

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

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

«До захисту допущено»
В.о. завідувача кафедри АСНК
_____ Галина БОГДАН

«__» _____ 2025 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: «Автоматизований вихрострумний прилад для контролю
елементів авіаційної техніки»**

Виконав:
студент IV курсу, групи ПК-11
Миронець Андрій Володимирович _____

Керівник:
д.т.н., професор
Куц Юрій Васильович _____

Рецензент:
к.т.н., доцент
Синиця Валентин Іванович _____

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

Студент _____
(підпис)

Київ – 2025 року

№ з/п	Формат	Позначення			Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4	ПК11.07.1760.00.000.ПЗ			Пояснювальна записка	49	
2	A1	ПК11.07.1760.00.001.ЕЗ			Мікроконтролерний модуль обробки сигналів ВСП схема електрична принципова	1	
3	A1	ПК11.07.1760.00.002.ЕЗ			Цифровий синтезатор сигналів схема електрична принципова	1	
4	A1	ПК11.07.1760.00.003.ЕЗ			Підсилювач сигналу збудження схема електрична принципова	1	
5	A1	ПК11.07.1760.00.004.ЕЗ			АЦП схема електрична принципова	1	
6	A1				Плакат	1	
					ДП ПК11.07.1760.00.000		
		ПІБ	Підп.	Дата			
Розробник	Миронець А. В.				Відомість дипломного проєкту	Лист	Листів
Керівник	Куц Ю. В.					1	1
Консульт.						КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. АСНК Гр. ПК-11	
Н/контр.							
Зав. каф.	Киричук Ю.В.						

**Пояснювальна записка
до дипломного проєкту
на тему: «Автоматизований вихрострумовий прилад для
контролю елементів авіаційної техніки»**

Київ – 2025 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

В.о. завідувача кафедри АСНК

_____ Галина БОГДАН

«__» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студента

Миронця Андрія Володимировича

1. Тема роботи «Автоматизований вихрострумний прилад для контролю елементів авіаційної техніки», керівник проєкту Куц Юрій Васильович, доктор технічних наук, професор, затверджені наказом по університету від «26» травня 2025 р. №1765-с

2. Термін подання студентом проєкту 05 червня 2025 року

3. Вихідні дані до проєкту: об'єкт контролю (ОК) – нероз'ємне клепане з'єднання листів, товщина листів – 2-3мм, матеріал ОК – алюмінієві сплави, тип дефекту – тріщина між заклепками, тип сенсора – накладний вихрострумний перетворювач мультидиференціального типу

4. Зміст пояснювальної записки

Вступ

1. Аналіз завдання проєкту

2. Розроблення вихрострумного приладу для контролю клепаних з'єднань алюмінієвих листів

3. Моделювання процесу обробки сигналів ВСП та оцінювання їх інформаційних параметрів

Висновки

Список використаних джерел

5. Перелік ілюстративного матеріалу (5 листів А1):

1 – Структурна схема вихрострумowego приладу

2 – Схема електрична принципова мікроконтролерного модулю обробки сигналів ВСП

3 – Схема електрична принципова цифрового синтезатору сигналів

4 – Схема електрична принципова підсилювачу сигналу збудження

5 – Схема електрична принципова АЦП

6. Дата видачі завдання 10 березня 2025 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Формулювання завдання проекту	27.03.2025	
2	Проведення аналітичного огляду	16.04.2025	
3	Розрахунок параметрів датчика	20.04.2025	
4	Оформлення пояснювальної записки	29.05.2025	
5	Розробка графічної частини проекту	05.06.2025	

Студент

Андрій МИРОНЕЦЬ

Керівник

Юрій КУЦ

Анотація

В дипломному проєкті було розроблено вихрострумний прилад контролю елементів авіаційної техніки – нероз’ємних клепаних з’єднань алюмінієвих листів з використанням в якості сенсора накладний вихрострумний перетворювач мультидиференціального типу.

Проект складається з трьох розділів.

В першому розділі розглядаються фізичні основи вихрострумової дефектоскопії та особливості клепаних з’єднань алюмінієвих листів як об’єктів неруйнівного контролю. Було проаналізовано особливості використання вихрострумового неруйнівного контролю виявлення тріщин в клепаних з’єднаннях алюмінієвих листів, наведено результати огляду відомих засобів вихрострумового неруйнівного контролю, які використовуються для контролю авіаційної техніки під час виготовлення та експлуатації, виконано постановку задачі дослідження.

В другому розділі розроблено структурну схему вихрострумового приладу, виконано розрахунок сигналів вихрострумового перетворювача, обґрунтовано елементну базу для реалізації електричних принципів схем та дано їх опис.

В третьому розділі наведено результати процесу оброблення сигналів вихрострумового перетворювача та оцінювання їх інформаційних параметрів. Представлено загальну модель сигналів перетворювача, розроблено моделюючу програму в середовищі Matlab та результати виконаних комп’ютерних модельних експериментів з моделями сигналів перетворювача з урахуванням розрядності АЦП.

Ключові слова: мультидиференціальний вихрострумний перетворювач, вихрострумний прилад, дефектоскопія, неруйнівний контроль, авіаційна техніка

Annotation

In the diploma project, an eddy current device for controlling aircraft elements - non-separable riveted joints of aluminum sheets was developed, using a multi-differential type eddy current transducer as a sensor.

The project consists of three sections.

The first section considers the physical foundations of eddy current flaw detection and the features of riveted joints of aluminum sheets as objects of non-destructive testing. The features of using eddy current non-destructive testing to detect cracks in riveted joints of aluminum sheets were analyzed, the results of a review of known eddy current non-destructive testing tools used to control aircraft during manufacture and operation were presented, and the research problem was formulated.

In the second section, a structural diagram of the eddy current device was developed, the eddy current transducer signals were calculated, the element base for the implementation of electrical schematic diagrams was substantiated, and their description was given.

The third section presents the results of the eddy current converter signal processing process and the evaluation of their information parameters. A general model of the converter signals is presented, a modeling program is developed in the Matlab environment, and the results of computer model experiments with the converter signal models taking into account the ADC bit depth are presented.

Key words: multidifferential eddy current transducer, eddy current device, flaw detection, non-destructive control, aviation technology

Зміст

ВСТУП.....	10
РОЗДІЛ 1. Аналіз завдання проєкту.....	11
1.1. Клепані з'єднання алюмінієвих листів як об'єкт контролю авіаційної техніки	11
1.2. Фізична сутність вихрострумowego неруйнівного контролю та його застосування для виявлення прихованих дефектів конструкцій авіаційної техніки	17
1.3. Огляд відомих засобів вихрострумowego неруйнівного контролю для використання під час виготовлення та експлуатації авіаційної техніки.....	21
1.4. Постановка задачі дослідження.....	25
Висновки до розділу.....	26
РОЗДІЛ 2. Розроблення вихрострумowego приладу для контролю клепанних з'єднань алюмінієвих листів	27
2.1. Розроблення структурної схеми вихрострумowego приладу	27
2.2. Розроблення накладного вихрострумowego перетворювача та розрахунок його електричних сигналів	29
2.3. Вибір елементної бази для реалізації електричних принципових схем вихрострумowego приладу	35
2.4. Опис схеми електричної принципової генератора сигналів.....	40
2.5. Опис схеми електричної принципової АЦП.....	41
2.6. Опис схеми мікроконтролерного модуля обробки сигналів ВСП....	42
Висновки до розділу.....	43

					ПК11.07.1760.00.000ПЗ				
Змн.	Ар	№ до	Підпис	Дата					
Розробив		Миронець А.В.			Автоматизований вихрострумовий прилад для контролю елементів авіаційної техніки	Лім.	Арк.	Акрушів	
Перевір.реві		Куц Ю.					8		
Реценз.						ПБФ, ПК-11			
Н. Контр.									
Затверд.		Куц Ю. В.							

РОЗДІЛ 3. Моделювання процесу обробки сигналів ВСП та оцінювання їх інформаційних параметрів.....	44
3.1. Модель сигналів ВСП	44
3.2. Постановка задачі моделювання	45
3.3. Розроблення моделюючої програми та проведення комп'ютерних модельних експериментів.....	47
Висновки до розділу.....	56
ВИСНОВКИ.....	57
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	58

ВСТУП

Сучасна авіаційна техніка потребує високої надійності та безпеки, оскільки навіть незначні дефекти в її конструктивних елементах можуть призвести до критичних наслідків. Одним з ефективних методів неруйнівного контролю, що дозволяє виявляти поверхневі та підповерхневі дефекти в металевих деталях, є вихрострумний контроль. Його основною перевагою є здатність проводити діагностику без демонтажу елементів конструкції, що особливо важливо в умовах технічного обслуговування авіаційної техніки.

Особливої актуальності набуває розробка таких систем у контексті контролю елементів літальних апаратів, де важливо забезпечити високу точність виявлення тріщин, корозії та знещільнення на ранніх стадіях експлуатації. Автоматизація процесу контролю не тільки знижує людський фактор, але й підвищує ефективність технічного обслуговування, що відповідає сучасним вимогам безпеки польотів [1, 2].

Метою даного проекту є створення автоматизованого вихрострумного приладу з використанням мікроконтролера, здатного виконувати сканування, фільтрацію та обробку сигналів з вихрострумного датчика для контролю металевих елементів авіаційної техніки. Такий пристрій має знайти своє застосування як у виробничих умовах, так і в обслуговуванні авіаційних агрегатів.

					ПК11.07.1760.00.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

РОЗДІЛ 1. Аналіз завдання проєкту

1.1. Клепані з'єднання алюмінієвих листів як об'єкт контролю авіаційної техніки

Однією з важливих проблем авіаційної техніки є своєчасне виявлення прихованих дефектів багат шарових вузлів у зоні заклепкових з'єднань в умовах експлуатації. Типовий двошаровий вузол, в якому стрингер з'єднаний з зовнішньою обшивкою літака регулярним рядом заклепок, зображено на рис. 1.1. У багатьох випадках небезпеку становлять тріщини, які не виходять за межі головки заклепки. Для з'єднання елементів конструкції з зовнішньою обшивкою літака зазвичай застосовують заклепки потайного типу. Внутрішні з'єднання переважно виконуються з використанням заклепок із головками різної форми. У деяких випадках застосовують болтові з'єднання [3].

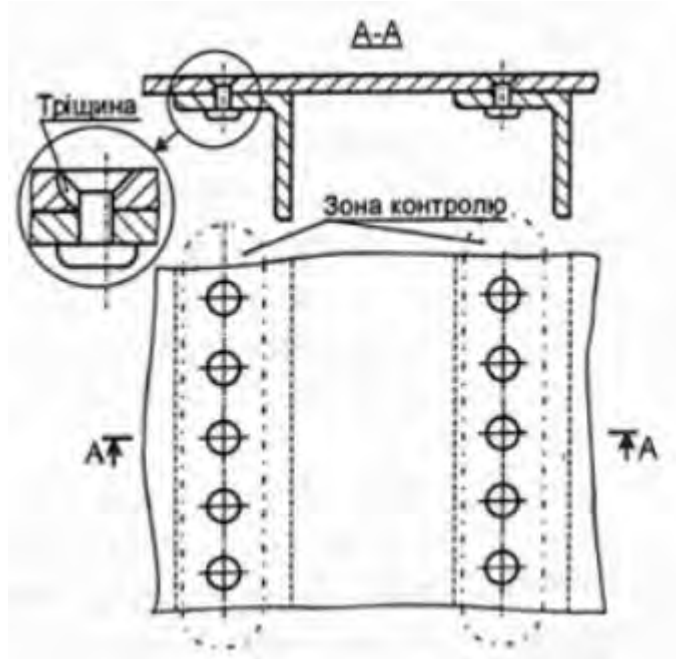


Рис 1.1. Двошаровий вузол з рядом заклепок (штрихпунктирною лінією обведена зона контролю).

Клепані з'єднання широко застосовуються в авіаційній промисловості завдяки їх високій надійності, простоті реалізації та ефективності в умовах змінних навантажень [4]. Особливо актуальними є клепані з'єднання

					ПК11.07.1760.00.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

алюмінієвих сплавів, які завдяки малій масі та корозійній стійкості широко використовуються в конструкціях літальних апаратів [5]. Надійність таких з'єднань критично важлива, тому вони є об'єктами неруйнівного контролю на всіх етапах експлуатації та технічного обслуговування авіаційної техніки [6].

У конструкціях літальних апаратів використовуються різні типи клепаних з'єднань залежно від умов навантаження, доступності для обслуговування та конструктивних вимог [7]. Основні типи:

- нахлесточні з'єднання – найпоширеніший тип у зовнішніх обшивках фюзеляжів, крил тощо;
- стикові з'єднання з накладками – застосовуються для подовжнього з'єднання листів;
- коробчасті з'єднання – для елементів жорсткості (лонжерони, стрингери).

Клепки можуть встановлюватися однорядно, дворядно або багаторядно, залежно від навантаження і необхідної міцності [7]. Для забезпечення міцності та довговічності з'єднань встановлюються жорсткі геометричні та технологічні допуски [8], які наведені в табл. 1.1.

Прямого уніфікованого стандарту з розмірами листів саме авіаційної техніки немає у вигляді документа, тому авіації найчастіше застосовуються:

- стандартні прокатні розміри листів із алюмінієвих сплавів, які визначаються за ГОСТ/ДСТУ або міжнародними стандартами (наприклад, ASTM, EN, ISO) [9];
- специфікації конкретних виробників (Boeing, Airbus, АТ "ОАК", АНТК ім. Антонова та ін.), де вказуються нестандартні чи індивідуальні розміри для конкретних елементів [10].

Стандарти на листи з алюмінієвих сплавів наведено в табл. 1.2.

					ПК11.07.1760.00.000ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 1.1. Геометричні та технологічні допуски клепок

Параметр	Норма (типіві значення)	Джерело
Діаметр клепки (D)	2 – 6 мм	ГОСТ 14798-85
Довжина клепки (L)	$h1 + h2 + 1.3 \cdot D$	ГОСТ 10300-80
Діаметр отвору (d_0)	$D + 0.1$ мм	ГОСТ 10300-80
Крок клепок (P)	2.5– 4D	ГОСТ 10300-80
Відстань до краю листа (E)	$\geq 2D$	ГОСТ 10300-80
Матеріал листа	Д16Т, 2024-Т3	ДСТУ ГОСТ 21631
Матеріал клепки	АМг5, Д16, 2117-Т, 5056, 7050	ГОСТ 28827-90; NASM 33558

Таблиця 1.2. Стандарти на листи з алюмінієвих сплавів

Стандарт	Опис
ГОСТ 21631-76 / ДСТУ ГОСТ 21631:2006	Листи та смуги з алюмінію та його сплавів. Розміри, допуски за товщиною та шириною
ГОСТ 17232-99	Листи та смуги з алюмінієвих сплавів, що деформуються, для авіації
ГОСТ 13726-97	Листи та смуги з алюмінієвих сплавів. Технічні умови
ASTM B209	Стандартні специфікації на алюмінієві та алюмінієво-сплавні листи та плити.
EN 485-1 / EN 485-2	Європейські норми на алюмінієві листи та плити

Приклади типових товщин листів з алюмінієвих сплавів для авіації (ГОСТ 17232-99) наведено в табл.1.3.

Таблиця 1.3. Товщина листів авіації за ГОСТ 17232-99

Товщина (мм)	Застосування
0.3 – 1.0	Обшивка, обтічники
1.0 – 2.5	Несучі елементи, панелі
2.5 – 4.0	Перехідні зони, посилені ділянки
5.0 – 10.0 +	Силові елементи, шпангоути, лонжерони

Ширина та довжина зазвичай залежать від формату прокату:

- ширина: від 600 мм до 1500 мм (іноді до 2000 мм);
- довжина: від 1000 до 6000 мм (або у рулонах для тонких листів).

Крім геометричних параметрів, регламентуються умови установки клепок: ущільнення, відсутність деформацій, правильність формування "головки", відсутність тріщин [8]. У процесі експлуатації та виготовлення з'єднань можуть виникати дефекти, які суттєво знижують міцність конструкцій [6] (див. табл.1.4).

Таблиця 1.4. Опис можливих дефектів з'єднань

Тип дефекту	Опис
Недобиття клепок	Недостатнє ущільнення або незформована закладна головка
Тріщини в листі, клепці	Через перенапруження або втомні навантаження
Корозія між листами	Особливо небезпечна для з'єднань з різнорідних сплавів
Ексцентриситет клепок	Несуміщення отворів, що викликає напругу в зоні з'єднання
Зазори між листами	Недостатнє притискання елементів при клепанні

Для своєчасного виявлення дефектів застосовуються різні методи неруйнівного контролю (НК), призначення і особливості яких в задачах контролю елементів авіаційної техніки наведено в табл. 1.5.

Таблиця 1.5. Методи неруйнівного контролю для виявлення дефектів

Метод	Призначення	Особливості
Вихрострумовий контроль	Виявлення тріщин, корозії, порушень контакту	Не потребує демонтажу, висока чутливість
Ультразвуковий контроль	Визначення тріщин, розшарувань	Складніше при великій кількості клепок
Капілярний контроль	Виявлення поверхневих тріщин	Потребує очищення поверхні
Візуально-оптичний контроль	Первинна оцінка стану клепаного з'єднання	Обмежений у ділянках з обмеженим доступом.

Серед розглянутих методів НК одним із найбільш широко використовуваних в авіаційній галузі, особливо для обстеження алюмінієвих конструкцій та клепаних з'єднань є вихрострумовий контроль [11]. Це пов'язано з рядом його технічних та експлуатаційних переваг, що ідеально підходять для умов авіації, серед яких:

- висока чутливість до поверхневих та підповерхневих дефектів – дає змогу виявляти тріщини біля кромek отворів під заклепки, тріщини навколо заклепок та у листах, корозійні поразки під фарбою чи герметиком, розшарування та порушені контакти в клейових або клепаних сполуках, а також чутливість може досягати дефектів розміром менше ніж 0,5 мм [12];
- ідеально підходить для матеріалів авіації - метод особливо ефективний на провідних матеріалах, таких як: алюмінієві та титанові сплави; мідні та

магнієві сплави. Вихрострумний контроль чудово працює з легкими алюмінієвими обшивками, типовими для літаків [12];

- безконтактний та не вимагає демонтажу - контроль може проводитися через фарбу, герметик і навіть тонкий шар забруднень без необхідності розбирання конструкції, що значно економить час при технічному обслуговуванні та ремонті [11];
- підходить для автоматизації та сканування складних поверхонь - існують автоматизовані системи для сканування великих ділянок обшивки, наприклад роботи з датчиками, також можливе застосування зондів складної форми для важкодоступних ділянок [13];
- дає змогу швидко аналізувати велику кількість заклепок – існують спеціальні датчики та зонди для контролю клепаних з'єднань, що дозволяють за лічені секунди перевірити стан клепки [13].

В табл.1.6 наведено результати порівняльного аналізу вихрострумного методу НК з капілярним або ультразвуковим (УЗК) контролюми [14]:

Таблиця 1.6. Порівняння вихрострумного, капілярного та ультразвукового методів НК

Критерій	Метод НК	
	Вихрострумний	УЗК або капілярний
Контакт з об'єктом	Необов'язковий (можна безконтактно)	Потрібен контакт та/або очищення
Робота через покриття	Так	Потрібно видаляти покриття
Швидкість контролю	Дуже висока	Низька
Чутливість до поверхневих тріщин	Дуже висока	Залежить від методу
Автоматизація	Відмінно підходить	Обмежено
Доступність	Компактне обладнання	Часто громіздке

Вихрострумовий НК в авіаційній галузі можна застосувати для реалізації:

- періодичного контролю фюзеляжу та крила – перевірки обшивки на наявності втомних тріщин [11];
- контролю отворів під клепки після зняття заклепок [12];
- обстеження клепаних з'єднань без демонтажу [13];
- контроль лопатки компресора та інших деталей газотурбінних двигунів [14];
- діагностика поблизу місць підвищених навантажень – двері, люки, центроплан [12].

В результаті можна зробити висновок, що потрібно використовувати саме вихрострумовий контроль для контролю авіаційної техніки, так як він безпечний та швидкий, що знижує час обслуговування без втрати якості, має як мінімальні вимоги щодо підготовки поверхні, так і високу точність локалізації дефектів, особливо в алюмінії, також підтримується всіма авіаційними стандартами та нормами та сумісний з автоматизованими системами та цифровою реєстрацією даних (архівація, порівняння в динаміці) [14].

1.2. Фізична сутність вихрострумового неруйнівного контролю та його застосування для виявлення прихованих дефектів конструкцій авіаційної техніки

Вихрострумовий неруйнівний контроль ґрунтується на явищі електромагнітної індукції, яке описується законами Фарадея та Ленца. Цей метод використовується для виявлення дефектів, контролю товщини покриттів, вимірювання електропровідності матеріалів та інших завдань діагностики [15]. Основним принципом вихрострумового контролю є збудження вихрових струмів в електропровідному матеріалі за допомогою змінного магнітного поля, створеного індуктором, та аналіз їх взаємодії з матеріалом (рис 1.2.) [15].

					ПК11.07.1760.00.000ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

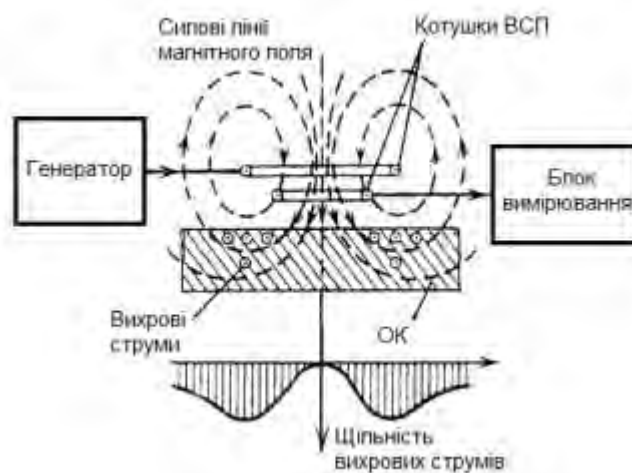


Рис 1.2. Взаємодія ВСП з електропровідним ОК

Змінне магнітне поле індуктора спричиняє виникнення в об'єкті замкнених вихрових струмів (струмів Фуко), які, у свою чергу, створюють власне магнітне поле. Взаємодія первинного та вторинного полів дозволяє реєструвати зміни електромагнітних характеристик об'єкта, що обумовлені дефектами, неоднорідностями або змінами структури матеріалу [16].

Інтенсивність вихрових струмів та характер їхнього розподілу залежать від електропровідності, магнітної проникності, геометричних параметрів об'єкта, а також від частоти збуджуваного поля. Зокрема, підвищення частоти дозволяє покращити чутливість до поверхневих дефектів, проте зменшує глибину проникнення струмів у матеріал. Це явище описується законом скін-ефекту, який обмежує застосування вихрострумів неруйнівного контролю для виявлення глибоко розташованих дефектів [17].

В авіаційній техніці вихрострумівий контроль знайшов широке застосування завдяки своїй здатності виявляти тріщини, корозію, розшарування, порушення з'єднань у деталях з алюмінієвих і титанових сплавів, що використовуються у фюзеляжах, крилах, лопатях турбін, елементах шасі тощо. Один із головних напрямів — виявлення мікротріщин у отворах під кріплення, які є потенційно небезпечними осередками зародження руйнування [18].

Перевагою вихрострумового методу є можливість його автоматизації та застосування портативних приладів, що дозволяє проводити інспекцію у важкодоступних місцях без демонтажу вузлів. Сучасні системи вихрострумового контролю здатні здійснювати цифрову обробку сигналів, забезпечуючи високу точність та надійність контролю. Крім того, метод дозволяє проводити періодичний моніторинг стану конструкцій під час експлуатації, що є критично важливим для забезпечення безпеки польотів [19].

Таким чином, вихрострумовий неруйнівний контроль є незамінним інструментом у технічному обслуговуванні авіаційної техніки, оскільки дозволяє виявляти приховані дефекти на ранніх стадіях без пошкодження об'єкта контролю. Його фізичні принципи, технологічні переваги та висока чутливість до дефектів визначають його провідну роль у системах авіаційного нагляду та діагностики.

Одним з ключових елементів вихрострумового контролю є вихрострумовий перетворювач (ВТП), який формує змінне магнітне поле та приймає сигнал, змінений у результаті взаємодії з матеріалом об'єкта. Серед різних типів ВТП особливе значення для авіаційної галузі мають накладні (контактні) вихрострумові перетворювачі, які розміщуються безпосередньо на поверхні контрольованої деталі. Основна перевага накладних ВТП полягає в забезпеченні максимально ефективної взаємодії з об'єктом контролю завдяки мінімальному зазору між індуктором та поверхнею. Це підвищує чутливість до локальних змін електромагнітних властивостей, викликаних дефектами, зокрема мікротріщинами, корозійними ураженнями та розшаруваннями (Рис 1.3) [3, 20].

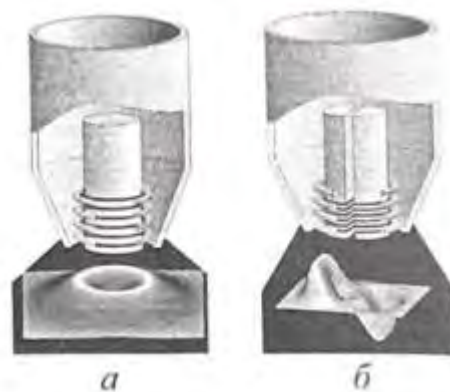


Рис 1.3. Найпростіші абсолютний (а) і диференційний (б) накладні ВСП і просторові розподіли їх чутливості.

Накладні перетворювачі мають високу просторову роздільну здатність, що дозволяє точно локалізувати положення дефекту. Вони широко використовуються для обстеження таких критичних зон авіаційних конструкцій, як отвори під заклепки, крайки панелей, місця зварних або клейових з'єднань. У цих зонах імовірність появи поверхневих або підповерхневих тріщин є особливо високою, тому важлива здатність перетворювача "зчитувати" сигнал безпосередньо з поверхні [21].

Крім того, накладні ВТП зручні у використанні для ручного або напівавтоматичного контролю, включаючи контроль у польових умовах, де недоцільно або неможливо використовувати стаціонарні або вбудовані системи. Завдяки своїй компактності та простоті конструкції, такі перетворювачі легко адаптуються до різноманітних форм поверхонь авіаційних компонентів [22]. У поєднанні з сучасною електронікою та цифровими алгоритмами обробки сигналів, накладні вихрострумові перетворювачі дозволяють проводити швидкий та надійний неруйнівний контроль без зняття елементів конструкції, що істотно знижує витрати часу на технічне обслуговування та підвищує загальну безпеку експлуатації літальних апаратів [8].

1.3. Огляд відомих засобів вихрострумового НК для використання під час виготовлення та експлуатації авіаційної техніки

Для прикладу розглянемо використання анаксіального вихрострумового перетворювача типу SPF-2346, працюючий в діапазоні від 0.2 до 4.0 кГц, який було розроблено для вирішення однієї з найскладніших проблем – виявлення внутрішніх тріщин, що розвиваються від заклепкових отворів (рис 1.4.), який використовують з вихрострумовим дефектоскопом типу ЕЛОТЕСТ у авіакомпанії «Міжнародні авіалінії України» [3].

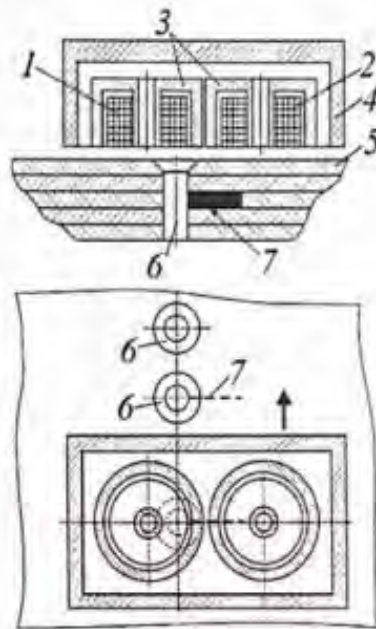


Рис 1.4. Схема контролю за допомогою ВСП типу SPF-2346: 1 – Обмотка збудження; 2 – Вимірювальна обмотка; 3 – напівброньові осердя; 4 – корпус; 5 – багатощаровий об'єкт контролю; 6 – заклепка; 7 – тріщина

Під час застосування даного вихрострумового перетворювача використовують методику ковзного контролю, що передбачає встановлення його у бездефектну зону та сканування вздовж заклепкового ряду, також у конструкції вдалося зменшити вплив електромагнітного поля обмотки збудження на вимірювальну обмотку, завдяки використанню двох рознесених обмоток, які розміщені у напівброньованих осердях.

Приклад застосування можна побачи на п'ятишаровому зразку від американської компанії “NDT engineering corporation” типу NDT 3049, загальною товщиною 13.7 мм з двома дефектами. Перший довжиною в 11.4 мм було розміщено у третьому шарі на глибині 3.6 мм, а другий завдовжки 16.5 мм розміщено у четвертому шарі зразку на глибині 6.1 мм (рис 1.5.).

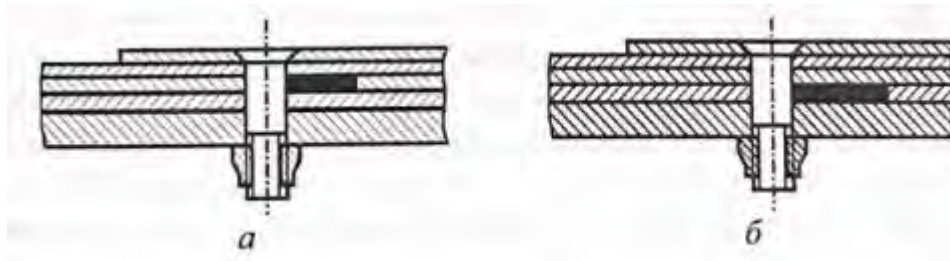


Рис 1.5. Розташування тріщин у третьому (а) і четвертому (б) шарах п'ятишарового зразку типу NDT 3049.

Дослідження було проведено за допомогою вихрострумової плати EDDYMAX на робочій частоті 500 Гц. На рис. 1.6 можна побачити сигнали від тріщин у третьому шарі зразку (рис 1.5а) та сигнали від тріщини у четвертому шарі (рис 1.5б), також на зображенні зображено сигнали від бездефектної заклепки і змін зазору. Отримані результати свідчать про можливість виявлення тріщин у зоні заклепок на глибині до 6 мм з розділенням сигналів від дефектів і завад, обмовлених заклепкою і зміною зазору.

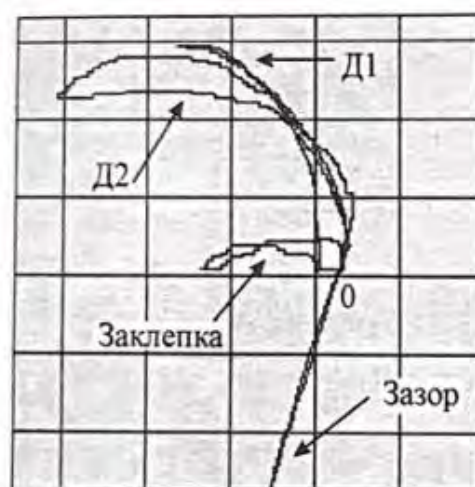


Рис 1.6. Селективна інтерпретація сигналів ВСП під час контролю п'ятишарового вузла в зоні заклепок

Ще одним з прикладів може бути дефектоскоп Leotest VD 3.03 розроблений у роботі [20] який було впроваджено в практику технічного обслуговування авіаційної техніки на підприємствах, таких як “АНТОНОВ”, Львівський державний авіаційно-ремонтний завод та Конотопський авіаремонтний завод “АВІАКОН”.

Дефектоскоп було створено на основі режиму автогенератора та застосування мініатюрних однокотушкових вихрострумових перетворювачів (рис 1.7) для виявлення втомних тріщин, що виникають у конструкціях крила та фюзеляжу, а також авіаційних двигунів. Як інформативний параметр використовувалася частота проходження імпульсів високочастотних коливань. Важливою особливістю розробленої автогенераторної схеми є ефективне придушення впливу відриву (зміни зазору між перетворювачем та поверхнею контролюваного об'єкта під час сканування)

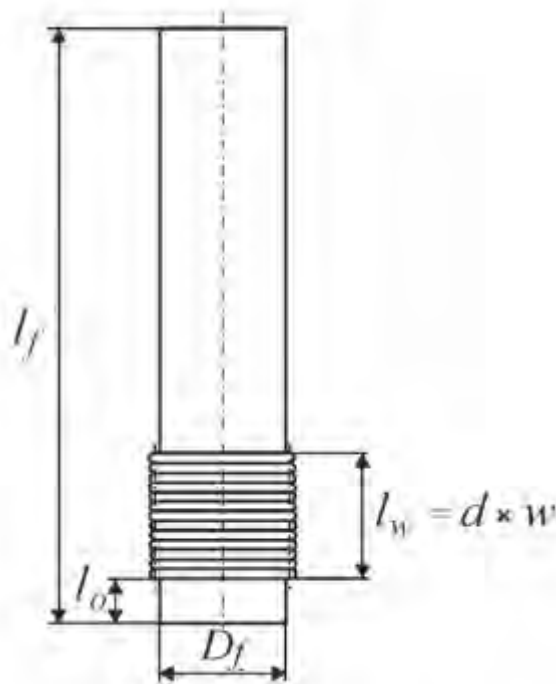


Рис 1.7. Конструкція чутливого елементу однокотушкового вихрострумового перетворювача з феритовим сердечником

Для оцінки сигналів перетворювача було використано реальний фрагмент клепаного вузла літака з тріщиною. Сигнали в комплексній площині були

отримані при скануванні впоперек кромки заклепки (рис. 1.8а) та для кругового сканування вздовж кромки заклепки (рис. 1.8б).

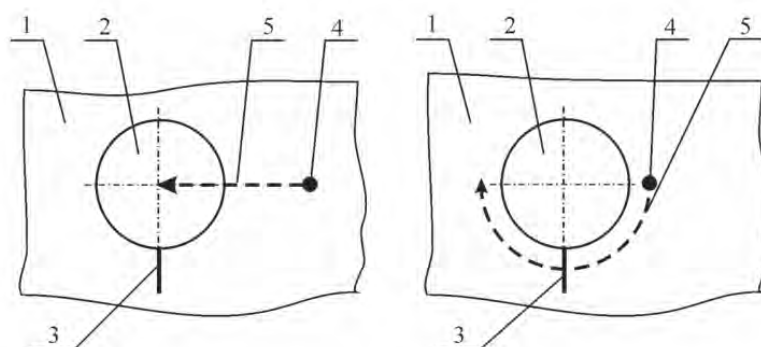


Рис 1.8. Лінії сканування для оцінки впливу краю заклепки (а) та тріщини (б):
1 – поверхня, 2 – заклепка, 3 – втомна тріщина, 4 – точка рівноваги, 5 – лінії сканування перетворювача.

Сигнали при скануванні були отримані та представлені на рис. 1.9.



Рис 1.9. Сигнали однокатушкового перетворювача в комплексній площині орієнтованого горизонтально у вихідному вигляді (а) та після перетворення (б)

Достатньо великий сигнал кромки заклепки був орієнтований горизонтально обертанням комплексної площини, у цьому випадку найбільший сигнал відриву посідає на третій квадрант комплексної площини (рис. 1.9). Але було можливо виділити невеликий сигнал, пов'язаний із тріщиною. Для кращого

розрізнення сигналу дефекту та кромки заклепки застосували додаткове посилення у вертикальному напрямку, як показано на рис. 1.9б. Після такого налаштування сканування в області заклепки стало можливо здійснювати в різних напрямках, а не тільки з постійною відстанню від краю заклепки. Подана процедура контролю області заклепки була впроваджена в практику контролю літаків “АНТОНОВ”.

1.4. Постановка задачі дослідження

Задачою дослідження є розробка вихрострумового приладу контролю заклепкового з’єднання листів авіаційної техніки товщиною 3 мм з алюмінію. Для створення даного приладу потрібно розробити структурну схему, електричну принципову, до складу якої повинні входити мікроконтролер, аналогово-цифровий перетворювач, цифровий синтезатор сигналів, підсилювач сигналу вихрострумового перетворювача та сигналу синтезатору, фільтр низьких частот, вихрострумний перетворювач, а також важливо щоб у системі було достатньо оперативної пам’яті для отримання результатів приладу у реальному часі.

Під час виконання необхідно обґрунтувати режими роботи та проаналізувати електричні сигнали вихрострумового накладного перетворювача мультидиференціального типу, що надасть вихідну інформацію для структурного розрахунку вихрострумового приладу. Крім того поставлена задача моделювання сигналів вихрострумового перетворювача у програмному пакеті MATLAB, визначення інформативних параметрів сигналу – амплітуди та фази, за гармонічного збудження вихрострумового перетворювача та проведення дослідження сигналів за зміни його параметрів при скануванні ділянки ОК з дефектом.

					ПК11.07.1760.00.000ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки до розділу

В першому розділі було розглянуто клепані з'єднання алюмінієвих листів як об'єкт контролю авіаційної техніки. Було проаналізовано затребуваність та важливість завдання контролю клепаних з'єднань, міжнародні та вітчизняні стандарти, що стосуються даної галузі, а також характерні дефекти та методи НК, які можуть бути використані для виявлення цих дефектів. Було розглянуто фізичку сутність вихрострумового методу контролю, а саме він користується великим попитом даної галузі, та методи його застосування для контролю авіаційної техніки. Було розглянуто 2 приклади вже існуючих приладів контролю авіаційної техніки, кожен з яких було впроваджено до застосування у вітчизняних компаніях. Було наведено як конструкцію вихрострумових перетворювачів, так і наочні результати їх роботи на зразках, та методи контролю які для них застосовують, як наприклад вертикальне посилення для Leotest VD 3.03. Також було поставлено задачу розроблення приладу для виконання вихрострумового контролю авіаційної техніки, за допомогою якого можна буде обслідувати листи та заклепкові з'єднання на наявність дефектів. До складу розробки також входить розробка вихрострумового перетворювача та моделювання сигналу з подальшим його аналізом та симуляцією дефекту.

					ПК11.07.1760.00.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

РОЗДІЛ 2. Розроблення вихрострумowego приладу контролю клепаних з'єднань алюмінієвих листів

2.1. Розроблення структурної схеми вихрострумowego приладу

Для реалізації даного приладу було сформовано вимоги за якими приладу потрібно мати мікроконтролер, цифровий синтезатор сигналів, аналого-цифровий перетворювач, підсилювачі сигналів, вихрострумовой перетворювач та за потреби додаткову пам'ять яка дозволить обробляти інформацію в реальному часі та дасть змогу зменшити затримки та навантаження на мікроконтролер. За даними вимогами запропоновано структурну схему вихрострумowego приладу зображену на рис 2.1.

Надається за запитом

Рис 2.1. Структурна схема вихрострумowego приладу

ВСП мультидиференціального типу [3] складається з котушки збудження $W1$ та двох пар диференціально включених вимірювальних котушок – $W2$ і $W3$ та $W4$ і $W5$. Таке включення вимірювальних котушок забезпечує компенсацію неінформативних складових вигналів ВСП – напруги холостого ходу та внесеної напруги. Таким чином на виході ВСП формується сигнал від дефекту, який утворюється при скануванні дефектної ділянки ОК перетворювачем.

На структурній схемі рис.2.2 зв'язок мікроконтролеру з персональним комп'ютером здійснюється за допомогою інтерфейсу USB (Universal Serial Bus – Універсальна послідовна шина). Зв'язок МК (Мікроконтролер) з DDS (Direct digital synthesis - Цифровий синтезатор сигналів) здійснено за допомогою SPI1 (Serial Peripheral Interface - Послідовний периферійний інтерфейс), а з АЦП (Аналогово-цифровий перетворювач), підсилювачем з керованим підсиленням

					ПК11.07.1760.00.000ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

та модулями пам'яті – за допомогою SPI2. Розділення SPI на 2 різних інтерфейси зроблено з тих міркувань, що під час роботи з різними підключеними елементами до однієї шини потрібно подавати сигнал керування на один з них, тобто поки один з елементів буде отримувати сигнал, інший його отримувати не буде, тому для стабільної та паралельної роботи DDS з АЦП потрібно розділення їх інтерфейсів. У ідеальному випадку треба було б ще виділити для пам'яті окремий SPI3, але МК з двома шинами SPI більш легкодоступні ніж з трьома.

Генератор струму збудження забезпечує формування гармонічного сигналу збудження заданої частоти і рівня. Він складається з DDS та підсилювача його вихідного сигналу який буде подаватися на котушку збудження ВСП (Вихрострумний перетворювач). Модуль вимірювання параметрів сигналу складено з підсилювачу сигналу вимірювальної котушки ВСП, сигнал після якого фільтрується та потрапляє у підсилювач з керованим коефіцієнтом підсилення для того щоб забезпечити узгодження діапазону перетворення АЦП та діапазону зміни амплітуди сигналу ВСП. Після АЦП сигнал через SPI2 передається у МК, або записується у пам'ять ОЗП1 (Оперативний запам'ятовувальний пристрій) та ОЗП2.

Обчислення та аналіз інформаційних параметрів сигналу ВСП виконується в ПК.

2.2. Аналіз вихрострумного перетворювача мультидиференціального типу та розрахунок його електричних сигналів

Принцип роботи накладного вихрострумного перетворювача мультидиференціального типу представлено у роботі [3]. Перетворювач має 1 котушку збудження та 4 вимірювальні котушки. Конструкцію чутливих елементів ВСП представлено на рис 2.2; на рис 2.3 подано загальний вид системи «ВСП – ОК» з позначенням необхідних для розрахунку параметрів цієї системи.

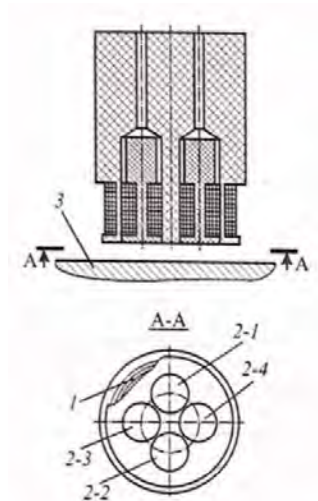


Рис 2.2. Чутливий елемент ВСП подвійного диференціювання з внутрішніми ВО (Вимірювальна обмотка); 1 – ОЗ (Обмотка збудження); 2 – 1, 2 – 2, 2 – 3 та 2 – 4 – ВО; 3 – ОК (Об’єкт контролю).

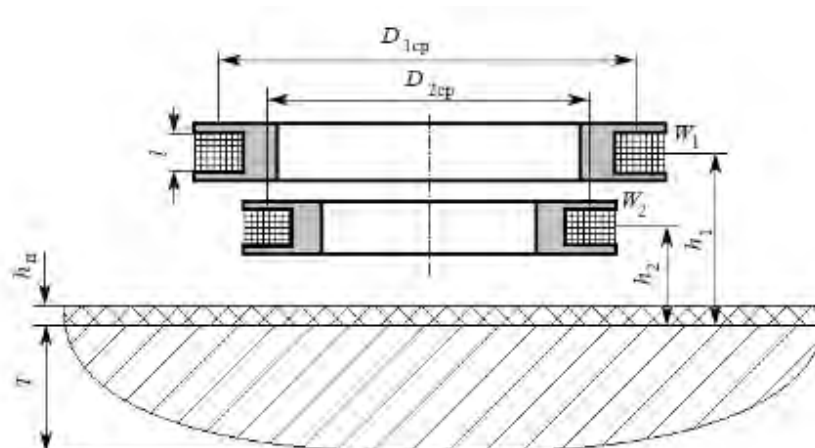


Рис 2.3. Система “ВСП накладного типу – ОК”

2.2.1. Початкові дані, необхідні для розрахунку сигналів ВСП і які обрані з вимог Технічного завдання проєкту та згідно із запропонованим конструктивним рішенням, наведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1. Вихідні дані для розрахунку сигналів ВСП

Параметр	Значення	Значення у основних одиницях SI
W_1 – Кількість витків ОЗ	30	

W_2 – Кількість витків ВО	60	
h_{Π} – Товщина покриття ОК	0.1мм	$0.1 * 10^{-3}\text{м}$
D_{cp1} – Діаметр котушки збудження	13мм	$13 * 10^{-3}\text{м}$
D_{cp2} – Діаметр вимірювальної котушки	4мм	$4 * 10^{-3}\text{м}$
h_1 – Відстань від котушки збудження до ОК	1мм	$1 * 10^{-3}\text{м}$
h_1 – Відстань від вимірювальної котушки до ОК		
T – Товщина ОК	3мм	$3 * 10^{-3}\text{м}$
β – Узагальнений параметр	10	
d_1 – Діаметр проводу котушки збудження	0.15мм	$0.15 * 10^{-3}\text{м}$
d_2 – Діаметр проводу вимірювальної котушки		
H – Глибина дефектів	3мм	$3 * 10^{-3}\text{м}$
μ_0 – Магнітна стала	$4\pi * 10^{-7}\text{Гн/м}$	
γ – Електропровідність алюмінію	$37.7 * 10^{-6}\text{См/м}$	
ρ – Питомий електричний опір міді	$1.68 * 10^{-8}\text{Ом * м}$	
λ – Коефіцієнт тепловпередачі	8	
$[\theta]_d$ – Допустима температура перегріву	2°C	

2.2.2. Визначимо аксиальну довжину котушки збудження:

$$l = d_1 * W_1 = 0.15 * 10^{-3} * 30 = 4.5 * 10^{-3}\text{м} = 4.5\text{мм}.$$

2.2.3. Розрахуємо силу струму збудження з умови відсутності перегріву:

$$I = 0.8 * I_{гр} = 0.8 * \sqrt{\frac{\lambda S_{ox}[\theta]_d}{R}},$$

де $I_{гр}$ – граничний струм, S_{ox} – площа охолодження котушки збудження, R – активний опір котушки збудження, який визначається за формулою:

$$R = \frac{4\rho W_1 D_{cp1}}{d_1^2}.$$

					ПК11.07.1760.00.000ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Знайдемо спочатку площу охолодження котушки збудження (рис.2.3), яку в першому наближенні можна представити полим цилиндром з висотою $l = 4.5\text{мм}$, зовнішнім діаметром $13 - 0.15 = 12.85\text{мм}$ та внутрішнім діаметром $4 + 0.15 = 4.15\text{мм}$:

$$S_{\text{вехнього та нижнього кільця}} = 2\pi * \left(\left(\frac{12.85 * 10^{-3}}{2} \right)^2 - \left(\frac{4.15 * 10^{-3}}{2} \right)^2 \right) =$$

$$= 0.000232321 \approx 0.00023\text{м}^2$$

$$S_{\text{зовнішнього боку}} = (\pi * 12.85 * 10^{-3} * 4.5 * 10^{-3}) =$$

$$= 0.000181663 \approx 0.00018\text{м}^2$$

$$S_{\text{внутрішнього боку}} = (\pi * 4.15 * 10^{-3} * 4.5 * 10^{-3}) =$$

$$= 0.0000586692 \approx 0.00006\text{м}^2,$$

$$S_{\text{ох}} = 0.00047\text{м}^2.$$

Розрахуємо активний опір котушки збудження та $I_{\text{гр}}$:

$$R = \frac{4\rho W_1 D_{\text{ср1}}}{d_1^2} = \frac{4 * 1.68 * 10^{-8} * 30 * 13 * 10^{-3}}{(0.15 * 10^{-3})^2} = 1.1648 \text{ Ом}$$

$$I_{\text{гр}} = \sqrt{\frac{\lambda S_{\text{ох}}[\theta]_{\text{д}}}{R}} = \sqrt{\frac{8 * 0.00047 * 2}{1.1648}} = 0.08 \text{ А.}$$

Отже маємо

$$I = 0.8 * I_{\text{гр}} = 0.8 * 0.08 = 0.064 \text{ А.}$$

2.2.4. Розрахуємо частоту струму збудження з умови:

$$f = \frac{\beta^2}{2\pi D_e^2 \gamma \mu_0},$$

де D_e – еквівалентний діаметр контуру вихрових струмів, який визначається за формулою:

$$D_e = 1.5 * h_1 + D_{\text{ср1}} = 1.5 * 1 + 13 = 14.5\text{мм} = 14.5 * 10^{-3}\text{м},$$

$$f = \frac{10^2}{2\pi * (14.5 * 10^{-3})^2 * 4\pi * 10^{-7} * 37.7 * 10^6} = 1597.8 \text{ Гц.}$$

2.2.5. Визначимо кутову частоту:

					ПК11.07.1760.00.000ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\omega = 2\pi f = 2\pi * 1597.8 = 10040 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

2.26. Розрахуємо глибину проникнення вихрових струмів при контролі листа з алюмінієвого сплаву (матеріал немагнітний):

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\gamma\mu_0}} = \sqrt{\frac{2}{10040 * 37.7 * 10^6 * 4\pi * 10^{-7}}} = 0.0021 \text{ м} = 2.1 \text{ мм}.$$

2.2.6. Розрахуємо напругу холостого ходу:

$$U_{\text{оп}} = 1.35\omega\mu_0 W_1 W_2 (m - 0.3) I (D_{\text{ср1}} D_{\text{ср2}})^{0.5},$$

де $m = \frac{D_{\text{ср1}}}{D_{\text{ср2}}}$ – відношення діаметрів котушок

$$m = \frac{13}{4} = 3.25$$

$$U_{\text{оп}} = 1.35 * 10040 * 4\pi * 10^{-7} * 30 * 60 * (3.25 - 0.3) * 0.064 * (13 * 10^{-3} * 4 * 10^{-3})^{0.5} =$$

$$= 0.0417401 \approx 0.0417 \text{ В}.$$

2.2.7. Визначимо відносну товщину ОК:

$$T^* = \frac{T}{D_e} = \frac{3}{14.5} = 0.207.$$

2.2.8. Визначимо за допомогою годографа складові відносної комплексної внесеної напруги $U_{\text{вн}}^*$ вимірювальної котушки накладного ВСП при контролі листа з алюмінієвого сплаву:

					ПК11.07.1760.00.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

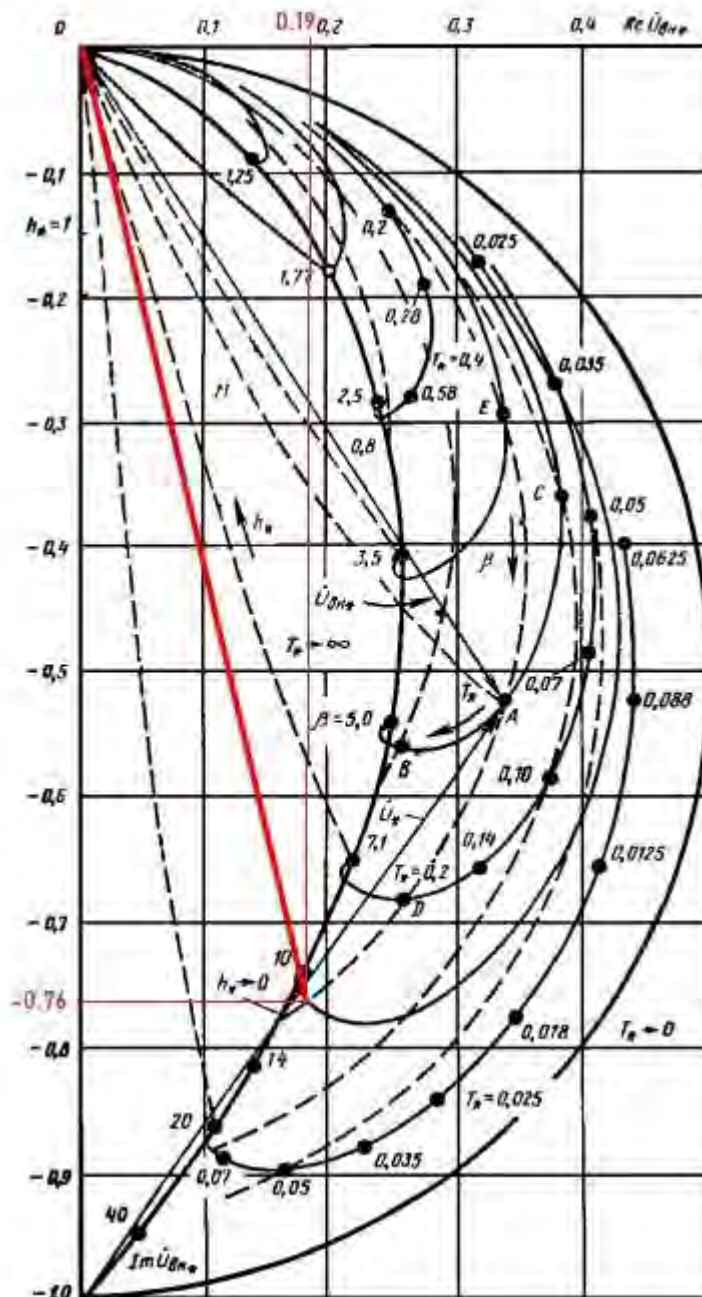


Рис 2.4. Визначення U_{BH}^* за годографом відносних внесених напруг внакладного ВСП

За годографом отримаємо результат у виді:

$$Re U_{BH}^* = 0.19$$

$$Im U_{BH}^* = -0.76$$

$$U_{BH}^* = (0.19 - 0.76j) \text{ В}$$

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ПК11.07.1760.00.000ПЗ

Арк.

33

2.2.9. Визначимо абсолютну внесену напругу:

$$U_{\text{вн}} = U_{\text{оп}} * (ReU_{\text{вн}}^* + ImU_{\text{вн}}^* * j) * e^{-3\xi},$$

де $\xi = \frac{h_1 + h_2}{D_e}$ – безрозмірний параметр

$$\xi = \frac{2}{14.5} = 0.138,$$

а напруга холостого ходу визначається виразом:

$$U_0 = j * U_{\text{оп}} * e^{\frac{-3c}{D_1}},$$

де $c = h_1 - h_2$.

Оскільки в реальній конструкції ВСП $h_1 = h_2$, то розрахунок дає такий результат:

$$U_0 = j * U_{\text{оп}} = 0.0417j \text{ В.}$$

Тоді маємо

$$U_{\text{вн}} = 0.0417 * (0.19 - 0.76j) * e^{-3*0.138} = (0.0052 - 0.0209j) \text{ В.}$$

2.2.10. Визначимо відносне значення напруги від дефекту ΔU_* на виході ВСП за допомогою представленого на рис. 2.5 графіку залежності $\Delta U_*(h^*, \beta)$, де

$$h^* = \frac{T}{D_e} = 0.207.$$

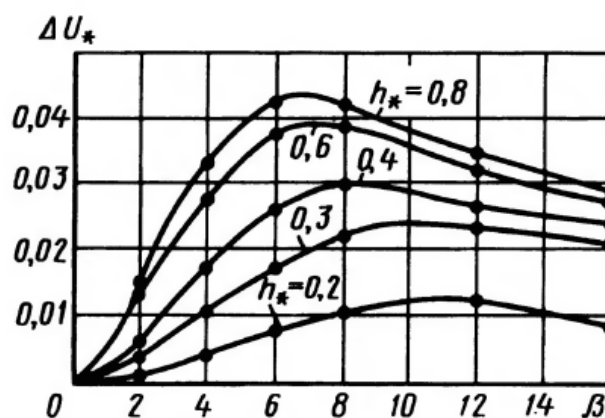


Рис 2.5. Графік залежності напруги $\Delta U_*(h^*, \beta)$

За результатами графіку отримано таке орієнтовне значення:

$$\Delta U_* \approx 0.012$$

2.2.11. Визначимо вихідний сигнал ВСП. Оскільки в добре збалансованому мультидиференціальному ВСП внесена напруга та напруга холостого ходу компенсуються, вихідна напруга дорівнюватиме напрузі від дефекту. Отже амплітудне значення цієї напруги за наявності дефекта становитиме:

$$U_d = 0.012 * 0.0417 = 0,0005V = 0,5mV.$$

2.3. Вибір елементної бази для реалізації електричних принципових схем вихрострумового приладу

Завданням вибору елементів полягає в пошуку оптимальних компонентів які будуть задовільняти вимоги проєкту. Почнемо з вибору МК серед яких можна зробити вибір між STM32F103C8T6, STM32F405RGT6, ESP32. В цей список не було включено ARDUINO так як його потужності недостатньо для використання в розроблюваному приладі. Розглянемо спочатку STM32F103C8T6 та STM32F405RGT6 (рис 2.6.) які мають ядро ARM Cortex M3 та ARM Cortex M4 відповідно. Порівняння їх деяких характеристик, які цікаві для нашого проєкту наведено у табл. 2.2.



Рис 2.6. Зовнішній вигляд а) STM32F103C8T6 та б) STM32F405RGT6

Таблиця 2.2. Порівняння характеристик МК типу STM

Параметр	STM32F103C8T6	STM32F405RGT6
Вартість	5.11\$	11.31\$
Кількість пінів	48	64
Ядро	ARM Cortex M3	ARM Cortex M4
Максимальна частота	72МГц	168МГц
Flash пам'ять	64kb	1024kb
SRAM	20kb	192+4kb
Кількість Таймерів	7	17
Кількість SPI	2	3

Як видно з таблиці, STM32F405RGT6 має кращі характеристики ніж STM32F103C8T6, але коштує у 2 рази більше та має надмірну потужність для проекту, а також більш складну реалізацію, єдине що дійсно приваблює у виборі STM32F405RGT6 так це наявність 3 SPI, що не завадило би роботі приладу, але переплата у 2 рази не виправдає цього. Також споживання у STM32F103C8T6 менше, що дасть змогу довше працювати від батареї або акумулятора. Для цього приладу буде достатньо потужності від STM32F103C8T6 тому оберемо його, а не більш потужний STM32F405RGT6.

Можна також розглянути альтернативу у вигляді популярного ESP32, але в нього є деякі недоліки, які ставлять його нижче STM32F103C8T6. ESP32 як і STM32F103C8T6 має два SPI, але у STM32F103C8T6 робота з DMA набагато простіша через його апаратну підтримку, а так як DMA це ключовий момент для прийому даних з АЦП та інших компонентів, то у цьому випадку STM32F103C8T6 виглядає краще. Також одна з головних переваг STM32F103C8T6 це простота реалізації RTOS (система реального часу), коли у ESP32 FreeRTOS майже обов'язкове та загалом STM32F103C8T6 має більш зручну середу розробки програмного забезпечення та відладки.

Для АЦП потрібно використати такий варіант, в якого буде більше ніж 14 біт розрядності, так як в нашому випадку потрібна висока точність перетворення сигналу, а через те що під час квантування нормальна «гладкість» результату починається з розрядності у 14 біт, то краще було б обрати 16-ти розрядний АЦП. Також було б зручніше якщо АЦП буде мати у своєму складі PGA (Programmable Gain Amplifier – підсилювач з керованим коефіцієнтом підсилення), щоб зменшити кількість елементів схеми, та спростити реалізацію. Наприклад можна взяти ADS8328, ADS124S08, ADS1118 або MCP3465R. Порівняння характеристик цих АЦП містить табл. 2.3.

Таблиця 2.3. Порівняння характеристик АЦП різних типів

Параметр	ADS8328	ADS124S08	MCP3465R	ADS1118
Розрядність	16	24	16/24	16
Кількість каналів	1	8	4	2/4
Підключення через інтерфейс	SPI	SPI	SPI	SPI
Наявність PGA	Відсутній	є	є	є
Швидкість (SPS)	250ksps	2.0ksps	До 153.6ksps	860sps
Ціна	11.3\$	14.75\$	2.38\$	4.89\$
Примітки		Складна конфігурація		Високоточний, але повільний

За результатами аналізу характеристик АЦП можна зробити висновок, що більше всього для приладу підійдуть мікросхеми ADS8328 та MCP3465R. ADS124S08 занадто дорогий та має складну реалізацію, що буде складніше використати ніж простіші аналоги. ADS1118 хоч і точний, але повільний, через свою ціну за свої якості він може бути гарним вибором для дешевих приладів.

ADS8328 та MCP3465R показують себе краще всього, якщо не дивитися на різницю ціни приблизно в 5 разів, то ADS8328 гарний вибір, але він коштує дорожче, а також не має в собі PGA, тобто потребує додаткових витрат. Серед усіх кандидатів раціональним вибором є перетворювач MCP3465R який за невеликої вартості має потрібну точність, швидкодію та містить PGA.

У ролі DDS можна зробити вибір наприклад між мікросхемами AD9834 та AD9850 які досить схожі, але мають певні відмінності. Ціна в них майже однакова, але AD9834 трошки дорожчий. Кожен з цих цифрових синтезаторів гарно виконує свої задачі, але для даного приладу більше підійде AD9834 так як на відміну від AD9850 він має можливість змінювати фазу сигналу без перезавантаження пристрою, що дуже корисно, особливо для даного випадку. Також AD9834 має набагато більшу спектральну чистоту ніж AD9850, що теж є дуже важливим, тому кращим вибором для пристрою буде AD9834.

Для виконання функції підсилення сигналу DDS буде використовуватися ОРА541АР який має високу потужність для формування струмових сигналів до 5А при високих напругах, а також працює стабільно при індуктивних навантаженнях та дозволяє передавати сигнал збудження без спотворень, в додаток до цього, ще має захист від перенавантаження та високу термостабільність. Через всі названі переваги ОРА541АР дозволить забезпечити стійке та стабільне формування струмового сигналу, отже і створення необхідного електромагнітного поля котушкою збудження в широкому динамічному діапазоні.

У приладі буде використано дві статичних оперативних пам'яті 23LC1024 які є SRAM (Static Random Acces Memory – статична оперативна пам'ять з довільним доступом) для запису та збереження даних, що дозволить обробляти результати у режимі близькому до реального часу, що буде дуже корисно у випадку автоматизованої вихрострумової дефектоскопії під час сканування поверхні ОК, де потрібна чутливість до короткотривалих змін параметрів сигналу ВСП. Коли у першу SRAM будуть записуватися дані, то дані другого SRAM будуть оброблятися, що усуне колізію між зчитуванням та записом, що

					ПК11.07.1760.00.000ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

виникає при застосуванні одного SRAM. Також в даному випадку застосування як альтернативи SDRAM не вийде, так як це потребує зовнішнього контролера або більш потужний МК, наприклад розглянутого вище STM32F405RGT6.

Тепер коли основні елементи схеми обрані, можна розглянути питання вибору елементної бази для реалізації інших менш важливих складових електричної схеми приладу. Наприклад для посилення сигналу перед АЦП та його фільтрацією доцільно використати OP2177ARZ, що має дуже низьку вхідну напругу зміщення, що не буде вносити систематичну похибку у виміри слабого сигналу. Також OP2177ARZ має низький рівень шуму тому підійде до чутливих вимірів, та має високу стабільність та точність при цьому будучи прецизійним підсилювачем з rail-to-rail виходом, що дає змогу використати його ще й для зворотнього зв'язку підсилювача OPA541AP.

Феритовий фільтр BLM18AG102SN1D буде використано на схемі з DDS для подавлення високочастотних завад які генеруються DDS. Для забезпечення стабільної частоти генерації сигналу DDS буде використовуватися зовнішній кварцовий генератор DSC1001CI1-050.0000. Використання зовнішнього джерела високої стабільності гарантує точність вихідної частоти та її повторюваність, що критично важливо для даного приладу.

Стабілізаторами живлення всієї схеми будуть реалізовані на мікросхемах L78L05ABD13TR для перетворення напруги живлення з +15В у +5В та L79L05ABD для перетворення напруги живлення з -15В у -5В. Ці стабілізатори були обрані через те що DC-DC перетворювачі генерують високочастотні пульсації які можуть індукуватися в котушку, що призведе до спотворення вимірів. В цілому це широко поширені лінійні стабілізатори з низьким рівнем шуму, простою реалізацією та надійністю. Для перетворення +5В у +3.3В застосовано лінійний прецизійний стабілізатор LM4120AIM5-3.3_NOPB у парі з VCP69 що дозволить отримати опорну напругу 3.3В з високою точністю та забезпечити велику навантажувальну здатність.

У якості підключення USB-B до ПК було обрано роз'єм типу 5787834-2 та TVS-фільтр (Transient Voltage Suppressor – супресор перенапруг) USBLC6-

					ПК11.07.1760.00.000ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

напруги аналогової частини. Також виходи IOUT та IOUTB проходять через фільтрацію у вигляді RC фільтру.

2.5. Опис схеми електричної принципової АЦП

На рис 2.8. зображено схему електричну принципову АЦП.

Надається за запитом

Рис 2.8. Схема електрична принципова АЦП

Сигнал від вихрострумового перетворювача посилюється за допомогою OP2177ARZ та фільтрується після чого потрапляє у АЦП, звідки цифровий сигнал потрапляє у МК за допомогою SPI2. Також за допомогою SPI2 можна записати дані у пам'ять 23LC1024. АЦП також має вбудований PGA що дозволить ще посилити сигнал за допомогою відправки потрібної команди через SPI2.

2.6. Опис схеми мікроконтролерного модуля обробки сигналів ВСП

На рис 2.9 зображено схему електричну принципову мікроконтролерного модуля обробки сигналів ВСП. Завдяки 5787834-2 здійснюється з'єднання МК з ПК за допомогою USB, а TVS-фільтр USBLC6-2SC6 забезпечує надійність та безпеку при підключенні та вимиканні USB кабелю. Також у правій частині схеми розміщено живлення пристрою, яке забезпечено через стабілізатори L78L05ABD13TR та L79L05ABD, а також роботою LM4120AIM5-3.3_NOPB у парі з VCP69. Завдяки цим стабілізаторам схема має надійну напругу в 5В та 3.3В.

					ПК11.07.1760.00.000ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Надається за запитом

Рис 2.9. Схема електрична принципова мікроконтролерного модуля обробки сигналів ВСП

Висновки до розділу

У першому підрозділі було розглянуто запропоновану структурну схему пристрою, яка задовільняє вимоги технічного завдання, та проаналізовано взаємозв'язок між різними складовими схеми.

У другому підрозділі було обґрунтовано вибір робочої частоти приладу та розраховано вихідні сигнали накладного мультидиференціального ВСП в задачі контролю листів з алюмінієвих сплавів.

У третьому підрозділі було виконано аналіз характеристик електронних компонентів для реалізації приладу, в результаті чого було обрано потрібні компоненти. Критеріями відбору були низька вартість, потрібні для реалізації проекту технічні характеристики та помірний рівень складності використання мікросхем у приладі.

В четвертому, п'ятому та шостому підрозділі було представлено ряд електричних принципових схем пристрою, які мають найбільшу цінність та визначають його можливості як засобу вихрострумowego НК.

					ПК11.07.1760.00.000ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3. Моделювання процесу обробки сигналів ВСП та оцінювання їх інформаційних параметрів

3.1. Модель сигналів ВСП

При подачі змінного струму на котушку збудження утворюється магнітне поле яке індукує вихрові струми в ОК, що утворюють своє магнітне поле яке впливає на параметри котушки (амплітуда, фаза та імпеданс). Коли є наявність дефекту у зоні дії котушки, то структура вихрових струмів порушується, що призводить до змін вимірювальних параметрів сигналу ВСП. Якщо підсумувати сказане, то виходить, що вихідний сигнал ВСП являє собою відклик системи «ВСП-ОК» на взаємодію змінного магнітного поля збуджуючої котушки з електропровідною структурою ОК та зміни в цій структурі призводять до локальних спотворень вихрових струмів, що призводить до відхилень амплітудно-фазових параметрів сигналу.

Для одночастотної системи збудження гармонічний сигнал збудження ВСП буде мати такий загальний вид:

$$a(t) = A * \cos(2\pi ft + \varphi), \quad t = 0 \dots T_c, \quad (3.1)$$

де:

A – амплітуда сигналу,

f – частота збудження,

t – час,

φ – початкова фаза сигналу,

T_c – час спостереження сигналу

Під час спанування ОК відбувається модуляція амплітуди і фази сигналу ВСП внаслідок структурних неоднорідностей характеристик матеріалу ОК, викликаних наявними дефектами. Крім того формування сигналу ВСП супроводжується дією шумів – як зовнішніх електромагнітних шумів, щ

					ПК11.07.1760.00.000ПЗ	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

очинять вплив на електричні ланцюги приладу, так і внутрішні шуми електронних блоків приладу. Враховуючи значне число чинників, що впливають на формування шумової компоненти, можна прийняти гіпотезу про те, що шум уявляє реалізацію гауссового процесу. Тому аналізований інформаційний сигнал може бути представлений моделлю:

$$u(t) = A(t) * \cos(2\pi f t + \varphi(t)) + n(t), \quad t = 0 \dots T_c, \quad ((3.2))$$

$A(t)$ – обвідна сигналу,

f – частота збудження,

$\varphi(t)$ – модульована частина фази сигналу,

$n(t)$ – реалізація випадкового гауссового процесу з нульовим математичним сподіванням і середнім квадратичним відхиленням σ .

3.2. Постановка задачі моделювання

Метою моделювання є проведення комп'ютерного моделювання процесу опрацювання сигналів ВСП з метою визначення його характеристик – амплітудної та фазової, які зазнають амплітудно-фазовій модуляції під час сканування поверхні ОК з дефектом мультидиференціальним вихрострумовим перетворювачем. Сигнали ВСП спостерігаються в адитивній суміші з шумовою складовою, яка визначається як внутрішніми шумами електронних блоків, так і зовнішніми електромагнітними завадами.

Визначення характеристик сигналу ВСП виконувалось за допомогою дискретного перетворення Гільберта [21, 24]. В загальному виді це перетворення представляється згорткою вихідного сигналу $u(t)$ та ядра перетворення $1/\pi t$

$$\mathcal{H}\{u(t)\} = u(t) * \left(\frac{1}{\pi t}\right). \quad (3.3)$$

В середовищі Matlab, в якому проводиться моделювання, операція дискретного перетретворення Гільберта реалізується командою `hilbert`, яка повертає комплекснозначний аналітичний сигнал

					ПК11.07.1760.00.000ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$z(t) = u(t) + j * \mathcal{H}\{u(t)\}, \quad (3.4)$$

що пов'язано з особливостями реалізації цієї команди через дискретне перетворення Фур'є. Тому власне гільберт-образ сигналу (квадратурна компонента аналітичного сигналу) визначається як уявна частина аналітичного сигналу

$$\mathcal{H}\{u(t)\} = \text{Re}\{z(t)\}. \quad (3.5)$$

Викорисновуючи сигнал $\mathcal{H}\{u(t)\}$ миттєві значення амплітуди сигналу ВСП визначаються як

$$A(t) = |z(t)| = \sqrt{u(t)^2 + \mathcal{H}\{u(t)\}^2}, \quad (3.6)$$

а миттєві значення фази сигналу визначаються за формулою

$$\phi(t) = \arctan\left(\frac{\mathcal{H}\{u(t)\}}{u(t)}\right) + L\{u(t), \mathcal{H}\{u(t)\}\}, \quad (3.7)$$

де $L\{u(t), \mathcal{H}\{u(t)\}\}$ – оператор розгортання фазової характеристики сигналу за межі однозначного визначення функції арктангенса.

Визначення модульованої частини фази сигналу здійснюється шляхом влучення лінійної частини фази:

$$\phi_{\text{мод}}(t) = \phi(t) - 2\pi f_0 t. \quad (3.8)$$

Оцінка похибок амплітудної та фазової модуляції здійснювалась шляхом порівняння відновлених значень заданих в моделі і обчислених за формулами (3.6) – (3.8) відповідних миттєвих значень амплітуди і фази сигналу.

Дослідження проводились на модельному гармонічному сигналі ВСП частотою $f_0=500\text{Гц}$ та амплітудою 1 В, кий модулювався за амплітудою та фазою на ділянці часу між 0.045с та 0.055с (повний час спостереження сигналу становив 0.1 с). Амплітудна та фазова модуляції реалізовані у вигляді півхвилі синусоїдного сигналу з частотою 50Гц та глибиною модуляції 0.2. Період дискретизації сигналу становить 10 мкс. Додатково до модульованого сигналу додавалась реалізація гауссового шум з нульовим математичним сподіванням і дисперсією 0.0001 В².

3.3. Розроблення моделюючої програми та проведення комп'ютерних модельних експериментів

Моделююча програма розроблена за допомогою програмного пакету MATLAB, що є загальновизнаним стандартом у сфері інженерного моделювання та аналізу сигналів. Даний пакет має потужні математичні можливості, включає в себе спеціалізовані інструменти обробки сигналів, зокрема потрібне для нашого розрахунку перетворення Гільберта, та має високу швидкість у поєднанні з простотою розробки програмних продуктів та візуалізації результатів моделювання.

На першому етапі моделювання було сформовано немодульований гармонічний сигнал частотою 500 Гц та амплітудою 1В, після чого виконано його модуляцію за амплітудою та фазою з частотою 50Гц та глибиною 0.2 у проміжку часу між 0.045с та 0.055с та додано шумову компоненту. Код моделюючої програми представлено у лістингу 3.1:

Лістинг 3.1. – Утворення немодульованого та модульованого сигналів
Надається за запитом

Графіки вихідного сигналу, функцій модуляції його амплітуди та фази, а також графік вихідного сигналу наведені на рис.3.1. та отримаємо результат який можна побачити на рис 3.1.

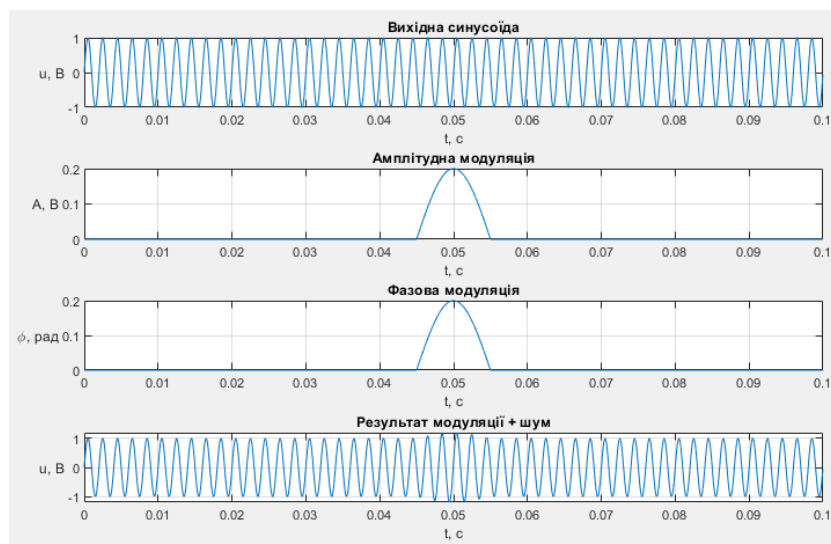


Рис 3.1. Результат виконання коду наведеного у лістингу 3.1.

На другому етапі моделювання визначались характеристики модульованого сигналу згідно формул (3.6) – (3.8). Код моделюючої програми представлено у лістингу 3.2, а графіки, що відображають різні етапи виконання обчислень – на рис 3.2, на якому зокрема зображено:

- реальну(червоний колір), уявну (синій колір) частини аналітичного сигналу, та амплітудна характеристика сигналу(зелений колір);
- миттєва нерозгорнута фаза сигналу;
- миттєва розгорнута фаза сингналу;
- Відновлений закон фазової модуляції сигналу
- Відновлений закон амплітудної модуляції сигналу.

Лістинг 3.2. – Використання перетворення гільберта

Надається за запитом

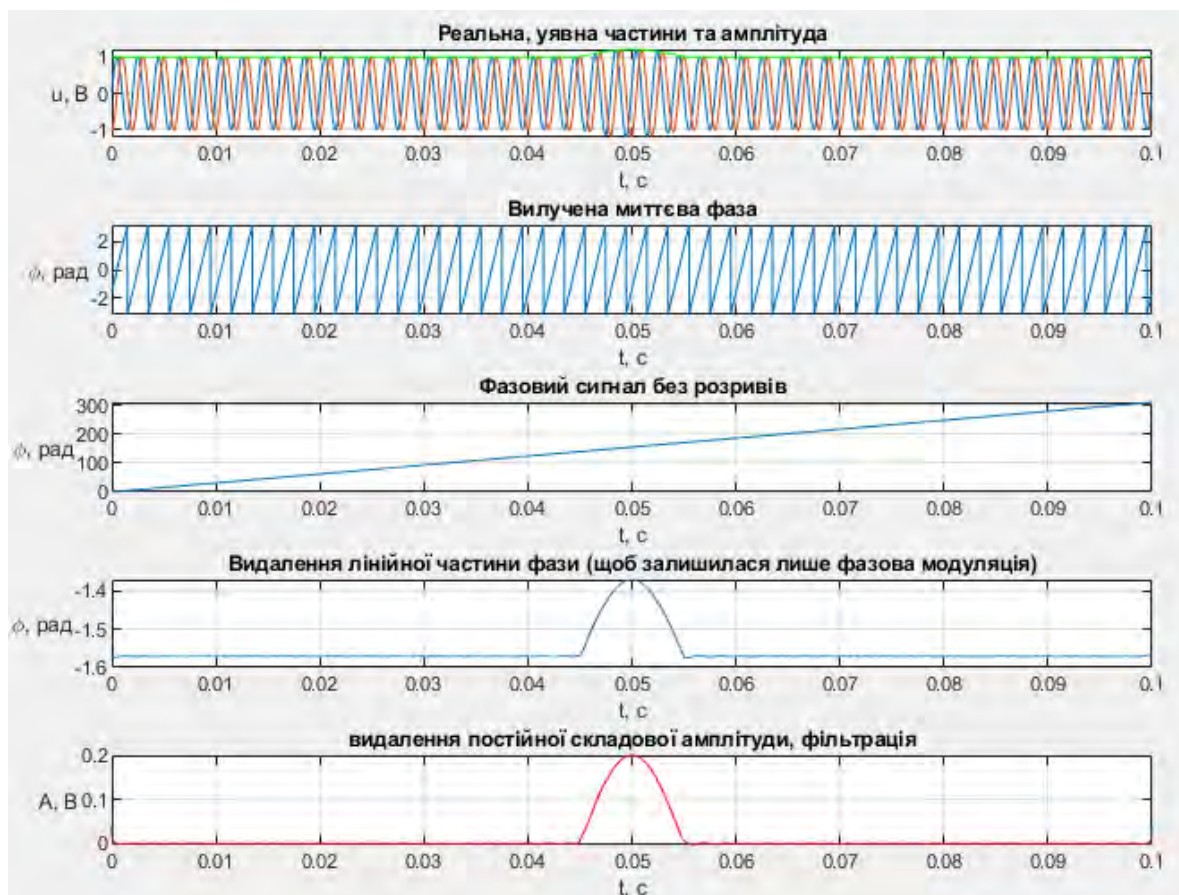


Рис 3.2. Використання перетворення гільберта за допомогою коду лістингу 3.2

Представлений на другій епюрі рис.3.2. графік нерозгорнутої фази сигналу уявляє собою пилоподібну криву, що змінюється в інтервалі значень $(\pi, -\pi)$ зі стрибкоподібною зміною від π до $-\pi$; натомість розгорнута фаза сигналу на третій епюрі уявляє собою зростаючу функцію з лінійним трендом. Операція розгортання фази реалізується командою `unwrap`.

На четвертій епюрі рис.3.2. показано отриманий за формулою (3.8) графік відновленого закону фазової модуляції, подібна з точністю до похибки перетворення заданому закону (див. рис.3.1). На останній 5 епюрі рис.3.2 представлено графік відновленої функції, за якою здійснювалась амплітудна модуляція сигналу; ця залежність змінюється в інтервалі значень 0 В до 0.2В, а

Результати моделювання підтвердили, що перетворення Гільберта ає змогу розрізняти амплітудну і фазову модуляції, які одночасно діють на гармонічний сигнал (див. Останні дві епюри на рис.3.2).

Також перевірен ефективність використання медіанного фільтру для згладжування отриманих законів модуляції, на рис.3.3 представлено фрагмент графіку функції амплітудної модуляції до і після застосування медіанної фільтрації з вікном (апертурою фільтру) 13 відліків, що дозволить згладити огинаючу та краще побачити результат (Рис 3.3).



Рис 3.3. Фрагмент функції амплітудної модуляції: червоним кольором позначено сигнал після фільтрації, а синім – до фільтрації

На третьому етапі моделювання виконувалось оцінювання похибки відновлення функцій амплітудної та фазової модуляцій. Код моделюючої програми приведено у лістингу 3.3 а результати його виконання – на рис 3.4.

Лістинг 3.3. – Порівняння результатів перетворення гільберта та утворених на початку модуляцій
Надається за запитом

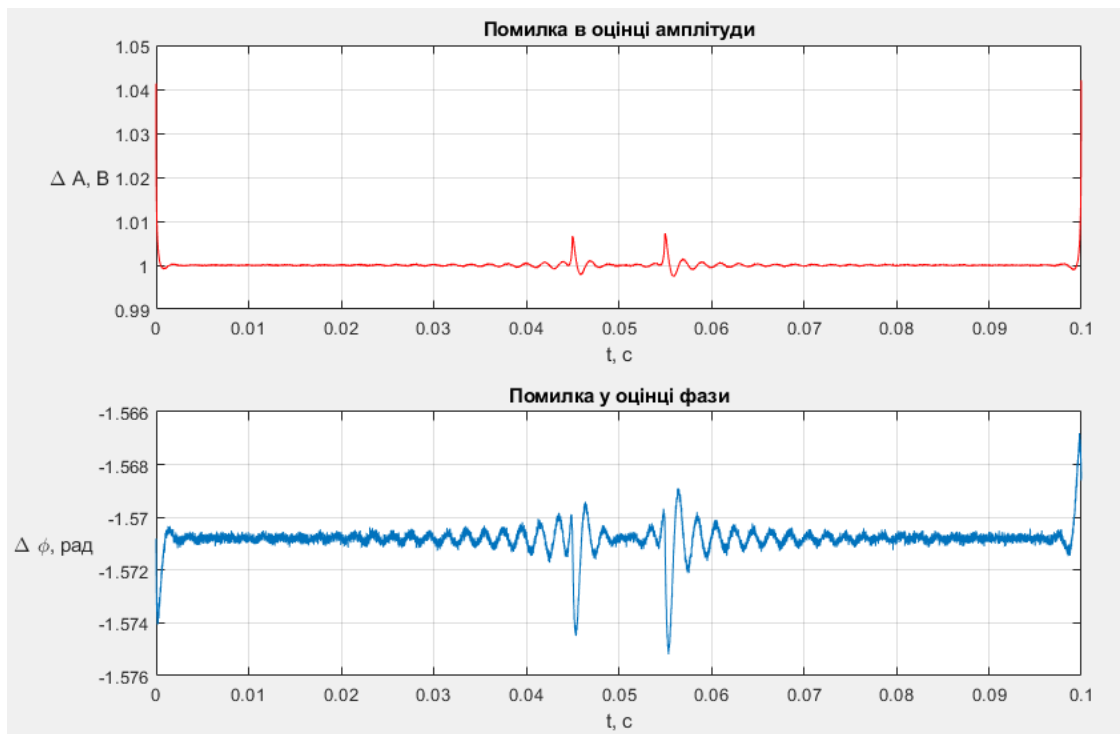


Рис 3.4. Похибка оцінювання функцій амплітудної та фазової модуляцій

З рис 3.4. видно, що у точках початку та закінчення модуляції помилка має найбільшою, що зумовлено різкою зміною похідної сигналів модуляції, а між цими спотвореннями сигнал змінюється плавно.

В цілому перетворення Гільберта показало себе гарним інструментом обробки сигналу ВСП, який дає змогу отримувати потрібні інформативні параметри та характеристики сигналів ВСП при їх динамічному змінюванні.

Наступний експеримент було проведено з метою оцінювання впливу квантування (розрядності АЦП) на результат відновлення модулюючих функцій, присутніх в сигналі ВСП. Це завдання реалізовано на симуляції роботи АЦП та порівнянні модульованого сигналу з немодульованим. Код експерименту приведено у лістингу 3.4, а результати – на рис 3.5.

Лістинг 3.4. – Реалізація симуляції АЦП для порівняння сигналів та виявлення похибки квантування

Надається за запитом

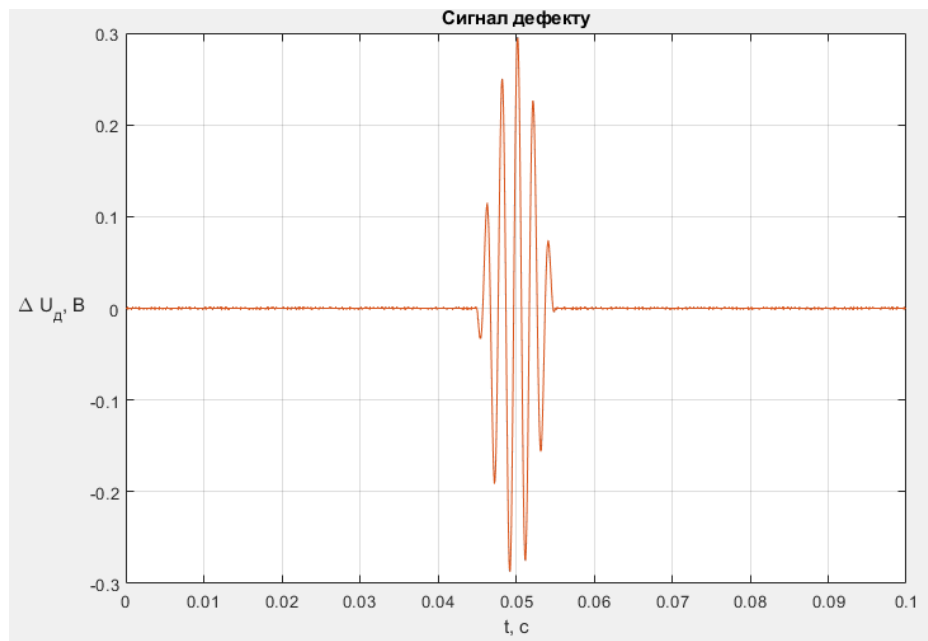


Рис 3.5. Графік аналізованого сигналу згідно лістингу 3.4

Сигнал мультидиференціального ВСП від дефекта представлено у вигляді радіоімпульса з обвідною у півперіода синусоїди. Передбачалось, що АЦП має 10 двійкових розрядів. На перший погляд при використанні симуляції АЦП з розрядністю в 10 біт результат однаковий, але якщо масштабувати рисунок (Рис 3.6.), то видно що різниця є.

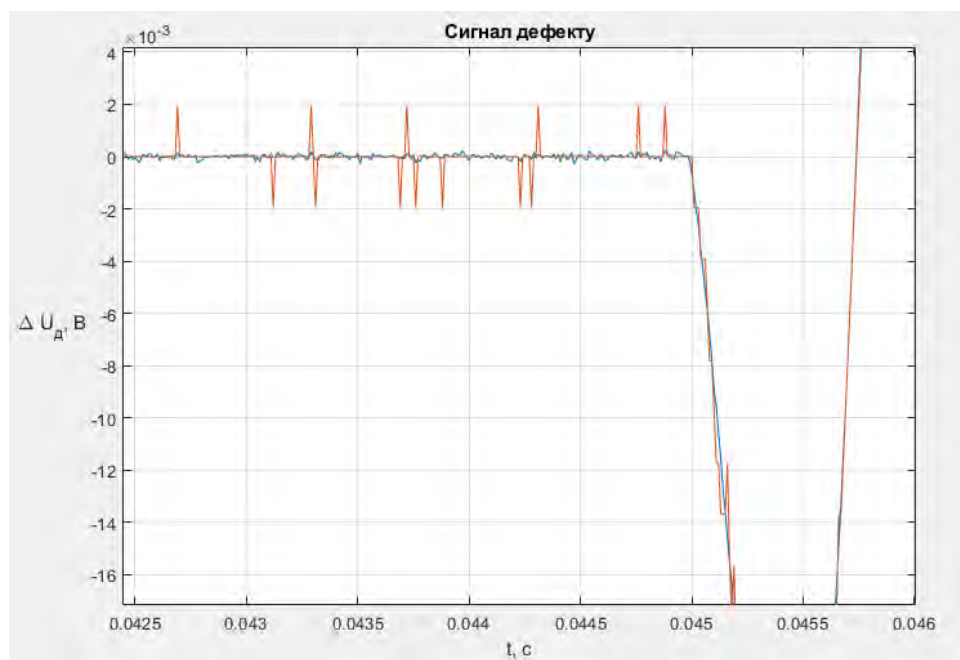


Рис 3.6. Фрагмент сигналу, представленого на рис 3.5 (червоним кольором позначено квантований сигнал, а синім – початковий сигнал)

Зробимо подібний експеримент, змінивши розрядність АЦП: змінимо команду `round_value` з 10 на 16 розрядів та проаналізуємо різницю між точністю 10- та 16-розрядних АЦП (рис 3.7).



Рис 3.7. Приблизжене зображення на рис 3.6

З рис. 3.7 видно, що в цьому випадку похибка квантування є нехтовно малою, що свідчить про недоцільність збільшення розрядності АЦП. Методика таких досліджень може бути застосована при аналізі роботи АЦП з сигналами в широкому динамічному діапазоні.

Висновки до розділу

У першому підрозділі було розглянуто модель сигналів ВСП, їх аналітичний вид та фізична сутність цих сигналів. У другому підрозділі було сформульовано задачу моделювання програми у MATLAB та результати яких потрібно досягти. У третьому підрозділі було проведено моделювання за результатами якого було перевірено коректність та ефективність реалізації процесу опрацювання сигналів мультидиференціального ВСП, яке ґрунтується на дискретному перетворенні Гільберта.

Також важливим результатом є створення програми та проведення опрацювання сигналів ВСП з урахуванням квантування сигналів у АЦП. Зроблено висновок, що у системах цифрового опрацювання сигналів ВСП не доцільно використовувати АЦП з розрядністю 16 біт та більше.

					ПК11.07.1760.00.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

Висновки

У виконаному дипломному проєкті було поставлено задачу розроблення вихрострумового приладу контролю клепаних з'єднань деталей з дюралюмінію, орієнтованого на використання в авіаційній галузі. Розглянуто види дефектів елементів авіаційної техніки та способи їх виявлення. Показано, що вихрострумовий метод НК є найпоширенішим у цій галузі, що зумовлено його високими показниками ефективності, чутливості, безконтактності та відносною простотою реалізації та практичного застосування. Було розглянуто фізичну сутність вихрострумового неруйнівного контролю та представлено приклади його застосування для неруйнівного контролю авіаційної техніки.

В проєкті розроблено структуру приладу та проведено аналіз накладного ВСП мультидиференціального типу. Виконано підбір елементної бази для реалізації вихрострумового приладу виявлення тріщин у клепаних з'єднаннях алюмінієвих листів, в результаті якого було знайдено ефективні та надійні компоненти за допомогою яких можливо реалізувати такий прилад. Розроблено частину електричних принципових схем та надано опис їх роботи.

Наведено моделі сигналів ВСП та представлено спосіб отримання їх інформаційних характеристик на основі перетворення Гільберта. Розроблено програму симуляції роботи ВСП та досліджено, визначення функцій модуляції сигналів ВСП при скануванні ОК. Також було проведено дослідження впливу квантування на точність оцінювання характеристик сигналів ВСП.

У результаті проєктування було розглянуто задачу контролю елементів авіаційної техніки у вигляді клепаних з'єднань деталей з дюралюмінію та розроблено варіант її вирішення, який включає структурну схему вихрострумового приладу контролю, ряд схем електричних принципових та елементів програмного забезпечення, розроблено прилад за допомогою якого можна контролювати елементи авіаційної техніки. Проведені комп'ютерні експерименти на моделях сигналів ВСП засвідчили коректність використаних алгоритмів їх оброблення та розробленого програмного забезпечення.

					ПК11.07.1760.00.000ПЗ	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] A. Sophian, G.Y. Tian, D. Taylor, J. Rudlin. Electromagnetic and eddy current NDT: a review. *Insight – Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 43(5), 2001
- [2] R. Collins, *Eddy current inspection in the aerospace industry*, NDT.net. [Online]. Available: <https://www.ndt.net/article/ecndt2006/doc/P61.pdf>
- [3] В.М. Учанін. НАКЛАДНІ ВИХРОСТРУМОВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ПОДВІЙНОГО ДИФЕРЕНЦІЮВАННЯ, 2013
- [4] Federal Aviation Administration (FAA). Aircraft Inspection and Repair. FAA-H-8083-31A, 2012.
- [5] J.R. Davis (Ed.). Aluminum and Aluminum Alloys. ASM International, 1993.
- [6] Prasad, N. Eswara, et al. Aluminum-lithium Alloys: Processing, Properties, and Applications. Elsevier, 2014.
- [7] Bruhn, E.F. Analysis and Design of Flight Vehicle Structures. Tri-State Offset Co., 1973
- [8] MIL-HDBK-5H. Metallic Materials and Elements for Aerospace Vehicle Structures. Department of Defense, USA.
- [9] ASTM B209 / B209M. Standard Specification for Aluminum and Aluminum-Alloy Sheet and Plate
- [10] Airbus Material Standards & Process Specifications. Airbus S.A.S., internal documentation.
- [11] Hellier, C. Handbook of Nondestructive Evaluation. McGraw-Hill Education, 2013.
- [12] Blitz, Jack, and Geoff Simpson. Ultrasonic Methods of Non-Destructive Testing. Springer Science & Business Media, 1995.
- [13] ASNT. Nondestructive Testing Handbook, Vol. 5: Electromagnetic Testing. 3rd edition, American Society for Nondestructive Testing, 2004.

					ПК11.07.1760.00.000ПЗ	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

[14] Raj, Baldev, et al. Practical Non-Destructive Testing. Narosa Publishing House, 2002.

[15] Технології електромагнітного неруйнівного контролю (Сертифікат Серія ДК № 0401), Дистанційний курс для дистанційного навчання для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні» спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. Розміщений на платформі «Сікорський». Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. Затверджений Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол №8 від 20.06.2024р.)
<https://classroom.google.com/c/NTQ2MTA4MzQzMDCw?cjc=zxw2w2g>

[16] Васильєв В.І., Неруйнівний контроль: навч. посіб. — Київ: НАУ, 2015.

[17] Гусєв В.І., Основи фізичних методів неруйнівного контролю. — Харків: НТУ "ХПІ", 2017.

[18] Вишняков Г.І., Вихрострумний контроль конструкцій літальних апаратів. — Київ: Авіаційна техніка, 2018.

[19] ASTM E 309-21. Standard Guide for Eddy Current Examination of Metallic Aerospace Components. — ASTM International, 2021.

[20] ENHANCED EDDY CURRENT TECHNIQUES FOR DETECTION OF SURFACE-BREAKING CRACKS IN AIRCRAFT STRUCTURES, Valentyn Uchanin, Karpenko Physico-Mechanical Institute of National Academy of Sciences of Ukraine, 2021

[21] Ю.В. Куц, В.М. Учанін, Ю.Ю. Лисенко, О.Е. Левченко, ЗАСТОСУВАННЯ ПЕРЕТВОРЕННЯ ГІЛЬБЕРТА ДЛЯ АНАЛІЗУ СИГНАЛІВ АВТОМАТИЗОВАНОГО ВИХРОСТРУМОВОГО КОНТРОЛЮ, НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», 2021

					ПК11.07.1760.00.000ПЗ	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

[22] Стислий україно-англійський тлумачний словник термінів з вихрострумового неруйнівного контролю, Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 63 с (2.6 авт.арк): уклад.: Ю.В. Куц, Ю.Ю. Лисенко, В.М. Учанін. Розглянуто Вченою радою Приладобудівного факультету (протокол № 5/23 від 29.05.2023 р.)

[23] Development Of Automated Eddy Current System For Aircraft Structure Inspection, Seminarium IV “New Trends in the Construction, Research and Operation of Flying Objects”, Łukasiewicz Research Network – Institute of Aviation, I. Lysenko, V. Petryk, V. Malko, A. Melnyk, 17-18.11.2022

[24] Застосування перетворення Гільберта для аналізу сигналів автоматизованого вихрострумового контролю. Частина 1. Теоретичні аспекти використання перетворення Гільберта у вихрострумовому контролі, Технічна діагностика та неруйнівний контроль. – 2021. – №3. – С.7-13. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2021.03.01>, Учанін В.М. Лисенко Ю.Ю. Левченко О.Е.

[25] Застосування перетворення Гільберта для аналізу сигналів автоматизованого вихрострумового контролю. Частина 2. Отримання вторинних діагностичних ознак та приклади реалізації, Технічна діагностика та неруйнівний контроль. – 2021. – №4.– С.11-18. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2021.04.01>, Учанін В.М. Лисенко Ю.Ю. Петрик В.Ф. Левченко О.Е. Богдан Г.А.

[26] Using signal phase in computerized systems of non-destructive testing, Measurement science review, 22, (2022), No 1, 32-43. DOI: <https://doi.org/10.2478/msr-2022-0004>, Zhong Mei, Orest Kochan, Iuliia Lysenko, Oleksandr Levchenko, Halyna Vlach-Vyhrnovska

[27] Малько В. П. Метод ультразвукової фазової двокоординатної реєстрації інформації для систем автоматизованого неруйнівного контролю / Малько В. П., Куц Ю. В., Лисенко Ю. Ю., Щербак Л. М. // Вісник КПІ. Серія ПРИЛАДОБУДУВАННЯ, Вип. 65(1), 2023. С. 89 – 96

					ПК11.07.1760.00.000ПЗ	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- [28] Куц Ю.В. Спеціальні розділи математики. Курс лекцій: навчальний посібник / Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 180 с.
- [29] 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.
- [30] Куц Ю.В. Застосування фазових характеристик сигналу в автоматизованій вихрострумовій дефектокопії / М.О. Редька, Ю.В. Куц, Є.В. Шаповалов, В.М. Учанін, Ю.Ю. Лисенко, О.Д. Близнюк // Технічна діагностика і неруйнівний контроль, 2022, №1, стор. 45-53.
- [31] Баженов В.Г. Електроніка. Лабораторний практикум: навчальний посібник / В. Г. Баженов, Є. Ф. Суслов, Ю. Ю. Лисенко, А.С. Момот; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 70 с.
- [32] Дослідження вихрострумових перетворювачів для контролю зварних швів конструкцій із алюмінієвих сплавів з використанням дефектоскопа на базі смартфона / Мок Г., Учанін В.М., Лисенко Ю.Ю. // Технічна діагностика і неруйнівний контроль, 2024, №3, стор. 32-38.
- [33] Ефективність технології автоматизованої вихрострумової дефектокопії з матричними перетворювачами / Лисенко Ю.Ю., Куц Ю.В., Мірчев Й., Левченко О.Е., Глабець С.М. // Технічна діагностика і неруйнівний контроль, 2024, №3, стор. 3-8.
- [34] Evaluation Of Eddy Current Array Performance In Detecting Aircraft Component Defects / I. Lysenko, Y. Kuts, V. Uchanin, Y. Mirchev, O. Levchenko // Transactions on Aerospace Research, Institute of Aviation: Poland, 2024. –Volume 2/2024 (275). – pp. 1-9
- [35] Eddy Current Array Testing of Steel Tube Profiles / Mirchev Y., I. Lysenko I., V. Kovtun, Ts. Borisov, P. Chukachev // International Journal “NDT Days”, BSNDT: Bulgaria, 2023. – Volume 6, Issue 3. – 137-147 pp.

- [36] Using the RedPitaya 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. – 194-201 pp.
- [37] 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. – 84-88 pp.
- [38] Automated Eddy Current System for Aircraft Structure Inspection / Iuliia Lysenko, Yurii Kuts, Valentyn Petryk, Volodymyr Malko, Andrii Melnyk // Transactions on Aerospace Research, Institute of Aviation: Poland, 2023. – Volume 4/2023 (273). – 33-40 pp.
- [39] Analysis of formation processes of informative features in eddy current probes with pulsed excitation mode / I. Lysenko, Y. Kuts, V. Uchanin, A. Protasov // Research and Review Journal of Nondestructive Testing, 2023, vol. 1, no. 1
- [40] Муравйов О. В. Передача даних та сучасні методи обробки сигналів. Практикум: навчальний посібник / О. В. Муравйов; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім.Ігоря Сікорського, 2022. – 55 с.
- [41] Куц Ю.В. Технології електромагнітного неруйнівного контролю: Лабораторний практикум [Електронний ресурс]: навчальний посібник / Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 1,5 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 63 с.
- [42] Куц Ю.В. Новітні системи та технології: навчальний посібник / Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко, А.С. Момот; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 123 с.
- [43] Спеціальні розділи математики: конспект лекцій : навч. посіб. / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко, В. М. Сокурєнко. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. – 192 с.

[44] G. Mook. Studies of eddy current probes for inspection of aluminium alloy structure welds using smartphone-based flaw detector / G. Mook, V. Uchanin, Ju. Lysenko //The Paton Welding Journal, 2024, 12, 2024, pp. 42–48.

[45] Investigation of the Impact of Limited Penetration Depth on the Effectiveness of Eddy Current Testing of Aluminum Alloys / V. Uchanin, I. Lysenko, Y. Kuts, Y. Mirchev // International Journal “NDT Days”, BSNDT: Bulgaria, 2024. – Volume 7, Issue 4. – 213-217 pp. ISSN: 2603-4018, eISSN: 2603-4646

[46] Effectiveness of the technology of automated eddy current flaw detection with array probe / Iu. Lysenko, Yu. Kuts, Y. Mirchev, O.E. Levchenko, S.M. Glabets // The Paton Welding Journal, 2024, 11, 2024, pp. 30–35.

					ПК11.07.1760.00.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60