

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Приладобудівний факультет
Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю**

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
_____ Юрій КИРИЧУК

« ____ » _____ 2024 р.

Дипломний проєкт

на здобуття ступеня бакалавра

**за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи
та технології в приладобудуванні»
спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
на тему: «Вихрострумний дефектоскоп з GMR перетворювачами»**

Виконала:

студент IV курсу, групи ПК-01
Чернишов Олександр Леонідович

Керівник:

д.т.н., професор
Куц Юрій Васильович

Рецензент:

к.т.н., доцент
Самарцев Юрій Миколайович

Засвідчую, що у цьому дипломному проєкті
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2024 року

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4	ПК01.22.1760.00.000.ПЗ	Пояснювальна записка	50	
2	A1	ПК01.22.1760.01.000	Фізичні основи GMR перетворювачів	1	
3	A1	ПК01.22.1760.02.000.СхС	Схема структурна дефектоскопу	1	
4	A1	ПК01.22.1760.03.000.СхА	Алгоритм роботи дефектоскопу	1	
5	A1	ПК01.22.1760.04.000.СхЕ	Електрична схема перетворювача напруга-струм	1	
6	A1	ПК01.22.1760.05.000.СхЕ	Схема підключення GMR перетворювача	1	

				ДП ПК01.22.1760.00.000		
	ПІБ	Підп.	Дата	Відомість дипломного проекту	Лист	Листів
Розробник	Чернишов О. Л.				1	1
Керівник	Куц Ю. В.				КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. АСНК Гр. ПК-01	
Консульт.						
Н/контр.						
Зав. каф.	Киричук Ю.В.					

**Пояснювальна записка
до дипломного проєкту
на тему: «Вихрострумний дефектоскоп з GMR
перетворювачами»**

Київ – 2024 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Приладобудівний факультет

Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Освітньо-професійна програма «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Юрій КИРИЧУК

«__» _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту

Чернишову Олександрю Леонідовичу

1. Тема проєкту «Вихрострумний дефектоскоп з GMR перетворювачами», керівник проєкту Куц Юрій Васильович, доктор технічних наук, професор, затверджені наказом по університету від «28» травня 2024 р. №2121-с
2. Термін подання студентом проєкту 10 червня 2024 року
3. Вихідні дані до проєкту: матеріал ОК – алюміній, тип сенсора – GMR перетворювач, поле збудження – ротаційне, форма ОК – плоска, тип дефекту – поверхневі та підповерхневі тріщини.
4. Зміст пояснювальної записки
 - Вступ
 - Застосування перетворювачів GMR у вихрострумній дефектоскопії
 - Розроблення структурної схеми вихрострумного дефектоскопу
 - Розрахунок параметрів вихрострумного перетворювача
 - Розроблення принципів електричних схем
 - Висновки
 - Список використаних джерел

5. Перелік ілюстративного матеріалу (5 листа А1):

1 – Фізичні основи GMR перетворювачів

2 – Структурна схема дефектоскопу

3 – Алгоритм роботи дефектоскопу

4 – Електрична схема перетворювача напруга-струм

5 - Схема підключення GMR перетворювача

7. Дата видачі завдання 15 березня 2024 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Формулювання завдання проекту	27.03.2024	
2	Проведення аналітичного огляду	16.04.2024	
3	Розрахунок параметрів датчика	20.04.2024	
4	Розроблення електричних схем дефектоскопу	14.05.2024	
5	Оформлення пояснювальної записки	29.05.2024	
6	Розробка графічної частини проекту	05.06.2024	

Студент

Олександр ЧЕРНИШОВ

Керівник

Юрій КУЦ

Анотація

В дипломному проєкті було проведено розробку вихрострумowego дефектоскопу з використанням в якості сенсора GMR перетворювач.

Відмінні особливості проєкту полягають у наступному. По-перше, збудження вихрових струмів у об'єкті контролю (ОК) здійснюється прямокутними котушками збудження, активна частина яких розташована тангенціально до поверхні ОК. Це дає змогу забезпечити в ОК однорідний розподіл щільності вихрових струмів на значній ділянці поверхні ОК. По-друге, система збудження вихрових струмів утворена двома ортогональними у просторі котушками, які живляться двома синусоїдними струмами з фазовим зсувом між ними величиною 90° . Це дає змогу забезпечити інваріантність параметрів вихрових струмів від дефектів ОК до просторової орієнтації дефекта. По-третє, використання в якості сенсора GMR перетворювачів дає змогу підвищити чутливість датчика до дефектів малих розмірів за рахунок їх високої чутливості до магнітної індукції поля вихрових струмів.

Проєкт складається з чотирьох розділів, а також містить огляд статті з використанням GMR перетворювача у ВСП вихрострумowego дефектоскопу.

В першому розділі розглядаються фізичні основи вихрострумової дефектоскопії. Були наведені особливості використання вихрострумowego дефектоскопу та фізичну суть GMR перетворювачів.

В другому розділі розробляється структурна схема вихрострумowego дефектоскопу. Розробляється конструкція ВСП та пояснюється взаємодія компонентів дефектоскопу.

В третьому розділі проводиться розрахунок параметрів ВСП та даються пояснення впливу підмагнічення GMR перетворювача на вихідний сигнал.

В четвертому розділі розробляються електричні принципіальні схеми перетворювача напруга-струм для живлення котушок збудження та вимірювального підсилювача сигналів GMR перетворювача.

Ключові слова: вихрострумовой перетворювач, вихрострумовой дефектоскоп, дефектоскопія, неруйнівний контроль.

Annotation

In the diploma project, the development of an eddy current flow detector based on a GMR converter was carried out.

The distinctive features of the project are as follows. Firstly, the excitation of eddy currents in the control object (CO) is carried out by rectangular excitation coils, the active part of which is located tangentially to the CO surface. This makes it possible to ensure a homogeneous distribution of eddy current density over a large area of the CO surface. Secondly, the eddy current excitation system is formed by two orthogonal coils in space, which are fed by two sinusoidal currents with a phase shift of 90° between them. This makes it possible to ensure the invariance of the eddy current parameters from the CO defects to the spatial orientation of the defect. Thirdly, the use of GMR transducers as a sensor makes it possible to increase the sensitivity of the sensor to small defects due to their high sensitivity to the magnetic induction of the eddy current field.

The project consists of four sections, and also contains an overview of the article using a GMR converter in the eddy current probe of an eddy current flow detector.

The first section discusses the physical foundations of eddy current flow detection. The features of the use of eddy current flow detector and the physical essence of GMR converters were given.

In the second section, a structural diagram of an eddy current flow detector is developed. The design of the probe is being developed and the interaction of the components of the flow detector is explained.

In the third section, the eddy current probe parameters are calculated and the effect of magnetization of the GMR converter on the output signal is explained.

In the fourth section, the electrical schematic diagrams of the voltage-to-current converter for powering the excitation coils and the measuring amplifier of the GMR signals of the converter are developed.

Key words: eddy current converter, eddy current flow detector, flow detection, non-destructive testing.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	10
РОЗДІЛ 1. ЗАСТОСУВАННЯ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ GMR У ВИХРОСТРУМОВОМУ НЕРУЙНІВНОМУ КОНТРОЛІ.....	11
1.1. Фізичні основи вихрострумowego неруйнівного контролю.....	11
1.2. Особливості вихрострумowego неруйнівного контролю.....	13
1.3. Принцип роботи перетворювачів GMR.....	16
1.4. Огляд попередніх публікацій з використанням GMR перетворювача у вихрострумовой дефектоскопії.....	18
1.5. Постановка завдання дипломного проєкту.....	23
Висновки до розділу.....	23
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБЛЕННЯ СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ ВИХРОСТРУМОВОГО ДЕФЕКТОСКОПУ.....	25
2.1. Використання обертового вихрострумowego обертового поля.....	25
2.2. Конструкція вихрострумowego перетворювача.....	26
2.3 Структурна схема вихрострумowego дефектоскопу.....	27
Висновки до розділу.....	29
РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНОК ПАРМЕТРІВ ВИХРОСТРУМОВОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА.....	31
3.1. Визначення необхідних параметрів.....	31
3.2. Розрахунок котушки збудження.....	32
3.3. Вплив підмагнічення на підсилюючу характеристику GMR перетворювача.....	35
Висновки до розділу.....	36
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБЛЕННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ СХЕМ В ПРОГРАМНОМУ СЕРЕДОВИЩІ MULTISIM.....	38
4.1. Відомості про програмне середовище MULTISIM.....	38

					ПК01.22.1760.00.000ПЗ			
Змн.	Ар	№ до	Підпис	Дата				
Розробив	Чернишов О.Л.				Вихрострумовой дефектоскоп з GMR перетворювачами	Літ.	Арк.	Акрушіє
Перевір.реві	Куц Ю.					8	48	
Реценз.						ПБФ, ПК-01		
Н. Контр.								
Затверд.	Куц Ю. В.							

4.2. Розроблення електричної схеми перетворювача напруга-струм.....	40
4.3. Вибір GMR перетворювача.....	43
4.4. Підключення GMR до інструментального підсилювача.....	44
Висновок до розділу.....	46
ВИСНОВКИ.....	47
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	49

					ПК01.22.1760.00.000ПЗ	Арк.
						9
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

ВСТУП

Сучасні технології неруйнівного контролю (НК) відіграють ключову роль у забезпеченні безпеки та надійності різноманітних конструкцій і матеріалів. Одним із найефективніших методів НК є вихрострумний дефектоскоп, який дозволяє виявляти внутрішні та поверхневі дефекти у провідних матеріалах. Традиційно, для прийому сигналів у вихрострумних перетворювачах використовуються індукційні котушки або інші електромагнітні приймачі. Однак, останніми роками все більше збільшується інтерес до використання GMR перетворювачів як альтернативного варіанту приймаючої частини вихрострумного дефектоскопа.

GMR перетворювачі, завдяки своїй високій чутливості до змін магнітного поля та компактним розмірам, пропонують значні переваги у порівнянні з традиційними приймачами. Їх застосування може покращити точність вимірювань, зменшити розміри та вагу дефектоскопів, а також знизити енергоспоживання.

Мета даного дипломного проекту полягає у дослідженні можливостей використання магніторезисторів як приймаючої частини вихрострумного перетворювача. У рамках цієї роботи будуть проведені теоретичні та експериментальні дослідження для визначення чутливості, точності та ефективності магніторезисторів у порівнянні з традиційними приймачами. Результати цього дослідження можуть стати основою для подальшого розвитку вихрострумних дефектоскопів нового покоління.

					ПК01.22.1760.00.000ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1. ЗАСТОСУВАННЯ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ GMR У ВИХРОСТРУМОВОМУ НЕРУЙНІВНОМУ КОНТРОЛІ

1.1. Фізичні основи вихрострумowego неруйнівного контролю

В усіх сферах діяльності людини використовуються металокопструкції того чи іншого виду. Дані структури є основою для суднобудування, автомобілебудування, аеро-космічної справи, залізничного транспорту, будівництва і багатьох інших галузей, тому контроль їх якості відіграє життєвоважливу роль. Одним із таких методів є вихрострумовой неруйнівний контроль.

Вихрострумовой контролю [1] ґрунтується на реєстрації електромагнітного поля вихрових струмів, що збуджуються в електропровідних матеріалах та виробах з них. Явища, що виникають під час вихрострумовой НК об'єкту контролю (ОК) подібний до явищ, що виникають в індуктивно зв'язаних електричних котушках.

Два елементи називають індуктивно зв'язаними, якщо зміна струму в одному з них призводить до появи електрорушійних сил в іншому елементі і називаються е.р.с. електромагнітної індукції. Вони виникають за наявності двох електричних котушок, що знаходяться досить близько одна від одної. Електрична близькість цих котушок характеризується коефіцієнтом зв'язку k , де k – взаємна індуктивність ланцюга, L_1 – індуктивності котушок. Коефіцієнт зв'язку завжди менший одиниці, оскільки через наявність розсіювання магнітного потоку витки однієї котушки зчіплюються не зі всім магнітним потоком другої котушки. Змінюючи взаємне положення між котушками можна змінювати величину індуктивного зв'язку.

У вихрострумовой НК вторинною котушкою індуктивності виступає ОК, а первинна котушка виконує роль вихрострумowego перетворювача (ВСП). Первинна котушка утворює змінний магнітний потік, що пронизує ОК та збуджує в ньому вихрові струми або ще відомі як струми Фуко. Щільність

					ПК01.22.1760.00.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

вихрових струмів залежить від електромагнітних параметрів матеріалу ОК, його геометричних розмірів, наявності дефектів таких як: тріщини, порожнини, дефекти лиття/зварбвання тощо. Сутність вихрострумowego НК полягає у визначенні зворотної дії цих струмів через створений ними магнітний потік на ВСП.

Для застосування вихрострумowego неруйнівного контролю використовують котушку індуктивності, що живиться гармонічним електричним струмом за законом синуса або косинуса (рис 1.1.). Завдяки змінним гармонічним коливанням струму виникає електромагнітне поле навколо котушки. При піднесенні даного пристрою до електропровідного ОК, в останньому під впливом електромагнітного поля збурюються вихрові струми. Інформацію про властивості виробу датчик отримує через магнітний потік, створений вихровими струмами. Вектори напруженості збуджуючого поля і поля вихрових струмів спрямовані назустріч один одному, тобто електрорушійна сила в обмотці датчика пропорційна різниці магнітних потоків котушки ВСП та вихрових струмів.

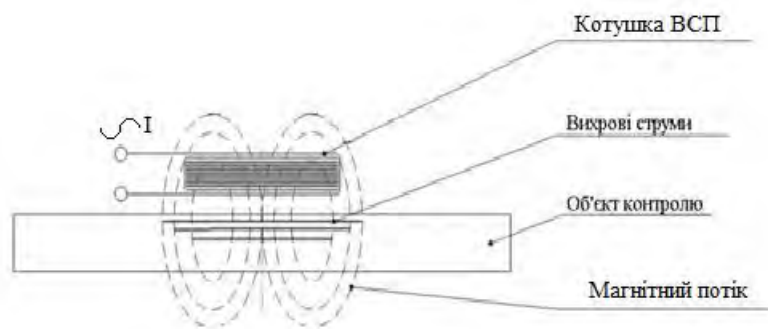


Рис. 1.1.

Реєструючи напругу на котушці або зміну її опору, можна отримати відомості про контрольований виріб. Напруга і опір котушки залежать від багатьох параметрів, що обумовлює широкі можливості вихрострумowego НК (дефектоскопія, товщинометрія, структурометрія, сортування металу по маркам, контроль стану поверхні і т.д.). З іншого боку, ця обставина ускладнює поділ інформації про різні параметри об'єкта і вимагає використання

					ПК01.22.1760.00.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

спеціальних способів фільтрації шумів. Для аналізу зміни електромагнітного поля зазвичай використовують активний і індуктивний опір котушки, амплітуду напруги, зсув фаз вимірюваної і опорної напруг.

Глибина проникнення вихрових струмів залежить від частоти електромагнітних коливань, електричних і магнітних характеристик матеріалу об'єкта контролю (ОК), форми котушки і поверхні виробу. Зокрема, зі збільшенням частоти зменшується глибина проникнення вихрових струмів, що обмежує їх використання для контролю товстих виробів. Крім того, електропровідність і магнітна проникність матеріалу ОК впливають на проникнення вихрових струмів: з підвищенням електропровідності або магнітної проникності глибина проникнення зменшується. Форма котушки та структура поверхні виробу також можуть впливати на розподіл вихрових струмів, що слід враховувати при проектуванні обладнання для контролю та проведенні вимірювань.

1.2. Особливості вихрострумового неруйнівного контролю

У вихрострумового НК, так як і у інших методах НК, є свої особливості та переваги, наприклад, електрорушійні сили або комплексний опір ВСП залежать від численних параметрів [2, 3]. Це має свої переваги, але також приносить складнощі у проведенні аналізу. З одного боку, вихрострумівий НК дозволяє одночасно перевіряти кілька параметрів ОК. З іншого боку, для точного та ефективного аналізу необхідно використовувати спеціальні методи для виділення та оброблення інформації про кожен окремий параметр. При контролі одного з параметрів може виникнути проблема впливу інших на ВСП, що вимагає використання фільтрів для відсіювання непотрібного сигналу.

Вихрострумівий НК ґрунтується на результатах непрямих вимірювань, що дає можливість оцінити стан об'єкта контролю без його пошкодження чи руйнування. Формування висновків здійснюється на основі попередньо встановлених взаємозв'язків між параметрами сигналів ВСП та

					ПК01.22.1760.00.000ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

характеристиками об'єкта контролю та його матеріалу. Однак некоректна обробка результатів може виникнути у разі недостатнього або недостовірного проведення попередніх досліджень, що призводить до неточних висновків щодо стану ОК.

Також важливою особливістю вихрострумowego НК є те, що він може бути здійснений без прямого контакту з ОК. Взаємодія між ОК та ВСП відбувається на відстані, яка дозволяє вільний рух перетворювача відносно ОК на відстанях, що забезпечує ефективність обстеження та достатню точність результатів контролю. Це означає, що вихрострумівий неруйнівний контроль може бути здійснений при високих швидкостях руху ВСП відносно ОК. Така можливість визначає високу продуктивність методу та дозволяє використовувати його для автоматизованих систем контролю.

Сигнали, що генеруються ВСП, практично не піддаються впливу вологості, тиску, забрудненості газовим середовищем, радіоактивному випромінюванню, а також забрудненості поверхні об'єкта контролю непровідними та немагнітними речовинами, наявності немагнітних покриттів і так далі. Це означає, що ефективність контролю залишається стабільною в різних умовах, що робить вихрострумівий неруйнівний контроль надзвичайно надійним та універсальним методом.

Відносна простота конструкції ВСП робить його стійким до механічних і атмосферних впливів. Такі перетворювачі можуть ефективно працювати в агресивних середовищах та у широкому діапазоні температур і тиску. В більшості випадків котушки ВСП розміщують у захисному корпусі, який заповнюється епоксидною смолою. Це забезпечує надійний захист від впливу навколишнього середовища та забезпечує тривалий термін служби перетворювача.

Оскільки вихрострумівий НК ґрунтується на збудженні та реєстрації електромагнітного поля вихрових струмів, він застосовується виключно для контролю якості ОК з електропровідних матеріалів: металів, їх сплавів, графіту, напівпровідникових структур тощо.

					ПК01.22.1760.00.000ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Найбільш важливим завданням вихрострумовеого контролю є виявлення та оцінювання поверхневих і приповерхневих дефектів, як на відкритих поверхнях ОК, так і під шаром захисного діелектричного покриття. Певним недоліком вихрострумовеого НК, який обмежує область його застосування є мала глибина зони контролю, що визначається глибиною проникнення електромагнітного поля в електропровідне середовище (до 4 міліметрів). Глибина контролю залежить від електрофізичних характеристик досліджуваного матеріалу, частоти струму збудження ВСП, відстані між перетворювачем та поверхнею ОК і повинна бути розрахована для кожного конкретного випадку.

Незважаючи на вказане обмеження, вихрострумовеий НК широко застосовується для дефектоскопії з високою точністю, що дозволяє контролювати шорсткість поверхні, визначати розміри ОК та структурні характеристики матеріалів і виробів. Завдяки своїй чутливості, вихрострумовеий метод ефективно виявляє тріщини, пори, корозію та інші дефекти, що можуть бути приховані під поверхнею. Крім того, цей метод дозволяє проводити контроль в реальному часі, не потребуючи складної підготовки поверхні або спеціальних умов експлуатації.

Вихрострумовеий НК дає змогу розв'язувати задачі контролю розмірів виробів. Цим методом вимірюють діаметри дротів, прутків, труб, товщину металевих листів, стінок труб при односторонньому доступу до ОК, товщину електропровідних покриттів на електропровідній основі, товщину немагнітних покриттів і т. п. За допомогою вихрострумовеого НК можна контролювати зазори деталей у виробі.

Структурний стан металів та їх сплавів має великий вплив на їх електричні та магнітні властивості, що дозволяє не лише контролювати варіації хімічного складу матеріалу ОК, а й визначати рівень механічних напруг усередині них. Вихрострумовеий НК широко використовуються для вимірювання питомої електропровідності матеріалів та для сортування та відбраковування металевих матеріалів за їх марками. За допомогою цього

					ПК01.22.1760.00.000ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

методу неруйнівного контролю інспектується якість термічної обробки, стан поверхневих шарів деталей після механічної обробки, виявляють залишкові механічні напруги, тріщини та ін.

1.3. Принцип роботи перетворювачів GMR

GMR (Giant Magnetoresistive) — це квантово-механічний ефект магнітоопору, що спостерігається в тонкоплівкових структурах, що складаються з феромагнітного та немагнітного шарів, що чергуються. Нобелівську премію з фізики 2007 року отримали Альберт Ферт і Петер Грюнберг за відкриття GMR. Загалом, GMR оптимізований на коротких дистанціях і забезпечує найвищу стабільність і стійкість. Це найдавніший МР-матеріал, для якого було проведено більшість досліджень. В даний час GMR використовується в компонентах датчиків зчитування в магнітних носіях інформації, де рівні опору представляють сторону GMR. Він також використовується в зчитувальних головках в магнітному зчитувачі жорстких дисків у багатьох електронних пристроях.

Відповідно до принципу роботи GMR перетворювача (рис. 1.2.), коли між двох тонких феромагнітних шарів знаходиться немагнітна тонка плівка і паралельні їх векторам намагніченості (рис. 1.2. епюр А), електрони провідності в двох магнітних шарах утворюють дифузний струм [4, 6, 15].



Рис. 1.2.

					ПК01.22.1760.00.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

Оскільки більшість електронів втрачають свій спін відносно свого руху, спіни струму не узгоджуються з намагніченістю шарів. Коли магнітне поле прикладено до такого приладу, спінові стани електронів у феромагнітних шарах вирівнюються (рис. 1.2. епюр Б), що і призводить до зменшення електричного опору.

В даний час GMR ще більше посилюється за рахунок використання антиферомагнітних матеріалів, таких як IrMn (іридій-марганець), які посилюють однорідність між намагніченістю двох феромагнітних шарів. Ця структура відома як GMR. Загалом, ефект GMR зазвичай використовується для створення датчиків зчитування для магнітних носіїв.

З моменту своєї появи компанією Israel and Young в 1988 році, GMR став одним з найбільш перспективних матеріалів для сучасних застосувань в області технології магнітного зберігання даних, оперативної пам'яті (ОЗП) і мікроелектроніки. Чудовою особливістю, яка сьогодні привертає увагу до цього матеріалу, є реакція деяких датчиків GMR з надзвичайно низьким питомим опором на поле, що вимірюється. Сигнал зчитування порядку десятків мікрвольт на вольт досяжний за допомогою нових датчиків GMR мікронного розміру. Цей відгук у п'ять разів більший, ніж вихід сучасних датчиків. Навіть у разі вузького проміжку зчитування відгук цього датчика вдвічі більший, ніж вихід від наявних датчиків. Таке збільшення сигналу зчитування не тільки полегшує роботу попереднього підсилювача, але й різко зменшує ширину датчика. Ширина зменшеної ширини допомагає збільшити кількість бітів на доріжці. Також спостерігається значне зменшення ширини доменів замикання. Час пошуку будь-якого конкретного треку різко скорочується.

Завдяки своїм чудовим характеристикам у реєструванні малих змін у магнітному потоці GMR перетворювач має високий потенціал застосування у вихрострумовій дефектоскопії. Чутливість даного перетворювача не єдина його перевага. За допомогою особливостей структури даної конструкції її габарити можна зменшити збільшуючи кількість шарів феромагнітної та непровідної

					ПК01.22.1760.00.000ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

плівок. Це може стати основою для компактних та точних ВСП вихрострумових дефекоскопів. Ще однією перевагою цього пристрою є можливість створення матричних ВСП, а його мале енергоспоживання дозволить зменшити ресурси та витрати на розроблення системи живлення такого комплексу неруйнівного контролю.

1.4. Огляд попередніх публікацій з використанням GMR перетворювача у вихрострумовій дефектоскопії

Чудові характеристики GMR перетворювачів привернули увагу дослідників у сфері неруйнівного контролю. Про інтерес до даної технології свідчить зростаюча кількість наукових праць з даної тематики.

Одним з прикладів таких робіт, що лягли в основу даного дипломного проекту, є стаття "Design and Analysis of a GMR Eddy Current Probe for NDT" [7]. У статті представлено систему вихрострумового контролю для виявлення поверхневих дефектів у провідних матеріалах за допомогою GMR перетворювача. Система включає соленоїд для створення змінного магнітного поля і генерування вихрових струмів у матеріалі. Датчик GMR, встановлений всередині котушки, дозволяє виявляти ці вихрові струми. Для розроблення даної системи дефекти моделювалися тріщинами у заготовках виготовлених з алюмінію 5083.

Для живлення збуджувальної котушки автори використовували джерело струму з регулюванням напруги і генератор форми сигналу на основі технології прямого цифрового синтезу (DDS). У вимірювальній системі використовувався GMR перетворювач AAL002-02 з постійним магнітом для налаштування магнітної точки роботи датчика. Сигнал датчика підсилюється за допомогою операційного підсилювача INA125, а потім демодулюється для вилучення інформації про дефекти.

У якості ОК використовувались алюмінієві пластини з механічно створеними тріщинами різних розмірів. Щоб отримати високоточні дані з

					ПК01.22.1760.00.000ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

датчика GMR використовувався вертикальний оброблювальний центр MVK-1000 з точність позиціонування ВСП до 0,008 мм. Параметрами для оцінки дефектів слугували амплітуда вихідного сигналу GMR та зсув, пов'язаний з наявністю тріщин.

Автори дійшли висновку, що оптимальною частотою збудження вихрових струмів в ОК є 6,5 кГц для максимального сигналу при скануванні пластин. Завдяки аналізу вихідних сигналів з GMR перетворювача дослідники розробили методику аналізу амплітуди отриманого сигналу для визначення глибини дефекту, а зсув між мінімальною точкою сигналу та максимальною був використаний для обрахунку ширини тріщини.

Стаття демонструє успішну розробку та тестування вихрострумової системи на базі датчика GMR для виявлення поверхневих дефектів у провідних матеріалах. Запропонований підхід дозволяє точно визначати параметри дефектів, що може бути корисно для контролю якості в металургійній та інших промисловостях.

Наступною статтею з використанням GMR у вихрострумовому НК є "GMR-Based ECT Instrument for Detection and Characterization of Crack on a Planar Specimen: A Hand-Held Solution" [8]. Стаття пропонує новий інструмент для неруйнівного контролю вихровими струмами провідних матеріалів. Інструмент включає в себе датчик на основі GMR перетворювача і відповідний блок обробки даних.

Для реалізації пристрою автори обрали GMR-сенсори виробництва компанії NVE. Були проведені експериментальні дослідження для вибору оптимального датчика, зокрема аналіз чутливості, гістерезису та лінійності. Обраний сенсор було налаштовано за допомогою постійного магніту для досягнення оптимальних характеристик.

Прилад складається з п'яти основних секцій:

1. GMR перетворювач з постійним магнітом, збуджуючою котушкою та системою обробки сигналу.

					ПК01.22.1760.00.000ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. Система вимірювання позиції датчика, що використовує енкодер з механічної миші для вимірювання координат на площині зразка.

3. Секція попередньої обробки та комунікації на базі мікроконтролера Microchip PIC18LF4620, що відповідає за збір даних та передачу їх на комп'ютер.

4. Система обробки та візуалізації, яка виконує остаточну обробку даних та відображає результати тесту.

5. Система живлення, що забезпечує живленням всі компоненти інструменту.

Інструмент продемонстрував високу ефективність у виявленні, локалізації та характеристиці тріщин на площинних зразках. Автори також зазначили, що цей інструмент є значним кроком вперед у області неруйнівного контролю завдяки своїй здатності виявляти та характеризувати дефекти за низькою собівартістю та високою продуктивністю.

Прикладом ще однієї статті у дослідженні потенціалу GMR-сенсорів у вихрострумівій дефектоскопії є "Routes for GMR-Sensor Design in Non-Destructive Testing" [9].

Дослідження зосереджується на аналізі геометричних параметрів сенсорів та їх розташуванні для оптимізації використання у вихрострумовому НК. Для цього використовували аналітичну модель, що симулює розподіл магнітного потоку від поверхневих дефектів, та досліджували сигнали витoku в залежності від різних параметрів сенсора. Важливим аспектом даного дослідження є оцінка чутливості сенсорів до різних типів дефектів, що дозволяє визначити оптимальні умови для їх виявлення. Результати показують, що правильний вибір геометрії та розташування сенсорів може значно покращити точність і надійність вихрострумового НК, забезпечуючи високий рівень виявлення дефектів у матеріалах.

Виявлено, що довжина та висота GMR перетворювача суттєво впливають на його чутливість. Таким чином автори дійшли висновку, що довжина датчика

					ПК01.22.1760.00.000ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

200 мкм є оптимальною для виявлення дефектів довжиною 500 мкм, тоді як його висота має бути мінімальною для забезпечення високої амплітуди сигналу.

Конфігурації розташування GMR-сенсорів забезпечують зменшення шуму та дозволяють виявляти дефекти будь-якої орієнтації без додаткових обертів сенсора під час тестування. Це досягається за рахунок використання багатовимірних матриць сенсорів, які здатні одночасно фіксувати сигнали у різних напрямках. Такий підхід не тільки підвищує точність і швидкість виявлення дефектів, але й спрощує процес калібрування та налаштування обладнання. Крім того, вдосконалені алгоритми обробки сигналів дозволяють ефективно виділяти корисний сигнал від шумів та артефактів, що забезпечує високу надійність результатів тестування.

Експериментальні дослідження показали гарну відповідність між симуляціями та реальними вимірюваннями, що підтверджує надійність аналітичної моделі для проектування GMR перетворювачів для вихрострумівого НК. Вимірювання з використанням GMR на тестовій пластині з штучними тріщинами в мкм-діапазоні показали відмінності менше 6% між симуляціями та експериментом.

На основі проведених досліджень було розроблено рекомендації щодо оптимального дизайну GMR сенсорних масивів для автоматизованого тестування. Впровадження технології GMR у вихрострумівому НК має потенціал для заповнення прогаліни між індукційними котушками та сканувальними магнітними силовими мікроскопами. Це також сприятиме оптимізації GMR сенсорів для інших застосувань, таких як вимірювання позицій, довжин, кутів або електричних струмів. Завдяки своїй високій чутливості та компактним розмірам, GMR сенсори здатні забезпечити більш точні і надійні результати порівняно з традиційними методами. Слід зазначити, впровадження цих сенсорів може значно знизити вартість і час проведення тестувань, підвищуючи ефективність виробничих процесів.

Була розглянута ще одна стаття "Non Destructive Testing with GMR Magnetic Sensor Arrays" [10], в якій автори розглядають застосування сенсорів

					ПК01.22.1760.00.000ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

на основі GMR перетворювачів у неруйнівному контролі вихровими струмами для перевірки матеріалів, що використовуються в аерокосмічній, ядерній та транспортній галузях. У статті досліджуються ці сенсори за їх високу чутливість, низьке енергоспоживання та економічну ефективність у порівнянні з традиційними індуктивними сенсорами.

Команда дослідників розробила зонд на основі GMR для перевірки труб із нержавіючої сталі 316L, що використовуються в системах видалення залишкового тепла реакторів. Зонд успішно виявив тріщини, викликані термічною втомою 7 мм, демонструючи здатність технології ідентифікувати глибоко заховані дефекти з відношенням сигнал/шум приблизно 30 дБ.

Також дослідники розробили високочутливий зонд масиву GMR для виявлення невеликих поверхневих дефектів. Зонд складається з 11 сенсорів GMR, кожен з яких має чутливу область розміром 80x9 мкм, що покриває зону сканування 1,1 мм з роздільною здатністю 100 мкм. Моделювання з використанням програмного забезпечення CIVA оптимізувало конструкцію зонда, покращивши його здатність виявляти дефекти розміром до 100x100x100 мкм. Експериментальні перевірки показали відмінні можливості зонда для виявлення різних розмірів дефектів з високим відношенням сигнал/шум.

У дослідженні було включено моделювання різних конфігурацій зонда для покращення точності виявлення. Експериментальні результати перевірки макета інконелевої пластини з електроерозійними дефектами підтвердили моделювання, показавши хорошу відповідність і підтвердивши ефективність зонда.

Стаття демонструє потенціал сенсорів GMR у покращенні продуктивності вихрострумового НК. Датчики на основі GMR можуть виявляти глибоко заховані та малі поверхневі дефекти з високою чутливістю та роздільною здатністю, що робить їх цінними інструментами для забезпечення безпеки та цілісності компонентів у критичних галузях. Успішні експериментальні перевірки підкреслюють можливість інтеграції сенсорів GMR у комерційні застосування неруйнівного контролю.

					ПК01.22.1760.00.000ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.5. Постановка завдання дипломного проєкту

Метою проєкту є розроблення вихрострумового дефектоскопу, що використовує GMR перетворювач як приймаючу частину для виявлення та аналізу дефектів у провідних матеріалах.

Основними цілями дослідження являються:

- Проведення огляду існуючих наукових праць з використанням GMR датчика як приймаючої частини ВСП.
- Розробити електричну схему джерела живлення та провести моделювання для перевірки його характеристик.
- Розробити електричну схему приймаючої частини, включаючи необхідні елементи обробки сигналу (підсилювачі, фільтри, аналого-цифрові перетворювачі тощо).

					ПК01.22.1760.00.000ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновок до розділу

У даному розділі розглянуто застосування ВСП на основі GMR перетворювача у вихрострумовому НК. Проаналізовано фізичні основи вихрострумового НК, який базується на реєстрації електромагнітного поля вихрових струмів у електропровідних матеріалах. Досліджено процеси, що відбуваються під час проведення контролю, включаючи індуктивний зв'язок між елементами, електромагнітну індукцію та взаємодію первинної котушки вихрострумового перетворювача з ОК.

Виявлено, що щільність вихрових струмів, збуджених у матеріалі ОК, залежить від його електромагнітних параметрів, геометричних розмірів та наявності дефектів. Ці характеристики дозволяють точно виявляти дефекти, такі як тріщини, порожнини, та інші дефекти лиття або зварювання.

Застосування GMR перетворювачів дозволяє підвищити чутливість та точність вихрострумового НК, що є важливим для забезпечення надійності та безпеки металоконструкцій у різних галузях промисловості. Висновки, отримані в результаті досліджень, підтверджують ефективність та перспективність використання GMR-перетворювачів у вихрострумовому НК, що сприяє подальшому розвитку методів неруйнівного контролю.

					ПК01.22.1760.00.000ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБЛЕННЯ СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ ВИХРОСТРУМОВОГО ДЕФЕКТОСКОПУ

2.1. Використання обертового вихрострумowego поля

Ще однією особливістю створюваного вихрострумowego дефектоскопу є те, що котушка збудження генеруватиме обертове електромагнітне поле [5, 11, 12]. Вихрострумований перетворювач з обертовим полем збудження використовує спеціальну конструкцію для генерування рівномірного обертового вихрострумowego поля під зондом. Це дозволяє значно підвищити точність виявлення дефектів у провідних виробах.

Принцип роботи ВСП з обертовим полем полягає у наступному: дві перпендикулярні котушки збудження живляться змінним електричним струмом, фаза якого зміщена на 90° між котушками. При подачі живлення на такі збуджуючу конструкцію виникає обертове електромагнітне поле, разом з яким у ОК виникають обертові вихрові струми, що реєструються приймаючим елементом. Таким чином, принцип роботи вихрострумowego перетворювача з обертовим полем збудження полягає у створенні рівномірного обертового вихрострумowego поля, яке дозволяє ефективно і точно виявляти дефекти у конструкціях виготовлених з провідних матеріалів знижуючи при цьому рівень шуму.

Наведена система збудження ВСП має певні переваги в порівнянні з більш класичними методами її реалізації. Найбільш суттєвими з них є:

1. Незалежність орієнтації дефекта відносно ВСП. Дана збуджувальна система дозволяє визначити дефекти незалежно від їх розташування відносно ВСП завдяки обертовому полю.

2. Відсутність напруги холостого ходу в приймачі. Завдяки відсутності електрорушійної сили в вимірювальному елементі збільшується чутливість до

					ПК01.22.1760.00.000ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

дефектів, що дозволяє значно підвищити ефективність проведення досліджень ОК на наявність дефектів.

3. Значно зменшується залежність між вихідних сигналів ВСП та відстанню над ОК. Це надає можливість тримати ВСП на відстанях, що забезпечуються вільний рух перетворювача над ОК і не сильно зменшувати ефективність сканування.

4. З'являється можливість визначення кута тріщини відносно ВСП. Це дає можливість більш точно та швидше ідентифікувати дефект на поверхні ОК та прийняти дії щодо його усунення.

5. Зменшення впливу шумової складової на вихідний сигнал. Це відбувається завдяки генерації рівномірного вихрострумове поле в ОК.

2.2. Конструкція вихрострумове перетворювача

Конструкція ВСП зображена на рисунку 2.1. та застовується для генерування обертового поля збудження. Куб 1 виготовлений з діелектричного метеріалу та слугує основою, на якій розміщуються котушки. Її форма обгрутована тим, що вона забезпечує стабільність і правильне розташування котушок відносно одна одної. Елемент 2 – це дві котушки, які намотані перпендикулярно одна до одної на основу ВСП. Живлення котушок здійснюється зі зміщенням фази на 90° . Тобто одна котушка живиться змінним електричним струмом, що змінюється за законом синуса, а інша, перпендикулярна їй, – електричним струмом, що змінюється за законом косинуса. Це зумовлює генерацію обертового електромагнітного поля, яке збуджує вихрові струми в ОК. ОК 3 являє собою пластину з провідного матеріалу, у якому необхідно виявити дефекти або неоднорідності. При наближенні ВСП до ОК, під впливом обертового електромагнітного поля колушок збудження 2 в ньому виникають вихрові струми, перпендикулярні магнітному потоку Φ , які створюють вторинне магнітне поле. GMR-сенсор розташований на нижній грані кубічної основи 1 та використовується для

					ПК01.22.1760.00.000ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

реєстрації вихрових струмів, збуджуваних в ОК. Він виявляє зміни у щільності вторинного магнітного поля, створеному вихровими при наявності дефектів чи неоднорідностей в ОК.

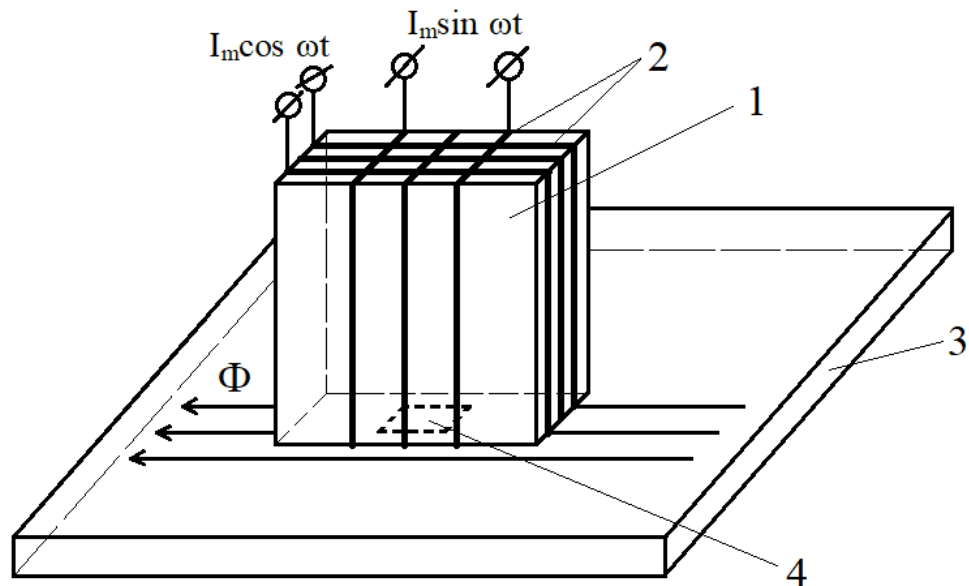


Рис. 2.1.

Дана конструкція ВСП забезпечує генерацію обертового електромагнітного поля, збудження вихрових струмів у провідному об'єкті контролю та їх реєстрацію за допомогою GMR перетворювача незалежно від розташування дефекту відносно ВСП та зменшує вплив шумів на сигнал від датчика.

2.3 Структурна схема вихрострумового дефектоскопу

Структурна схема розробленого вихрострумового дефектоскопу наведена на рис.2.2. Принцип роботи дефектоскопу полягає у наступному. Прямий цифровий синтезатор частот (Direct Digital Synthesizer, DDS) 1, генерує синусоїдальні та косинусоїдальні сигнали з високою точністю і стабільністю частоти. AD9854 може працювати в діапазоні частот до 300 МГц, має два незалежні канали, а також можливість модуляції амплітуди, частоти і фази. Цей генератор створює сигнал живлення збуджуючої системи. Перетворювачі

					ПК01.22.1760.00.000ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

напруга-струм 2 перетворюють вихідний сигнал генератора у струм, необхідний для живлення котушок збудження. Це дозволяє забезпечити стабільний та керований струм, що важливо для точності вимірювань. Система котушок збудження 3, зображена на схемі, створює змінне електромагнітне поле, яке наводить вихрові струми в провідному ОК. Завдяки фазовому зміщенню струмів у котушках, створюється обертове поле збудження.

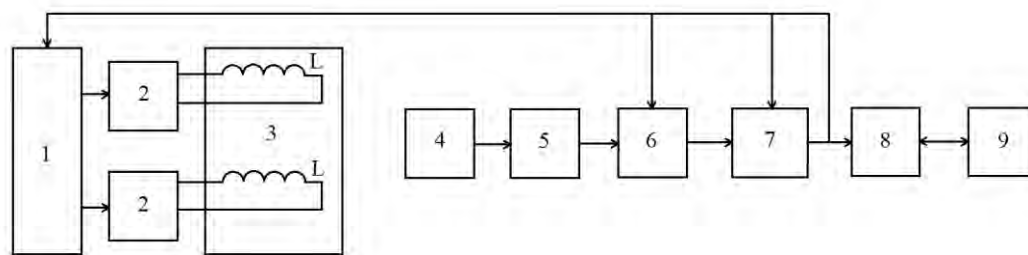


Рис 2.2.

Датчик GMR 4 реєструє зміни в магнітному полі, які викликані вихровими струмами в об'єкті контролю при наявності в робочій області неоднорідностей. GMR перетворювач має високу чутливість до зміни магнітної щільності, що дозволяє точно вимірювати зміни, викликані малими дефектами в матеріалі. Параметричний підсилювач INA125 5 використовується для підсилення сигналу, що надходить від GMR сенсора. INA125 має високу точність і низький рівень шумів, що дозволяє отримати чіткий сигнал для подальшої обробки. Підсилювач також може виконувати функції корекції сигналу. Фільтр низьких частот 6 у цій системі використовується для відсіювання небажаної шумової складової сигналу, яка може виникати через високочастотні компоненти або інші перешкоди. Він пропускає сигнали вищі порогового рівня, що відповідають корисній інформації, отриманій від GMR про ОК. Аналого-цифровий перетворювач (АЦП) 7 перетворює аналоговий сигнал з виходу підсилювача в цифровий. Це дозволяє обробляти сигнал за допомогою цифрових методів, а також зберігати і передавати дані на інтерфейс користувача 8 та комп'ютер 9. АЦП повинен мати високу розрядність і швидкість, щоб забезпечити точне і швидке вимірювання.

Інтерфейс користувача 8 є програмним забезпеченням, яке дозволяє взаємодію оператора з системою. Він надає можливість задавати параметри вимірювань, відображати результати у зручному для користувача вигляді, а також зберігати і аналізувати дані. Інтерфейс може мати різні функції, включаючи візуалізацію сигналів, побудову графіків, збереження даних тощо. На комп'ютері 9 встановлений інтерфейс користувача і програмне забезпечення для обробки даних. Комп'ютер отримує цифровий сигнал від АЦП, обробляє його, візуалізує результати, і зберігає дані для подальшого аналізу.

Таким чином, вихрострумний дефектоскоп працює шляхом збудження вихрових струмів у провідному об'єкті контролю, реєстрації змін у магнітному полі за допомогою магнеторезистора, підсилення і фільтрації сигналу, його оцифрування, та подальшої обробки і аналізу даних за допомогою комп'ютера і програмного забезпечення.

					ПК01.22.1760.00.000ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновок до розділу

У даному розділі розглянуто конструкцію ВСП та принцип його роботи для визначення дефектів у плоских ОК виготовлених з провідних матеріалів. Дана конструкція ВСП забезпечує:

1. Визначення дефектів незалежно від їх розташування завдяки обертовому полю, що дозволяє проводити дослідження з високою точністю.
2. Відсутність напруги холостого ходу в приймачі, що підвищує чутливість до дефектів та ефективність проведення досліджень.
3. Зменшення залежності сигналу від відстані між ВСП та об'єктом контролю (ОК), що спрощує маніпуляції з перетворювачем та покращує результати сканування.
4. Визначення кута тріщини відносно ВСП, що дозволяє швидше ідентифікувати дефекти та вжити відповідних заходів для їх усунення.
5. Зменшення впливу шуму на вихідний сигнал завдяки генерації рівномірного вихрострумовеого поля.

Розглянута будова ВСП, що складається з двох котушок, розташованих перпендикулярно одна до одної, і генерацію обертового електромагнітного поля, яке збуджує обертові вихрові струми в ОК. Використання GMR-сенсора дозволяє реєструвати зміни у щільності вторинного магнітного поля, що забезпечує виявлення дефектів та неоднорідностей у виробі.

Структурна схема вихрострумовеого дефектоскопу включає такі компоненти, як генератор синусоїдальних та косинусоїдальних сигналів, перетворювачі напруга-струм, система котушок збудження, GMR-сенсор, підсилювач сигналу та фільтр низьких частот. Всі ці компоненти забезпечують високу точність та стабільність вимірювань, що робить систему ефективною для виявлення дефектів у провідних матеріалах.

					ПК01.22.1760.00.000ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНОК ПАРМЕТРІВ ВИХРОСТРУМОВОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

3.1. Аналіз поля збудження вихрострумowego перетворювача

Для визначення магнітного поля в довільній точці (x, y, z) робочої зони перетворювача повне магнітне поле $B(t)$ [12]. Оскільки воно складається з двох ортогональних компонент, які формуються ідентичними збуджуючими котушками, то вираз матиме форму:

$$B(t, x, y, z) = \sqrt{(B_{1m}(x, y, z) \cdot \cos \omega t)^2 + (B_{2m}(x, y, z) \cdot \sin \omega t)^2}, \quad (1)$$

де $B_{1m}(x, y, z), B_{2m}(x, y, z)$ - амплітуди магнітного поля від ортогональних збуджуючих котушок.

У робочій області ВСП необхідно виконати умову рівності індукцій: $B_{1m}(x, y, z) = B_{2m}(x, y, z) = B_m(x, y, z)$. В цьому випадку ОК розташовується в однорідному полі з індукцією $B(x, y, z) = B_m(x, y, z)$. Тому достатньо розглянути формування однієї складової.

Робоча поверхня перетворювача, що збуджує вихрові струми в ОК, представлена системою провідників зі змінним електричним струмом в координатній системі (x, y, z) . Координати x та y лежать у площині системи провідників і спрямовані відповідно вздовж і поперек провідників, а координата z перпендикулярна цій площині; координата y вказує порядковий номер провідника, над яким розташована точка розрахунку. В основу розрахунку було покладено закон Біо-Савара-Лапласа, що визначає величину магнітного поля в просторі навколо провідників зі струмом за відсутності феромагнітних середовищ. Кінцевий вираз розподілу індукції амплітудного значення $B_m(x, y, z)$ в області ОК має вигляд:

					ПК01.22.1760.00.000ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$B_m(x, y, z) = \frac{\mu_0 \cdot I_m}{4 \cdot \pi \cdot d_{np}} \cdot \left[\int_{\beta_1}^{\beta_2} \left(\frac{x}{\sqrt{z^2 + x^2 \cdot \sin^2 \beta}} + \frac{l-x}{\sqrt{z^2 + (l-x)^2 \cdot \sin^2 \beta}} \right) d\beta \right] \quad (2)$$

де I_m – амплітудне значення струму збуджуючої котушки, l – довжина сторони збуджуючої котушки вздовж вісі x , $\mu_0 = 4\pi * 10^{-7} \text{ Гн/м}$ – магнітна стала, d_{np} – діаметр проводу котушки, β_1, β_2 – граничні для даної координати y кути, β – поточне значення кута. Кут β лежить в площині, яка проведена через досліджувану точку A поля паралельно площині zOy . Залежність індукції від координати y присутня у (2) в неявному виді, оскільки y впливає на значення кутів β_1, β_2 :

$$\beta_1 = \arctg \frac{z_A}{y_A} \quad (3)$$

$$\beta_2 = \pi - \arctg \frac{z_A}{H - y_A} \quad (4)$$

де z_A, y_A координати точки A , H – розмір сторони грані котушки.

3.2. Розрахунок котушки збудження

Припустимо, що за вихідною характеристикою GMR перетворювача його вихідна напруга при виявленні тріщини мінімальних допустимих розмірів складатиме $0,175 \text{ В} \pm 0,025 \text{ В}$ (рис. 3.1.).

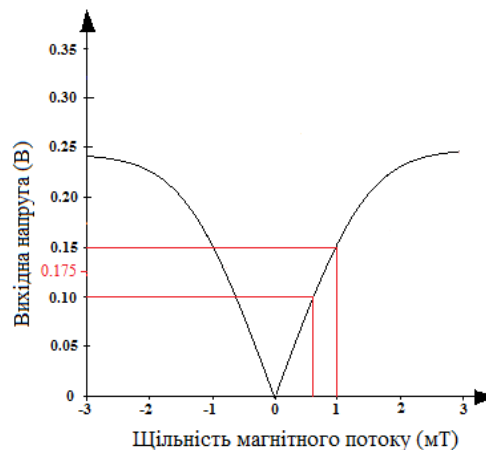


Рис. 3.1.

					ПК01.22.1760.00.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

На рис.3.1. наведено характеристику використаного в роботі GMR перетворювача типу AAL002-02. Відповідно до відношення щільності магнітного потоку до вихідної напруги GMR перетворювача у даному діапазоні вихідної напруги відповідає найбільшій чутливості перетворювача. З рис. 3.1. визначимо, що робочий діапазон щільності магнітного потоку для сенсора цього типу складає приблизно 0,4 мТл. Щільність магнітного потоку створюваного котушками доцільно обрати в десять разів більше, а саме 4 мТл.

Після визначення щільності магнітного збуджувального пристрою потрібно визначити його струм живлення. Для цього дослідимо розміри GMR перетворювача [13], що становлять 5 мм у довжину та шириною 6,2 мм (рис. 3.2.).

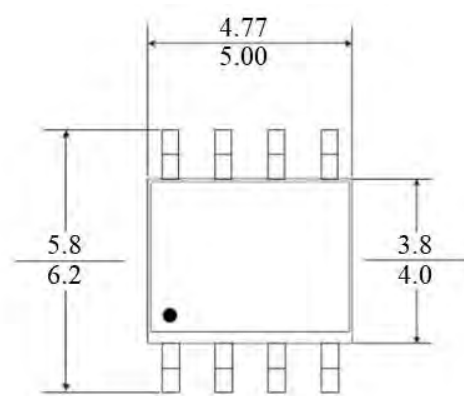


Рис. 3.2.

З метою роботи сенсора в області однорідного магнітного поля необхідно задати розміри котушок збудження не менше ніж в три рази більшими за розміри GMR перетворювача. З огляду на розміри GMR сенсора можна припустити, що кубічна основа для системи збудення матиме розміри 30 мм X 30 мм X 30 мм. Запишемо загальну формулу магнітного поля за законом Біо та Савара:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot N \cdot I}{l} \quad (5)$$

, де l – довжина котушки, I – струм живлення, N – кількість витків.

Припустимо товщина дроту з ізоляцією складатиме 0,15 мм тоді в одному шарі котушки буде 200 витків.

З формули (5) ми можемо визначити струм живлення збуджувальних котушок, оскільки він однаковий для них обох:

$$I = \frac{B \cdot l}{\mu_0 \cdot N} \quad (6)$$

Підставляємо дані у формулу (6) та отримуємо:

$$I = \frac{4 \cdot 10^{-3} \cdot 0,03}{4 \cdot 3,14 \cdot 200} = 0,477 \quad (\text{А})$$

Проте згідно з таблицею максимально допустимого струму у мідній жилі кабеля відносно її діаметра [14] кабель з ізоляцією товщиною 0,15 мм не витримає струм 0,477 А. Отже, для запобугання перегрівання та виходу з ладу котушок необхідно збільшити кількість шарів обмоток. Тому ми дійшли висновку, що мінімальна кількість шарів необхідних для генерації магнітного поля 4 мТл дорівнює трьом. Таким чином загальна кількість витків кожної з котушок повинна складати 600. Для перевірки гіпотези підставимо значення у формулу (6):

$$I = \frac{4 \cdot 10^{-3} \cdot 0,03}{4 \cdot 3,14 \cdot 600} = 0,16 \quad (\text{А})$$

Значення струму живлення 0,16 А не викликає надмірного нагрівання котушок, що дозволяє безпечно проводити вимірювання без руйнування пристрою.

Проведемо моделювання системи збудження з такими вихідними даними: кількість витків $N = 600$, струм живлення $I = 0,16$ А, діаметрі кабеля $d = 0,15$ мм при довжині грані кубічної основи $l = 30$ мм. З рисунку 3.3. видно, що розподіл магнітного поля є симетричним, а його середня частина є плоскою, що доводить наявність у робочій області ВСП ділянки з постійним значенням магнітного поля. Це вказує на те, що магнітне поле в цій області є рівномірним і стабільним.

Також можна помітити, що інтенсивність магнітного поля зменшується по краях, що характерно для розподілу поля в просторі.

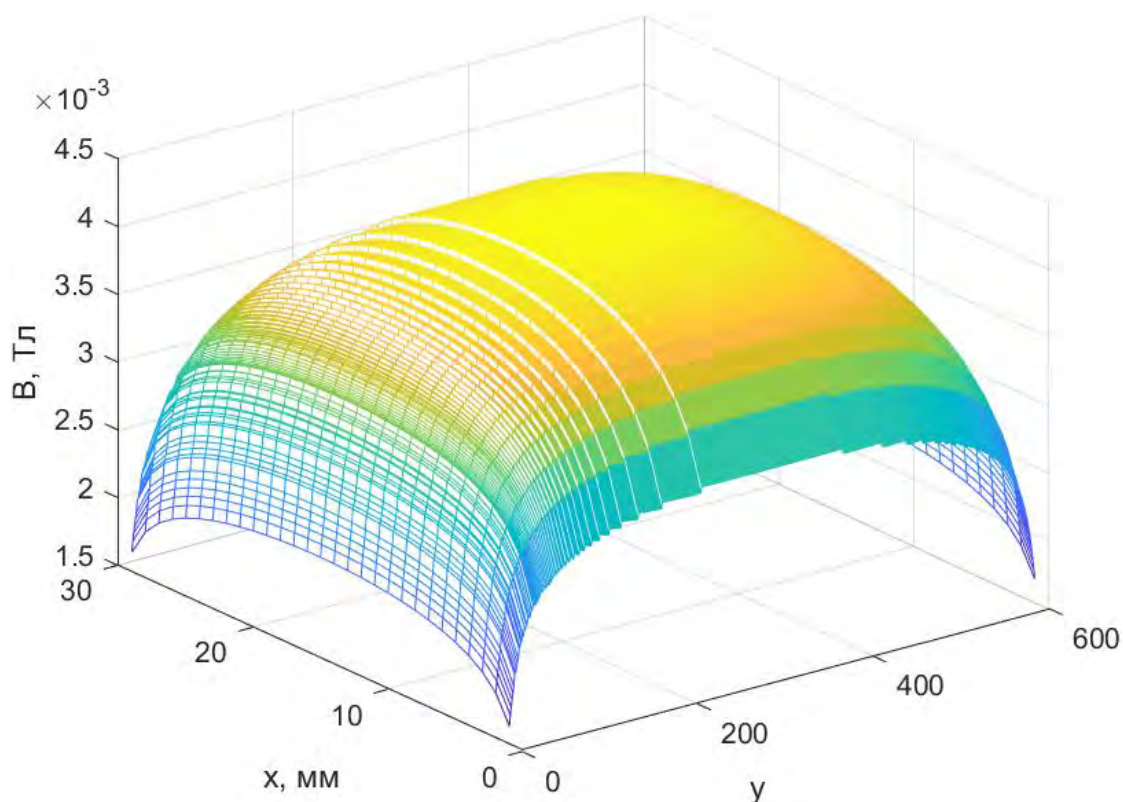


Рис. 3.3.

3.3. Вплив підмагнічення на підсилюючу характеристику GMR перетворювача

Важливо зазначити, що для підвищення ефективності GMR перетворювача необхідно оптимізувати параметри підмагнічення. Одним з ключових аспектів є забезпечення рівномірного розподілу магнітного поля по всій площі перетворювача, що дозволить збільшити вихідну амплітуду сигналу.

На рисунку 3.4. показано залежність вихідного сигналу від інтенсивності підмагнічення. Помітно, що при збільшенні інтенсивності підмагнічення до оптимального значення, вихідний сигнал стає більш чітким та стабільним. Це пояснюється тим, що сильніше підмагнічення збільшує лінійність відгуку GMR перетворювача, що в свою чергу призводить до зменшення спотворень і втрат сигналу.

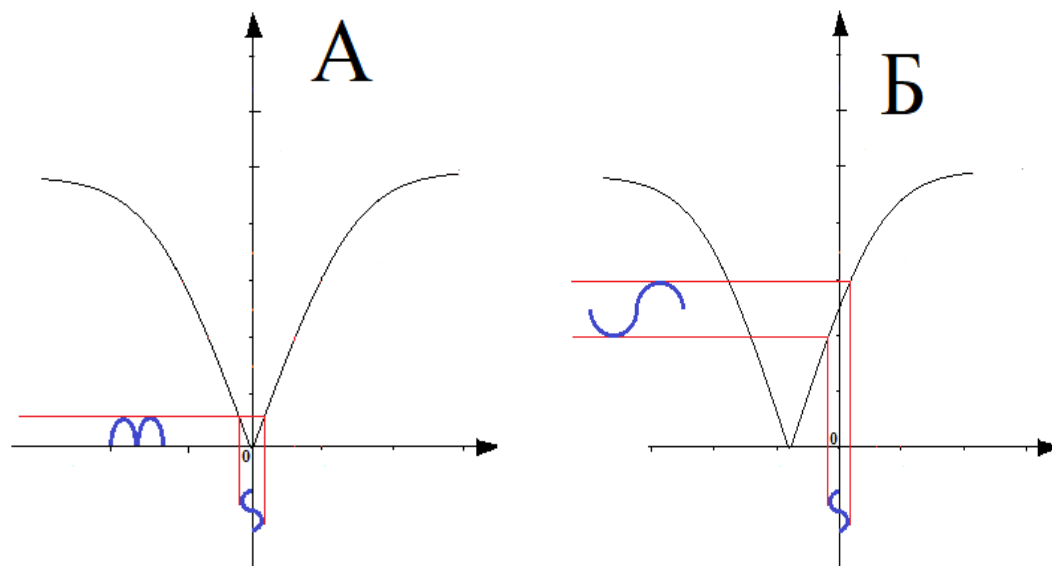


Рис. 3.4.

Дослідження даних сенсорів показують, що правильний вибір матеріалів для виготовлення GMR перетворювачів, а також точне налаштування параметрів підмагнічення можуть значно підвищити коефіцієнт підсилення сигналу.

Нажаль, вихідний сигнал датчика GMR неможливо безкінечно посилювати за допомогою підмагнічення. Попри те, що GMR перетворювач має обмеження у підсиленні через нелінійність відношення магнітного потоку до вихідної напруги, це не знецінює його здатність підсилення сигналів від дефектів та неоднорідностей.

Висновок до розділу

У даному розділі розглянуто процес розрахунку параметрів ВСП на основі закону Біо-Савара-Лапласа. Було визначено, що для забезпечення однорідного магнітного поля необхідно виконати умову рівності індукцій в робочій області. Розрахунки показали, що магнітне поле, створюване збуджуючими котушками, має бути 4 мТл, що в десять разів більше від щільності магнітного потоку, необхідного для GMR перетворювача.

Визначено, що для досягнення необхідного магнітного поля потрібно використовувати котушки з 600 витками, розташовані в три шари, що дозволяє уникнути перегріву і забезпечити безпечне проведення вимірювань. Проведене моделювання підтвердило симетричність і однорідність магнітного поля в робочій області ВСП.

Також було проаналізовано вплив підмагнічення на підсилюючу характеристику GMR перетворювача. Оптимізація параметрів підмагнічення дозволяє забезпечити рівномірний розподіл магнітного поля, що покращує вихідний сигнал і зменшує спотворення. Правильний вибір матеріалів та точне налаштування параметрів підмагнічення можуть значно підвищити коефіцієнт підсилення сигналу, хоча існують обмеження через нелінійність відношення магнітного потоку до вихідної напруги.

Проведені розрахунки та моделювання дозволяють забезпечити необхідні параметри вихрострумowego перетворювача для ефективного використання в практичних застосуваннях.

					ПК01.22.1760.00.000ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБЛЕННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ СХЕМ В ПРОГРАМНОМУ СЕРЕДОВИЩІ MULTISIM

4.1. Відомості про програмне середовище Multisim

Multisim — це програмне забезпечення для моделювання електронних схем, яке широко використовується у сфері освіти та інженерії [15]. Його основною метою є допомога у проектуванні та аналізі електронних схем.

Історія даного програмного забезпечення розпочалась 1984 року, коли компанія Electronics Workbench розробила та створила Multisim. У 1999 році Electronics Workbench стала частиною National Instruments. Це дозволило програмі отримати ще ширше поширення та функціонал. Після об'єднання розробники почали вдосконалювати дане програмне середовище та з часом була створена функція інтеграції з іншими продуктами компанії, такими як LabVIEW.

Однією з ключових переваг Multisim є його здатність моделювати поведінку складних електричних схем у реальному часі, що значно підвищує ефективність розробки та тестування нових проєктів. Крім того, програма підтримує широкий спектр компонентів та інструментів, що робить її універсальним інструментом для інженерів та дослідників у галузі електроніки. Завдяки постійному розвитку та вдосконаленню, Multisim залишається одним із найпопулярніших інструментів для моделювання електричних схем.

Програмне забезпечення Multisim має зручний графічний інтерфейс користувача. Інструменти для моделювання і аналізу доступні прямо з головного вікна програми, що спрощує роботу навіть для всіх користувачів та інтуїтивно зрозумілим для новачків, що вирішили працювати з даним програмним середовищем. Програма містить велику бібліотеку електронних компонентів, завдяки яким можна створювати електричні схеми будь-якої складності. Також Multisim підтримує реалістичне моделювання поведінки

					ПК01.22.1760.00.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

схем у режимі реального часу та має широкий функціонал для аналізу. Програма дозволяє проводити різні види аналізу, такі як DC, AC, транз'єнтний аналіз, аналіз частотної характеристики та інші, що допомагає глибше зрозуміти роботу електронних схем.

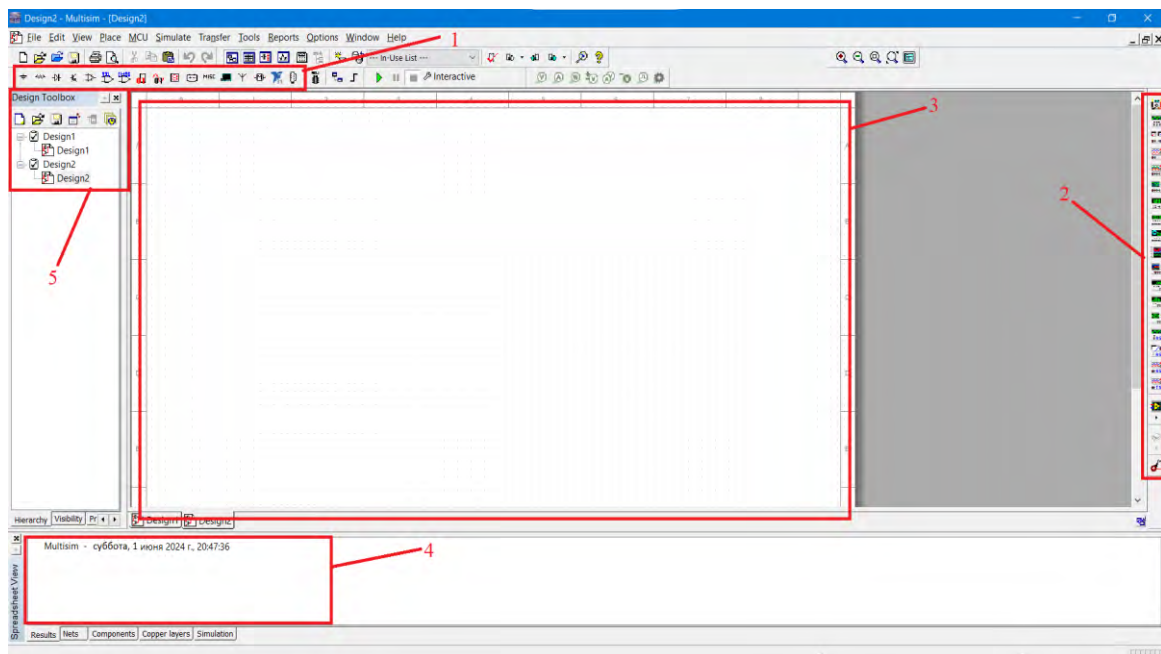


Рис. 4.1.

На рисунку 4.1. показані основні області, необхідні для моделювання електричних схем. Панель інструментів 1 містить інструменти для виконання дій над файлами та керування перебігом процесів. Зокрема, на ній розміщені кнопка запуску моделювання та бібліотеки для швидкого доступу під час моделювання. Область 2 містить набір електронних приладів, таких як осцилограф, мультиметр, генератор та інші. Область 3 є робочим місцем, де користувач створює та досліджує свою електричну схему. У області 4 відображаються повідомлення про успішний запуск моделювання або те, що якийсь із компонентів неправильно підключений чи інші помилки. Область 5 є деревом проекту, за допомогою якого можна швидко перемикатись між файлами одного проекту.

Завдяки своєму функціоналу та широкому вибору інструментів, було прийнято рішення щодо використання даного програмного забезпечення для розроблення необхідної електричної схеми.

					ПК01.22.1760.00.000ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

є вхідний сигнал, який подається на операційний підсилювач LF353P. Підсилений сигнал керує транзисторами BD135 та BD136 (Q1 і Q2 відповідно), забезпечуючи живлення котушки L1 струмом. Діоди D1 і D2 (1N4148) використовуються для захисту транзисторів від зворотної напруги. Резистори R2 і R3 встановлюють робочі точки транзисторів, забезпечуючи їх стабільну роботу. Конденсатори C2, C3 і C4 допомагають фільтрувати сигнал і стабілізувати роботу схеми. Резистор R8, з опором 3.8 Ом, забезпечує потрібний струм через котушку збудження L1.

Резистор R8 був розрахований за допомогою закону Ома. Оскільки вихідна напруга встановлена генератором дорівнює 0,6 В, а необхідний струм для живлення котушки, розрахований у попередньому розділі, становить 0,16 А, можна знайти його опір:

$$R = \frac{V}{I} = \frac{0,6}{0,16} \approx 3,8 \text{ (Ом)}$$

Вибрано стандартне значення резистора R8 з опором 3,8 Ом для забезпечення необхідного встановлення струму живлення котушки збудження.

Для моделювання сигналу з DDS генератора AD9854 був використаний функціональний генератор XFG1 з частотою 6,5 кГц та амплітудою напруги 600 мВ (рис. 4.3.). Це дозволяє точно відтворити умови роботи системи та забезпечити стабільний і точний сигнал для живлення котушки

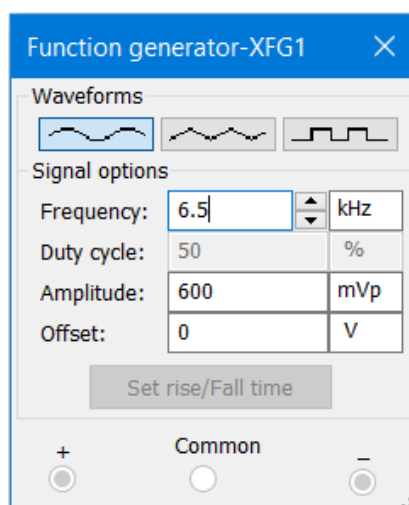


Рис. 4.3. Параметри генератора сигналів

					ПК01.22.1760.00.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

Для перевірки правильності складання електричної схеми перетворювача підключимо амперметр у режимі виміру змінного струму, послідовно перед котушкою L1 (рис. 4.4). Амперметр показав значення 160 мА, отже схема складена правильно.

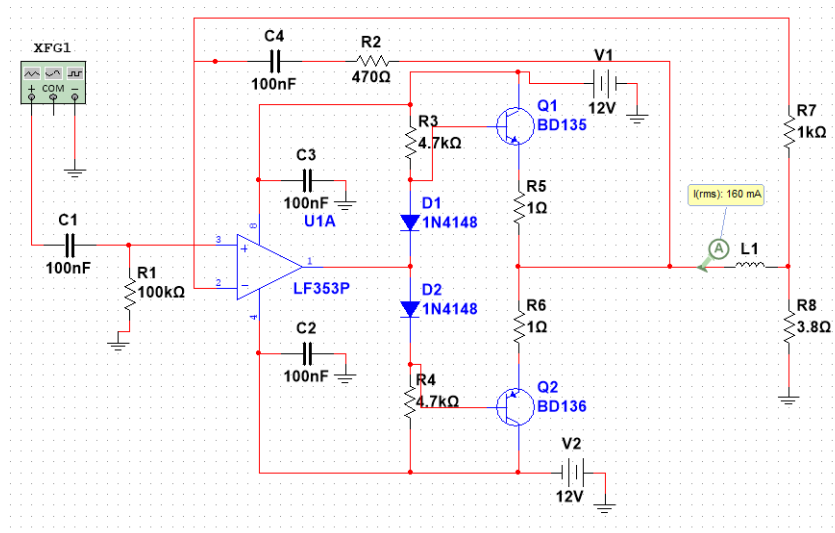


Рис. 4.4.

Також перевіримо схему на працездатність з'ясувавши чи є вихідний сигнал. Для цього використаємо осцилограф, що підк'єчений як на рисунку 4.5.

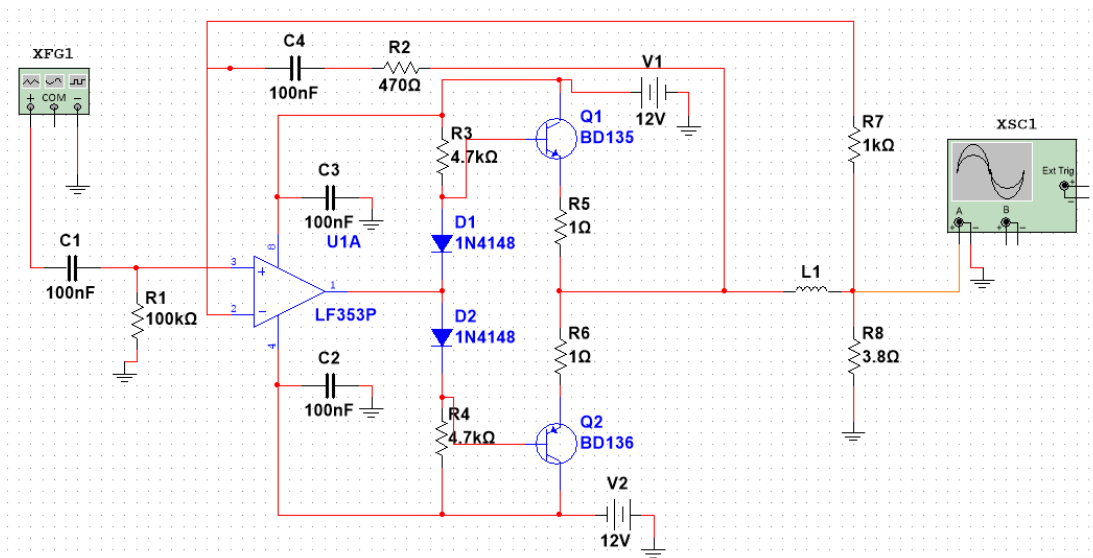


Рис. 4.5.

Підключення осцилографа дозволяє спостерігати форму вихідного сигналу і переконатися у правильній роботі схеми. Якщо осцилограф показує стабільний сигнал необхідної амплітуди і частоти, то схема працює коректно.

Осцилограма вихідного сигналу має наступний вигляд(рис. 4.6.)
 Осцилограма підтверджує, що вихідний сигнал схеми має правильну форму. Це свідчить про те, що схема працює правильно і підсилює сигнал без видимих викривлень.

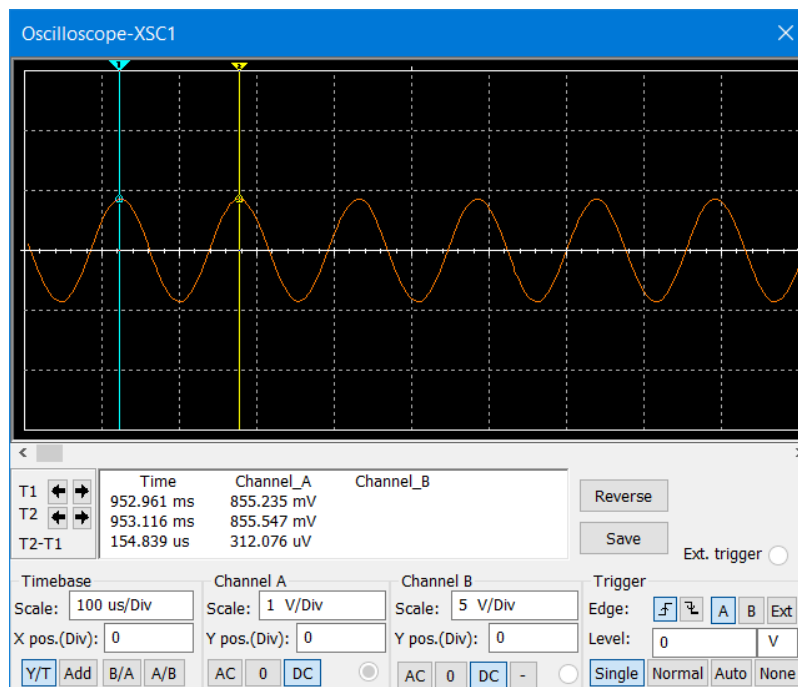


Рис. 4.6.

4.3. Вибір GMR перетворювача

Вимірюючим компонентом для вихрострумowego дефектоскопу був обраний GMR сенсор AAL002-02. Даний пристрій виготовляється серійно компанією NVE Corporation, що є лідером з виробництва цих датчиків. У таблиці 4.1. наведені основні характеристики декількох GMR перетворювачів серії AA [16, 17].

Таблиця 4.1.

Характеристика	Тип GMR перетворювачі		
	AA002-02	AAL002-02	AAH002-02
Опір R, Ом	5000	5500	2000
Робоча температура, °C	125	150	150
Максимальний гістерезис, %	4	2	15
Чутливість, мВ/В-Е	3 – 4,2	3 – 4,2	11 – 18

Вибір цього датчика був зумовлений його меншим, в порівнянні з іншими приладами серії, гістерезисом та оптимальній робочій температурі і опорі при чудовій чутливості.

На рисунку 4.7. зображено розташування пінів GMR сенсора. Даний

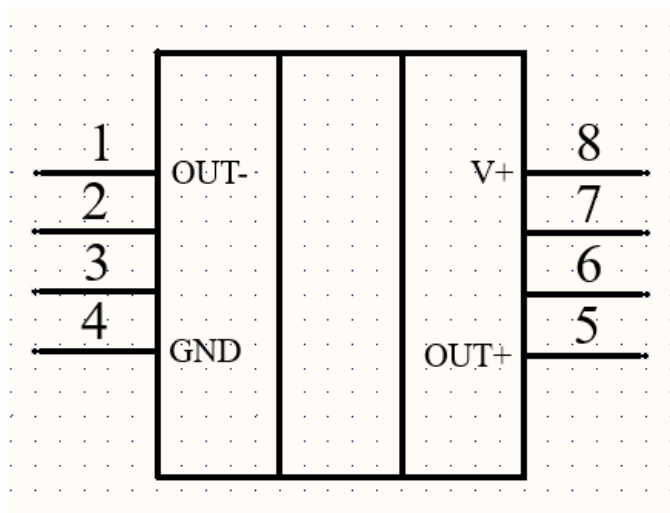


Рис. 4.7.

пристрій має 8 пінів, 4 з яких мають функціональне призначення. Пін 1 призначений для знімання сигналу з негативною полярністю, пін 4 використовуються як заземлення пристрою, пін 5 – знімання сигналу з позитивною полярністю, а пін 8 – для живлення датчика.

4.4. Підключення GMR до інструментального підсилювача

Для зчитування вихідного сигналу з GMR датчика використовуються інструментальний підсилювач INA125 [18]. INA125 — це малопотужний високоточний інструментальний підсилювач із точним джерелом опорної напруги. Він забезпечує повне мостове збудження та точне посилення диференціального входу на одній інтегральній схемі. Деякі параметри наведені у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2.

Характеристика	Значення
Напруга живлення, В	1,24 – 10
Струм споживання спокою, мкА	460
Робоча температура, °С	-40 – +85
Вихідна напруга шуму, мкВ	0,7

Підключення GMR сенсора AAL002-02 до операційного підсилювача INA125 відбувається мостовою схемою (рис. 4.8.). На вихід 8 датчика подається живлення з 4 та 15 виходів INA125, а його 4 вихід є заземлюючим. Виходи 1 та 5 GMR перетворювача призначені для знімання сигналів з нього і мають різну полярність.

Щоб забезпечити правильне функціонування системи, необхідно врахувати наступні аспекти:

1. Стабільність живлення: Важливо забезпечити стабільне живлення для GMR сенсора, оскільки будь-які коливання напруги можуть вплинути на точність вимірювань.
2. Фільтрація сигналів: Для уникнення перешкод і шумів в системі, бажано використовувати додаткові фільтри на вході і виході підсилювача.
3. Калібрування системи: Після підключення необхідно провести калібрування системи для встановлення нульової точки і масштабування сигналів, що дозволить забезпечити високу точність вимірювань.
4. Захист від зовнішніх впливів: Для зменшення впливу зовнішніх електромагнітних полів на сенсор, рекомендується використовувати екранування або захисні корпуси.

					ПК01.22.1760.00.000ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

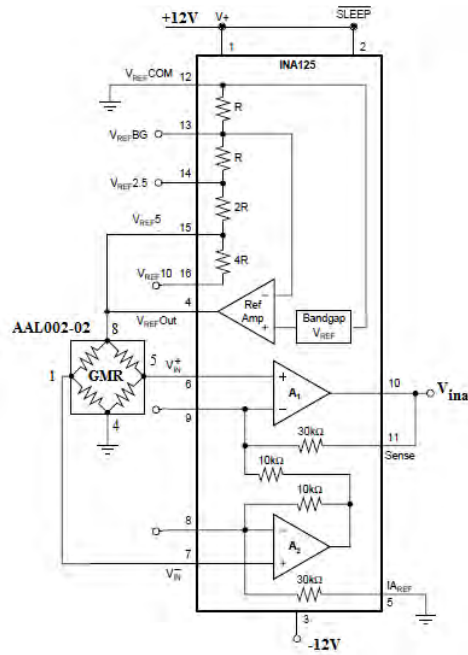


Рис. 4.8.

Забезпечення дотримання цих умов дозволить отримати стабільну та точну роботу GMR сенсора в складі вихрострумовеого дефектоскопу, що суттєво підвищить ефективність і надійність проведених вимірювань.

Висновок до розділу

У цьому розділі було детально розглянуто процес створення електричних схем за допомогою програмного середовища Multisim. Визначено основні можливості та переваги цього програмного забезпечення, такі як зручний графічний інтерфейс, велика бібліотека електронних компонентів та реалістичне моделювання поведінки схем у режимі реального часу. Зокрема, було розроблено та проаналізовано схему перетворювача напруга-струм та схему підключення GMR перетворювача AAL002-02 до операційного підсилювача INA125. Усі розрахунки, проведені під час моделювання, підтверджують правильність вибору компонентів і їхню відповідність технічним вимогам. Отримані результати моделювання демонструють ефективність запропонованого підходу і можливість його практичного застосування у подальших дослідженнях.

					ПК01.22.1760.00.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

ВИСНОВКИ

У даному дипломному проєкті розроблено вихрострумний дефектоскоп, який використовує GMR перетворювачі як сенсор вихрострумного перетворювача, який має підвищену чутливість по параметрів електромагнітного поля і дає змогу виявляти поверхневі і підповерхневі дефекти малих розмірів. Проведені теоретичні та експериментальні дослідження підтвердили ефективність та перспективність застосування GMR перетворювачів у вихрострумному НК.

Збудження вихрових струмів у ОК здійснюється системою двох прямокутних котушок, активна частина яких розташована тангенціально до поверхні ОК. Це забезпечує створення в ОК вихрових струмів з однорідним розподілом щільності на значній ділянці поверхні ОК. Крім того система збудження вихрових струмів утворена двома ортогональними у просторі котушками, які живляться двома синусоїдними струмами з фазовим зсувом 90° між ними. Це дає змогу забезпечити незалежність параметрів вихрових струмів дефектів ОК від просторової орієнтації дефекта.

У першому розділі дипломного проєкту було досліджено фізичні процеси, що відбуваються під час вихрострумного контролю, та визначено переваги використання GMR перетворювачів у порівнянні з традиційними індукційними котушками.

У наступному розділі обґрунтовано структурну схему дефектоскопу, що включає компоненти для генерації та реєстрації вихрових струмів з використанням GMR перетворювачів.

У розрахунковій частині було визначено необхідні параметри вихрострумного перетворювача, проведено розрахунки котушки збудження та досліджено вплив підмагнічення на підсилюючу характеристику GMR перетворювача.

					ПК01.22.1760.00.000ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

В четвертому розділі було розглянуто та створено електричну схему перетворювача напруга-струм та промодельовано її роботу в середовищі Multisim. Було проаналізовано серію АА датчиків GMR від виробника NVE Corporation та обрано оптимальну модель з хорошими характеристиками. Було показано інтеграцію GMR сенсора в систему за допомогою інструментального підсилювача INA125.

Результати проєкту підтвержують доцільність і ефективність використання GMR перетворювачів у вихрострумовому НК, оскільки це дає змогу підвищити чутливість та точність виявлення дефектів у провідних матеріалах, отже сприяє покращенню надійності та безпеки конструкцій у різних галузях промисловості, зокрема в авіаційній, автомобільній та енергетичній сферах.

Використання GMR перетворювачів дозволяє не лише вдосконалити існуючі методи вихрострумового НК, але й відкрити нові можливості для створення більш компактних, енергоефективних та високочутливих приладів вихрострумового НК.

Результати досліджень даного дипломного проєкту можуть бути основою для практичної реалізації вихрострумового дефектоскопу з елементом збудження обертового магнітного поля та приймаючим елементом з GMR сенсором. Очікувані результати від реалізації даного пристрою є створення приладу, що має хороші здатності до виявлення дефектів і неоднорідностей, а також їх характеристик таких як: розмір та координати розміщення.

					ПК01.22.1760.00.000ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Білокур І. П. «Основи дефектоскопії». – К.: Азимут-Україна, 2004. – 496 с. —
- [2] A. Sophian, G. Y. Tian, M. Fan and D. Taylor, "Pulsed Eddy Current Non-destructive Testing and Evaluation: A Review," in *Materials Science and Engineering: R: Reports*, vol. 50, no. 1-2, pp. 1-46, 2005.
- [3] S. Mandache and L. Clapham, "A Model for Pulsed Eddy Current Testing," in *NDT & E International*, vol. 36, no. 7, pp. 405-413, 2003.
- [4] Liu Chang, Min Wang, Lei Liu, Siwei Luo, Pan Xiao, « A brief introduction to giant magnetoresistance». – Hyscorelle Co., Ltd., Beijing, China.
- [5] О. Л. Чернишов, "Вихрострумовий перетворювач на базі GMR," КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна, 2024.
- [6] Inga Ennen, Daniel Kappe, Thomas Remppe, Claudia Glenske, Andreas Hütten, «Giant Magnetoresistance: Basic Concepts, Microstructure, Magnetic Interactions and Applications», [Електронний ресурс] Режим доступу: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4934330/>
- [7] Porto, R. W., Brusamarello, V. J., Azambuja, R., and Frison Jr., O., "Design and Analysis of a GMR Eddy Current Probe for NDT," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 63, no. 10, pp. 2426-2433, Oct. 2014.
- [8] Brusamarello, V. J., Azambuja, R., and Porto, R. W., "GMR-Based ECT Instrument for Detection and Characterization of Crack on a Planar Specimen: A Hand-Held Solution," *IEEE Sensors Journal*, vol. 15, no. 1, pp. 199-207, Jan. 2015.
- [9] A. E. Kovalev, I. M. Bilotti, N. D. Mathur, J. L. Prieto, F. S. Plazaola, and A. P. de los Reyes, "Routes for GMR-Sensor Design in Non-Destructive Testing," *Sensors*, vol. 12, no. 9, pp. 12169-12188, Sep. 2012.

					ПК01.22.1760.00.000ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- [10] F. Vacher, E. C. Balizer, S. Cointe, F. Augier, and M. Babic, "Non Destructive Testing with GMR Magnetic Sensor Arrays," Proc. 11th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT 2014), Oct. 2014, pp. 1-8.
- [11] Hiroshi Hoshikawa, Kiyoshi Koyama. A New Eddy Current Probe Using Uniform Rotating Eddy Currents. – J. Materials Evaluation, 1998, p. 85-88.
- [12] Куц Ю.В. Аналіз роботи накладного вихрострумове перетворювача з обертовим полем /Ю.В. Куц, В.В. Лисенко, О.А. Бекеш //Технічна електродинаміка. – 2001. –№3. – С.70-73.
- [13] GMR перетворювач AAL002-02. [Електронний ресурс] Режим доступу: <https://www.rhopointcomponents.com/product/sensors/magnetic-sensors/gmr-magnetic-sensors/nve-aal002-02e/>
- [14] AWG таблиця [Електронний ресурс] Режим доступу: <https://oxorona.com/awg/>
- [15] Офіційний сайт National Instruments [Електронний ресурс] Режим доступу: <https://www.ni.com/en.html>
- [16] О. Л. Чернишов, "Застосування GMR перетворювачів у вихрострумове неруйнівне контролю," КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна, 2024.
- [17] GMR перетворювачі серії AA. [Електронний ресурс] Режим доступу: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/608149/ETC2/AAL002-02.html>
- [18] INA125 інструментальний підсилювач. [Електронний ресурс] Режим доступу: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/56681/BURR-BROWN/INA125.html>
- [19] Гальченко В.Я. Накладні вихрострумові перетворювачі з однорідною чутливістю: монографія / В.Я. Гальченко, Р.В. Трембовецька, В.В. Тичков. – Харків : СГ НТМ «Новий курс», 2021. –280 с.
- [20] Статистичні методи визначення залежностей між випадковими величинами: навчальний посібник / Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 115 с.

					ПК01.22.1760.00.000ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- [21] Баженов В. Г. Електроніка. Лабораторний практикум [Електронний ресурс] / В. Г. Баженов, Є. Ф. Суслов, Ю. Ю. Лисенко, А. С. Момот ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 70 с.
- [22] Галаган Р.М. Комп'ютерне проектування електронних схем. Комп'ютерний практикум: навчальний посібник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 419 с.
- [23] Lysenko I, Kuts Y, Petryk V, Malko V, Melnyk A. Automated eddy current system for aircraft structure inspection. Transactions on Aerospace Research. 2023;4(273):33–40.
- [24] Lysenko, I., Kuts, Y., Uchanin, V., Mirchev, Y., Alexiev, A. (2023). Problems of Using Eddy Current Arrays NDT. In: Pawelczyk, M., Bismor, D., Ogonowski, S., Kacprzyk, J. (eds) Advanced, Contemporary Control. PCC 2023. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 708. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-35170-9_27
- [25] Lysenko, I. Advantages of Using Eddy Current Array for Detection and Evaluation of Defects in Aviation Components / Lysenko I., Mirchev Y., Levchenko O., Kuts Y., Uchanin V. // International Journal “NDT Days”. – BSNDT: Bulgaria, 2023. – Volume 6, Issue 2. – P. 84-88. 26.
- [26] Using the Red Pitaya platform in automated eddy current testing / Levchenko O., Aleksiev A., Kuts Y., Lysenko I. // International Journal “NDT Days”. - BSNDT: Bulgaria, 2023. - Volume 6, Issue 4. - P. 194-201 27.
- [27] Eddy Current Array Testing of Steel Tube Profiles / Y. Mirchev, I. Lysenko, Ts. Borisov, V. Kovtun, P. Chukachev // International Journal “NDT Days”. - BSNDT: Bulgaria, 2023. - Volume 6, Issue 3. - P. 137-147.
- [28] Zhong, M., Kuts, Y., Kochan, O., Lysenko, I., Levchenko, O., Vlah-Vyhrynovska, H.: Using signal phase in computerized systems of non-destructive testing. Measur. Sci. Rev. 22(1), 32–43 (2022).
- [29] Куц Ю.В. Застосування фазових характеристик сигналу в автоматизованій вихрострумовій дефектокопії / М.О. Редька, Ю.В. Куц,

					ПК01.22.1760.00.000ПЗ	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Є.В. Шаповалов, В.М. Учанін, Ю.Ю. Лисенко, О.Д. Близнюк // Технічна діагностика і неруйнівний контроль, 2022, №1, стор. 45-53.

[30] Kuts, Y., Kochan, O., Lysenko, I., Huminilovych, R. (2021). Methodology for measuring phase shifts of signals using discrete Hilbert transform. In 13th International Conference on Measurement. IEEE, 18-21. <https://doi.org/10.23919/Measurement52780.2021.9446811.10.23919/Measurement52780.2021.9446811>

[31] Kuts, Yu.V., Uchanin, V.M., Lysenko, Yu.Yu., Levchenko, O.E.: Application of Hilbert transform for analysis of signals of automated eddy current inspection. Part 1. Theoretical aspects of Hilbert transformation application at eddy current inspection. In: Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing, №3, pp. 7–13 (2021).

[32] Kuts, Yurii, Uchanin, Valentyn, Lysenko, Jully, Petryk, V.F., Bohdan, G.A. and Levchenko, Oleksandr. “Application of Hilbert Transform for Analysis of Signals of Automated Eddy Current Inspection. Part 2. Deriving secondary Diagnostic Features and Examples of Realization.” Technical Diagnostics and Non Destructive Testing No. 4 (2021) pp. 11–18.

					ПК01.22.1760.00.000ПЗ	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		