

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Факультет автоматизації та енергетики
Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій та енергетичного менеджменту

Романів Роман Володимирович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 620.179.1

(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Розроблення пристрою для контролю дефектів внутрішньої поверхні труб
вихрострумовим методом

(назва роботи)

Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка

(назва освітньої програми)

175 Інформаційно-вимірювальні технології

(шифр і назва спеціальності)

Робота містить результати власних досліджень, використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело:

Здобувач освітнього ступеня _____

Р.В. Романів

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник _____

Криницький Олександр Степанович к.т.н., доц.

(підпис, прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання керівника)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

Віталій ЦИХ

(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Івано-Франківськ – 2025

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій та енергетичного менеджменту

Освітній рівень перший (бакалаврський)

Спеціальність 175 Інформаційно-вимірювальні технології

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІВТЕМ

В.С. Цих

« » 20 року

З А В Д А Н Н Я

НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

Романіву Роману Володимировичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення пристрою для контролю дефектів внутрішньої поверхні труб вихрострумним методом

керівник роботи Криницький Олександр Степанович к.т.н., доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від "30" квітня 2025 року № 269/7

2. Строк подання студентом роботи 20.06.2025

3. Вихідні дані до роботи: металева катана труба діаметром 60 мм матеріал сталь 20, товщина стінки 4мм, тип дефекту поперечна тріщина, глибина дефекту 1,2 мм, частота 50кГц

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Аналіз сучасного стану вихрострумного неруйнівного контролю

2. Дослідження характеристик вихрострумних перетворювачів

3. Метрологічний аналіз вихрострумного дефектоскопа

4 Охорона праці

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

1. Принцип роботи вихорового дефектоскопа

2. Загальна схема вихрострумного перетворювача для контролю циліндричних протяжних виробів

3. Моделювання розподілу густини вихрових струмів від частоти у сталевих трубах різної товщини

4. Схема зразка вз штучними дефектами для калібрування дефектоскопа

5. Дефект зварного з'єднання труби на колекторі гарячої пари котла ТЕС

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
4	Кривенко Г.М., доц. каф. ТЗНС та БП		
нормо контроль	Лютак З.П., проф. каф. ІВТЕМ		

7. Дата видачі завдання 05.05.2025р.**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	<i>Вступ</i>	15.05.2025	
2.	<i>Аналіз сучасного стану вихрострумового неруйнівного контролю</i>	18.05.2025	
3.	<i>Дослідження характеристик вихрострумових перетворювачів</i>	01.06.2025	
4.	<i>Метрологічний аналіз вихрострумового дефектоскопа</i>	10.06.2025	
5	<i>Розрахунок основної допустимої похибки вихрострумовго дефектоскопу</i>	15.06.2025	
6	<i>Охорона праці</i>	15.06.2025	
7.	<i>Оформлення бакалаврської роботи</i>	23.06.2025	

Студент _____ Романів Р.В.
 (підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Кривицький О.С.
 (підпис) (прізвище та ініціали)

Анотація

У бакалаврській роботі проведено дослідження ефективності вихрострумowego неруйнівного контролю як методу виявлення дефектів у електропровідних матеріалах. У вступі обґрунтовано актуальність тематики, зокрема важливість підвищення достовірності діагностики технічного стану теплообмінного обладнання.

У першому розділі виконано аналіз сучасного стану досліджень і розвитку засобів вихрострумowego контролю, визначено основні напрямки вдосконалення та сформульовано завдання роботи.

Другий розділ присвячено моделюванню взаємодії вихрострумowych перетворювачів із дефектами різних типів за допомогою програмного середовища ANSYS Maxwell. Проаналізовано вплив геометричних характеристик дефектів — зокрема їх глибини та розмірів — на параметри сигналів вихрострумowego перетворювача.

У третьому розділі виконано метрологічний аналіз похибок вихрострумowego дефектоскопа, зокрема проведено оцінку основної допустимої похибки при виявленні дефектів.

Четвертий розділ присвячено питанням охорони праці: охарактеризовано небезпечні виробничі фактори, пов'язані з експлуатацією дефектоскопа, визначено засоби захисту від шкідливих впливів, зокрема електромагнітного випромінювання, а також виконано розрахунки освітлення та захисного заземлення.

Результати роботи можуть бути використані для підвищення ефективності та безпеки неруйнівного контролю в енергетичній, машинобудівній та авіаційній галузях.

ВИХРОСТРУМОВИЙ КОНТРОЛЬ, НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ, ДЕФЕКТОСКОП, МОДЕЛЮВАННЯ, ЕЛЕКТРОМАГНІТНЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ, МЕТРОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ, ПОХИБКА, ДЕФЕКТИ, ГЛИБИНА ДЕФЕКТУ.

Abstract

The bachelor's thesis studies the effectiveness of eddy current non-destructive testing as a method for detecting defects in electrically conductive materials. The introduction substantiates the relevance of the topic, in particular the importance of increasing the reliability of diagnostics of the technical condition of heat exchange equipment.

The first section analyzes the current state of research and development of eddy current testing tools, identifies the main areas of improvement, and formulates the tasks of the work.

The second section is devoted to modeling the interaction of eddy current transducers with defects of various types using the ANSYS Maxwell software environment. The influence of the geometric characteristics of defects — in particular their depth and size — on the parameters of the eddy current transducer signals is analyzed.

In the third section, a metrological analysis of the errors of the eddy current flaw detector is performed, in particular, an assessment of the basic permissible error in detecting defects is carried out.

The fourth section is devoted to labor protection issues: hazardous production factors associated with the operation of the flaw detector are characterized, means of protection against harmful effects, in particular electromagnetic radiation, are determined, and lighting and protective grounding calculations are performed.

The results of the work can be used to improve the efficiency and safety of non-destructive testing in the energy, mechanical engineering and aviation industries.

EDDY CURRENT TESTING, NON-DESTRUCTIVE TESTING, DEFECTOSCOPE, MODELING, ELECTROMAGNETIC RADIATION, METROLOGICAL ANALYSIS, ERROR, DEFECTS, DEFECT DEPTH.

ЗМІСТ

Вступ	7
1 Аналіз сучасного стану вихрострумowego неруйнівного контролю	9
1.1 Аналіз сучасного стану досліджень засобів вихрострумowego неруйнівного контролю	9
1.2 Аналіз сучасного розвитку засобів вихрострумowego неруйнівного контролю	13
1.3 Постановка завдань на бакалаврську роботу	19
2 Дослідження характеристик вихрострумowych перетворювачів	20
2.1 Моделювання взаємодії вихрострумowych перетворювачів з дефектами різного типу в електропровідних матеріалах	20
2.2 Аналіз результатів моделювання вихрострумowego перетворювача в ANSYS Maxwell	24
2.3 Аналіз впливу характеристик дефектів різного типу на сигнал вихрострумowego перетворювача	27
2.4 Вплив зміни розміру дефекту для різної глибини	31
2.5 Дослідження впливу зміни глибини дефекту і його розмірів	33
3 Метрологічний аналіз вихрострумowego дефектоскопа	36
3.1 Аналіз основних складових похибки вихрострумowego дефектоскопу	36
3.2 Розрахунок основної допустимої похибки вихрострумowego дефектоскопу	39
4 Охорона праці	46
4.1 Характеристика життєво - небезпечних факторів та правила безпеки при користуванні розроблюваним дефектоскопом	46
4.2 Способи захисту від шкідливих факторів виробництва	48
4.3 Дія електромагнітного випромінювання на організм людини, його нормування	50
4.4 Захист від електромагнітних випромінювань	54
4.5 Розрахунок штучного освітлення	55
4.6 Розрахунок захисного заземлення	56
Висновки	60
Список використаних джерел	61

Вступ

У сучасному світі стійкість роботи об'єктів техносфери та безпечні умови життєдіяльності людини значною мірою визначаються якістю, продуктивністю та ефективністю складних технічних систем. Для забезпечення надійності й тривалого терміну служби важливих конструкцій і обладнання необхідно проводити профілактичне обслуговування та своєчасно замінювати зношені елементи. Нині неруйнівний контроль є невід'ємною складовою процесів виробництва й експлуатації відповідальних виробів.

Одним із ключових чинників безпечної експлуатації котельного та теплообмінного обладнання є надійна робота парогенераторів. Визначальну роль у забезпеченні їх довговічності відіграють теплообмінні трубки, які належать до тонкостінних, високонавантажених і відповідальних елементів, що потребують дотримання жорстких експлуатаційних вимог. Аналіз характеру пошкоджень свідчить, що основними причинами виходу з ладу є корозійні процеси та зношування в умовах експлуатації. Поглиблене вивчення проблеми показує, що відмови обладнання здебільшого зумовлені або поступовим розвитком корозійних ушкоджень і технічного виснаження, або наявністю дефектів, спричинених виробничими недоліками чи неякісним ремонтом. Для запобігання аваріям необхідно регулярно контролювати стан теплообмінних труб. Вагому роль у цьому процесі відіграють методи неруйнівного контролю та технічної діагностики. Застосування таких методів на етапах виробництва та експлуатації дозволяє значно знизити ризики економічних втрат і людських жертв.

Сьогодні електромагнітні методи неруйнівного контролю стали невід'ємною частиною технологічних процесів під час виробництва та експлуатації більшості промислових об'єктів. Вони успішно застосовуються для діагностики металевих виробів і запобігання аваріям, що можуть виникнути внаслідок пошкодження відповідальних елементів конструкцій. Застосування засобів неруйнівного контролю передбачено в більшості

нормативних документів, які регламентують умови експлуатації технічних систем і обладнання.

На сьогоднішній день найбільш результативним способом оцінки технічного стану трубок парогенераторів є вихрострумний метод неруйнівного контролю. Тому розробка засобів вихрострумного неруйнівного контролю є необхідною умовою для підвищення достовірності оцінки стану труб та отримання об'єктивної інформації для аналізу й прогнозування безаварійної роботи теплообмінних елементів. У цьому контексті актуальним завданням є створення нових, більш ефективних методів і засобів виявлення дефектів, орієнтованих на підвищення інформативності та надійності результатів контролю під час експлуатації.

1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ВИХОРОСТРУМОВОГО НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

1.1 Аналіз сучасного стану досліджень засобів вихрострумового неруйнівного контролю

Сильний поштовх у розвитку електромагнітного неруйнівного контролю було надано сучасною цифровою технікою та методами комп'ютерного моделювання. За весь час розвитку електромагнітних методів було сформовано значний теоретичний і практичний фундамент, але багато з пропонованих підходів щодо вирішення завдань контролю та діагностики або були дуже складні для аналітичної обробки, або передбачали суттєві спрощення і не враховували такі важливі аспекти, як неоднорідність полів, намагніченість матеріалу та зміна магнітної проникності.

Сучасний рівень цифрової техніки зумовив розвиток напряму комп'ютерного моделювання в галузі вихрострумового неруйнівного контролю, орієнтованого на потреби розробників та дослідників і що дозволяє заощадити час та кошти.

При моделюванні вихрострумового контролю перед дослідниками постає складне математичне завдання, яке у минулому вирішувалося наближеними методами визначення коренів системи диференціальних рівнянь. Використання цього методу передбачало введення спрощень у систему та раціональне виключення деяких членів. Для наближених методів часто застосовується розкладання розв'язання ряду за деяким із параметрів завдання. Також застосовуються асимптотичні методи, які описують граничне рішення задачі.

На сьогоднішній день є велика кількість різних за складністю та своїми характеристиками чисельних методів. Найчастіше у практиці вирішення завдань неруйнівного контролю застосовуються: метод кінцевих елементів, метод скінчених різниць, метод граничних елементів, метод інтегральних рівнянь та метод еквівалентних зарядів. Основні відмінності цих методів

полягають у способі обліку граничних умов та підходу до складання системи лінійних рівнянь алгебри, яку потрібно вирішити. Умовно реалізацію цих методів можна поділити на такі кроки: складання розрахункової моделі, проведення розрахунку та обробка результатів.

Одним із найпоширеніших і найпопулярніших – метод кінцевих елементів (МКЕ) – це чисельний метод вирішення крайових завдань, в основі якого лежить принцип розбиття об'єкта, що вивчається, на сукупність елементів, що становлять цей об'єкт. МКЕ має низку переваг, але й є деякі недоліки. До переваг можна віднести універсальність методу, можливість задання складних крайових умов та опис областей будь-яких форм. При необхідності метод дозволяє збільшувати густину обчислювальної сітки в необхідних ділянках об'єкта, що досліджується. Однак, розв'язання задачі може займати великий проміжок часу, що безпосередньо залежить від щільності сітки розбиття та ускладнення крайових умов. При цьому розрахунок взаємодії магнітних полів у областях нетривіальної форми передбачає побудову складних просторових сіток із великою кількістю вузлів. З цієї причини проведення розрахунків стає трудомістким та вимогливим до обчислювальної техніки процесом. У цьому плані метод кінцевих елементів програє метод кінцевих різниць. [1, 2]

Метод кінцевих різниць (МКР) один із найбільш старих методів, характерний тим, що для його застосування не потрібно проводити безліч математичних обчислень, а, отже, немає необхідності у великих обчислювальних потужностях. Досліджувана область розбивається плоскою або просторовою сіткою, а приватні похідні в системі рівнянь замінюються наближеними відповідними значеннями на кінцево-різницевої сітці. У результаті завдання зводиться до вирішення системи рівнянь алгебри щодо невідомих потенціалів у вузлах сітки. Основним недоліком методу є складність опису криволінійних досліджуваних областей через застосування прямокутної січі. [3]

Метод граничних елементів (МГЕ) - метод вирішення крайових задач шляхом зведення їх до інтегрального рівняння на межі розрахункової області

з використанням формул Гріна. Порівняно з МКЕ цей метод дозволяє знайти компоненти умови у вигляді безперервних функцій чи функцій із розривами першого роду. При цьому розмірність матриць рішення значно менша за матриці для аналогічного завдання методу кінцевих елементів. Характерним недоліком методу є проведення операція над несиметричними матрицями, обчисленими за допомогою інтегрування. [5]

Підхід, який ґрунтується на заміщенні реального розподілу заряду поверхнею шарами розподілених по поверхні фіктивних зарядів, визначених граничними умовами, називається метод інтегральних рівнянь (МІУ). Істотні переваги методу полягають у високій точності отримуваних значень напруженості поля у всій розрахунковій області та відсутність необхідності у побудові просторової сітки розбиття цієї області. Однак метод має деяку низку обмежень, що ускладнюють комп'ютерну реалізацію аналізу результатів. [6]

Спрощеним варіантом МІУ став метод еквівалентних зарядів (МЕЗ). Метод ґрунтується на принципі заміщення заряду, розподіленого поверхнею об'єкта системою розміщених усередині об'єкта еквівалентних зарядів, значення яких визначаються за граничними умовами (аналогічно МІУ). Розрахунок полів проводиться виходячи з накладання полів дискретних еквівалентних зарядів. Порівняно з МІУ розрахунок не потребує чисельного інтегрування і є найбільш прийнятним рішенням для задач із простою геометрією [7].

Всі з перерахованих вище методів і комбіновані рішення з їх використанням застосовні для вирішення задач електромагнітного неруйнівного контролю. Недоліки кожного з методів малі порівняно з їх перевагами та користю від застосування. Значно більший вплив на результати несе правильна постановка завдання та визначення граничних умов. При виборі способу варто враховувати доступність його реалізації та можливість використання програмних обчислювальних засобів.

Для створення та випуску на ринок конкурентоспроможної продукції переважну більшість сучасних підприємств та розробників застосовують

системи автоматизованого проектування та інженерних розрахунків (англ. Computer-aided design (CAD); Англ. Computer-aided Engineering. Подібні системи дозволяють оцінити, як поведе себе майбутній виріб у реальних умовах експлуатації без застосування трудомістких випробувань на прототипах. Використання засобів комп'ютерного моделювання дозволяє скоротити витрати часу та засобів та оцінити працездатність майбутнього продукту. Інструменти комп'ютерного інженерного аналізу призначені для скорочення циклу розробки нових продуктів та оптимізації розробок на початкових етапах проектування. У галузі дослідження та розробки електромагнітного неруйнівного контролю найбільш популярні програмні продукти наступних фірм:

ANSYS Inc. (1970 р. США) є одним із світових лідерів у розробці програмних засобів для інженерних розрахунків. Корпорація ANSYS Inc. займається розробкою широкої лінійки однойменних програмних продуктів для вирішення інженерних проблем з використанням моделювання, звичайно, елементним методом. Сімейство пропонованих компанією продуктів являє собою інструменти для вирішення завдань: міждисциплінарного аналізу, динаміки, міцності, теплообміну та довговічності, динаміки рідин та газів, електромеханіки, моделювання високочастотних пристроїв, оптимізації та високопродуктивних обчислень, а також включають генератори сіток розбиття та платформи проведення. [8]

З множини продуктів ANSYS найбільш застосовні для вирішення завдань вихрострумове неруйнівне контролю є комплекс Electromagnetic Suite, що містить всі необхідні засоби для моделювання розподілу електромагнітних полів. До складу комплексу входить програмний пакет ANSYS Maxwell, який ґрунтується на застосуванні МКЕ для вирішення задач нестационарного магнітного поля з рухом елементів моделі, змінного електромагнітного поля, магнітостатичних та електричних полів.

Cobham Technical Services (1934 р. Англія) - компанія з багатою історією розробок в авіаційній промисловості спільно з Vector Fields Software ведуть розробку та підтримку програмного пакету Opera Simulation Software, який

включає інструменти для розробки та оптимізації електроелементів і електроніки. Вхідні в цей програмний пакет модулі Static Electromagnetics та Dynamic Electromagnetics, призначені для моделювання, тимчасового та гармонійного аналізу електромагнітних полів, вихрових струмів та скін-ефекту у провідних матеріалах. [5]

INTEGRATED Engineering Software (1984 Канада) компанія пропонує сучасні комплексні рішення для інженерних та наукових проектів. IES є лідером з розробки програмних засобів, що ґрунтуються на МГЕ, які надають найточніші чисельні рішення задач електродинаміки. Продукти IES сумісні з популярним програмним пакетом для технічних обчислень - MATLAB. [5,6]

Ще одним серйозним програмним продуктом для вирішення задач електромагнітного контролю, є система CIVА, розроблена під керівництвом французького "Комісаріату атомної енергії" (фр. Commissariat à l'énergie atomique (CEA)). CIVА Extende включає програмні засоби для моделювання процесів неруйнівного контролю, взаємодії перетворювачів і об'єктів контролю. Для дослідження вихрострумовевого методу використовується модуль CIVА ET, в якому присутні бібліотеки типових рішень для вихрострумівих перетворювачів, об'єктів контролю та видів дефектів [3]

1.2 Аналіз сучасного розвитку засобів вихрострумовевого неруйнівного контролю

Прилади, принцип дії яких ґрунтується на вихрострумовевому методі неруйнівного контролю, призначені для виявлення дефектів у виробках з електропровідних матеріалів. Дефектоскопи умовно поділяють за видом об'єктів контролю, за типом перетворювачів (прохідних, накладних та ін.) та за режимом роботи (у статичному, динамічному режимі та ін).

Характеристики вихрострумівих дефектоскопів встановлює ISO 9934-3:2015 Non-destructive testing – Magnetic particle testing Part 3: Equipment Особливу увагу слід приділяти спеціальним технічним характеристикам, на

які вказує цей стандарт, а саме поріг чутливості, роздільна здатність, швидкість і максимальна продуктивність контролю.

Поріг чутливості - основний параметр, що характеризує мінімальні розміри штучного дефекту певної форми, при яких показання сигналу буде не менш ніж удвічі перевищувати перешкоди. Таким чином, реальний поріг чутливості дефектоскопа залежить не тільки від рівня сигналу, але і від рівня перешкод, які найчастіше викликані змінами властивостей матеріалу, зміною взаєморозташування об'єкта контролю та перетворювача, шорсткістю поверхні виробу, що контролюється. З цього випливає, що поріг чутливості не є постійною характеристикою вихрострумowego дефектоскопа, а залежить від умов його експлуатації. Поріг, що вказується в технічній документації, визначають за суворого дотримання умов застосування дефектоскопа, описаних у цій документації.

Найменша відстань між двома дефектами, при якому вони фіксуються окремо, називається роздільна здатність. Цей параметр залежить від типу, що використовується вихрострумowego перетворювача. При використанні накладних перетворювачів вона обернено пропорційна розміру зони чутливості. Для прохідних перетворювачів роздільна здатність обернено пропорційна розміру об'єкта контролю (і, отже, розміру перетворювача).

Для дефектоскопів, що експлуатуються в автоматичному режимі у складі виробничої лінії важливою характеристикою є максимальна продуктивність. Для лінійно протяжних об'єктів контролю (труб, дроту та ін.) продуктивність характеризується швидкістю контролю. При дефектоскопії малогабаритних виробів визначається числом проконтрольованих об'єктів в одиницю часу.

На додаток до вищеперелічених ключових характеристик дефектоскопів, заснованих на застосуванні вихрострумowego методу, варто відзначити важливість таких параметрів як налаштування на зміни в зазорі, можливість аналізу глибини та довжини дефектів та збереження результатів контролю.

Забезпечення найкращих показників основних параметрів вихрострумowych дефектоскопів підвищує рівень їхньої

конкурентоспроможності на ринку засобів неруйнівного контролю. У зв'язку з цим підприємства розробники ведуть безперервне вивчення та вдосконалення методів та обладнання для електромагнітного контролю та діагностики.

На сьогоднішній день одним із основних конструктивних елементів є трубний металопрокат, який незамінний у багатьох сферах промисловості, виробництва та техніки. З цієї причини актуальним є розвиток методів, спрямованих на вирішення завдань внутрішньотрубного неруйнівного контролю металопрокату, як у процесі виробництва, так і на стадії експлуатації. Більшість сучасних науково-виробничих компаній мають у лінійці своєї продукції обладнання внутрішньотрубної дефектоскопії, що ґрунтуються на застосування вихрострумowego (EC) методу з підмагнічуванням і без, контролю за витіканням магнітного потоку (MFL) та методу контролю у віддалених полях вихрових струмів (англ. Remote-Field Testing (RFT)).

Сьогодні під маркою Olympus NDT виробляється модельна лінійка дефектоскопів Nortec, MultiScan MS і OmniScan MX. Серед яких Olympus поставляє на ринок систему дефектоскопії MultiScan MS5800, яка реалізує вихрострумову технологію, метод контролю у віддалених полях та витіку магнітного потоку (Рис. 1.1) [6].



Рисунок 1.1 – Зовнішній вигляд дефектоскопа MultiScan MS5800

Внутрішню трубну інспекцію проводять дефектоскопом MultiScan MS5800 методом RFT (контроль у ближньому та залишковому полі). Метод RFT використовується для контролю трубок з феромагнітних матеріалів, наприклад вуглецева або феритна нержавіюча сталь. Дана технологія має велику чутливість при пошуку та вимірюванні таких об'ємних дефектів, як ерозія, корозія, зношування матеріалу та пошкодження.

В одному ряду з міжнаціональними корпораціями стоять менші підприємства, такі як американська фірма «TesTex, Inc». Компанія займається розробкою та впровадженням засобів неруйнівного контролю майже 30 років та орієнтована на впровадження інноваційних технічних рішень у галузі електромагнітної дефектоскопії. TesTex представляє продукцію, засновану на різних методах зокрема Falcon S Scanner та TX-4400 системи вихрострумової дефектоскопії (Рис. 1.2) [8].



Рисунок 1.2 – Зовнішній вигляд дефектоскопа TX-4400 та програмного забезпечення для збору даних

Також варто відзначити американську фірму Zetec, що займається розробкою вихрострумових засобів неруйнівного контролю з 1968 р. Компанія випускає серію дефектоскопів MIZ-21C та ін. Використовується вихрострумовий метод, контроль з підмагнічуванням об'єкта дослідження,

внутрішньотрубний контроль у віддалених полях та метод контролю за витіканням магнітного потоку. [9]

Канадська фірма «Russell NDE Systems Inc.» маючи більш ніж сорокарічний досвід у розробках засобів неруйнівного контролю, в 1988 р. провела серію досліджень контролю в полях вихрових струмів. Ferroscope RFT-ECT – основні представники продукції Russell NDE, що реалізують досягнення фірми [10]

Eddyfi молода компанія, активно інвестує в розвиток інноваційних рішень та інструментів вихрострумового методу. Серед лінійки обладнання, що виробляється, є флагманська система Ectane-2, яка здатна комбінувати технології ECT, RFT і MFL, а також ультразвукового контролю відповідно до потреб замовника. [11]



Рисунок 1.3 – Зовнішній вигляд дефектоскопа Ectane-2

Ectane 2 має швидший процесор з більшою потужністю для надшвидкого обнулення зондів та обробки даних у режимі реального часу. Це значною мірою спрощує перевірку якості, з будь-якою комбінацією технологій. Максимальна частота ECT Ectane 2 становить 10 МГц, що забезпечує більшу гнучкість та кращу продуктивність для різноманітних застосувань у трубах та на поверхні. Джерело струму для зондів насичення доступне на 41-контактному роз'ємі, ви можете запрограмувати вбудоване джерело для керування вихідним струмом, що подається на зонди ECT часткового насичення та магнітного зміщення [11].

Заснована у 1988р. фірма Delta Test GmbH (Німеччина) спеціалізується на розробці інструментів для проведення вихрострумової дефектоскопії відповідно до потреб замовників з урахуванням норм та стандартів у галузі. Компанія пропонує широкий спектр рішень для діагностики трубок парогенераторів та теплообмінників. [12]

Tecnatom S.A. - Іспанська інжинірингова компанія, що з 1957 р. надає послуги атомній промисловості у сфері неруйнівного контролю компонентів парогенераторів та теплообмінників. На даний момент випускаються мультифункціональні системи серії ETbox, що працюють із різними видами неруйнівного контролю (Рис. 1.4) [12].



Рисунок 1.4 – Зовнішній вигляд дефектоскопа ETbox2i

ETbox2i — це цифровий багатоканальний та багаточастотний портативний вихрострумовий прилад для контролю компонентів в електрогенерації, ядерній енергетиці та промисловості. Він підтримує стандартні вихрострумові (ET) та дистанційно-польові (RFT) трубні зонди, а також масиви поверхневого сканування. Програмне забезпечення TEDDY доступне для збору даних та аналізу.

1.3 Постановка завдань на бакалаврську роботу

Провівши аналіз представлених на ринку систем електромагнітної дефектоскопії, а також, виходячи з сучасного стану справ у галузі теоретичних досліджень, можна зробити наступні висновки, що в даний час у світі розробкою засобів внутрішньотрубного неруйнівного контролю, заснованого на технології аналізу полів вихрових струмів займається ціла низка незалежних фірм з багаторічною історією. При цьому класичний ЕС та MFL методи ґрунтовно розвинені та широко застосовуються всіма компаніями-розробниками засобів неруйнівного контролю, а техніка RFT відносно новий метод, розвитком якого займаються передові міжнародні корпорації.

Виходячи із висновків можна сформулювати такі завдання бакалаврської роботи:

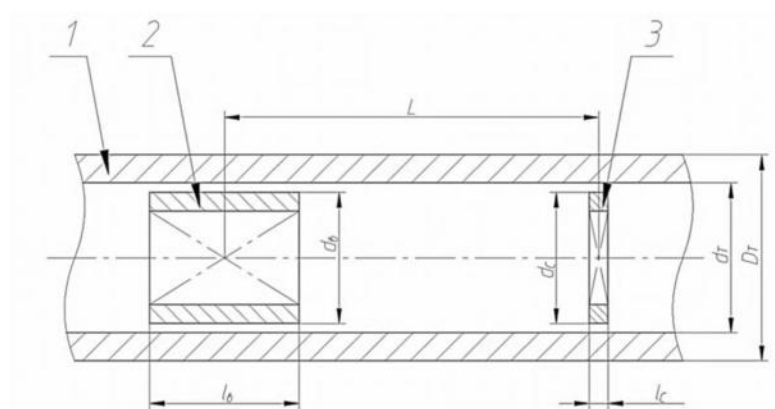
1. Провести аналіз методу контролю у полях вихрових струмів з метою визначення його застосування на реальних виробках.
2. Розробити математичну модель для опису процесу електромагнітної взаємодії полів вихрових струмів з об'єктом, що контролюється, для випадку внутрішньотрубного контролю прохідним перетворювачем.
3. Дослідити різні варіанти конструкції прохідних вихрострумових перетворювачів.
4. Дослідити вплив на вихідний сигнал перетворювача різних дефектів, таких як глибина, розмір (діаметр, ширина та довжина).
5. Розробити заходи із охорони праці при користуванні розробленим дефектоскопом.

2 ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВИХРОСТРУМОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

2.1 Моделювання взаємодії вихрострумів перетворювачів з дефектами різного типу в електропровідних матеріалах

При класичному вихрострумовому контролі циліндричних протяжних виробів з електропровідних матеріалів застосовуються прохідні внутрішньотрубні перетворювачі. Конструкція внутрішньотрубних перетворювачів має одну або кілька збудливих обмоток і як мінімум одну сигнальну обмотку, які в процесі контролю співвісні з об'єктом дослідження і розташовуються з його внутрішньої сторони. Одними з найбільш застосовуваних для даного методу контролю є трубки теплообмінників і парогенераторів. Стан цих конструкційних складових визначає фактичний термін служби теплообмінної системи.

Метод контролю вихровими струмами вносить певні обмеження у конструкцію перетворювачів. Це обумовлено необхідністю розташовувати сигнальну котушку на певній відстані від котушки збудження, так щоб вона знаходилася в області дії вторинного магнітного поля. Як досліджувану модель розглянемо найпростішу конфігурацію перетворювача (рисунок 2.1) [14].



1 – об'єкт контролю; 2 – котушка збудження; 3 - сигнальна котушка;

Рисунок 2.1 – Загальна схема вихрострумового перетворювача для контролю циліндричних протяжних виробів

На рисунку 2.1 прийнято наступні позначення: D_T – зовнішній діаметр контрольованої труби; d_T – внутрішній діаметр контрольованої труби; d_v – діаметр котушки збудження; l_v – довжина котушки збудження; d_s – діаметр сигнальної котушки; l_s – довжина сигнальної котушки; L – відстань від центральної точки котушки збудження до центральної точки сигнальної котушки [15].

Дослідження взаємодії електромагнітних полів, що збуджуються вихрострумовим перетворювачем та матеріалу об'єкта контролю доцільно проводити за допомогою чисельних методів, здатних моделювати розподіл електромагнітних полів у різномірному середовищі досить близько до реальної дійсності. Одним із найбільш універсальних та ефективних методів є метод скінчених елементів [15].

Тип кінцевих елементів визначає вид апроксимуючої функції, що застосовується. Найчастіше використовуваними елементами є області трикутної форми для двовимірних завдань і тетраедри для просторових завдань [16]. Однак у методу є певні обмеження, пов'язані з високою розмірністю системи рівняння, одержуваної в граничній області розташування дефекту в матеріалі, що моделюється. Це призводить до необхідності збільшення ступеня дискретизації розрахункової області в зоні взаємодії електромагнітних полів з об'єктом, що досліджується, для забезпечення прийнятної похибки обчислення. Підвищення кількості вузлів побудови сітки призводить до збільшення часу обчислення та похибки апроксимації. Таким чином необхідно застосовувати деяке оптимальне розбиття визначення параметрів якого вимагає проведення великої кількості розрахункових експериментів [17].

Для побудови моделі та проведення кінцево-елементного аналізу використовуються програмні засоби Maxwell пакету ANSYS Electronics Desktop: Electromagnetic Suite (ANSYS Maxwell). Дане програмне забезпечення широко застосовується у всьому світі і достовірність результатів, що досягаються з його допомогою, підтверджується великим досвідом використання для вирішення завдань у різних галузях.

Математичний апарат ANSYS Maxwell надає високопродуктивне та точне вирішення задачі визначення єдино можливого розподілу електромагнітних полів у заданій розрахунковій області за даних граничних умов та проведення розрахунків взаємодії статичних, гармонійних електромагнітних та електричних полів, а також перехідних процесів для завдань застосування магнітного поля [5].

Моделювання за допомогою МКЕ базується на перетворенні, вирішенні та апроксимації системи рівнянь Максвелла для розрахункової області [1]:

$$\operatorname{rot}(\overset{\circ}{H}) = \overset{\circ}{J}, \quad (2.1)$$

$$\operatorname{rot}(\overset{\circ}{E}) = -\frac{\partial \overset{\circ}{B}}{\partial t}, \quad (2.2)$$

де $\overset{\circ}{H}$ - напруженість магнітного поля, $\overset{\circ}{J}$ - густина струму, $\overset{\circ}{E}$ - напруженість електричного поля, $\overset{\circ}{B}$ - індукція магнітного поля, t - час.

Векторний магнітний потенціал $\overset{\circ}{A}$ описується наступним виразом:

$$\overset{\circ}{B} = \operatorname{rot}(\overset{\circ}{A}). \quad (2.3)$$

Напруженість електричного поля за наявності струмів провідності:

$$\overset{\circ}{E} = -\frac{\partial \overset{\circ}{A}}{\partial t}. \quad (2.4)$$

Враховуючи, що $\overset{\circ}{B} = \mu \overset{\circ}{H}$ і $\overset{\circ}{J} = \sigma \overset{\circ}{E}$ можемо провести перетворення

$$\operatorname{rot}\left(\frac{1}{\mu} \operatorname{rot}(\overset{\circ}{A})\right) - \operatorname{rot}\left(\frac{1}{\mu} \mu_0 \overset{\circ}{M}_0\right) + \sigma \cdot \operatorname{grad}(V) + \sigma \frac{\partial \overset{\circ}{A}}{\partial t} = 0, \quad (2.5)$$

$$\operatorname{div}\left(-\sigma \frac{\partial \overset{\circ}{A}}{\partial t} - \sigma \cdot \operatorname{grad}(V)\right) = 0, \quad (2.6)$$

де: μ - магнітна проникність матеріалу; μ_0 - абсолютна магнітна проникність; $\overset{\circ}{M}$ - вектор намагніченості (для постійних магнітів); V - скалярний потенціал; σ - питома електрична провідність (для провідників).

Таким чином, розв'язку підлягає диференціальне рівняння виду:

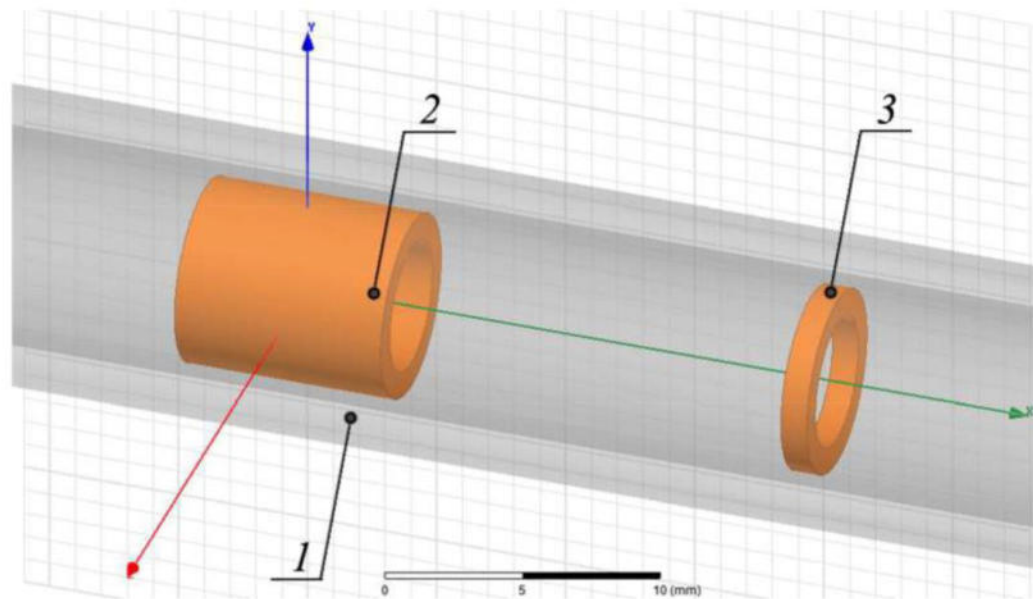
$$\nabla^2 \overset{\circ}{A} - \sigma \mu \frac{\partial \overset{\circ}{A}}{\partial t} = -\mu \overset{\circ}{J}, \quad (2.7)$$

або для гармонічних процесів з урахуванням оператора Лапласа:

$$\Delta \overset{\cdot}{A} - k^2 \overset{\cdot}{A} = -\mu J, \quad (2.8)$$

де $k^2 = -j\omega\mu\sigma$.

Першим етапом побудови розрахункової моделі в ANSYS Maxwell є створення геометрії досліджуваних об'єктів (об'єкта контролю, збуджуючої та сигнальної обмоток і геометричної області, що обмежує вирішуване завдання), а також завдання характеристик матеріалів, що використовуються рисунок 2.2 [5].



1 – об'єкт контролю; 2 – котушка збудження; 3 – сигнальна котушка

Рисунок 2.2 – Модель перетворювача в ANSYS Maxwell

Для завдання граничних умов використовується техніка масштабування, суть якої полягає в побудові навколо розрахункової області моделювання сітки, що штучно масштабується у напрямку нескінченності з подальшим завданням на її кінцях граничної умови типу Діріхле $B_n = 0$ для забезпечення $\overset{\cdot}{A} = 0$ на нескінченності. Застосування такого алгоритму до моделі забезпечує найкращу збіжність рішень системи диференціальних рівнянь (2.7).

Для математичного моделювання були обрані наступні геометричні розміри: $D_T = 20$ мм – зовнішній діаметр контрольованої труби; $d_T = 18$ мм –

внутрішній діаметр контрольованої труби; $d_v = 16$ мм - діаметр котушки збудження; $l_v = 10$ мм - довжина котушки збудження; $d_s = 15$ мм – діаметр сигнальної котушки; $l_s = 3$ мм - довжина сигнальної котушки.

2.2 Аналіз результатів моделювання вихрострумowego перетворювача в ANSYS Maxwell

Визначення збудження відбувається за допомогою ініціалізації сили струму в котушці та завдання частоти збудження, за якої проводиться розрахунок. У досліджуваній математичній моделі значення струму збудження було прийнято як 700 мА ($I_v=700$ мА), а частота збудження змінювалася в залежності від обраного матеріалу.

Грунтуючись на заданих параметрах збудження, характеристиках досліджуваних матеріалів та враховуючи зазначені граничні умови, ANSYS Maxwell дозволяє визначити векторні поля магнітного потенціалу, індукцію та напруженість магнітного поля, а також розрахувати векторне поле, що характеризує густину вихрових струмів в електропровідному об'єкті дослідження. Завдяки цьому з'являється можливість проілюструвати розташування у просторі силових ліній магнітного поля та область розподілу вихрових струмів у матеріалі об'єкта контролю [16].

Проведення серії експериментів над рядом моделей збудження з об'єктами контролю різної товщини показало залежність області розподілу та густини вихрових струмів від властивостей матеріалів та частоти збудження. Незважаючи на широку популярність готових розподілів вихрових струмів від частоти збуджуючого струму та характеристик електропровідних матеріалів, отримані результати моделювання дають можливість визначити оптимальну частоту збудження. Ілюстрації, що демонструють результати проведених моделювань, наведено на рисунку 2.3 для сталі та рисунку 2.4 для алюмінію [16].

Для об'єктів контролю із сталі частота обмежується діапазоном від 1,5 кГц до 2 кГц. При збільшенні частоти внаслідок виникнення поверхневого ефекту (скін-ефекту) глибина проникнення стрімко зменшується (Рис. 2.3).

Глибина проникнення вихрових струмів в об'єкті контролю з алюмінію досить велика і покриває всю товщину досліджуваного зразка (рисунок 2.4), отже, можна стверджувати, що контроль неферомагнітних матеріалів вихровими струмами має переваги в порівнянні із об'єктами контролю із сталі.

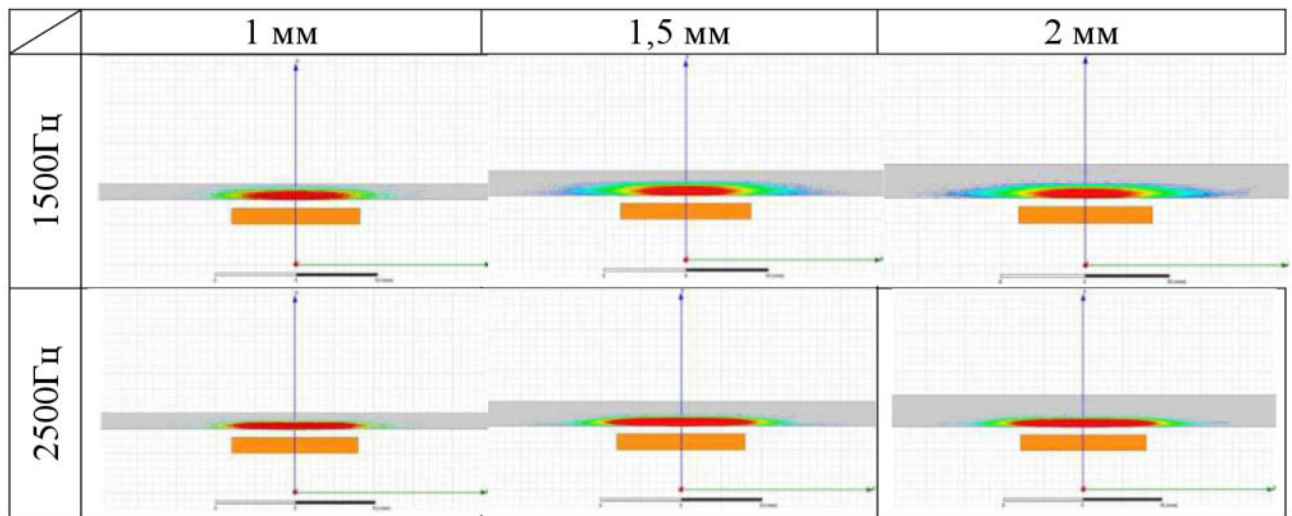


Рисунок 2.3 – Моделювання розподілу густини вихрових струмів від частоти у сталевих трубах різної товщини

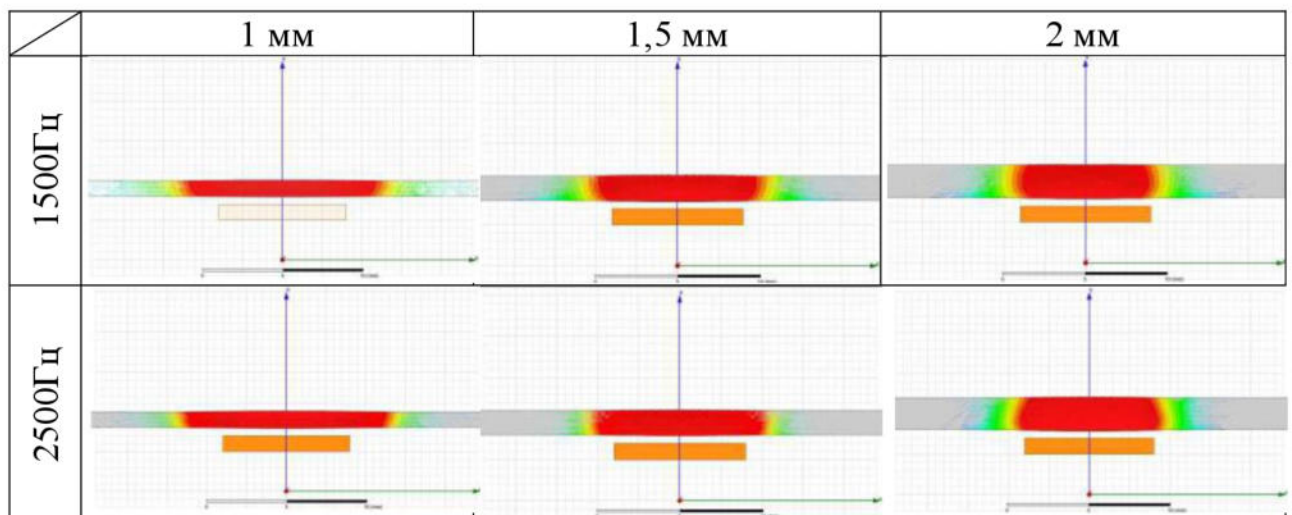


Рисунок 2.4 – Моделювання розподілу густини вихрових струмів від частоти у алюмінієвих трубах різної товщини.

Графіки залежності площі розподілу вихрових струмів (у перерізі) та сили вихрових струмів від обраної частоти збудження наведено на малюнку 2.5[17].

Розміри змінного магнітного поля, що збуджується вихровими струмами, прямо пропорційні розмірам області розподілу вихрових струмів. Поле збудження падає на деякій відстані від котушки, а поле, що виникає від вихрових струмів, поширюється далі вздовж матеріалу об'єкта дослідження, і теоретично може бути використано для визначення змін площі перерізу контрольованої труби [18].

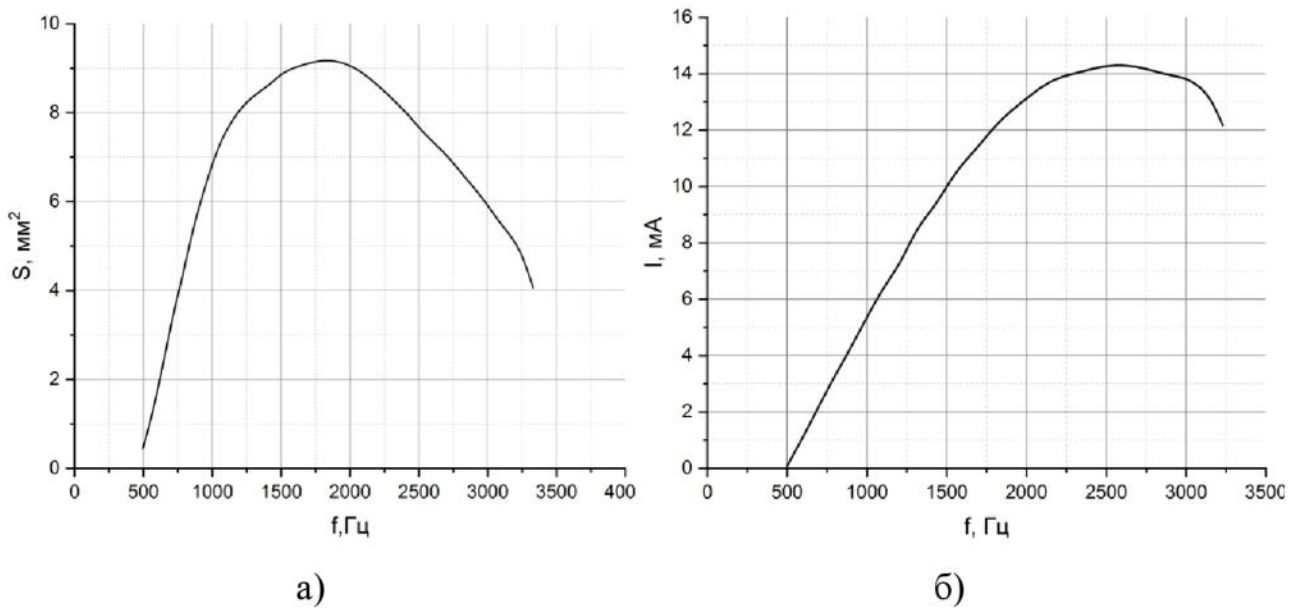


Рисунок 2.5 – Залежність площі розподілу (а) та величини вихрових струмів (б) від частоти збудливого струму

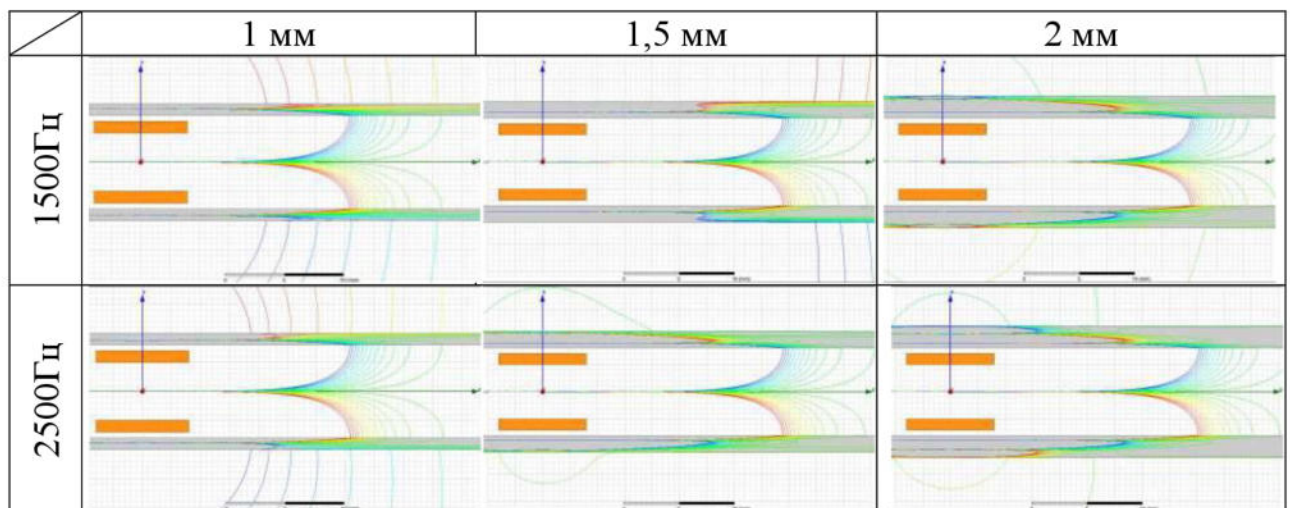


Рисунок 2.6 – Розташування силових ліній сумарного магнітного поля від струму збудження та вихрових струмів залежно від товщини об'єкта контролю та частоти збудження

На основі отриманих при розрахунку математичної моделі даних було побудовано сімейство інтегральних кривих, які являють собою силові лінії сумарного магнітного поля від змінного струму збудження та вихрових струмів, які представлені на рисунку 2.6 [18].

Аналіз розподілу магнітного поля, заснований на картинах розташування силових ліній сумарного магнітного поля, показує, що максимальна товщина досліджуваних об'єктів зі сталі при внутрішньотрубному контролі не може перевищувати два міліметри, так як при великих товщинах поле, що поширюється по зовнішній поверхні виробу, занадто мале для визначення його змін, що викликаються дефектами [18].

2.3 Аналіз впливу характеристик дефектів різного типу на сигнал вихрострумів перетворювача

Для дослідження впливу характеристик дефектів на параметри сигнальної котушки були застосовані моделі об'єктів дослідження з чотирма різними видами дефектами корозійної природи. Для зручності дефекти були позначені римськими цифрами і вибрані наступного типу: плоскодонний циліндричний дефект (I), поздовжній дефект – типу риски (II), поперечний дефект - лиска (III), кільцевий дефект (IV) [19, 20].

Були проведені математичні експерименти визначення впливу геометричних характеристик дефекту, наявності зазору чи зовнішньої опорної стінки на вихідний сигнал перетворювача. Параметри, що варіюються, для кожного виду дефекту наведені в таблиці 2.1.

Розрахункові залежності зміни глибини до різних розмірів досліджуваних дефектів представлені на рисунках 2.7 - 2.10. Тут і далі

представлені розрахункові значення дійсної ($ReU^{*вн}$) і уявної ($ImU^{*вн}$) складових наведеної напруги $U^{*вн}$ (В).

Таблиця 2.1 - Варіювати параметри для розрахункових моделей дефектів

Найменування дефекту	Розмір, мм	Глибина, % (товщини)	Зазор, мм	Розташування зовнішньої опорної стінки, мм (щодо центру дефекту)
Циліндричний дефект (I)	1-5	0-60	0,0-1,0	-1,25-1,25
Риска (II)	1-8	0-60	0,0-1,0	-2,85-2,85
Лиска (III)	1-5	0-60	0,0-1,0	-1,25-1,25
Кільцевий дефект (IV)	1-5	0-60	0,0-1,0	-1,25-1,25

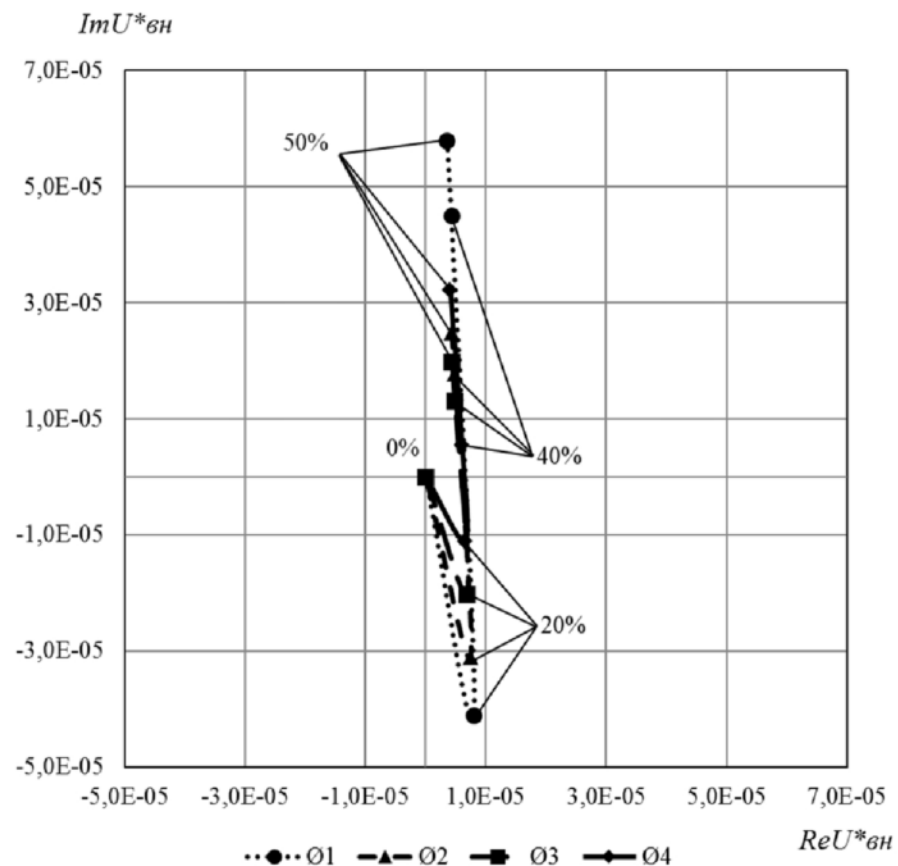


Рисунок 2.7 - Зміна напруги, що вноситься в залежності від збільшення глибини для плоскодонного циліндричного дефекту (I) діаметром 1...4.мм.

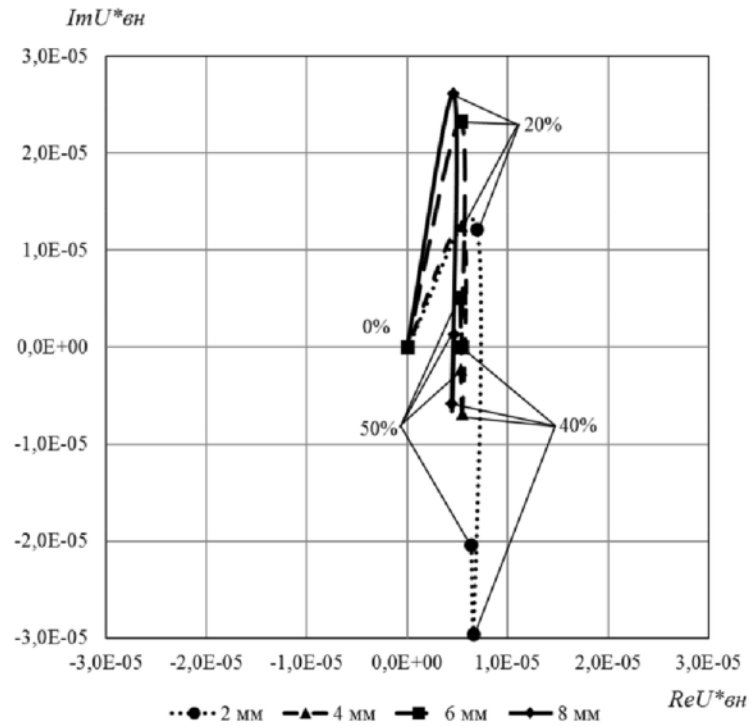


Рисунок 2.8 - Зміна напруги, що вноситься в залежності від збільшення глибини для дефекту типу риски (II) довжиною 2...8 мм.

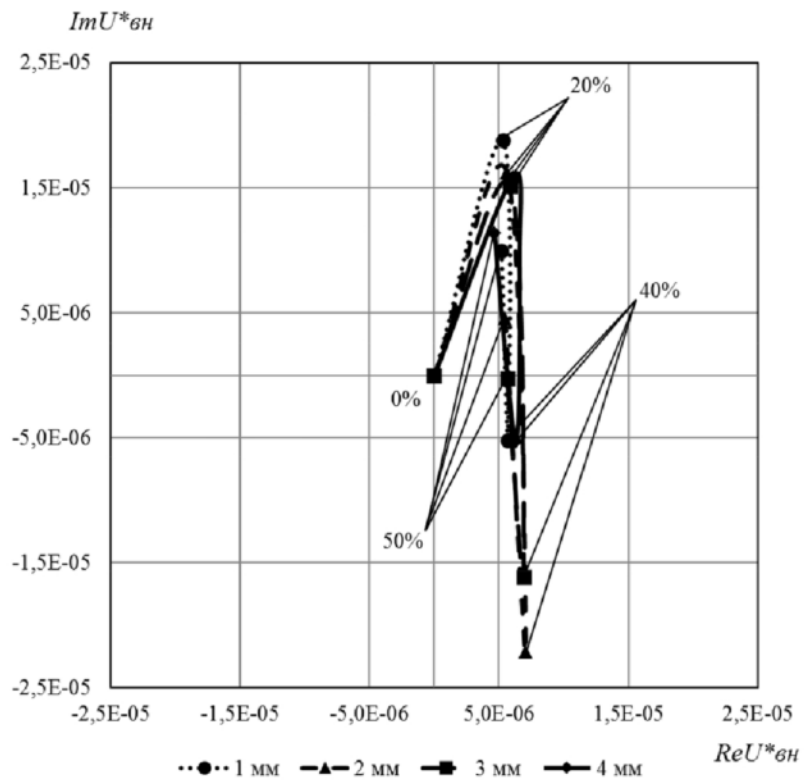


Рисунок 2.9 - Зміна напруги, що вноситься в залежності від збільшення глибини для дефекту для лиски (III) шириною 1...4 мм.

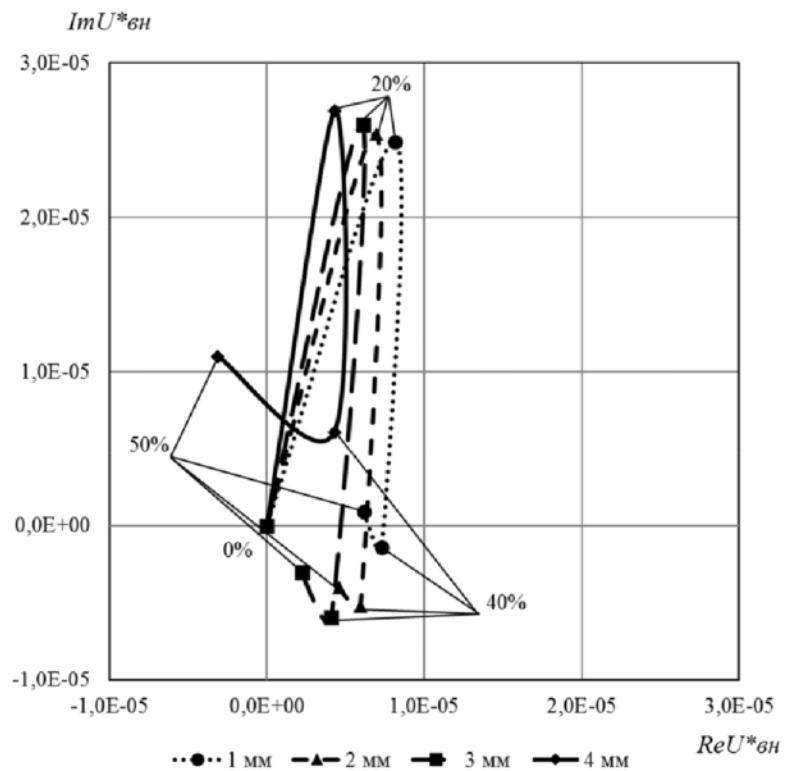


Рисунок 2.10 - Зміна напруги, що вноситься в залежності від збільшення глибини для кільцевого дефекту (IV) шириною 1...4 мм.

Поява і зростання глибини дефектів викликає збільшення амплітуди до тих пір, поки весь об'єм дефекту знаходиться в ділянках магнітних полів, де напрямок поширення магнітного поля не змінюється під дією складової поля викликається струмом збудження. Так як поле від струму збудження поширюється в протифазі з полем вихрових струмів, при розташуванні дефекту в перехідній області амплітуда сигналу перетворювача знижується і відбувається зміна фази сигналу перетворювача. Для малооб'ємних дефектів (I) характерно збільшення фази, а дефектів (II, III, IV) з великим об'ємом помітно падіння фази сигналу. При глибині дефекту більше 50% вплив складової сильнішого поля збудження стає ще помітнішим, що проявляється в різкій зміні амплітуди і фази сигналу (перегин годографів на малюнках 2.7 - 2.10). Дефекти, що проникають глибше, ніж на половину стінки об'єкта контролю надалі розглядатися не будуть [21].

2.4 Вплив зміни розміру дефекту для різної глибини

Збільшення поздовжнього розміру дефекту (діаметр для дефекту I, довжини для дефекту II та ширини для дефекту III) призводить до падіння амплітуди та значної зміни фази сигналу (рисунки 2.11 - 2.14). Для дефектів великого об'єму (IV) збільшення розмірів призводить до сильних змін як амплітуди, так і фази (рисунок 2.14) [22].

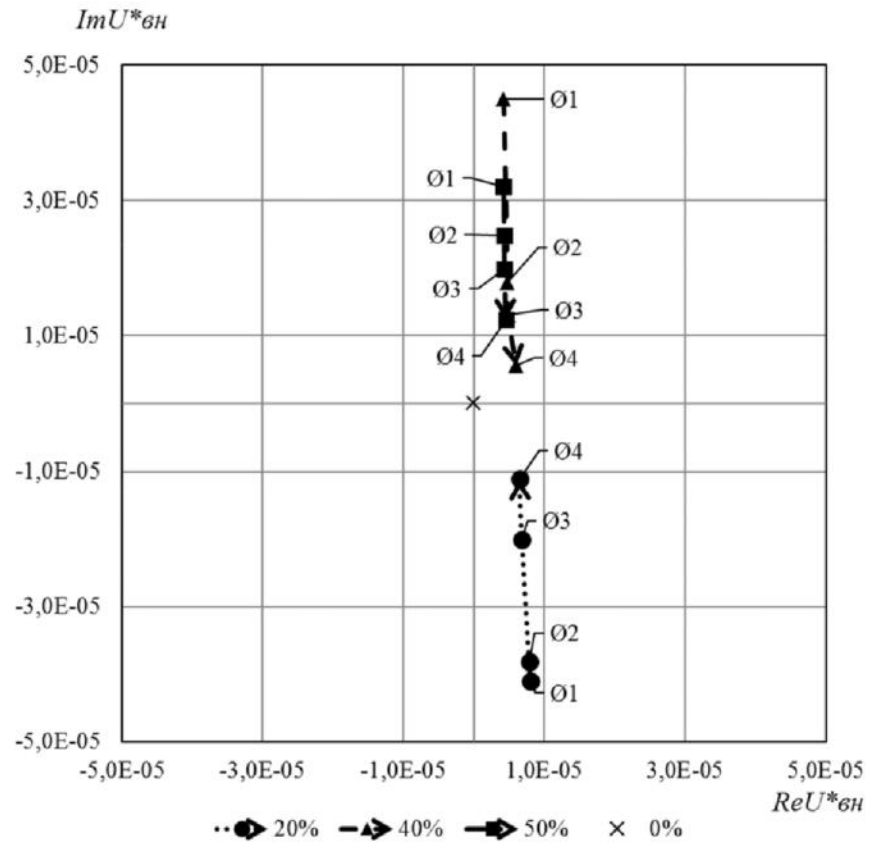


Рисунок 2.11 - Зміна напруги, що вноситься в залежності від збільшення діаметра плоскодонного циліндричного дефекту (I) глибиною 20%, 40% і 50% стінки об'єкта контролю.

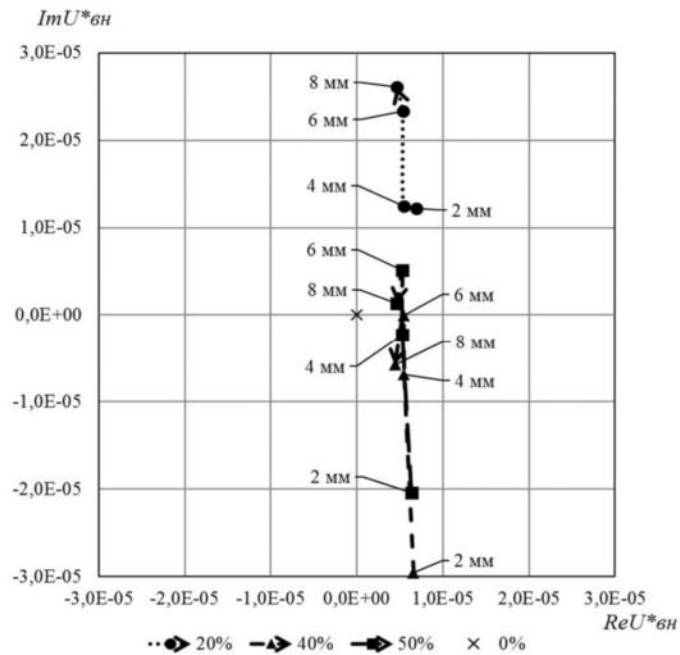
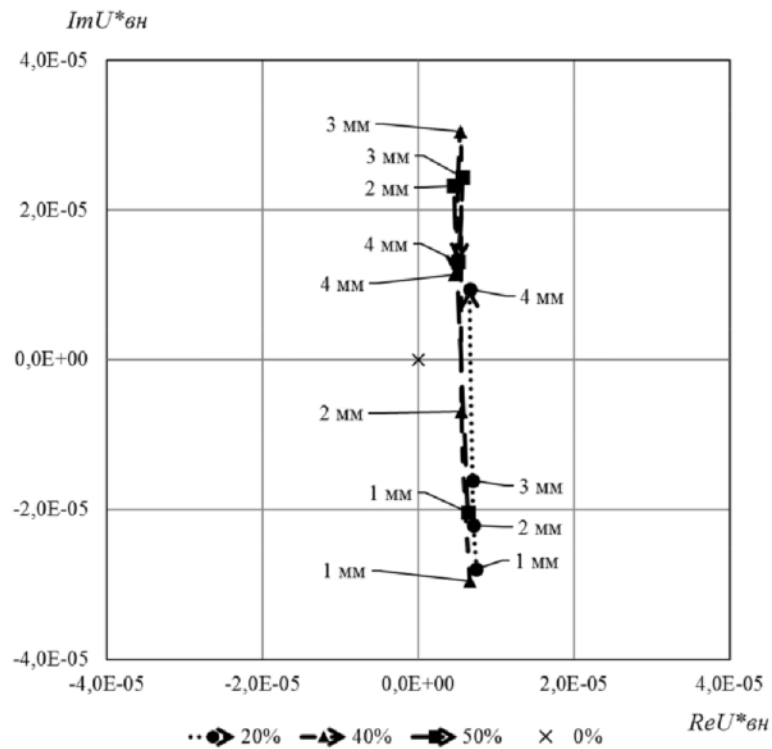


Рисунок 2.12 - Зміна напруги, що вноситься в залежності від збільшення довжини дефекту типу риски (II) глибиною 20%, 40% і 50% стінки об'єкта контролю.



Малюнок 2.13 - Зміна напруги, що вноситься в залежності від збільшення ширини дефекту типу лиски (III) глибиною 20%, 40% і 50% стінки об'єкта контролю.

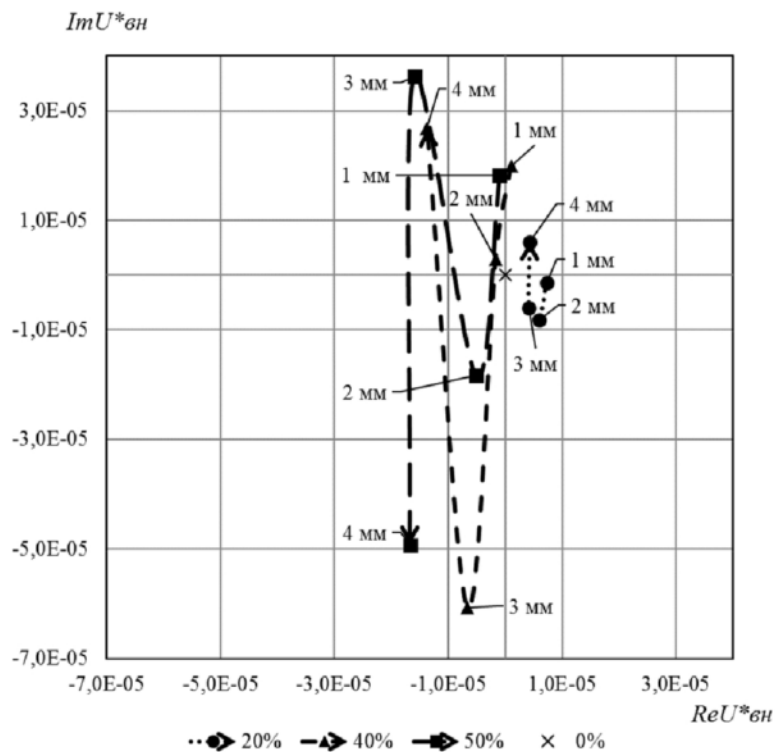


Рисунок 2.14 - Зміна напруги, що вноситься в залежності від збільшення ширини кільцевого дефекту (IV) глибиною 20%, 40% і 50% стінки об'єкта контролю.

2.5 Дослідження впливу зміни глибини дефекту і його розмірів

Розрахункові залежності зміни глибини різних розмірів досліджуваних дефектів для перетворювача з двома котушками збудження представлені малюнки 2.58 - 2.65 [21,22].

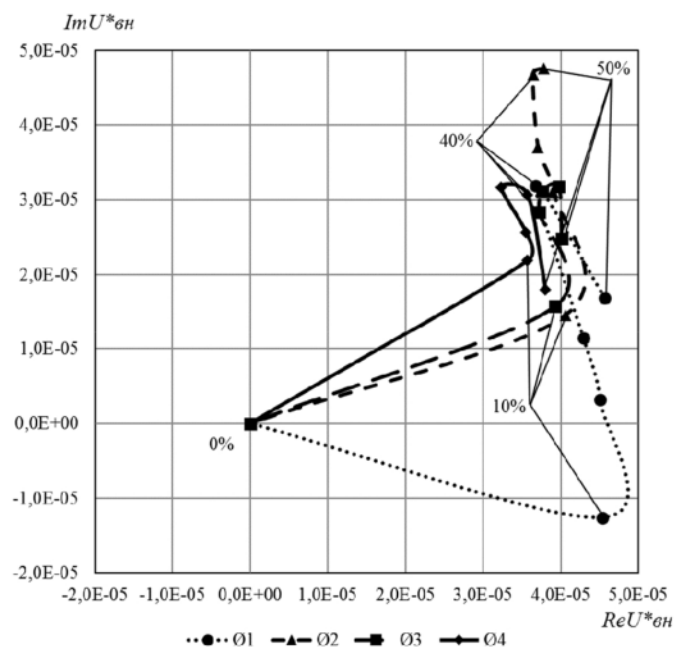


Рисунок 2.15 - Зміна напруги, що вноситься в залежності від збільшення глибини (до 50% товщини стінки об'єкта контролю) плоского циліндричного дефекту (I) різного.

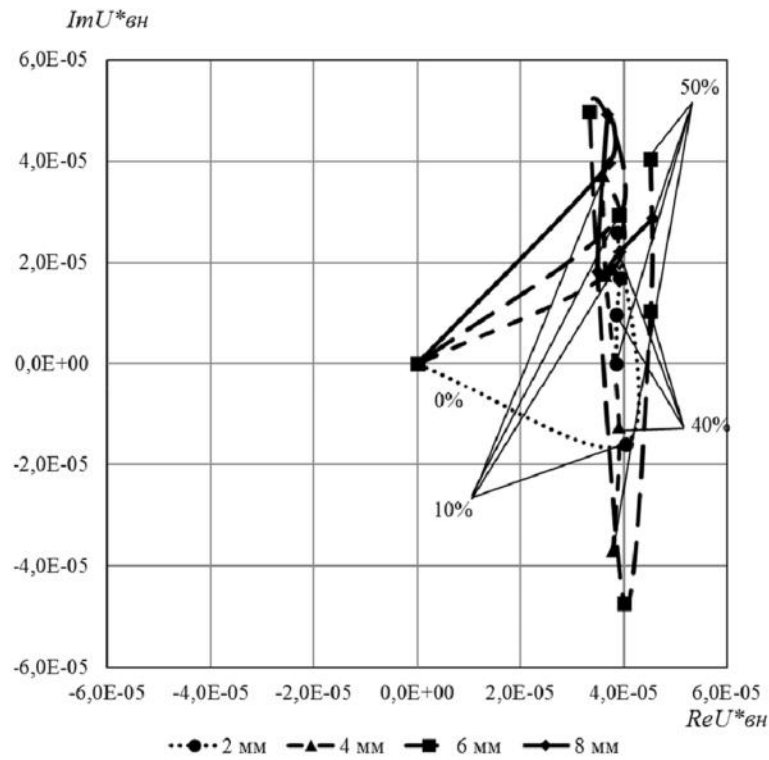


Рисунок 2.16 - Зміна напруги, що вноситься в залежності від збільшення глибини (до 50% товщини стінки об'єкта контролю) дефекту типу риски (II) різного розміру для.

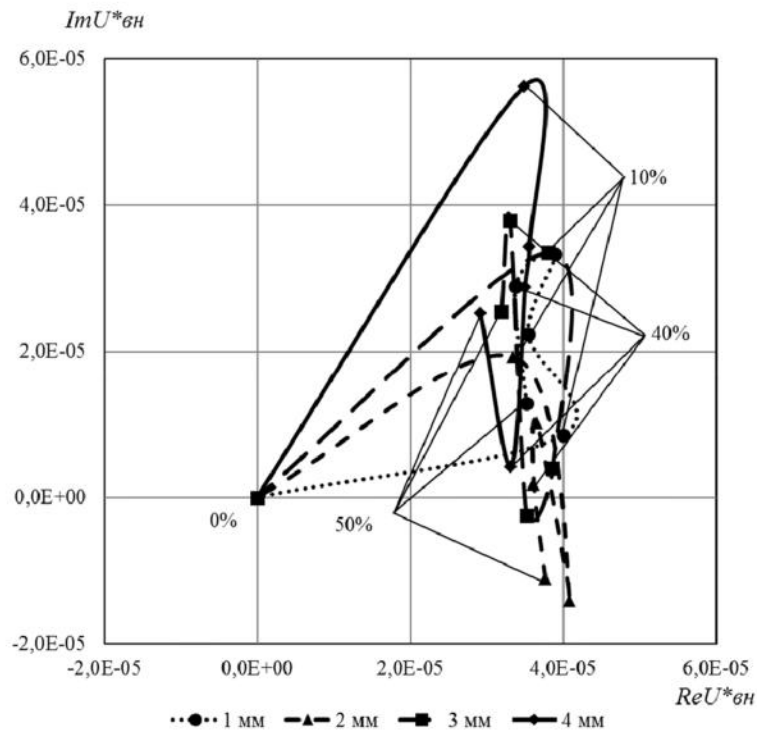


Рисунок 2.17 - Зміна напруги, що вноситься в залежності від збільшення глибини (до 50% товщини стінки об'єкта контролю) дефекту типу лиски (III) різного розміру.

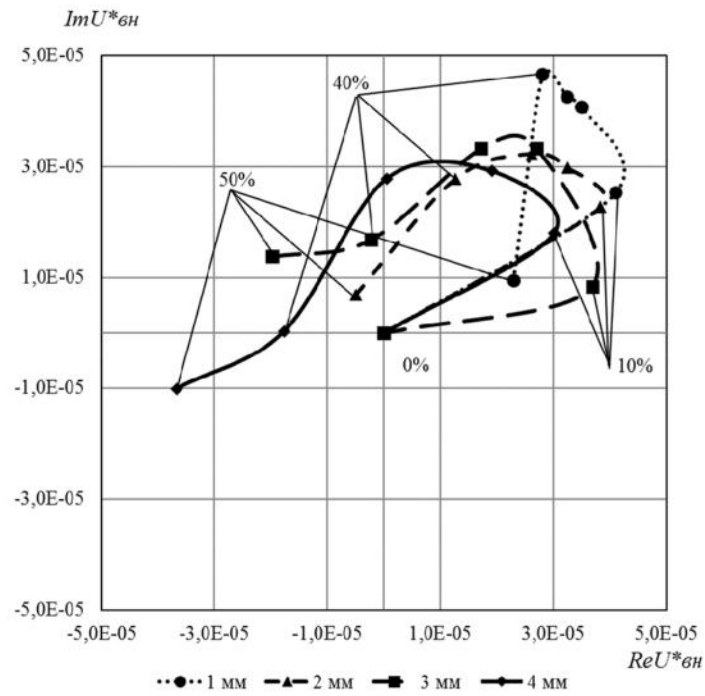


Рисунок 2.18 - Зміна напруги, що вноситься в залежності від збільшення глибини (до 50% товщини стінки об'єкта контролю) кільцевого дефекту (IV) різного розміру для перетворювача з двома котушками збудження.

3 МЕТРОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ ВИХРОСТРУМОВОГО ДЕФЕКТОСКОПА

3.1 Аналіз основних складових похибки вихрострумового дефектоскопу

Здійснюючи аналіз основних складових похибки вихрострумового дефектоскопу, слід відмітити, що прилад складається з багатьох блоків, що викликає виникнення багатопланових похибок. Тому варто навести деякі теоретичні дані для пояснення даних похибок. Слід відмітити, що результати вимірювань тієї чи іншої фізичної величини дають лише приблизне її значення.

Відхилення результату вимірювання від істинного значення вимірювальної величини називають похибкою вимірювання. Оскільки істинне значення вимірюваної величини залишається не відомим замість істинного значення приймають значення так зване дійсне, під яким розуміють значення вимірювальної величини, яке знайдене експериментальним шляхом і настільки наближується до істинного значення, що може бути використано замість нього. По цій причині на практиці можна знайти лиш приблизну оцінку похибки вимірювання [23, 24].

Похибка, яка виражена в одиницях вимірювальної величини, називається абсолютною похибкою, а відношення абсолютної похибки вимірювання до істинного значення вимірювальної величини - відносною похибкою. В залежності від характеру вимірювання похибки розрізняють:

систематичні похибки - похибки які залишаються постійними або закономірно змінюються при повторних вимірюваннях однієї і тієї ж самої величини [24];

випадкові похибки - похибки які змінюються випадковим чином при повторних вимірюваннях однієї і тієї ж самої величини.

Якість засобів і результатів вимірювань найкраще оцінити за допомогою похибок. На сьогодні відомо близько 30-ти різних видів похибок [10], перелічимо декілька основних, а саме;

1) Похибка засобу вимірювань і результату вимірювань. Похибка результату вимірювання це число, яке вказує можливі границі невизначеності отриманого значення вимірювальної величини. Похибка засобу вимірювання це певна його властивість, для визначення якої необхідно використовувати певні правила.

2) Інструментальні і методичні. Інструментальними похибками засобів вимірювань (ЗВ) називають такі похибки, які належать конкретному ЗВ, можуть бути визначені при випробовуванні даного ЗВ і можуть бути занесені в паспорт засобів вимірювання.

3) Статичні і динамічні похибки. Ці похибки властиві тільки ЗВ і залежать від швидкості зміни в часі вимірювальної величини. Ті похибки, які не залежать від швидкості зміни в часі- це статичні похибки, а ті, які залежать - динамічні похибки [1].

4) Систематичні, прогресуючі і випадкові похибки. Систематичні похибки - це такі, які змінюються в часі і є певними функціями відповідних параметрів. Прогресуючі похибки - це такі, які змінюються в часі і ця зміна залежить від зміни характеристик окремих елементів В. Випадкові похибки - це такі похибки, які не можуть бути передбачені ні по знаку ні по величині.

5) Похибки адитивності і градуювання. Системне відхилення експертних даних від вибраної характеристики ЗВ називається похибкою адекватності. Похибка градуювання залежить від похибок тих взірцевих ЗВ за допомогою, яких задається градуювання робочого ЗВ.

6) Абсолютна, відносна і приведені похибки. Абсолютна - це різниця між значенням параметру його дійсним значенням. Відносна похибка – це відношення абсолютної похибки до дійсного параметру.

Приведена похибка - це відношення абсолютної похибки до діапазону зміни вхідної чи вихідної величини.

7) Адитивні і мультиплікативні похибки. Похибки ЗВ, які не залежать від величини вхідного сигналу називаються адитивними [24].

На основі цього розглянемо складові сумарної похибки для даного приладу, а саме вихрострумове дефектоскопу, якому характерні такі похибки, як статично-інструментальні похибки. До статично-інструментальних похибок відносимо такі похибки як:

- похибка електричних вузлів δ_e , яка виникає в результаті нестабільної роботи генератора, також похибка підсилювача і перетворювача сигналу. Крім того при обробці вихідного сигналу також виникає похибка, яка базується на похибці аналогово-цифрового перетворювача. Всі ці похибки виникають при обробці сигналу, коли іде перетворення аналогового сигналу в цифровий при великій похибці обробки сигналу вузлами дефектоскопу.

- похибка від швидкості переміщення δ_v . При надто швидкому переміщенні прилад не встигає зафіксувати наявність дефекту, також його розміри і положення в ОК, що спотворює результати контролю.

- похибка зазору $\delta\Delta$, яка в свою чергу виникає при неправильному виставленні робочого режиму перетворювача стосовно об'єкту контролю, коли виставлено одну величину зазору, а при цьому вимірюється зовсім інша величина зазору;

- похибка від взаємного розміщення перетворювача і ОК δ_p , коли перетворювач неправильно (під кутом) встановлений по відношенні до поверхні ОК, що викликає зміну величини зазору, що як вже вище зазначалося викликає появу похибок при вимірюванні.

- похибка зразка δ_s , яку викликає неправильне виготовлення самого еталону [24].

Також до складових сумарної похибки можна віднести динамічну похибку δ_d , що залежить від встановлення приладу в робочий режим.

Варто зауважити, що сумарна похибка включає в себе і додаткову похибку δ_{ood} , яка буде залежати від шорсткості поверхні, забрудненості, температурної зміни струму, оскільки при нагріву елементів приладу

точність вимірювання вносить свою лепту в похибки, оскільки збільшується зазор, що призводить до спотворення результатів вимірювання. Забруднення поверхні також створює умови для виникнення похибок. Крайовий ефект чи не один з найважливіших складових випадкової похибки в нашому випадку, тому, що коли вимірювання проводяться на краю ОК то вихрострумове поле, що наводиться в ОК виходить за межі деталі, що викликає зміни вихрового поля, при цьому результати вимірювань спотворюються.

Крім вище наведених похибок також складовою сумарної похибки можна вважати методичну похибку δ_m , яка залежить від правильного вибору точки на годографі, також слід відмітити, що точність з якою вибирають точку впливає на результати вимірювань.

3.2 Розрахунок основної допустимої похибки вихрострумowego дефектоскопу

При розгляді даного розділу слід відмітити, що похибка вимірювання, тобто відхилення результату вимірювання від дійсного значення вимірної величини, утворюється внаслідок похибок засобів вимірювань, методу вимірювання і методу відрахунку показів засобів вимірювання. Ці похибки, в свою чергу, складаються із своїх складових похибок. Наприклад, похибка засобів вимірювання визначається похибками його блоків і вузлів. Значення цієї похибки може суттєво залежати від зовнішніх факторів, які впливають на роботу засобу вимірювання (вимірювання навколишньої температури, коливань напруженості джерел живлення) [24].

На практиці вимірювань часто постає задача визначення сумарної (результуючої) похибки за відомими значеннями складових цієї похибки.

Знаходження сумарної систематичної похибки по відомим систематичними похибкам сумуючих складових не викликає труднощів. В цьому випадку при розрахунку приймають $r = 0$, якщо випадкові складові можна рахувати невідомими, або рівними одиниці з знаком + або -, якщо

помітна кореляція між сумуючими випадковими складовими похибки. Розглянемо більш детально сумування випадкових похибок [24].

Сумування випадкових похибок при нормальних законах їх розподілу будемо вважати, що результуюча похибка вимірювань складається з n випадкових складових, які мають нормальний закон розподілу. Знаючи довірчу імовірність і довірчий інтервал для кожної складової похибки, можна знайти середньоквадратичне відхилення кожної із них по формулі :

$$\sigma_i = \frac{\delta_{im}}{z p_i} \quad (3.1)$$

де $z p_i$ - коефіцієнт, взятий з таблиць для нормального розподілу і відповідної довірчої імовірності P_i .

Якщо імовірність довіри для всіх складових однакова і рівна P , тоді використовуючи вираз (3.1) дістанемо:

а) для корельованих складових

$$\sigma_{\Sigma} = \frac{\sum_{i=1}^n \pm \delta_{im}}{z_p} \quad (3.2)$$

де знак \pm означає, що для складових з позитивною кореляцією δ_i і δ_{im} потрібно брати з знаком $+$, а для складової з негативною кореляцією - з знаком мінус;

б) для незалежних складових ($r_{ij}=0$)

$$\sigma_{\Sigma} = \frac{\sqrt{\sum \delta_{im}^2}}{z_p} \quad (3.3)$$

При сумуванні складових, які мають нормальний закон розподілу, результуюча похибка буде мати той самий нормальний закон розподілу.

Тому інтервал довіри сумарної похибки з імовірною довірою P може бути знайдений як :

$$\delta_{\Sigma} = \pm z_p \cdot \sigma_{\Sigma} \quad (3.4)$$

де δ_{Σ} - границя довірчого інтервалу сумарної похибки.

З врахуванням (3.2) (3.3) вираз (3.4) матиме вигляд

а) для корельованих складових

$$\delta_{\Sigma} = \pm \sum \pm \delta_{im} \quad (3.5)$$

б) для незалежних складових

$$\delta_{\Sigma} = \pm \sqrt{\sum \delta_{im}^2} \quad (3.6)$$

Якщо в виразі (3.4) всі складові мають позитивну кореляцію, тоді

$$\delta_{\Sigma} = \pm \sqrt{\delta_{im}} \quad (3.7)$$

Сумування похибок за виразом (3.6) називається арифметичним сумуванням, а за виразом (3.7) - геометричним сумуванням.

Дійсні значення коефіцієнтів кореляції за абсолютним значенням можуть знаходитись в границі від 0 до 1, тому арифметичне сумування звичайно дає високі значення похибки [1, 24].

Сумування випадкових похибок при їх законах розподілу, які відрізняються від нормальних.

Важкість знаходження сумарної похибки в цьому випадку заключається в тому, що закон розподілу сумарної похибки залежить від конкретних видів і характеристик законів розподілу сумарних складових. Наприклад, при складанні двох незалежних похибок, які мають рівномірні закони розподілу з однаковими дисперсіями, результуюча похибка буде розподілятися за трикутним законом. Якщо ці рівномірні закони мають різні дисперсії, тоді результувний закон буде мати вид у вигляді трапеції. Тому для встановлення інтервалу довіри сумарної похибки необхідно в кожному конкретному випадку шукати методами теорії імовірності результуючий закон розподілу за відомими законами сумування складових.

Можливі приблизні способи визначення інтервалу довіри похибки без встановлення результувного закону розподілу. Перший базується на центральній граничній теоремі: якщо число сумуючих незалежних складових достатньо велике, тоді результуючий закон розподілу близький до нормального і в якості коефіцієнту $K_{\Sigma}^{(p)}$ можна приймати z_p . Другий - при сумуванні незалежних складових, які мають закон розподілу.

Розподіл похибок ЗВ на основі центральної граничної теореми теорії імовірності мають бути завжди близькі до нормального розподілу. Але більш детально випробування фактичного розподілу похибок ЗВ показали, що закони розподілу похибок різноманітні. Це різко ускладнює призначення верхньої і нижньої границі лінії похибки, а тому і всю методику створення суджень про положення лінії похибки ЗВ в границях нормуючих границь і умов виходу частини смуги похибки за нормуючі границі.

Це більше ускладнюється ще й тим, що форма закону розподілу в поперечному перерізі смуги різна не тільки для ЗВ різних типів, але може суттєво відхилятися у окремих екземплярах ЗВ одного і того самого типу. І більш того, навіть у даному екземплярі ЗВ вона може змінюватися по довжині смуги похибки, тобто мати одну форму при $x=0$ і поступово набирати зовсім іншу форму до кінця смуги [24].

Більш детальним випробуванням цієї властивості граничних квантилів при $P_0=0,9$ показали, що інтегральні криві багатьох класів симетричних, високоентропійних розподілів в області 0,05 і 0,95 квантилів перетинаються між собою хоча і не строго в одній точці, зате в дуже вузькому інтервалі. Тому з похибкою в $0,05\sigma$, що в більшості технічних розрахунків, похибка з імовірністю $P_0=0,9$ може бути визначена як $\Delta_{0,9}=1,6\sigma$, а верхні і нижні границі можна знайти за формулами.

Таким чином, при використанні для оцінки випадкової складової похибки

з $P_0=0,9$ оцінки $\Delta_{0,9}=1,6\sigma$ довірна імовірність виходу похибки за симетричні границі буде мати значення $P_0=0,95$, так як вихід за нижню границю буде практично відсутній [24].

$$\Delta_z = \frac{\Delta_\Sigma}{U_{\text{вих}}} \quad (3.8)$$

$$\Delta_\Sigma = Z \cdot \sigma_\Sigma \quad (3.9)$$

де σ_Σ - сумарне середньоквадратичне відхилення(СКВ) похибок;

Z - коефіцієнт Ст'юдента (коефіцієнт довіри), який за нормальним законом розподілу рівний $Z = 1,96$

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sum \sigma_i^2} \quad (3.10)$$

де σ_i - СКВ похибок окремих елементів і яке рівне

$$\sigma_i = \frac{\Delta_i}{Z} \quad (3.11)$$

$$\Delta_i = \delta_i \cdot U_H \quad (3.12)$$

На основі вище наведених формул здійснюємо розрахунок сумарної похибки блоку дефектоскопу. З даних розрахованого блоку дефектоскопу береться розраховані складові елементи генератора. Туди входять транзистори, конденсатори, резистори. Відносна похибка цих елементів береться з довідника. Оскільки в розрахованій схемі певні групи елементів однотипні, то й відносна похибка даних елементів буде для всіх однакова. Тому для резисторів $\delta_R = 0,2\%$ при цьому в схемі налічується 9 резисторів, для конденсаторів $\delta_C = 0,5\%$ їх кількість складає 6 штук, для транзисторів $\delta_I = 1,5\%$ при тому, що в схемі їх 2 штуки.

Для того, щоб обчислити сумарну похибку дефектоскопа необхідно при цьому від відносних похибок перейти до абсолютних, для цього відносну похибку домножуємо на номінальну напругу живлення кожного елемента, вона складає $U_{HR} = 5V$, $U_{HC} = 4V$, $U_{HI} = 2V$ тому перемноживши дані величини отримуємо:

$$\Delta_R = (9 \cdot 0,002) \cdot 5 = 0,09$$

$$\Delta_C = (6 \cdot 0,005) \cdot 4 = 0,12$$

$$\Delta_I = (2 \cdot 0,015) \cdot 2 = 0,06$$

Тепер потрібно перейти до СКВ, при цьому отримані результати потрібно поділити на коефіцієнт Ст'юдента $Z = 1,96$, зробивши цю операцію отримаємо

$$\sigma_R = \frac{0,09}{1,96} = 0,046$$

$$\sigma_C = \frac{0,12}{1,96} = 0,061$$

$$\sigma_l = \frac{0,06}{1,96} = 0,031$$

тепер знаходиться сумарна похибка дефектоскопа про те в СКВ тому підставивши отримані дані отримаємо

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{0,046^2 + 0,061^2 + 0,031^2} = 0,082$$

Отримавши сумарну похибку вузла в СКВ переходимо тим самим шляхом, що йшли сюди до відносної похибки блоку.

$$\sigma_{\Sigma} = 0,082 \cdot 1,96 = 0,16$$

тоді $\delta_{\Sigma} = 0,16/9 = 0,018$ (1,8%)

Отже сумарна похибка вузла генератора складає 1,8%.

Тому можна зробити висновок, вузол має похибку, яка складає 1%. При такій похибці блок генератора можна вважати справним і допустимим до роботи.

Тепер маючи сумарну похибку блоку можна розрахувати основну сумарну похибку дефектоскопа[24].

Тому користуючись вище наведеними складовими основної похибки дефектоскопа, які мають певні значення, здійснюємо розрахунок. Для цього потрібно знати величини похибок складових дефектоскопу. Так як вище зазначалося, що сумарна похибка дефектоскопу складається з складових, то наведемо їх величини кожної зокрема.

Статично-інструментальна складова містить в собі такі похибки, як похибка зразка, яка за технічною документацією складає $\delta_3 = 0,4\%$. Похибка електронного блоку дефектоскопа складається з похибки розрахованого нами генератора, яка складає $\delta_2 = 1\%$, а похибки перетворювача і підсилювача, аналогово-цифрового перетворювача згідно документації на аналогічні прилади береться $\delta_{пер} = 0,9\%$, $\delta_{нідс} = 0,8\%$, $\delta_{аип} = 0,5\%$, тоді згідно вище наведених формул сумування похибок сумарна похибка електронного блоку рівна

$$\delta_e = \sqrt{\delta_2^2 + \delta_{пер}^2 + \delta_{нідс}^2 + \delta_{аип}^2} \quad (3.13)$$

$$\delta_e = \sqrt{0,018^2 + 0,009^2 + 0,008^2 + 0,005^2} = 0,022$$

Маючи похибку електронного блоку дефектоскопу перетворювач має фіксує опрацю, то похибкою від взаємного розміщення можна нехтувати $\delta_p = 0$.

Враховуючи, що в нас є електронна система обробки інформації і перетворювачі практично без інерційні, то динамічною похибкою також нехтуємо $\delta_d = 0$. Методична похибка, яка залежить від правильного вибору точки на годографі згідно документації береться рівною $\delta = 0,3\%$. При проведенні контролю дефектоскопом виникають ще і додаткові похибки, які згідно нормативних документів беруться загальною величиною для всіх складових даної похибки і ця величина рівна $\delta_{\text{дод}} = 0,8\%$.

Знайдемо тепер похибку швидкості переміщення перетворювача. За документаційними даними на цей виріб ця величина складає $\delta_v = 0,3\%$. Похибка зазору згідно стандартів на аналогічний прилад становить $\delta_{\Delta} = 0,5\%$.

Так як

Маючи всі вхідні дані для розрахунку, проводимо сумування всіх похибок за вище вказаними формулами

$$\delta_{\Sigma} = \sqrt{\delta_v^2 + \delta_{\Delta}^2 + \delta_p^2} + \delta_s + \delta_e + \delta_{\text{дин}} + \delta_m + \delta_{\text{дод}} \quad (3.14)$$

$$\delta_{\Sigma} = \sqrt{0,003^2 + 0,005^2 + 0^2 + 0,004} + 0,022 + 0 + 0,003 + 0,008 = 0,044 = 4,4\%$$

Отже сумарна похибка дефектоскопу складає 4,4%, що цілком прийнятно для групи приладів, що використовуються для точних вимірювань.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Характеристика життєво - небезпечних факторів та правила безпеки при користуванні розроблюваним дефектоскопом

Фактори, які впливають на характер та наслідки уражень електричним струмом, надзвичайно різноманітні, їх можна поділити на три групи:

- фактори електричного характеру (напруга і струм, який проходить крізь людину, вид і частота струму, опір людини електричному струму);
- фактори неелектричного характеру (особливі властивості людини, фактор уваги, тривалість дії струму, шлях струму крізь людину);
- фактори навколишнього середовища;

Струм, який проходить крізь людину, є головним ушкоджуючим фактором при електротравмі. Різний за рівнем струм впливає по-різному на людину.

Відчутний струм — малий струм, який людина починає відчувати: в середньому близько 1,1 мА при змінному струмі частотою 50 Гц і близько 6 мА при постійному струмі. Ця дія обмежується при змінному струмі слабким свербіжем і легким пощипуванням (поколюванням), а при постійному струмі — відчуттям нагріву шкіри на ділянці, що доторкується до струмовідних частин. Найменше значення відчутного струму називається пороговим відчутним струмом.

Невідпускаючий струм — струм, що викликає в разі проходження через тіло людини непереборні судорожні скорочення м'язів руки, в якій затиснутий провідник, а його найменше значення називається пороговим невідпускаючим струмом. При змінному струмі (50 Гц) величина цього струму перебуває в межах 20-25 А, При постійному струмі невідпускаючих струмів, власне кажучи, немає, оскільки при певних значеннях струму людина може самостійно розтиснути руку, в якій затиснутий провідник, і таким чином відірватися від струмовідної частини. Однак в момент відриву виникають болісні скорочення м'язів, аналогічні за характером і больовим

відчуттям тим, які спостерігаються при змінному струмі. Сила струму становить приблизно 50-80 мА.

Цей струм і прийнято умовно за поріг невідпускаючих струмів при постійній напрузі.

Фібриляційний струм. Змінний (50 Гц) струм 50 мА і більше, проходячи через тіло людини по шляху "рука — рука" або "рука — ноги", діє як подразник на м'язи серця, що розташовані глибоко в грудях. Це небезпечно для життя людини, оскільки через 1—3 с з моменту замикання кола через людину може настати фібриляція або зупинка серця. При цьому припиняється кровообіг і, відповідно, в організмі виникає нестача кисню; це, в свою чергу, швидко призводить до припинення дихання, тобто наступає смерть.

Електричний струм, який викликає фібриляцію серця, називається фібриляційним струмом, а найменше його значення — пороговим фібриляційним струмом.

За частоти 50 Гц фібриляційними є струми в межах від 50 мА до 5 А, а середнє значення порогового фібриляційного струму — близько 100 мА. При постійному струмі середнім значенням порогового фібриляційного струму можна вважати 300 мА, а верхнім 5 А.

Струм понад 5 А, як постійний, так і змінний, викликає раптову зупинку серця, минаючи стан фібриляції. Водночас із зупинкою серця виникає і параліч дихання, причому після швидкого відключення струму дихання, як правило, самостійно не відновлюється.

Безпечним струмом можна вважати такий струм, який протягом тривалого часу (декілька годин) може проходити через людину, не завдаючи їй шкоди і не викликаючи ніяких відчуттів, і який набагато менший порогового відчутного струму. Точні значення безпечного струму не встановлені, але для практичних цілей його найбільше значення можна, певно, вважати рівним 50-75 мкА при змінному струмі промислової частоти (50 Гц) і 100-125 мкА — при постійному струмі [25,26].

Правила безпеки при користуванні розроблюваним дефектоскопом:

- 1) перед вмиканням необхідно візуально перевірити електрошнур на наявність механічних пошкоджень;
- 2) дефектоскоп повинен бути надійно заземлений;
- 3) забороняється працювати з дефектоскоп вологими руками;
- 4) не можна залишати без нагляду на довгий час, після закінчення роботи перевірити, чи все вимкнено;
- 6) при виявленні або виникненні несправності негайно викликати відповідний обслуговуючий персонал;
- 7) категорично заборонено виконувати будь-які ремонтні роботи самостійно;
- 9) якщо в чути запах диму, горілої ізоляції, потрібно негайно повідомити про це відповідні служби.

4.2 Способи захисту від шкідливих факторів виробництва

Електробезпека - це система організаційних і технічних заходів, що забезпечують захист людей від небезпечної і шкідливої дії електричного струму, електричної дуги, електромагнітного поля, статичної електрики.

Основними заходами захисту від ураження електричним струмом є:

- забезпечення недоступності струмопровідних частин для випадкового дотику;
- застосування електроенергії з безпечними величинами напруги;
- усунення небезпеки ураження людей струмом у разі появи напруги на частинах конструкцій електроустаткування;
- застосування індивідуальних захисних засобів від ураження електричним струмом.

Недоступність струмопровідних частин для випадкового дотику досягається ізоляцією їх струмонепровідними матеріалами. Провідники електричного струму повинні мати робочу ізоляцію. Передбачено застосування в деяких випадках додаткової, підсиленої чи лінійної ізоляції.

Недоступність розташування струмопровідних частин досягається розміщенням їх на висоті, під підлогою чи приховано в стінах. Незахищені струмопровідні частини, до яких можливий дотик людей, надійно огороджують у всіх випадках, якщо напруга перевищує:

- 65 В - в приміщеннях без підвищеної небезпеки;
- 42 В - в приміщеннях з підвищеною небезпекою;
- 12 В - в приміщеннях особливо небезпечних;

У випадку напруги понад 250 В огороджують не тільки незахищені, але й ізольовані струмопровідні частини.

Застосування малих напруг - дуже ефективний захист від ураження електричним струмом. Для живлення кіл управління технологічним обладнанням, встановленим в особливо небезпечних приміщеннях і приміщеннях з підвищеною небезпекою; кіл управління пересувного устаткування і для живлення ручного інструменту використовують напругу не вище 42В. На шафах і пультах управління обладнанням розміщують штепсельні розетки з напругою не вище 12В для включення переносних світильників, які використовуються під час періодичних оглядів наявних в них важкодоступних місць.

Захисне заземлення, занулення і відключення - основні заходи захисту людей від ураження електричним струмом у разі появи напруги на частинах конструкцій електроустаткування.

Захисне заземлення - свідоме електричне з'єднання з землею чи її еквівалентом металевих частин електроустаткування.

Дотик до незахищеного корпусу, який виявився під напругою, рівнозначний однофазному ввімкненню людини в електричну мережу. Мета заземлення - понизити до безпечної величини напругу відносно землі на металевих частинах електроустаткування, які випадково виявилися під напругою, і цим усунути небезпеку ураження людей електричним струмом.

Захисне занулення - навмисне електричне з'єднання з нульовим захисним проводом металевих частин електроустановки, яке не перебуває під напругою, але може опинитись під напругою в аварійних режимах роботи.

Нульовий захисний провід - це провід, який з'єднує частини, що підлягають зануленню, з глухозаземленою нейтральною точкою обмотки джерела струму або її еквівалентом.

З метою зниження електротравматизму на виробництві використовується мала напруга 12, 36 та 42 В.

Основними мірами по захисту від ураження електричним струмом є:

- забезпечення недоступності струмоведучих частин для випадкового доторкання;
- використання ізоляції струмоведучих частин;
- використання методів колективного захисту від ураження електричним струмом;
- захисного заземлення, занулення та автоматичного відключення;
- періодична перевірка опору заземлення;
- контроль та профілактика пошкоджень ізоляції [26,27]

4.3 Дія електромагнітного випромінювання на організм людини, його нормування

Електромагнітні поля (ЕМП) негативно впливають на організм людини, яка безпосередньо працює з джерелом випромінювання, а також на населення, яке мешкає поблизу джерел випромінювання. Встановлено, що переважна частина населення знаходиться в умовах підвищеної активності ЕМП. Можна вважати, що в діапазоні промислових частот (у тому числі 50 Гц) допустимо розглядати вплив на біологічний об'єкт електричної і магнітної складових поля роздільно (нарізно). В будь-якій точці ЕМП промислової частоти енергія магнітної складової поля, яка поглинається тілом людини, майже в 50 разів менша від енергії електричної складової цього поля, що поглинається тілом. Це дає змогу зробити висновок, що в діапазоні промислових частот дією магнітної складової поля на біологічний об'єкт можна знехтувати, а негативний вплив на організм обумовлений електричною складовою поля.

Ступінь впливу електромагнітних випромінювань на організм людини взагалі залежить від діапазону частот, тривалості опромінення, характеру опромінення, режиму опромінення, розмірів поверхні тіла, яке опромінюється, та індивідуальних особливостей організму.

У результаті дії ЕМП на людину можливі гострі та хронічні форми порушення фізіологічних функцій організму. Ці порушення виникають в результаті дії електричної складової ЕМП на нервову систему, а також на структуру кори головного та спинного мозку, серцево-судинної системи.

У більшості випадків такі зміни в діяльності нервової та серцево-судинної системи мають зворотній характер, але в результаті тривалої дії вони накопичуються, підсилюються з плином часу, але, як правило, зменшуються та зникають при виключенні впливу та поліпшенні умов праці. Тривалий та інтенсивний вплив ЕМП призводить до стійких порушень та захворювань.

На початку 60-х років у науково-технічній літературі з'явилися перші відомості про те, що люди, опромінені імпульсом НВЧ коливань, можуть постійно чути якийсь звук. Залежно від тривалості та частоти повторень імпульсів цей звук сприймається як щебет, цвірінчання чи дзюркіт у деякій точці всередині чи ззаду голови. Це явище викликало інтерес вчених, які розпочали систематичні дослідження на людях та тваринах. Під час дослідів люди повідомляли про свої відчуття.

Отже, електромагнітне випромінювання як хвороботворний чинник слід розглядати на підставі клінічних та експериментальних матеріалів. Сумісну дію цих випромінювань широкого діапазону можна класифікувати як окрему радіохвильову хворобу. Тяжкість її наслідків знаходиться у прямій залежності від напруженості ЕМП, тривалості впливу, фізичних особливостей різних діапазонів частот, умов зовнішнього середовища, а також від функціонального стану організму, його стійкості до впливу різних чинників можливостей адаптації.

Поряд із радіохвильовою хворобою (як специфічним результатом дії ЕМП) зростає ризик виникнення загальних захворювань, захворювань органів дихання, травлення тощо. Це відбувається також і за дуже малої

інтенсивності ЕМП, яка незначно перевищує гігієнічні нормативи. Ймовірно, що причиною тут є порушення нервово-психічної діяльності як головної у керуванні всіма функціями організму.

У результаті дії на організм людини електромагнітних випромінювань в діапазоні 30 кГц - 300 МГц спостерігається: загальна слабкість, підвищена втома, сонливість, порушення сну, головний біль та біль в ділянці серця. З'являється роздратованість, втрачається увага, сповільнюються рухові реакції. Виникає ряд симптомів, які свідчать про порушення роботи окремих органів - шлунку, печінки, підшлункової залози. Погіршуються харчові та статеві рефлексі, діяльність серцево-судинної системи, фіксуються зміни показників білкового та вуглеводного обміну, змінюється склад крові, зафіксовані зміни на рівні клітин.

При систематичній дії ЕМП високої та надвисокої частоти на організм людини спостерігається підвищення кров'яного тиску, трофічні явища (випадіння волосся, ламкість нігтів). ЕМП викликають зміну поляризації молекул та атомів, які є складовою частиною клітин, в результаті чого виникає небезпечний нагрів. Надмірне тепло може нанести шкоду як окремим органам, так і всьому організму людини. Професійні захворювання виникають у працівників при тривалому та інтенсивному опроміненні.

Вплив випромінювань надвисокої частоти (НВЧ) на організм людини привертає увагу великої кількості дослідників і відображається у численних наукових доповідях і публікаціях. В одній із них наведені відомості про клінічні прояви дії НВЧ залежно від інтенсивності опромінення. При інтенсивності близько 20 мкВт/см^2 спостерігається зменшення частоти пульсу, зниження артеріального тиску, тобто явна реакція на опромінення. Вона сильніша й може навіть виражатися у підвищенні температури шкіри в осіб, які раніше потрапляли під дію опромінення.

Із ростом інтенсивності відбуваються електрокардіографічні зміни, при хронічному впливі - тенденція до гіпотонії, до змін у нервовій системі. Потім спостерігається прискорення пульсу, коливання об'єму крові.

При інтенсивності 6 мВт/см^2 помічені зміни у статевих залозах, у складі крові, помутніння кришталика. Далі - зміни у здатності крові зсідатися, умовнорефлекторній діяльності, вплив на клітини печінки, зміни у корі головного мозку. Потім - підвищення кров'яного тиску, розрив капілярів і крововиливи у легені та печінку [27,28].

Випромінювання інтенсивністю до 100 мВт/см^2 викликають стійку гіпотонію, стійкі зміни серцево-судинної системи, двосторонню катаракту. Подальше опромінення помітно впливає на тканини, викликає больові почуття. Якщо інтенсивність перевищує 1 Вт/см^2 , це спричинює дуже швидко втрату зору, що є одним із серйозних ефектів дії НВЧ на організм людини. На більш низьких частотах такі ефекти не відбуваються, і тому їх треба вважати специфічними для НВЧ діапазону. Ступінь пошкодження залежить, в основному, від інтенсивності та тривалості опромінення.

Інтенсивне НВЧ опромінення відразу викликає сльозотечу, подразнення, звуження зіниці ока. Після короткого (1-2 доби) прихованого періоду спостерігається погіршення зору, що посилюється під час повторного опромінення і свідчить про кумулятивний характер пошкоджень. Спостереження за людьми доводять існування механізму відбудови пошкоджених клітин, який вимагає тривалого часу (10-20 діб). Зі зростанням часу та інтенсивності впливу пошкодження набувають незворотного характеру.

У разі прямого впливу на око випромінювання відбувається пошкодження рогівки. Але серед усіх тканин ока найбільшу чутливість в діапазоні 1...10 ГГц має кришталик. Сильні пошкодження кришталика зумовлені тепловим впливом НВЧ (при щільності потоку енергії понад 100 мВт/см^2). За малої інтенсивності помутніння спостерігаються тільки у задній ділянці, за великої - по всьому об'єму кришталика.

Катароутворення пояснюється не тільки тепловою дією, воно залежить також від ряду інших не повністю встановлених чинників. Значну роль можуть відігравати концентрація поля у середовищах з окремими діелектричними властивостями та об'ємні резонансні ефекти. Для

попередження професійних захворювань, які виникають у результаті тривалої дії електромагнітних випромінювань, встановлені гранично допустимі рівні електромагнітних випромінювань [29].

Рівні ЕМП необхідно контролювати не рідше 1 разу на рік. Якщо вводиться в дію новий об'єкт або здійснюється реконструкція старих об'єктів, то заміри рівня електромагнітних випромінювань проводяться перед введенням їх в експлуатацію.

4.4 Захист від електромагнітних випромінювань

Вибір того чи іншого способу захисту від дії електромагнітних випромінювань залежить від робочого діапазону частот, характеру виконуваних робіт, напруженості та щільності потоку енергії ЕМП, необхідного ступеня захисту.

До заходів щодо зменшення впливу на працівників ЕМП належать: організаційні, інженерно-технічні та лікарсько-профілактичні.

Організаційні заходи здійснюють органи санітарного нагляду. Вони проводять санітарний нагляд за об'єктами, в яких використовуються джерела електромагнітних випромінювань [29].

Інженерно-технічні заходи передбачають таке розташування джерел ЕМП, яке б зводило до мінімуму їх вплив на працюючих, використання в умовах виробництва дистанційного керування апаратурою, що є джерелом випромінювання, екранування джерел випромінювання, застосування засобів індивідуального захисту (халатів, комбінезонів із металізованої тканини, з виводом на заземлюючий пристрій). Для захисту очей доцільно використовувати захисні окуляри ЗП5-90. Скло окулярів вкрито напівпровідниковим оловом, що послаблює інтенсивність електромагнітної енергії при світлопропусканні не нижче 75%.

Взагалі, засоби індивідуального захисту необхідно використовувати лише тоді, коли інші захисні засоби неможливі чи недостатньо ефективні: при проходженні через зони опромінення підвищеної інтенсивності, при

ремонтних і налагоджувальних роботах в аварійних ситуаціях, під час короткочасного контролю та при зміні інтенсивності опромінення. Такі засоби незручні в експлуатації, обмежують можливість виконання трудових операцій, погіршують гігієнічні умови.

У радіочастотному діапазоні засоби індивідуального захисту працюють за принципом екранування людини з використанням відбиття і поглинання ЕМП. Для захисту тіла використовується одяг з металізованих тканин і рідіопоглинаючих матеріалів. Металізовану тканину роблять із бавовняних ниток з розміщеним всередині них тонким проводом, або з бавовняних чи капронових ниток, спірально обвитих металевим дротом. Така тканина, наче металева сітка, при відстані між нитками до 0,5 мм значно послаблює дію випромінювання. При зшиванні деталей захисного одягу треба забезпечити контакт ізольованих проводів. Тому електрогерметизацію швів здійснюють електропровідними масами чи клеями, які забезпечують гальванічний контакт або збільшують ємнісний зв'язок не контактуючих проводів.

Лікарсько-профілактичні заходи передбачають проведення систематичних медичних оглядів працівників, які перебувають у зоні дії ЕМП, обмеження в часі перебування людей в зоні підвищеної інтенсивності електромагнітних випромінювань, видачу працюючим безкоштовного лікарсько-профілактичного харчування, перерви санітарно-оздоровчого характеру.

4.5 Розрахунок штучного освітлення

В цеху розміром $20 \times 60 \times 4,5$ м потрібно реалізувати освітленість $E_n = 300$ лк. Коефіцієнт відбивання стелі $\rho_{\text{стелі}} = 30\%$, коефіцієнт відбивання стін $\rho_{\text{стін}} = 10\%$. Для освітлення використовують люмінесцентні лампи типу ЛХБ 40-4 в світильниках ЛДОР[29].

Знаходимо індекс приміщення:

$$I = \frac{A \cdot B}{H_p (A + B)} = \frac{20 \cdot 60}{4,5(20 + 60)} = 3,33$$

Приймаємо коефіцієнт запасу $k=1,6$ і коефіцієнт нерівномірності освітлення:

$$Z = \frac{E_{\text{сеп}}}{E_{\text{мін}}} = 1,1$$

При індексі $I=3,33$ з таблиці отримуємо $\eta=67\%$

Кількість світильників із умови забезпечення рівномірності освітлення розраховують за формулою:

$$N = \frac{A \cdot B}{L^2}$$

де L - рекомендована відстань між світильниками $L=0,6H_p$.

Загальна кількість світильників повинна бути не менше:

$$N = \frac{A \cdot B}{L^2} = \frac{20 \cdot 60}{(0,6 \cdot 4,5)^2} \approx 164(\text{шт})$$

Світильники розміщуємо в 4 ряди: $N_p = 4$.

Визначаємо необхідний світловий потік ламп в кожному ряду:

$$\Phi = \frac{E_H \cdot SZk}{N_p \cdot \eta} = \frac{300 \cdot 1200 \cdot 1,1 \cdot 1,6}{4 \cdot 0,67} = 236417 \text{ лм}$$

де S - площа приміщення.

Якщо в світильнику встановити по дві лампи ЛХБ ($n = 2$) потужністю 40 Вт і світловим потоком $\Phi_{\text{л}}=2470$ лм, то необхідна кількість світильників у ряду буде:

$$N = \frac{\Phi}{n \Phi_{\text{л}}} = \frac{236417}{2 \cdot 2470} \approx 47,8(\text{шт})$$

Вибираємо 48 світильників.

4.6 Розрахунок захисного заземлення

Мета розрахунку захисного заземлення - визначення кількості електродів заземлювача і заземлювальних провідників, їхніх розмірів і схеми розміщення в землі, при замиканні фази на заземлені частини електроустановок не перевищують допустимих значень струму [29,30].

Вихідні дані:

1. Назва об'єкта - обладнання операторської,
2. Захищений об'єкт - стаціонарний.
3. Напруга мережі 220 В.
4. Виконання мережі - з глухо заземленою нейтраллю.
5. Тип заземлювального пристрою - вертикальний.
6. Розмір заземлювачів (довжина стержнів $l_B = 3\text{ м}$, діаметр $d = 0,04\text{ м}$, товщина стінки труби $\delta_T = 3,5\text{ мм}$).
7. Відношення відстані між трубами до їхньої довжини $\frac{L_B}{l_B} = 1$.
8. Розміри горизонтального заземлювача (з'єднувальної стрічки): $L_{\Gamma} = L_{\text{ЗС}}$ -згідно з розрахунком, м; ширина стрічки $b_{\text{С}} = 0,04\text{ м}$.
9. Глибина закладання вертикальних заземлювачів $h_B = 0,8\text{ м}$; горизонтальних $h_{\Gamma} = 0,8\text{ м}$.
10. Розташування заземлювачів попередньо приймають за чотирикутним контуром.
11. Ґрунт - супісок.
12. Кліматична зона II.

Визначимо R_d допустимий опір розтікання струму в заземлюваному пристрої (в нашому випадку він становить $R_d = 8\text{ Ом}$).

Визначимо $\rho_{\text{ТАБЛ}}$ приблизне табличне значення питомого опору ґрунту, воно становить $\rho_{\text{ТАБЛ}} = 300\text{ Ом} \cdot \text{м}$,

Визначимо коефіцієнти сезонності $K_{\text{СВ}}$, $K_{\text{СТ}}$ для вертикального та горизонтального заземлювача (в нашому випадку вони становлять $K_{\text{СВ}}=1,5$, $K_{\text{СТ}} = 3,5$).

Визначимо розрахунковий питомий опір ґрунту для вертикальних заземлювачів $\rho_{\text{РОЗР.В}}$:

$$\rho_{\text{РОЗР.В}} = \rho_{\text{ТАБЛ}} \cdot K_{\text{СВ}} = 300 \cdot 1,5 = 450\text{ Ом} \cdot \text{м}$$

Визначимо розрахунковий питомий опір ґрунту для горизонтальних заземлювачів $\rho_{\text{РОЗР.Г}}$:

$$\rho_{\text{РОЗР.Г}} = \rho_{\text{ТАБЛ}} \cdot K_{\text{СТ}} = 300 \cdot 3,5 = 1050 \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

Визначаємо відстань від поверхні землі до середини вертикального заземлювача t :

$$t = h_B + \frac{l_B}{2} = 0,8 + \frac{3}{2} = 2,3 \text{ м}$$

Визначимо опір розтікання струму в одному вертикальному заземлювачі R_B :

$$R_B = 0,366 \frac{\rho_{\text{РОЗР.В}}}{L_B} \left(\lg \frac{2L_B}{d} + \frac{1}{2} \lg \frac{4t + L_B}{4t - L_B} \right) = 0,366 \cdot \frac{450}{3} \left(\lg \frac{2 \cdot 3}{0,04} + \frac{1}{2} \lg \frac{4 \cdot 2,3 + 3}{4 \cdot 2,3 - 3} \right) = 135 \text{ Ом}$$

Визначаємо теоретичну кількість вертикальних заземлювачів $n_{\text{Т.В}}$ без врахування коефіцієнта використання $\eta_{\text{В.В}} = 1$:

$$n_{\text{Т.В}} = \frac{R_B}{R_{\text{Д}} \cdot \eta_{\text{В.В}}} = \frac{138}{8 \cdot 1} \approx 17$$

Визначаємо $\eta_{\text{ВВ}}$ - коефіцієнт використання вертикальних заземлювачів при розташуванні їх згідно з вихідними даними або за чотирикутним контуром при числі заземлювачів $n_{\text{Т.В}} = 17$ та при відношенні $\frac{L_B}{l_B} = 1$ (приймаємо $\eta_{\text{В.В}} = 0,42$).

Визначаємо $n_{\text{Н.В}}$ - необхідна кількість, шт., вертикальних однакових заземлювачів з врахуванням коефіцієнта використання:

$$n_{\text{Н.В}} = \frac{R_B}{R_{\text{Д}} \cdot \eta_{\text{Н.В}}} = \frac{138}{8 \cdot 0,4} = 42$$

Визначаємо $R_{\text{РОЗР.В}}$ - розрахунковий опір, Ом, розтікання струму у вертикальних заземлювачах при $n_{\text{Н.В}} = 42$ без врахування з'єднувальної стрічки:

$$R_{\text{РОЗР.В}} = \frac{R_B}{n_{\text{Н.В}} \cdot \eta_{\text{В.В}}} = \frac{135}{42 \cdot 0,42} = 1,35 \text{ Ом}$$

Визначаємо $L_{\text{В}}$ - відстань між вертикальними заземлювачами за відношенням $\frac{L_B}{l_B} = 1$. Звідси $L_{\text{В}} = 1 \cdot l_{\text{В}} = 3 \text{ м}$.

Визначаємо $L_{зс}$ - довжину з'єднувальної стрічки - горизонтального заземлювача:

$$L_{зс} = 1,05 \cdot L_B (n_{H.B} - 1) = 1,05 \cdot 3(42 - 1) \approx 129 \text{ м}$$

Визначаємо $R_{Г.з.с}$ опір, розтікання струму у горизонтальному заземлювачі (з'єднувальній стрічці):

$$R_{Г.з.с} = 0,366 \frac{\rho_{\text{роз.Г}}}{L_{з.с}} \lg \frac{2L_{з.с}^2}{h_3 b_c} = 0,366 \frac{1050}{129} \lg \frac{2 \cdot 129^2}{0,8 \cdot 0,04} = 18 \text{ Ом}$$

Визначаємо $n_{B.B}$ - коефіцієнт використання горизонтального заземлювача при розташуванні вертикальних заземлювачів згідно з вихідними даними або за чотирикутним контуром при відношенні $\frac{L_B}{l_B} = 1$ та необхідній кількості

вертикальних заземлювачів $n_{H.B} = 42$. Приймаємо $\eta_{B.Г} = 0,22$.

Визначаємо $R_{\text{розр.Г}}$ розрахунковий опір, розтіканню струму в горизонтальному заземлювачі (з'єднувальній стрічці) при числі електродів $\eta_{Г} = 1$:

$$R_{\text{розр.Г}} = \frac{R_{Г.з.с}}{\eta \cdot \eta_{B.Г}} = \frac{18}{1 \cdot 0,22} = 80 \text{ Ом}$$

Визначаємо $R_{\text{розр.В.Г}}$ - розрахунковий теоретичний опір, розтіканню струму у вертикальних та горизонтальних заземлювачах:

$$R_{\text{розр.В.Г}} \frac{1}{\frac{1}{R_{\text{розр.В}}} + \frac{1}{R_{\text{розр.Г}}}} = \frac{1}{\frac{1}{1,13} + \frac{1}{80}} \approx 1,2 \text{ Ом}$$

Було розглянуто питання характеристики життєво-небезпечних факторів та правила безпеки при користуванні розроблюваним вихрострумовим дефектоскопом, а також був розглянутий вплив електромагнітного поля на людину. Було розраховане штучне освітлення і заземлення.

ВИСНОВКИ

На основі аналізу стану проблеми дослідження та розробки сучасних методів та засобів електромагнітної дефектоскопії було обрано напрямок та сформовано завдання вдосконалення теорії вихрострумового неруйнівного контролю.

1. Проведено аналіз сучасних методів та засобів електромагнітної дефектоскопії, представлених на вітчизняному та міжнародному ринку.

2. Представлено імітаційну модель для опису процесу електромагнітної взаємодії полів вихрових струмів з контрольованим об'єктом при внутрішньотрубному контролі.

3. Отримано теоретичні співвідношення геометричних параметрів перетворювача та об'єкта контролю при внутрішньотрубному контролі.

4. Досліджено вплив на вихідний сигнал перетворювача різних варіацій геометричних характеристик, таких як глибина, розмір (діаметр, ширина та довжина) для дефектів різних типів.

Список використаних джерел

1. Середюк О.Є., Барна О.Б., Криницький О.С. Електричний, магнітний та електромагнітний види неруйнівного контролю в нафтогазовій галузі: навчальний посібник. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2017. – 348 с.
2. Середюк О.Є. Електричний, магнітний та електромагнітний види контролю: конспект лекцій. МВ 02070855-801-01. - Івано-Франківськ: Факел, 2001.-170с.
3. Фізичні основи неруйнівного контролю: навчальний посібник / Р.Т. Боднар, В.Т. Камінський, І.С. Кісіль, З.П. Лютак, О.Є. Середюк – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2013. – 384 с.
4. Поліщук Є.С. Методи та засоби вимірювань неелектричних величин. – Львів: Вид. Державного університету "Львівська політехніка", 2000.-360с.
5. ANSYS 18.0. [Електронний ресурс] – Інтернет ресурс програмного продукту ANSYS – Режим доступу: <http://www.ansys.com>.
6. Olympus NDT Inc. [Електронний ресурс] – Інтернет ресурс компанії Olympus NDT Inc. – Режим доступу: <https://www.olympus-ims.com>.
7. General Electric. [Електронний ресурс] – Інтернет-ресурс компанії GE. – Режим доступу: <https://www.gemeasurement.com/inspection-ndt>.
8. TesTex, Inc. [Електронний ресурс] – Інтернет-ресурс компанії TesTex, Inc. – Режим доступу: <http://testex-ndt.com>.
9. Zetec. [Електронний ресурс] – Інтернет ресурс компанії Zetec. – Режим доступу: <http://www.zetec.com>.
10. Russell NDE Systems Inc. [Електронний ресурс] – Інтернет-ресурс компанії Russell NDE Systems Inc. - Режим доступу: <https://www.russelltech.com>.
11. Eddyfi. [Електронний ресурс] – Інтернет-ресурс компанії Eddyfi. – Режим доступу: <https://www.eddyfi.com>.
12. Delta Test. [Електронний ресурс] – Інтернет-ресурс компанії Delta Test. – Режим доступу: <http://deltatest.de>.

13. DIN EN ISO 8044 – 2015. Corrosion of metals and alloys - Basic terms and definitions (ISO 8044:2015); Trilingual version EN ISO 8044:2015. – 37 с.
14. Day, P., *The Philosopher's Tree: A Selection of Michael Faraday's Writings / Compiled with commentary by Peter Day* - Institute of Physics Publishing Bristol and Philadelphia, 1999. - 207 с.
15. Foerster, F. *Computer-controlled Magnetic Leakage Field research Instillation / F. Foerster // Examples and Possibilities. X World Conference on Non-Destructive Testing.* – С. 172-186.
16. Dodd, C.V. *Optimizing Defect Detection in Eddy Current Testing / C. V. Dodd, W. E. Deeds, W. J. Spoeri // Materials Evaluation.* – 1971. – №3. – С. 59-83.
17. Brebbia, S.A. *The boundary element method for engineers / S. A. Brebbia // Pentech Press; Halstend Press.* – 1978 – 32 с.
18. Brebbia, S.A., Walker, S. *Boundary element technics in engineering / S. A. Brebbia, S. Walker // Newnes-Butterworths.* – 1980 – 29 с.
19. Collins, George W. *Fundamental Numerical Methods and Data Analysis / George W. Collins – NASA ADC, 2003.* – 159 с.
20. Procházka, M. *In-service inspection of heat-exchanger tubes by means of electromagnetic methods/ Miloslav Procházka // NDE for Safety / DEFEKTOSKOPIE .* – 2011. – С. 127–142.
21. Ghoni, R. *Defect Characterization Based on Eddy Current Technique: Technical Review / Ruzlaini Ghoni, Mahmood Dollah, Aizat Sulaiman, Fadhil Mamat Ibrahim // Advances in Mechanical Engineering.* – 2014. – Volume 14.
22. Pham, D. T., Bayro-Corrochano E. I. *Neural classifiers for automated inspection / D. T. Pham // Inst. iVlech. Eng.* – 1994. – v. 208, N 2. – С. 83 – 89.
23. Карпаш О.М. *Технічна діагностика бурового та нафтогазового обладнання: навч. посібник.* – Івано-Франківськ.: ІФНТУНГ, 2007. – 272 с.
24. Кісіль І.С. *Метрологія, точність і надійність засобів вимірювань: навч. посібник.* Івано-Франківськ.: Факел, 2002. – 400с.
25. *Безпека життєдіяльності: підручник.* / [О. І. Запорожець, Б. Д. Халмурадов, В. І. Применю та ін.] - К.: «Центр учбової літератури», 2013.- 448 с.

26. ДБН В.2.5-28:2018 Природне та штучне освітлення.

27. ДСТУ-Н Б А.3.2-1:2007 Система стандартів безпеки праці. Настанова щодо визначення небезпечних і шкідливих факторів та захисту від їх впливу при виробництві будівельних матеріалів і виробів та їх використанні в процесі зведення та експлуатації об'єктів будівництва

28. Грибан В. Г., Негодченко О. В. Охорона праці. Навч. посіб. 2-ге вид., - К.: Центр учбової літератури, 2011. - 280 с.

29. Жидецький В. Ц., Джигирей В. С., Сторожук В. М., Туряб Л. В., Лико Х. І. Практикум із охорони праці: Навчальний посібник. Львів: Афіша, 2000. 345с.

30. Шеремет В. О., Каракаш О. І. Довідковий посібник керівника та спеціаліста гірничо-металургійного підприємства з охорони праці: Навчальний посібник. Дніпро: ПП «Ліра ЛТД», 2005. 850с.