітне тіло невеликих розмірів діє сила, яку можна визначити за формулою:

$$\vec{F} = \vec{f} \cdot V_t = \frac{1}{2} V_t \mu_0 (\mu_r - 1) \text{grad} H^2, \quad (3.6)$$

де \vec{f} – густина пондеромоторних сил, які долають феромагнетиками в магнітному полі;

V_t – область простору, зайнятого феромагнітним тілом;

μ_0 – магнітна проникність вакууму;

μ_r – відносна магнітна проникність;

H – модуль напруженості магнітного поля.

Для визначення сили, що діє на феромагнітне тіло, необхідно розрахувати магнітне поле в робочій зоні ЕМД. Величина H , що цікавить нас визначалася шляхом чисельного рішення польового завдання з використанням методу скінченних елементів. Даний метод дозволяє точно описати конфігурацію активної частини ЕМД, а також врахувати нелінійність властивостей матеріалів.

На рис. 3.2 показана геометрична модель, побудована з урахуванням реальних лінійних розмірів активної зони експериментального зразка ЕМД. Основні властивості матеріалів, що задаються як вихідні дані для кожної розрахункової ділянки, наведені в таблиці 3.1.

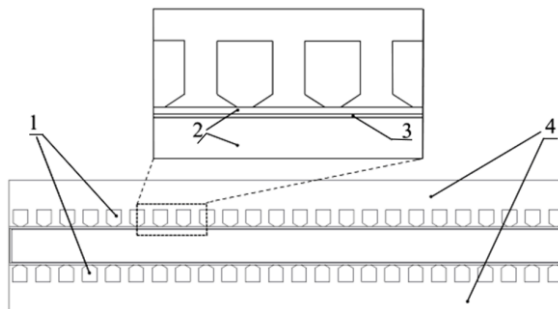


Рисунок 3.2 – Геометрія розрахункової моделі ЕМД

Таблиця 3.1 – Властивості матеріалів розрахункових областей

Назва розрахункової ділянки	Відносна магнітна проникність, μ_r	Питома електрична провідність, γ , См / м
1. Обмотка індуктора	1	$5,8e^7$
2. Повітряна область	1	0

Продовження таблиці 3.1

3. Робоча камера	1	1,12e7
4. Магнітопровід індуктора	Крива намагнічування для сталі марки Ст. 2211	0

На зовнішніх кордонах розрахункової області задається нульове значення векторного магнітного потенціалу (умова Діріхле). На кордоні розділу середовищ з різними магнітними властивостями використовується умова рівності нормальних до кордону складових вектора магнітної індукції і дотичних складових вектора напруженості магнітного поля (умова Неймана).

Картина розподілу векторного магнітного потенціалу в активній зоні ЕМД (в межах полюсного поділу) має вигляд, представлений на рис. 3.3.

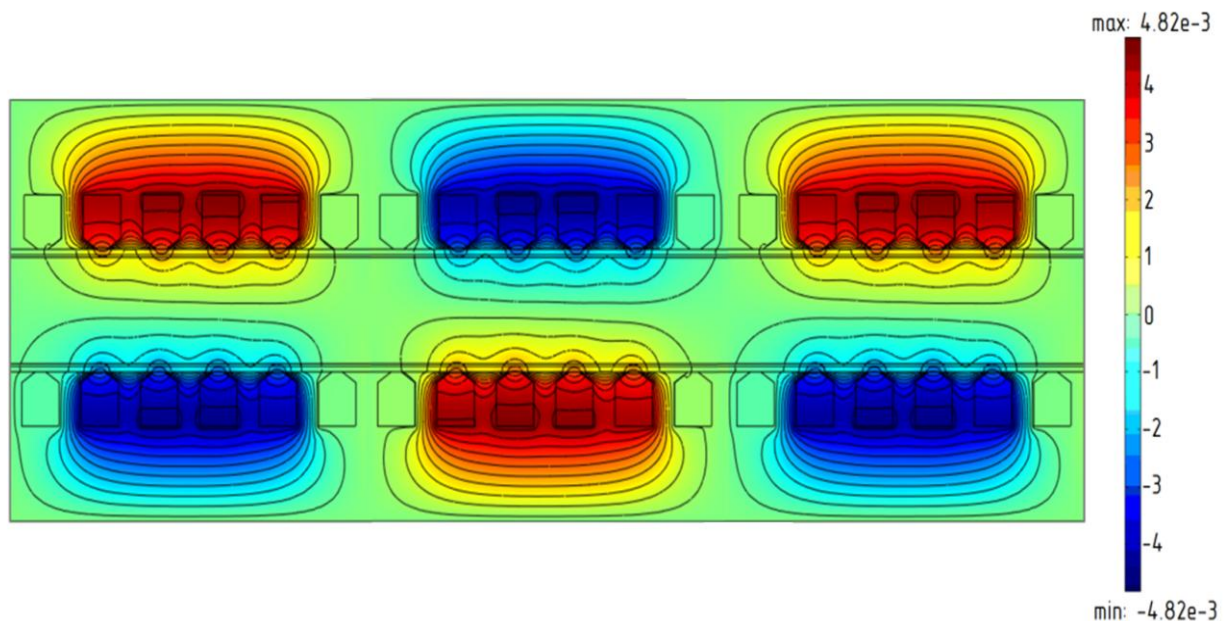


Рисунок 3.3 – Розподіл векторного магнітного потенціалу в активній зоні ЕМД

Магнітне поле представлено стійким знакозмінним характером, а його величина досягає 0,084 Тл, що є цілком характерним з точки зору організації руху феромагнітних робочих тіл.

Порівняльна візуальна оцінка силового магнітного поля і робочої камери показує, що лінії силової електромагнітної дії чітко відповідають характеру деформації елементів ділянок робочої камери рис. 3.4.



Рисунок 3.4 – Робоча камера

На рис. 3.5 (а) представлений фрагмент картини розподілу векторного магнітного потенціалу в активній зоні ЕМД при наявності немагнітної електропровідної камери і одного феромагнітного тіла. Розподіл зусиль (у вигляді стрілок-векторів), що діють на ФРТ при деяких миттєвих положеннях показано на рис. 3.5 (б).

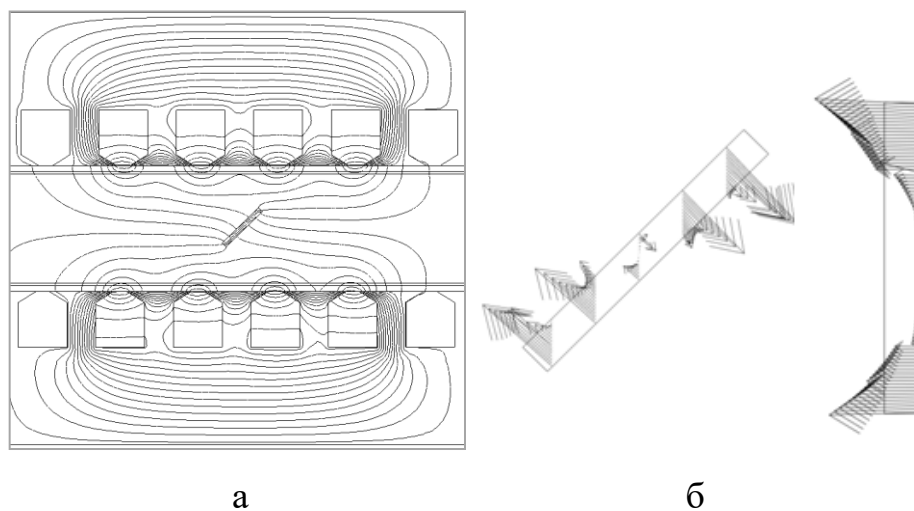


Рисунок 3.5 – Розподіл векторного магнітного потенціалу в активній зоні ЕМД (а) і зусиль діючих на ФРТ (б)

Важливою особливістю роботи ЕМД, виявленої в ході проведення експериментальних досліджень [23] є деформація робочої електропровідної камери. Наслідком взаємодії біжучих магнітних полів індукторів і вихрових струмів, що протікають в стінках робочої камери (прилеглих до індукторів), є поява характерних прогинів стінок робочої камери в межах кожного полюсного поділу. На рис. 3.6 представлені криві, що показують розподіл глибини прогину по довжині однієї зі стінок робочої камери після 10 хв, 15 хв і 20 хв роботи ЕМД. На рисунку видно, що після 20 хв роботи дезінтегратора глибина прогину, при товщині стінки камери 0,8 мм, досягає 10 мм.

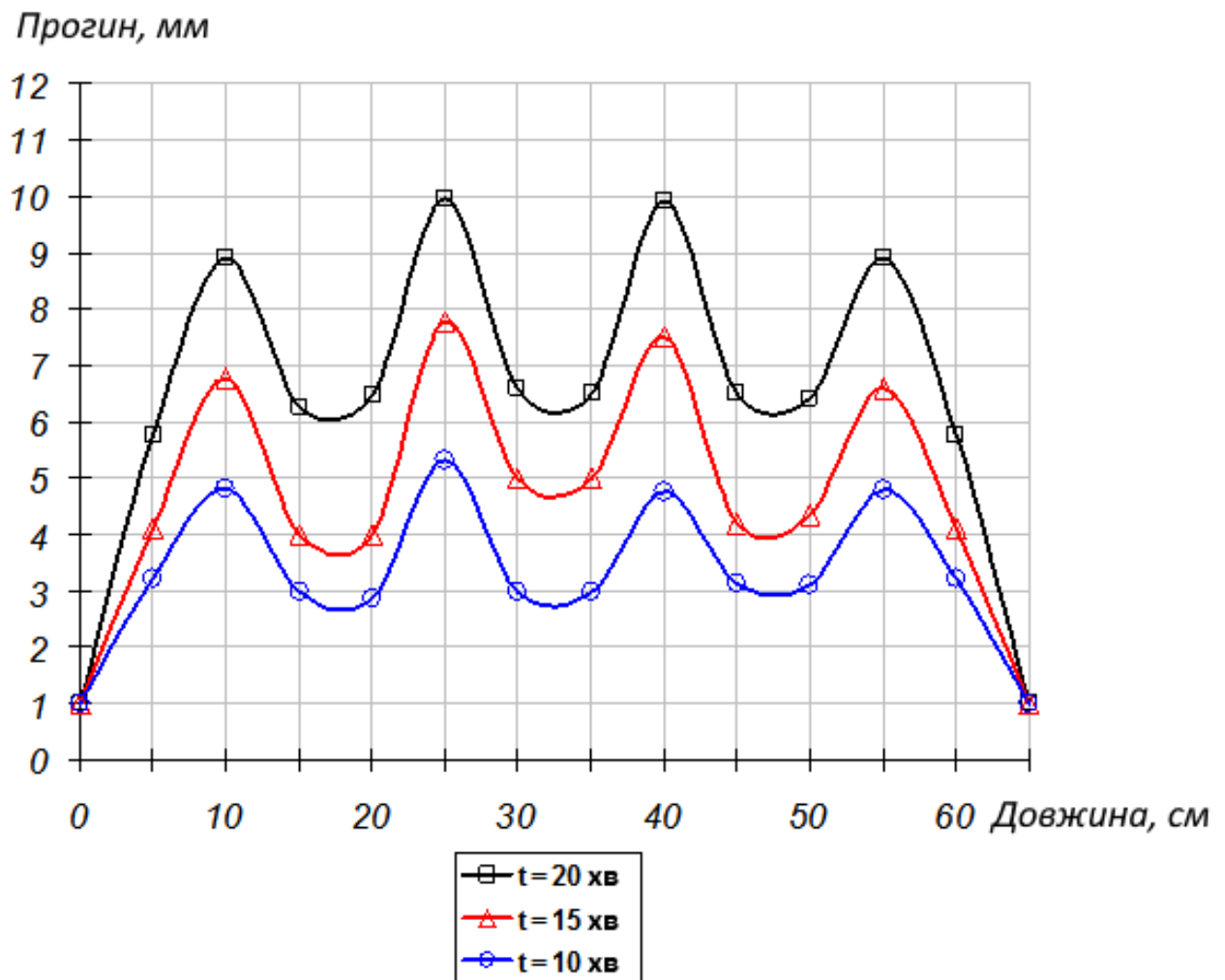


Рисунок 3.6 – Криві розподілу глибини прогину по довжині стінки робочої камери

Розподіл електромагнітних зусиль в робочій електропровідній камері ЕМД (в межах полюсного поділу), отримане за результатами кінцево-елементних розрахунків, представлено на рис. 3.7.

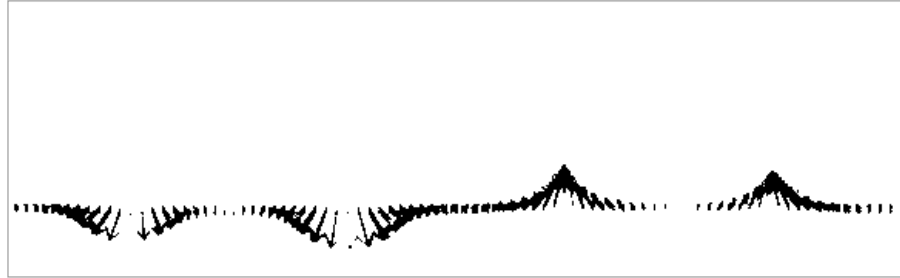


Рисунок 3.7 – Розподіл електромагнітних зусиль в робочій електропровідній камері ЕМД

Розрахунок підтверджує наявність локалізації діючих електромагнітних зусиль на стінки електропровідної камери в межах полюсного поділу індукторів. Деформацію робочої камери ЕМД викликають, перш за все, зусилля які спрямовані нормально до поверхні стінки камери.

Проведений аналіз виявив можливість застосування електромагнітного принципу подрібнення різноманітних матеріалів. Величина індукції магнітного поля, що досягає 0,084 Тл забезпечує стійку активну взаємодію феромагнітних тіл, що мелють, і подрібнюваного матеріалу.

3.4 Охорона праці та безпека дослідницької діяльності

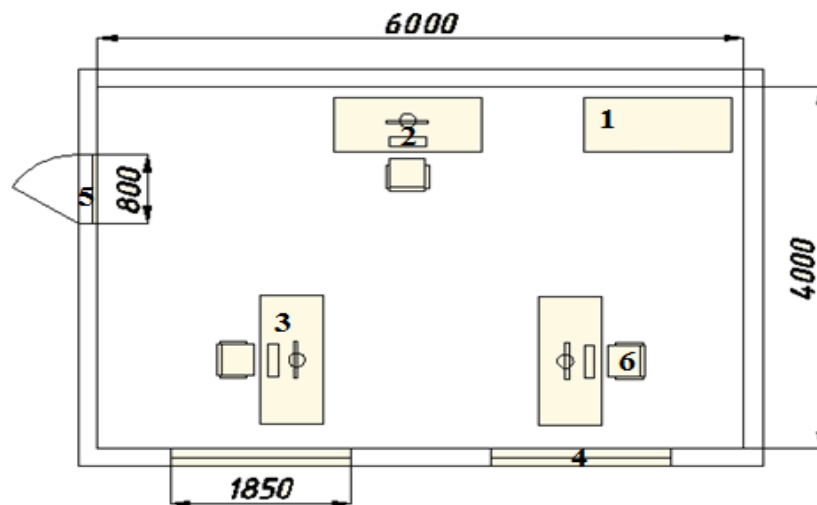
3.4.1 Характеристика приміщення і робочого місця

Аналіз умов праці проводиться щодо дослідницької лабораторії в якій відбувається моделювання та дослідження характеристик розроблюваного пристрою.

Так як дана робота має суто теоретичний характер і виконувалась із застосуванням засобів обчислювальної техніки, то в даному розділі визначені основні потенційно небезпечні і шкідливі фактори при використанні візуальних дисплейних терміналів персональних електронно-обчислювальних машин (ВДТ ПЕОМ) відповідно до вимог ДсанПіН 3.3.2.007-98 [24] та ДНАОП 0.00-1.21-99 та запропоновані технічні рішення та організаційні заходи з безпеки та гігієни праці і виробничої санітарії, а також визначені основні заходи з безпеки в надзвичайних ситуаціях (БНС).

Приміщення, в якому відбувалися дослідження, знаходиться на другому поверсі адміністративної будівлі. Загальна площа становить 24 м^2 , висота – 2,8 м. Кількість працюючих у лабораторії – 3 людини.

План дослідницької лабораторії, в якій проводилися роботи, показаний на рис. 3.8.



1 – шафа для зберігання документів; 2 – комп'ютери; 3 – стіл; 4 – вікно; 5 – двері; 6 – стілець

Рисунок 3.8 – Схема приміщення

В лабораторному приміщенні розташовано три робочі місця з персональними комп'ютерами. Напруга джерела живлення у приміщенні – від 220 В до 380 В. У лабораторії розміщено 3 письмових стола, одна шафа для зберігання документів. За безпекою ураження електричним струмом лабораторія належить до приміщень без підвищеної небезпеки ураження електричним струмом працюючих.

Геометричні параметри приміщення вказані у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Геометричні параметри приміщення

Параметри	Позначення	Значення
Глибина, м	A	6,0
Ширина, м	B	4,0
Висота, м	H	2,8
Площа, м ²	S	24,0
Об'єм, м ³	V	67,2

3.4.2 Виробнича санітарія у приміщенні дослідницької лабораторії

Всі 3 робочі місця обладнані спеціальними комп'ютерними столами зі стільницями для клавіатури та поворотними стільцями.

Кожне робоче місце обладнане персональним комп'ютером потужністю близько 450 Вт та додатковим периферійним обладнанням та підключене до локальної мережі.

Порівняння фактичних і нормативних характеристик робочого місця відповідно до ДСанПіН 3.3. 2-007-98 у таблиці 3.3.

Відповідно до Державних санітарних правил та норм роботи з візуальними дисплейними терміналами ЕОМ (ДСанПіН 3.3. 2-007-98) [24]:

- площа приміщення має бути не менш 6 м^2 на людину;
- об'єм приміщення має бути не менше 20 м^3 на людину.

Таблиця 3.3 – Порівняння фактичних і нормативних характеристик робочого місця

Параметри	Норматив, мм	Фактичне, мм
Висота простору для ніг	від 600	700
Висота робочої поверхні	від 680 до 800	700
Висота сидіння над рівнем підлоги	від 400 до 500	від 400 до 500
Висота спинки стільця	300±20	400
Відстань від екрану до очей	від 600 до 700	750
Глибина простору для ніг	від 650	800
Глибина робочої поверхні	від 800 до 1000	900
Глибина сидіння	400	500
Ширина простору для ніг	500	600

Ці показники для приміщення розраховуються по формулах:

$$S' = S / N \text{ (м}^2\text{/чол.)}, \quad (3.7)$$

$$V' = V / N \text{ (м}^3\text{/чол.)}, \quad (3.8)$$

де V – загальний об'єм приміщення;

S – загальна площа приміщення;

N – кількість працівників;

S' і V' – площа і об'єм, що приходяться на одну людину.

Таким чином, оскільки в приміщенні працюють 3 людини, то:

$$S'=24,0 / 3 = 8,0 \text{ (м}^2\text{/чол.)}, \quad (3.9)$$

$$V'=67,2 / 3 = 22,4 \text{ (м}^3\text{/чол.)}. \quad (3.10)$$

Отже, нормативи розмірів та забезпечення працюючих робочою площею в лабораторії дотримано.

Робота в лабораторії проводиться сидячи і не вимагає фізичної напруги. Тому вона відноситься до категорії Ia (легкі фізичні роботи, енерговитрати до 120 ккал/год). З метою забезпечити комфортні умови для працівників та

відповідно до ДСН 3.3.6.042-99 [25] в лабораторії встановлені такі метеорологічні параметри:

а) для холодного періоду:

- 1) температура повітря від 22 °С до 24 °С;
- 2) вологість повітря від 40 % до 60%;
- 3) швидкість руху повітря $\leq 0,1$ м/с;

б) для теплого періоду року:

- 1) температура повітря від 23 °С до 25 °С;
- 2) вологість повітря від 40 % до 60 %;
- 3) швидкість руху повітря $\leq 0,1$ м/с.

Нормалізація мікрокліматичних умов здійснюється за рахунок раціонального планування приміщення і оптимального розміщення в ньому обладнання, а також приладів регулювання тепловиділення, холодовиділення і вологовиділення.

3.4.3 Освітлення

В даному приміщенні використовується саме поєднаний вид виробничого освітлення.

Приміщення з ЕОМ повинні мати природне і штучне освітлення відповідно до ДБН В.25-28-2006 «Природне і штучне освітлення» [26]. Природне світло повинно проникати через бічні світлові прорізи, зорієнтовані, як правило, на північ або північний схід.

Джерелом природного освітлення є два вікна ($2 \text{ м}^2 \times 1,85 \text{ м}^2$), світло з яких падає збоку на робочі місця. Ці вікна виходять на північну сторону, що дозволяє уникати занадто яскравих прямих сонячних променів під час роботи в приміщенні та відповідає рекомендації, що зазначена у Державних санітарних правилах та нормах роботи з візуальними дисплейними терміналами ЕОМ (ДСанПіН 3.3. 2-007-98).

Джерелом загального штучного освітлення виступають шість растрових світильника ARS/S накладного типу, кожен з яких має чотири лампи потужністю 18 Вт кожна. Ці світильники розташовані по периметру приміщення на відстані 1-го метра від стіни.

Розряд зорової роботи тих, хто працює з використанням комп'ютерів, приймається виходячи з мінімального об'єкту, який розглядається від 0,3 мм до 0,5 мм та відносяться до III розряду, для якого у відповідності до Державних будівельних стандартів (ДБН В.2.5-28-2006) коефіцієнт природної освітленості (КПО) встановлюється не нижче 1,5 % і від 1/7 до 1/6, мінімальне значення освітленості $E_{\min} = 150$ лк та нормоване значення освітленості $E_N = 300$ лк.

Згідно нормативу та задач, які будуть виконуватися в дослідницькій лабораторії, а саме робота із графічними матеріалами, різноманітними схемами та документацією відносно навчального макета, приміщення слід віднести до категорії високої точності, та освітлення повинно складати не менше 300 лк. Враховуючи таку освітленість та індекс приміщення 2,0 максимально допустима питома встановлена потужність не менше 17 Вт/м².

Рівень загального штучного освітлення учбової лабораторії можливо перевірити за допомогою методу питомої потужності. Площа приміщення складає 24 м².

Розрахункова формула методу:

$$W = W_{\Sigma} / S, \quad (3.11)$$

де w – питома потужність, Вт/м²;

s – площа приміщення; $S = 24$ м²;

W_{Σ} – загальна потужність освітлювальної установки Вт, яка розраховується за формулою:

$$W_{\Sigma} = W_{cv} \cdot n_{cv}, \quad (3.12)$$

де $W_{св}$ – потужність одного світильника, $W_{св} = 72(4 \times 18)$ Вт;

$n_{св}$ – кількість світильників у приміщенні, $n_{св} = 6$.

$$W_{\Sigma} = 72 \cdot 6 = 432 \text{ Вт},$$

$$W = \frac{432}{24} = 18,00 \text{ Вт/м}^2.$$

Розраховане значення відповідає освітленості 400 лк. Отже для створення сприятливих зорових умов в приміщенні достатньо використати 6 люмінесцентних світильників потужністю 72 Вт кожний.

3.4.4 Промислова безпека у приміщенні учбової лабораторії

Учбова лабораторія має трифазну чотирипровідну мережу живлення зі змінним струмом напругою від 220 В до 380 В та частотою 50 Гц із глухозаземленою нейтраллю. Згідно з НПАОП 40.1-1.21-2001 приміщення можна віднести до першої категорії – приміщення без підвищеної небезпеки – це приміщення, де відсутні умови, що створюють підвищену чи особливу небезпеку.

Приміщення у своєму складі має персональні комп'ютери та периферійне обладнання. Характеристики наявного обладнання не дозволяють отримати травми, ушкодження або нести іншу небезпеку.

Для захисту людей від ураження електричним струмом передбачено блокувальні пристрої, контрольний вмикач та заземлення відповідно до НПАОП 40.1-1.21-2001.

3.4.5 Пожежна безпека

В приміщенні, що розглядається, до пожежі можуть призвести:

– меблі, що містять деталі з дерева, пластику та синтетичних тканин (столи, стільці, шафи);

- ПЕОМ, монітори, клавіатури та ін. пристрої, корпуси яких зроблені з пластмас;
- папір, штори, лінолеум тощо.

Відповідно до норм визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою (НАПББ.03.002-2007) подібне приміщення відноситься з точки зору пожежної безпеки до категорії В, оскільки в ньому знаходяться горючі, тверді, волокнисті речовини та матеріали.

За правилами технічної експлуатації електроустановок споживачів (ПУЕ) дане приміщення відноситься до зони П–Па, тобто де є тверді горючі речовини чи матеріали.

Приміщення має бути оснащено системою пожежної сигналізації та вогнегасниками; за Правилами пожежної безпеки України (ППБУ-95) рекомендовано встановити три вогнегасники ОУ-2 на площу робочого приміщення $24,0 \text{ м}^2$.

План евакуації з приміщення знаходиться біля дверей. Двері на шляху евакуації відчиняються в напрямку виходу з приміщення. При наявності людей у приміщенні двері евакуаційних виходів можуть замикатись лише на внутрішні запори, котрі легко відмикаються; встановлені протипожежні перешкоди.

3.5 Висновки до розділу 3

У третьому розділі визначені фізичні процеси що виникають в електромеханічних дезінтеграторах та сформульована їх математична інтерпретація. Надано опис принципу дії індуктора магнітного поля і магнітний стан його робочої камери, а також зазначений порядок розрахунку енергетичних параметрів індуктора магнітного поля та проведена оцінка зусиль в активній зоні електромеханічного дезінтегратора.

Представлені результати свідчать, що магнітне поле в РК представлене стійким знакозмінним характером, а його величина досягає 0,084 Тл.

Наслідком взаємодії біжучих магнітних полів індукторів і вихрових струмів, що протікають в стінках робочої камери (прилеглих до індукторів), є поява характерних прогинів стінок РК які при товщині стінки камери 0,8 мм досягають 10 мм. Розрахунок підтверджує наявність локалізації діючих електромагнітних зусиль на стінки електропровідної камери в межах полюсного поділу індукторів. Деформацію робочої камери ЕМД викликають, перш за все, зусилля які спрямовані нормально до поверхні стінки камери.

Також в розділі опрацьовано питання вимог до приміщення у лабораторії з програмування. Встановлено необхідну температуру, вологість повітря та швидкість руху повітря у теплий та холодний період року. Встановлено параметри лабораторії, а саме площу приміщення, висоту, кількість робочих місць.

Розраховано рівень загального штучного освітлення приміщення, який дорівнює 350 лк при мінімально допустимому рівні в 350 лк.

За результатами розрахунків будуть забезпечені комфортні умови роботи в лабораторії за показником освітленості.

Дане приміщення повністю відповідає Державним санітарним правилам та нормам. Робота в даному приміщенні є безпечною і такою, що не шкодить здоров'ю працівників. Умови праці не несуть загрози життю. Наявні чіткі та зрозумілі інструктажі на випадок виникнення непередбачених ситуацій.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі виконано огляд сфер застосування електромеханічного дезінтегратора, визначені перспективні напрямки використання пристроїв зазначеного класу а також проведено аналіз конструкцій обладнання, призначеного для подрібнення різноманітних матеріалів.

Також розглянуті існуючі конструкції дезінтеграторів, що побудовані за принципом електромеханічного впливу на речовину феромагнітних робочих тіл, які перебувають в активній зоні біжучого магнітного поля, їх недоліки та обмеження. Запропоновані шляхи удосконалення конструкцій апаратів даного класу.

Надана інформація про пристрій автоматизації і управління режимами роботи електромеханічного дезінтегратора, його влаштування і особливості роботи. Також обраний частотний перетворювач промислового виробництва, що за своїми характеристиками може бути використаний для управління робочими режимами розроблюваного дезінтегратора.

Визначені фізичні процеси що виникають в пристроях, вихровий шар яких створюється обертовим магнітним полем та сформульована їх математична інтерпретація. На підставі проведених досліджень засобами Comsol MultiPhysics створено комп'ютерну модель дезінтегратора із заданими параметрами, проведені необхідні обрахунки та отримано відповідні результати у вигляді тривимірних просторово часових залежностей та анімацій.

В роботі надано опис принципу дії індуктора магнітного поля і магнітного стану його робочої камери, а також зазначений порядок розрахунку енергетичних параметрів індуктора магнітного поля та проведена оцінка зусиль в активній зоні електромеханічного дезінтегратора.

У результаті було досягнуто основної мети, заплановані дослідження проведені у повному обсязі.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. ДСТУ 3008:2015. Документація. Звіти у сфері науки та техніки. Структура та правила оформлення. [Чинний від 2015–06–22]. Вид. офіц. Київ, 2015. 29 с. (Інформація та документація).
2. Дипломне проектування для студентів усіх форм навчання спеціальностей 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»: / упоряд. І.Ш. Невлюдов, А.О. Андрусевич, О.В. Токарєва, Г.В. Пономарьова. Київ, 2018. 320 с.
3. Методичні вказівки з підготовки й оформлення кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, освітньо-професійних програм: «Автоматизоване управління технологічними процесами», «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва», «Комп'ютеризовані та робототехнічні системи» / Упоряд. І. Ш. Невлюдов, Р. В. Артюх, Н. П. Демська, В. В. Євсєєв, О. І. Филипенко, О. М. Цимбал. Харків: ХНУРЕ, 2021. 50 с.
4. Грицюк В.Ю., Перепелиця Д.В., Шевчук І.О. Чисельний розрахунок електромеханічного дезінтегратора для автоматизації подрібнення різноманітних матеріалів // V Міжнародна конференція Виробництво & Мехатронні системи (M&MS), Харків, Україна, 2021, С. 36-38.
5. Пилов П.И., Горобец Л.Ж., Салова Е.В., Пеня Ю.С. Тонкоизмельченные и ультрадисперсные материалы в промышленности (производство и применение): Материалы I-й Междунар. науч. практ.-конф., г. С.-Петербург: Изд-во «ИВА», 2003. С. 73.
6. Тимонин А. С. Справочник. Основы конструирования и расчета химико-технологического и природоохранного оборудования / ред. Н. В. Бочкаревой. Калуга, 2002. С. 1028.
7. Адошев А. И. Ферровихревой аппарат для обеззараживания жидкого свиного навоза: дисс. ... канд. техн. наук : 05.20.02 Ставрополь, 2011. 190 с.

8. Системный анализ процессов химической технологии. Процессы измельчения и смешения сыпучих материалов / Кафаров В.В., Дорохов И.Н., Арутюнов С.Ю. Москва: Высшая школа, 1985. 440 с.
9. Борщев В. Я. Классификация машин для измельчения материалов // учебн. пособие Тамбов, 2004. 102 с.
10. Волков В. С. Разработка ресурсо- и энергосберегающего электромагнитного способа механоактивации витаминизированной биологически активной кормовой добавки: дисс. ... к-та техн. наук : 05.20.02. г. Санкт-Петербург, 2014. 179 с.
11. Оберемок В. М. Електромагнітні апарати з феромагнітними робочими елементами. Інтенсифікація технологічних процесів при очищенні промислових стічних вод : монографія / В. М. Оберемок, М. І. Никитенко. Полтава : ПУЕТ, 2012. 318 с.
12. Кардашев Г. А. Физические методы интенсификации процессов химической технологи : Москва : Высшая школа 1990. 205 с.
13. Логвиненко Д. Д., Шеляков О. П. Интенсификация технологических процессов в аппаратах с вихревым слоем , учебн. пособ. Киев: Техніка, 1976. 144 с.
14. Вершинин И. Н. Аппараты с вращающимся электромагнитным полем. Научный журнал Фундаментальные исследования. Сальск, 2015. № 4. С. 3508-3512.
15. Оберемок В. М. Електромагнітні апарати з феромагнітними робочими елементами: матеріали Міжвуз. наук.-практ. семін., м. Полтава, 6 квіт. 2017 р. Полтава, 2017. С. 29-30.
16. Деревянкин Н. А. Аппараты с вихревым слоем в химической технологии. Обзорная информация. Химическое и нефтеперерабатывающее машиностроение / Н. А. Деревянкин, З. А. Михалёва. Тамбов, 1989. 37 с.
17. Електромеханічний пристрій для обробки матеріалів: пат. 57384 Україна: МПК6 H02K41/025, B01F 13/08. № 201009465; заявл. 28.07.2010; опубл. 25.02.2011, Бюл.№ 4. 4 с.

18. Однообмотковий електромеханічний дезінтегратор: пат. 93237 Україна: МПК6 H02K 41/025, B01F 13/08. № 201403434; заявл. 03.04.2014; опубл. 25.09.2014, Бюл. № 18. 4 с.

19. ЗАО «Данфос» Преобразователи частоты – просто о сложном. Москва: Данфос, 2006. 165 с.

20. Бахвалов А. Ю. Электромеханические устройства с дискретной вторичной частью: алгоритмы анализа и синтеза и усовершенствованные конструкции: дис. канд. техн. наук: 05.09.01. Новочеркасск, 2007. 136 с.

21. Міліх В. І., Шилкова Л.В. Експериментальне дослідження фізичної моделі трифазного індуктора магнітного поля в робочому режимі при обробці сипучого матеріалу. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії. Харків, 2020. № 3. С. 3-7.

22. Вольдек А. И., Попов В. В. Электрические машины. Машины переменного тока: учеб. пособ. Санкт-Петербург, 2010. 356 с.

23. Грицюк В. І., і Тимофєєва О. О. «Електромеханічний дезінтегратор багатофакторної дії: моделювання та оцінка». Вісник Східноукраїнського Національного Університету імені Володимира Даля, вип. 8(264), Січень 2021, С. 34-38.

24. Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин : ДСанПІН 3.3.2.007-98 / Міністерство охорони здоров'я України. Головне санітарно- епідеміологічне управління. Київ : МОЗ України, 1998. 14 с.

25. Державні санітарні норми: ДСН 3.3.6.042–99 / Міністерство охорони здоров'я України. Головний державний санітарний лікар України. Київ : МОЗ України, 1998. 8 с.

26. Державні будівельні норми : ДБН В.2.5.–28–2006. / Державні будівельні норми. Київ : МОЗ України, 2008. 41 с.