

**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

(підпис)

(ініціали, прізвище)

“ ” 2023 р.

Дипломний проєкт

на здобуття ступеня бакалавра

**за освітньо-професійною програмою “Роботизовані і автоматизовані системи
неруйнівного контролю та діагностики”**

**спеціальності 151 “Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології”
на тему “Вихрострумова система автоматизованого контролю діелектричних
захисних покриттів елементів планеру літальних апаратів ”**

Виконав:

студент ІV курсу, групи ПК-91
Михайленко Ярослав Олексійович

Керівник:

д.т.н., професор
Куц Юрій Васильович

Рецензент:

к.т.н., доцент
Добролюбова Марина Валеріївна

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

Студент _____

Київ 2023

Пояснювальна записка
до дипломного проєкту
на тему: “Вихрострумова система автоматизованого
контролю діелектричних захисних покриттів
елементів планеру літальних апаратів ”

Київ 2023

**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 “ Роботизовані і автоматизовані системи неруйнівного контролю та діагностики”

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Юрій КИРИЧУК

(підпис)

(ініціали, прізвище)

“ ___ ” _____ 2023 р.

Завдання

на дипломний проєкт студенту

Михайленку Ярославу Олексійовичу

1. Тема проєкту “Вихрострумова система контролю діелектричних захисних покриттів елементів планеру літальних апаратів”, керівник проєкту Куц Юрій Васильович, доктор технічних наук, професор затверджені наказом по університету від “3” травня 2023 р. №2057
2. Термін подання проєкту 10 червня 2023 року
3. Вихідні дані до проєкту: тип перетворювача – матричний накладний ВСП
4. Зміст пояснювальної записки:

Вступ

Аналіз завдання проєкту

Розрахункова частина

Вибір та розрахунок електричних схем дефектоскопу

Висновки

Список використаних джерел

5. Перелік графічного матеріалу (4 листа А1): схема електрична структурна; схема електрична принципова; складальне креслення ВСП та деталювання; плакат «Фізичні принципи розроблення вихрострумової системи контролю діелектричних захисних покриттів».
6. Дата видачі завдання 20 лютого 2023 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Формулювання завдання проекту	12.03.2023	
2	Проведення аналітичного огляду	18.04.2023	
3	Розрахунок компонентів	15.05.2023	
4	Оформлення пояснювальної записки	30.05.2023	
5	Розробка графічної частини проекту	03.06.2023	

Студент _____

Ярослав МИХАЙЛЕНКО

Керівник _____

Юрій КУЦ

Київ 2023

Анотація

Дипломний проєкт, зосереджений на аналізі та дослідженні методів безконтактного контролю захисних покриттів в технологічному процесі виготовлення деталей конструкцій літальних апаратів. У проєкті розглядаються різні аспекти цього контролю, зокрема фізична сутність вихрострумowego контролю та адгезія як фактор, що впливає на якість контролю діелектричних покриттів.

Також проведений аналіз патентної інформації в галузі вихрострумowego контролю, а також огляд сучасних приладів, які використовуються для такого контролю. Поставлено задачу дослідження, що буде вирішена в рамках проєкту.

У другому розділі розглядається розрахункова частина проєкту. Проведено електричний розрахунок системи "вихрострумовой перетворювач-об'єкт контролю", включаючи вибір типу вихрострумowego перетворювача та розрахунок сигналів. Також обґрунтовується амплітудний метод вимірювання.

У третьому розділі розглядається вибір та розрахунок електричних схем дефектоскопу. Розроблено схему електричну структурну та надано опис роботи приладу. Також проводиться підбір та розрахунок елементів принципової схеми, включаючи вимірювальний підсилювач, АЦП та смуговий фільтр.

Дипломний проєкт містить висновки до кожного розділу, а також перелік літературних джерел і додатки.

У цілому, дипломний проєкт присвячений вивченню та дослідженню методів безконтактного контролю захисних покриттів в технологічному процесі виготовлення деталей конструкцій літальних апаратів. Проєкт містить аналіз і огляд існуючих методів та пристроїв, розрахункову частину і вибір електричних схем, а також висновки до кожного розділу.

Annotation

The diploma project is focused on the analysis and research of non-contact control methods for protective coatings in the manufacturing process of aircraft structural components. The project explores various aspects of this control, including the physical essence of eddy current testing and adhesion as a factor influencing the quality of dielectric coatings control.

Patent information in the field of eddy current testing is analyzed, along with an overview of modern devices used for such control. The project sets a research objective that will be addressed within its scope.

The second section covers the calculation part of the project. An electrical calculation is performed for the "eddy current transducer-object under control" system, including the selection of the eddy current transducer type and signal calculations. The justification of the amplitude measurement method is also provided.

The third section focuses on the selection and calculation of electrical circuits for the defectoscope. The project includes the development of an electrical structural scheme and a description of the device's operation. Additionally, the selection and calculation of elements for the circuit are conducted, including the measurement amplifier, ADC, and bandpass filter.

The diploma project concludes with conclusions for each section, a list of references, and appendices.

Overall, the diploma project is dedicated to the study and investigation of non-contact control methods for protective coatings in the manufacturing process of aircraft structural components. It encompasses the analysis and review of existing methods and devices, the calculation part, and the selection of electrical circuits, providing conclusions for each section.

Зміст

Вступ	9
1. Аналіз завдання проєкту.....	11
1.1 Особливості контролю захисних покриттів в технологічному процесі виготовлення деталей конструкцій літальних апаратів.....	11
1.2. Огляд існуючих методів безконтактного контролю товщини захисних покриттів.	12
1.3. Фізична сутність вихрострумowego контролю.....	14
1.4 Адгезія як фактор, що впливає на якість контролю діелектричних покриттів. ...	16
1.5 Аналіз патентної інформації в галузі вихрострумowego контролю	18
1.6 Огляд сучасних приладів вихрострумowego контролю	24
1.7. Постановка задачі дослідження	27
Висновки до розділу	29
2. Розрахункова частина.....	31
2.1 Електричний розрахунок системи «вихрострумовой перетворювач- об'єкт контролю	31
2.1.1 Вибір типу ВСП.....	31
2.1.2 Розрахунок сигналів ВСП	33
2.2. Обґрунтування амплітудного методу вимірювання.	39
Висновки до 2 розділу	40
3. Вибір та розрахунок електричних схем дефектоскопу	41
3.1 Розробка схеми електричної структурної та опис роботи приладу	41
3.2 Підбір та розрахунок елементів принципової схеми	43
3.2.1 INA 128P Вимірювальний підсилювач.	43
3.2.2. АЦП ADS 1115 16-bit Adafruit.....	45
3.2.3 Розрахунок смугового фільтру.	47
Висновки	50
Літературні джерела	51
Додатки	54

					ДП ПК 91.09.1760.000ПЗ			
<i>Змн.</i>	<i>Ар</i>	<i>№ до</i>	<i>Підпи</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розробив</i>		Михайленко Я.О.			Вихрострумова система контролю діелектричних захисних покриттів елементів планеру літальних апаратів	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрушів</i>
<i>Перевір.реві</i>		Куц Ю.В.					8	
<i>Реценз.</i>						ПБФ, ПК-91		
<i>Н. Контр.</i>								
<i>Затверд.</i>		Куц Ю.В.						

Вступ

Діелектричні покриття широко використовують в різних галузях промислового виробництва та на транспорті з метою захисту металів від корозії. Такі покриття застосовуються і для захисту елементів планера авіаційної техніки. Важливим показником якості покриття є його товщина. В авіації збільшення товщини покриття веде до збільшення маси літального апарату отже до збільшення експлуатаційних витрат (за рахунок більших витрат пального). Зменшення товщини покриття підвищує ризик його передчасного руйнування і корозійного ураження металу.

Задача неруйнівного контролю діелектричних покриттів на металічній основі вирішується за допомогою вихрострумівих методів. Тому розроблення на сучасній елементній базі вихрострумової система контролю діелектричних захисних покриттів елементів планеру літальних апаратів є актуальною темою дослідження в галузі авіаційного виробництва та безпеки польотів. Вона спрямована на покращення ефективності контролю та діагностики захисних покриттів, що використовуються для забезпечення надійності та тривалості експлуатації літальних апаратів.

Діелектричні захисні покриття відіграють важливу роль у захисті структурних елементів літальних апаратів від впливу небезпечних факторів, таких як корозія, удари, волога та екстремальні температури. Однак, внаслідок експлуатації, ці захисні покриття можуть піддаватися пошкодженням, зношуванню чи деградації, що може впливати на їх функціональність та надійність.

Вихрострумова система контролю є одним із сучасних підходів до неущкоджувального діагностування та оцінки стану діелектричних захисних покриттів. Вона базується на використанні електромагнітного явища вихрових струмів, яке виникає при взаємодії магнітного поля з провідником. Вихрострумова система дає змогу виявляти потенційні дефекти, внутрішні пошкодження, розриви чи деградацію діелектричних захисних покриттів без необхідності їх фізичного пошкодження.

					ДП ПК 91.09.1760.000ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Метою даного дипломного проєкту є розроблення вихрострумової системи контролю діелектричних захисних покриттів елементів планеру літальних апаратів з метою підвищення ефективності контролю та забезпечення безпеки повітряних суден. В рамках проєкту будуть вивчені принципи роботи вихрострумової системи, розроблено структурну схему системи та конструкцію вихрострумового перетворювача.

					ДП ПК 91.09.1760.000ПЗ	Арк.
						10
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

1. Аналіз завдання проєкту

1.1 Особливості контролю захисних покриттів в технологічному процесі виготовлення деталей конструкцій літальних апаратів.

У технологічному процесі виготовлення деталей конструкцій літальних апаратів особливу увагу приділяють контролю захисних покриттів. Захисні покриття відіграють ключову роль у забезпеченні надійності та тривалості експлуатації літальних апаратів, оскільки вони захищають структурні елементи від зовнішніх впливів, таких як корозія, удари, волога та екстремальні температури.

Основні особливості контролю захисних покриттів в технологічному процесі виготовлення деталей конструкцій літальних апаратів включають:

- Відповідність вимогам технології. Контроль захисних покриттів повинен відповідати встановленим технологічним вимогам та процедурам. Це включає дотримання правил нанесення покриття, забезпечення правильної товщини шару та використання відповідних матеріалів.

- Неруйнівний контроль. Оскільки захисні покриття знаходяться на зовнішній поверхні деталей, важливо застосовувати неруйнівні методи контролю, які не пошкоджують саме покриття. Це можуть бути методи, такі як вихрострумний контроль, ультразвукова дефектоскопія або візуальний огляд.

- Моніторинг стану покриття. Контроль захисних покриттів повинен забезпечувати постійний моніторинг їх стану протягом всього технологічного процесу. Це дозволяє виявляти можливі пошкодження, деградацію або зношування покриття та приймати відповідні заходи для його відновлення або заміни.

- Забезпечення якості. Контроль захисних покриттів має на меті забезпечити високу якість покриття та відповідність вимогам безпеки та надійності. Це включає перевірку наявності дефектів, рівномірність покриття та його адгезію до основи.

- Документування результатів. Результати контролю захисних покриттів повинні бути детально задокументовані. Це включає фіксацію виявлених

					ДП ПК 91.09.1760.000ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

дефектів, проведені заходи з відновлення або заміни покриття, а також дані про використані методи та обладнання контролю.

Загальна мета контролю захисних покриттів в технологічному процесі виготовлення деталей конструкцій літальних апаратів полягає у забезпеченні високої якості та надійності покриття, що гарантує безпеку та тривалу експлуатацію літальних апаратів. Для досягнення цієї мети необхідно впроваджувати ефективні методи та засоби контролю та постійно вдосконалювати процедури технологічного процесу.

1.2. Огляд існуючих методів безконтактного контролю товщини захисних покриттів.

У сучасному авіаційному виробництві безконтактний контроль товщини захисних покриттів є важливою складовою процесу контролю якості та надійності літальних апаратів. Це дозволяє точно визначати товщину покриття без необхідності фізичного втручання та пошкодження самого покриття.

Нижче наведено перелік та стислий аналіз існуючих методів та систем безконтактного контролю товщини захисних покриттів [1]:

Вихрострумний контроль. Цей метод ґрунтується на принципі виникнення вихрових струмів у електропровідному середовищі за дії змінного електромагнітного поля. У вихрострумовому контролі найчастіше використовують електромагнітне поле, що змінюється в часі за функцією синуса. За допомогою вихрострумового контролю можна виміряти товщину покриття, оскільки вихрові струми проникають через покриття, а їх параметри – амплітуда та фазовий зсув, залежать від товщини покриття. Отже зміна параметрів вихрострумового сигналу дозволяє визначити товщину покриття.

Ультразвуковий контроль. Ультразвуковий контроль використовує високочастотні звукові хвилі для визначення товщини покриття. Відбиті від межі покриття хвилі аналізуються, що дозволяє виміряти товщину покриття без пошкодження його структури. Залежно від властивостей покриття та підложки, можуть використовуватися різні типи ультразвукових хвиль. Але цей метод не використовують для контролю тонких захисних покриттів.

					ДП ПК 91.09.1760.000ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Лазерний контроль. Лазерні методи контролю товщини покриття базуються на вимірюванні відстані між лазерним джерелом і поверхнею покриття. Зміна відстані відбивається у зміні характеристик лазерного променя, що дозволяє визначати товщину покриття. Цей метод може бути використаний для безконтактного контролю різних типів покриттів.

Тепловий контроль: Тепловий контроль використовує принцип розподілу тепла на поверхні покриття для визначення його товщини. Застосування теплових датчиків або інфрачервоних камер дозволяє виміряти температурний розподіл і визначити товщину покриття на основі зміни теплового потоку.

Оптичний контроль. Оптичні методи контролю використовуються для безконтактного вимірювання товщини покриття шляхом аналізу світлового відбиття або аналізу світла, що пройшло крізь оптично прозоре покриття. Застосування спектрального аналізу або інтерференційних методів дозволяє точно визначити товщину покриття.

Перевагами вихрострумових методів для розв'язання задач контролю елементів планеру літальних апаратів порівняно з іншими методами є те, що вихрострумний контроль не вимагає фізичного контакту з поверхнею покриття, що дозволяє проводити вимірювання без пошкодження або зношування покриття. Це особливо важливо для вимірювання товщини захисних покриттів, оскільки будь-яке пошкодження погіршує їх захисні властивості. Зміна параметрів вихрострумного сигналу може аналізуватись в реальному часі, що дозволяє швидко отримувати результати і виявляти невідповідність покриття встановленим нормам ще на етапі виготовлення. Застосування вихрострумного контролю дозволяє досягнути високої точності вимірювання товщини покриття. Залежно від налаштувань та умов контролю значення похибки вимірювання може становити декілька мікрометрів. Це дозволяє виявляти навіть незначні зміни товщини покриття.

Вихрострумний контроль може бути застосований навіть у випадках, коли покриття має складну структуру або складається з кількох шарів, тому є ефективним методом вимірювання товщини покриття навіть на нерівних або

					ДП ПК 91.09.1760.000ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

нерегулярних поверхнях.

1.3. Фізична сутність вихрострумowego контролю

Вихрострумний контроль ґрунтується на використанні явища виникнення вихрострумів у електропровідних матеріалах, коли змінюється магнітне поле. При проходженні змінного струму через котушку з провідним матеріалом, утворюється змінне магнітне поле. Це магнітне поле викликає вихрові струми в металевих матеріалах, що перебувають поблизу. Вихрові струми, у свою чергу, створюють власне магнітне поле, яке взаємодіє з початковим магнітним полем котушки. Зміна параметрів вихрострумowego сигналу, таких як амплітуда та фаза, може використовуватися для вимірювання товщини діелектричного захисного покриття.

Вихрострумний контроль заснований на аналізі взаємодії електромагнітного поля зовнішнього джерела (обмотка збудження вихрострумовой системи) з електромагнітним полем, що виникає в електропровідних об'єктах контролю. Розподіл щільності вихрових струмів у провідному об'єкті контролю визначається джерелом електромагнітного поля, геометричними і електромагнітними параметрами самого об'єкта контролю, а також взаємним розташуванням зовнішньої джерела і об'єкта контролю. Збуджуюча котушка вихрострумовой системи може бути розташована поруч з об'єктом контролю (див. рис. 1.1, а) як накладна котушка, або охоплювати об'єкт контролю (див. рис. 1.1, б) як прохідна котушка.

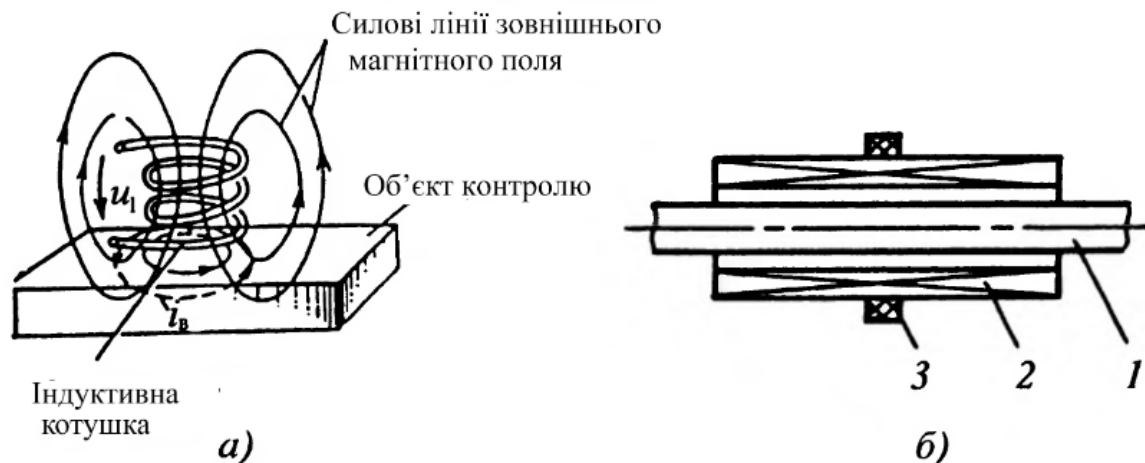


Рис 1.1 а) накладна вихрострумова система б) прохідна вихрострумова система
 1- об'єкт контролю, 2 – збуджуюча котушка, 3 – вимірювальна котушка

Форма кривих розподілу вихрових струмів у приповерхневих шарах об'єкта контролю повторює форму витків обмотки збудження вихрострумової системи з урахуванням форми об'єкта контролю (струми i_B на рис. 1.1, а). Внаслідок дії вихрових струмів на об'єкт контролю змінюється магнітне поле, що його оточує[2].

Механізм вихрострумового контролю можна пояснити за допомогою схеми, що зображена на рис. 1.2. У цій схемі показано наявність генератора змінного струму та двох обмоток вихрострумової системи. Перша обмотка, яку називають збуджуючою обмоткою, з'єднана з генератором. Друга обмотка, відома як вимірювальна обмотка, підключена до блоку вимірювання. Цей блок відповідає за виділення та обробку сигналів, які містять інформацію про вимірювані параметри об'єкта контролю.

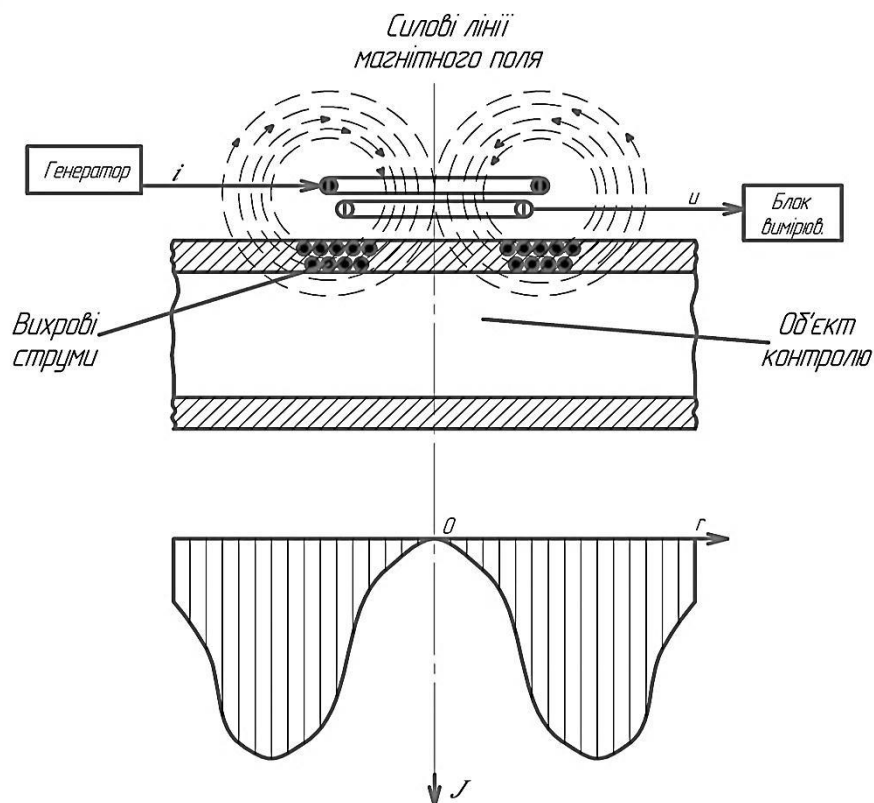


Рис 1.2 - Принцип дії приладу контролю з накладною вихрострумовою системою

На рисунку 1.2 також представлений графік розподілу щільності вихрових струмів в об'єкті контролю (ОК). З графіка видно, що найвище значення щільності вихрових струмів спостерігається під витками збуджуючої обмотки вихрострумової системи (ВСП). Під центром збуджуючої обмотки ВСП вихрові струми відсутні, тому виявлення дефектів в цій області об'єкта контролю не є можливим.

Електрорушійна сила (ЕРС) вимірювальної обмотки і опір збуджуючої обмотки вихрострумової системи залежать від різних параметрів об'єкта контролю (ОК) та взаємного розташування вихрострумового перетворювача (ВСП) і ОК [5]. Отримана інформація від перетворювача є багатопараметричною. Це одночасно визначає переваги і складнощі реалізації вихрострумового контролю. З одного боку, цей метод дозволяє проводити багатопараметричний контроль. З іншого боку, для забезпечення селективного (роздільного) контролю параметрів потрібно застосовувати різні складні методи виділення сигналів від контрольованих параметрів та пригнічення впливу перешкоджаючих факторів.

Однією з переваг вихрострумового контролю є його безконтактний характер, оскільки він може бути здійснений без прямого контакту між ВСП і ОК. Це дозволяє виконувати вихрострумівий контроль під час руху об'єкта контролю відносно ВСП, і цей рух може бути значним у виробничих умовах, забезпечуючи високу продуктивність контролю [3].

Додатковою перевагою вихрострумового контролю є його низька чутливість до впливу вологості, тиску та забруднень поверхні об'єкта контролю непровідними речовинами. Крім того, конструкція ВСП є простою, а котушки ВСП часто поміщаються в захисний корпус, що забезпечує їх стійкість до механічних та атмосферних впливів і робить їх надійними первинними перетворювачами.

1.4 Адгезія як фактор, що впливає на якість контролю діелектричних покриттів.

					ДП ПК 91.09.1760.000ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Адгезія відноситься до зчеплення або прилипання між двома різними матеріалами на молекулярному рівні. У контексті контролю діелектричних покриттів, адгезія може впливати на якість контролю і точність вимірювання товщини.

Коли провідний об'єкт контактує з діелектричним покриттям, виникає взаємодія між ними. Якщо адгезія між цими матеріалами є слабкою або недостатньою, можуть виникати проблеми з точністю вимірювання. Недостатня адгезія може призводити до утворення додаткового повітряного шару між поверхнею ОК та захисним покриттям і формування хибних висновків щодо товщини захисного діелектричного шару і в кінцевому рахунку – до передчасного руйнування покриття.

Адгезія впливає на якість контролю діелектричних покриттів і може бути зумовлена різними факторами. Наші знання про природу сил зчеплення обмежені, і існують різні гіпотези щодо механізму адгезії [4].

Згідно з однією гіпотезою, адгезія виникає внаслідок електричних сил і утворення подвійного електричного шару між покриттям і основою. Інша гіпотеза стверджує, що хімічні та сорбційні зв'язки відіграють основну роль у зчепленні. Також вважається, що при нанесенні покриття при різних температурах може змінюватися роль електричних, сорбційних та хімічних сил. В гальванотехніці відомо, що наявність хорошої адгезії покриття до основи може залежати від попередньої обробки поверхні. Наприклад, при електроосажденні покриття важливо, щоб воно продовжувало відтворювати структуру і кристалічну решітку основного металу або щоб іони, що розрядилися, розташовувалися в безпосередній близькості до ґраток основного металу. Також можуть використовуватися початкові шари зі спеціальних електролітів або термічна обробка для поліпшення адгезії.

Адгезія електролітичних покриттів зазвичай вища, ніж покриттів, нанесених розпилюванням на повітрі. У разі розпилювання, адгезія залежить від енергії удару рідкого металу, і хороше зчеплення можливе на шорстких поверхнях. В роботі [4] також зазначалось, що адгезія покриття до основного металу може

					ДП ПК 91.09.1760.000ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

бути забезпечена механічним зчепленням, взаємною дифузією, фізичним зв'язком ван-дер-вальсовими силами та утворенням сплаву з основним металом. Важливим фактором є шорсткість поверхні основного металу.

У випадку застосування електропровідних захисних покриттів використання вихрострумової системи контролю може бути корисним для виявлення проблем, пов'язаних з адгезією. За допомогою вихрострумовеого контролю можна виявити зони недостатньої адгезії або дефектів в покритті, що можуть призводити до відхилень в вимірюванні товщини. Зміни в розподілі вихрових струмів в ОК можуть вказувати на проблеми з адгезією, такі як розділення шарів покриття або наявність забруднень або пошкоджень.

1.5 Аналіз патентної інформації в галузі вихрострумовеого контролю

Нижче розглянуто декілька характерних прикладів патентів на винаходи, пов'язані з вихрострумовим неруйнівним контролем.

У винаході [7] поставлено завдання створення методу вихрострумової дефектоскопії, що забезпечує підвищення точності контролю шляхом зменшення впливу швидкості переміщення виробу.

Завдання вирішується таким чином: у методі вихрострумової дефектоскопії, який полягає у тому, що на поздовжньо переміщуваному зі швидкістю V (м/с) циліндричному виробі збуджують поздовжнє електромагнітне поле, розташовують дві індуктивні вимірювальні котушки на базовій відстані H (м) вздовж поверхні виробу та вздовж напрямку руху, плоскості витків які перпендикулярні напрямку збуджуючого електромагнітного поля, отримують диференційну напругу індуктивності котушки і використовують її для визначення наявності дефектів у виробі. Поруч з виробом, розміщують дві додаткові індуктивні вимірювальні котушки, ідентичні першим, на базовій відстані вздовж поверхні виробу таким чином, що одна з додаткових котушок розташована посередині між основними вимірювальними котушками, отримують диференційну напругу додаткових котушок, комутують диференційні напруги з частотою P (Гц), обраною з умови $F > 2 \cdot V/H$,

					ДП ПК 91.09.1760.000ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

порівнюють отримані пульсуючі напруги i , згідно з результатами порівняння, визначають наявність дефектів.

Технічним результатом є зменшення впливу швидкості переміщення виробу під час контролю. Це пов'язано з тим, що на формування корисного сигналу переважаючий вплив справляє не швидкість руху контрольованого виробу, а частота перемикання відповідних пар вимірювальних обмоток, за умови виконання залежності, наведеної в формулі винаходу.

На кресленні рис.1.3 показана схема пристрою для здійснення методу. Пристрій містить генератор 1 для живлення корисного трансформатора-перетворювача 2, на каркасі якого намотані ще чотири вимірювальні котушки, які через одну з'єднані між собою послідовно зустрічно і утворюють пари котушок двох вимірювальних каналів. Високочастотна напруга з першої пари котушок підсилюється селективним підсилювачем 3, знаходиться за допомогою детектору 4, а вирівняна напруга першого вимірювального каналу подається на перший інформаційний вхід комутатора 5, високочастотна напруга з другої пари котушок, одна з яких розташована посередині між котушками першого каналу, підсилюється селективним підсилювачем 6, знаходиться за допомогою детектору 7 і вирівняна напруга другого вимірювального каналу подається на другий інформаційний вхід комутатора 5. Імпульси високочастотного генератора 1 через дільник частоти 8 поступають на керуючий вхід комутатора 5, вихідні імпульси якого підсилюються селективним підсилювачем 9, до виходу якого підключений пороговий пристрій 10.

					ДП ПК 91.09.1760.000ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

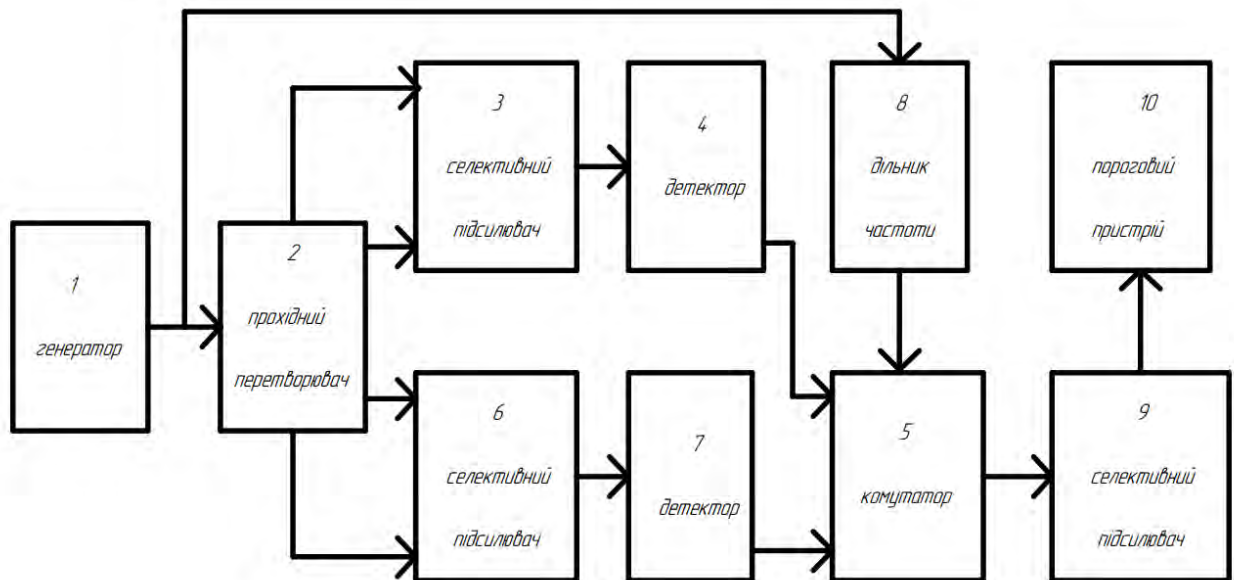


Рис 1.3 Схема способу вихрострумової дефектоскопії патенту UA4612 [7]

Розглянемо другий патент України UA20130U[8]. В корисній моделі пропонується пристрій для вихрострумowego контролю, який має на меті спростити конструкцію і зменшити вплив флікер-шуму, забезпечуючи нижчий поріг чутливості пристрою. Принциповою ідеєю є введення нових елементів та зв'язків, що дозволяють досягти цих цілей.

Пристрій складається з параметричного вихрострумowego перетворювача, який має два входи і три виходи, та модулятора з керуючим входом і виходом. Вихідні сигнали параметричного вихрострумowego перетворювача підключаються до відповідних сигнальних входів модулятора. Крім того, пристрій включає два комутатори з керуючими входами і виходами, а також диференціальний підсилювач.

У моделі також введено генератор прямокутних імпульсів з шпаруватістю два, подільник частоти, смугові фільтри, підсилювач потужності та синхронні детектори. Ці елементи допомагають забезпечити високу завадостійкість, формування амплітудно модульованого сигналу з подавленою несучою та детектування такого сигналу.

Введення генератора прямокутних імпульсів, подільника частоти та смугових фільтрів дозволяє знизити вплив флікер-шуму та спростити

конструкцію пристрою. Також застосування другого синхронного детектора підвищує вибірність пристрою і спрощує його конструкцію.

Отже, введення нових елементів та зв'язків в пристрої для вихрострумowego контролю дозволяє досягти спрощення конструкції, зниження впливу флікер-шуму та підвищення завадостійкості пристрою.

На рис. 1.4 зображена структурна схема пристрою, що складається з послідовно з'єднаних елементів, таких як генератор 1 прямокутних імпульсів зі шпаруватістю два, подільник частоти 2, перший смуговий фільтр 3, підсилювач 4 потужності, параметричний вихрострумowy перетворювач 5 з першою обмоткою 6 та другою обмоткою 7, модулятор 8 з першим комутатором 9 та другим комутатором 10, а також диференціальний підсилювач 11.

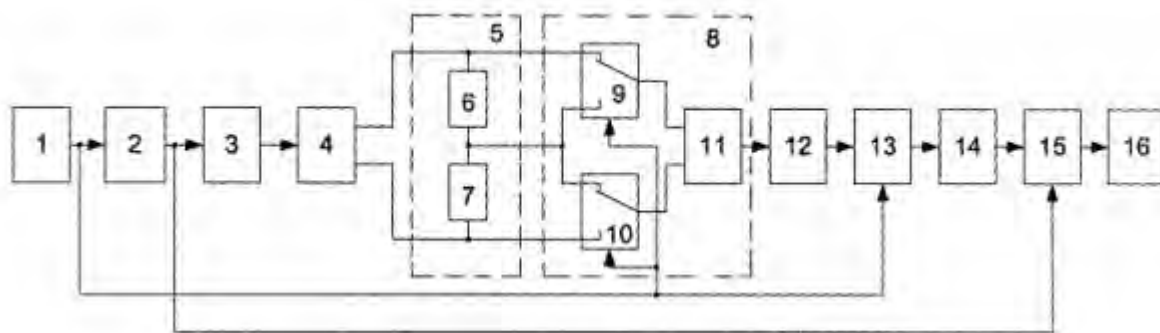


Рис 1.4 - Структурна схема пристрою для вихрострумowego контролю

У схемі перший сигнальний вхід першого комутатора 9 з'єднаний з точкою з'єднання підсилювача потужності 4 і першої обмотки 6 параметричного вихрострумowego перетворювача 5, другий сигнальний вхід першого комутатора 9 і перший сигнальний вхід другого комутатора 10 з'єднані з точкою з'єднання першої обмотки 6 і другої обмотки 7 параметричного вихрострумowego перетворювача 5, а другий сигнальний вхід другого комутатора 10 з'єднаний з точкою з'єднання підсилювача потужності 4 і другої обмотки 7 параметричного вихрострумowego перетворювача 5. Вихід першого комутатора 9 з'єднаний з першим входом диференціального підсилювача 11, а вихід другого комутатора 10 з'єднаний з другим входом диференціального підсилювача 11, тоді як вихід диференціального підсилювача 11 є виходом модулятора 8. Сигнальні входи комутаторів 9 та 10 з'єднані між собою та є сигнальним входом модулятора 8. У

схемі також є другий смуговий фільтр 12, перший синхронний детектор 13, підсилювач 14 змінного струму, другий синхронний детектор 15 та індикатор 16. Сигнальний вхід модулятора 8 та сигнальний вхід першого синхронного детектора 13 з'єднані з виходом генератора 1 прямокутних імпульсів зі шпаруватістю два, а сигнальний вхід другого синхронного детектора 15 з'єднаний з виходом подільника частоти 2.

Наступним розглянемо ще один патент України UA39207U [9].

Цей спосіб пропонується з метою покращення надійності і чутливості при контролі матеріалів з різними електрофізичними характеристиками, а також для розширення діапазону робочих зазорів. Для досягнення цієї мети використовується вихрострумний дефектоскоп, який складається з вихрострумного перетворювача, включеного в робочий контур двоконтурного автогенератора. Автогенератор використовує транзисторний активний елемент, а його живлення підключено до виходу через блок регенерації коливань. Додатково між виходом автогенератора і виходом блока регенерації коливань встановлений блок звукової індикації. У цьому способі використовується польовий транзистор з ізольованим затвором як активний елемент. Між затвором і стоком транзистора паралельно резистору автоматичного зміщення додатково включений діодний випрямляч.

На рис 1.5 зображено схему вихрострумного дефектоскопа.

					ДП ПК 91.09.1760.000ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

але знижує частоту проходження радіоімпульсів. Цю зміну частоти відображає блок звукової індикації, що надає додаткову інформацію оператору про положення вихрострумowego перетворювача 1 відносно контрольованої поверхні. Настроювання робочого контуру 2 автогенератора 1 при контролі об'єктів з різними електрофізичними властивостями виконується шляхом зміни ємності варикапу 4, який включений в робочий контур автогенератора 1. Використання польового транзистора з ізольованим затвором 9 дозволяє підвищити надійність роботи автогенератора 1 при контролі матеріалів з різними електрофізичними властивостями і з різним зазором між робочою поверхнею вихрострумowego перетворювача 1 і контрольованою поверхнею, завдяки високим технічним характеристикам польового транзистора з ізольованим затвором, таким як високий вхідний опір, гранична частота і крутизна перехідної характеристики. Використання варикапу при настроюванні дефектоскопа замість повітряного змінного конденсатора дозволяє підвищити надійність його роботи за рахунок відсутності контактних завад і кращого екранування від зовнішніх полів.

1.6 Огляд сучасних приладів вихрострумowego контролю

Першим є дефектоскоп VANTAGE [10]. Цей прилад є повнофункціональним вихрострумowym пристроєм, який можна використовувати однією рукою, звільняючи іншу руку для сканування за допомогою датчиків. Технічні характеристики та особливості цього пристрою спрямовані на користувачів у галузі авіації та космічної промисловості, нафтового буріння на шельфі, нафтохімії, енергетики та залізничного транспорту для контролю осей.

Цей пристрій має яскравий кольоровий дисплей та компактний міцний корпус, що робить його ідеальним для використання як у польових умовах, так і в промислових середовищах. Загальний вид приладу разом з різними типами ВСП, що входять до комплексу поставки приладу, зображений на рис 1.6, а його основні технічні характеристики наведені в табл. 1.1.

					ДП ПК 91.09.1760.000ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рис 1.6 – Ручний вихрострумний дефектоскоп VANTAGE [10]

Табл 1.1 – Технічні характеристики дефектоскопу VANTAGE

Габаритні розміри	200x110x95
Вага	0,8кг
Робочий температурний діапазон	-20...40 °С
Швидкість сканування	<60мм/с
Час роботи від акумуляторів	5.5 год

Наступний приклад вихрострумової системи – вихрострумний дефектоскоп ВД-43А [11], що призначений для контролю виробів з феро- і неферомагнітних металів і сплавів методом вихрових струмів та для виявлення поверхневих тріщин в різних виробках. Цей прилад має малі габарити та вагу, що робить його зручним у використанні. Він оснащений графічним індикатором з яскравим підсвічуванням, що дозволяє одночасно відобразити необхідну інформацію і надає наочність її представлення. Крім того, пристрій має графічну і звукову індикацію виявлених дефектів, що сприяє швидкому і точному аналізу результатів.

Організація меню пристрою дуже проста і зрозуміла, що дозволяє легко навігуватися та налаштовувати його параметри. Він також має можливість підключення різних перетворювачів в залежності від потреб користувача, що забезпечує більш широкий спектр застосування.

Прилад також забезпечує контроль рівня заряду батареї, що дозволяє користувачеві завжди бути в курсі стану живлення. Крім цього, він автоматично вимикається за відсутності дії, що допомагає економити заряд батареї і забезпечує ефективне використання приладу. Загальний вид приладу зображено на рис 1.7.



Рис 1.7 – Вихрострумний дефектоскоп ВД-43А[11]

Технічні характеристики даного пристрою подані в табл. 1.2.

Табл 1.2 – Технічні характеристики дефектоскопу ВД-43А[11]

Габаритні розміри	122x65x23
Вага	0,15 кг
Робочий температурний діапазон	-
Швидкість сканування	<50мм/с
Час роботи від акумуляторів	12 год

Наступний приклад – це імпульсний вихрострумний дефектоскоп Eddyfi Luft [12] для контролю корозії через покриття та ізоляцію. Вбудоване програмне забезпечення, що має велику потужність, здатне працювати з мультисенсорним введенням, включає низку інноваційних функцій, таких як візуалізація С-сканів

у режимі реального часу, повне вимірювання товщини стінки (включаючи корозію ID та OD) і розширені можливості керування процесом перевірки та складання звітів. Програмне забезпечення зручне у використанні і забезпечує надійні та повторювані результати завдяки вбудованим засобам автоматизації та передовим алгоритмам, що усувають залежність від оператора. Крім того, прилад має міцний корпус, що захищає від впливу води й пилу, а його гнучкість і практичність роблять його ідеальним для проведення перевірок на місці. Зовнішній вид приладу зображеной на рис 1.8.



Рис 1.8 - Імпульсний вихрострумовий дефектоскоп Eddyfi Lyft[12]

Технічні характеристики представленого пристрою вказані у табл. 1.3.

Табл 1.3 – Технічні характеристики дефектоскопу Eddyfi Lyft[12]

Габаритні розміри	355x288x127
Вага	6,6кг
Робочий температурний діапазон	0-40°C
Швидкість сканування	<75мм/с
Час роботи від акумуляторів	6-8 год

1.7. Постановка задачі дослідження

					ДП ПК 91.09.1760.000ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Дослідження має на меті з'ясування можливостей та обмежень накладного матричного датчика з частотою $f=1$ МГц для контролю товщини фарбового покриття на елементах з дюралюмінію, що дозволить розробити ефективніші методи контролю товщини покриття та забезпечити високу якість захисного покриття літальних апаратів.

В контексті авіабудування, покриття деталей планерів та інших елементів літальних апаратів має велике значення для забезпечення їх довговічності та захисту від шкідливих зовнішніх факторів [6]. Покриття може включати захисні шари фарби, лаку, покриття з анодного оксидування, покриття на основі полімерів тощо.

Мета застосування покриття на деталях авіабудування полягає в аступному

Захист від корозії. Повітряні судна постійно піддаються впливу вологості, агресивних хімічних речовин і солей. Покриття забезпечує захист металевих деталей від корозії, зберігаючи їх механічні властивості і тривалість служби.

Аеродинамічні характеристики. Покриття може мати значний вплив на аеродинаміку літального апарату. Використання спеціальних покриттів може знизити опір повітря і поліпшити ефективність польоту, забезпечуючи економію палива та підвищену продуктивність.

Термічний захист. Покриття може мати властивості теплоізоляції, що дозволяє зменшити втрату тепла або захистити внутрішні системи літального апарату від високих температур.

Візуальна ідентифікація та естетика. Покриття також використовується для візуальної ідентифікації літального апарату, включаючи маркування, логотипи та дизайн. Крім того, належна зовнішня апаратура і фінішне оформлення є важливими з точки зору естетики та іміджу компанії.

Контроль товщини та якості покриття є критичними завданнями в авіабудуванні. Наявність недоліків у покритті, таких як бульбашки повітря, вибоїни, тріщини або нерівності, може призвести до зменшення міцності, аеродинамічної ефективності та тривалості служби літального апарату. Контроль

					ДП ПК 91.09.1760.000ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

товщини покриття важливий для забезпечення відповідності вимогам технічних стандартів та безпеки польоту.

Виконаний аналіз об'єкта та задач контролю дав змогу сформулювати задачі та цілі проекту.

Необхідно дослідити ефективність використання накладного вихрострумowego матричного датчика для контролю товщини фарбового покриття на елементах авіаційної техніки, виготовлених з дюралюмінію. Товщина діелектричного покриття може варіюватися в діапазоні від 50 мкм до 1 мм. Орієнтовна частота сигналу збудження перетворювачів $f=1$ МГц. Задача полягає в оцінюванні точності, надійності та можливості виявлення дефектів накладним матричним датчиком при контролі товщини фарбового покриття.

Основні цілі дослідження включають:

- встановлення залежності відгуку датчика від товщини фарбового покриття в діапазоні від 50 мкм до 1 мм;
- виявлення і аналіз можливих дефектів, таких як нерівномірність товщини покриття, зони зі злуцненням або пошкодженням покриття;
- визначення роздільної здатності датчика при контролі товщини покриття;
- розроблення структури вихрострумowego приладу.

Висновки до розділу

В першому розділі дипломної роботи було розглянуто кілька ключових аспектів пов'язаних з контролем діелектричних захисних покриттів на елементах планеру літальних апаратів за допомогою вихрострумовой системи.

У розділі розглянуто особливості контролю захисних покриттів у технологічному процесі виготовлення деталей конструкцій літальних апаратів, зокрема, висвітлено важливість якісного контролю цих покриттів для забезпечення безпеки та надійності літальних апаратів.

Також було проведено огляд існуючих методів безконтактного контролю товщини захисних покриттів, з фокусом на вихрострумовой методі контролю. Вихрострумova система була визначена та проаналізована як ефективний засіб

					ДП ПК 91.09.1760.000ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

контролю, який заснований на використанні електромагнітних вихрових струмів, що виникають у електропровідних матеріалах.

Окрема увага була приділена питанню адгезії як фактору, що впливає на якість контролю діелектричних покриттів. Було розглянуто взаємозв'язок між якістю адгезії і точністю контролю, а також висвітлено роль вихрострумової системи у виявленні проблем, пов'язаних з недостатньою адгезією.

У розділі також було вказано на значення засобів інтелектуальної власності вихрострумових систем, що відіграють важливу роль у розробці нових технологій і вдосконаленні існуючих методів контролю.

Нарешті, був проведений огляд сучасних приладів вихрострумового контролю, які використовуються для контролю діелектричних захисних покриттів. Висвітлено їхні переваги, можливості та області застосування.

В результаті дослідження було отримано загальний огляд та уявлення про вихрострумову систему контролю діелектричних захисних покриттів елементів планеру літальних апаратів, включаючи методи, засоби та важливість контролю адгезії.

					ДП ПК 91.09.1760.000ПЗ	Арк.
						30
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

2. Розрахункова частина

2.1 Електричний розрахунок системи «вихрострумний перетворювач- об'єкт контролю»

Необхідно провести електричний розрахунок системи "вихрострумний перетворювач-об'єкт контролю", включаючи вибір типу вихрострумного перетворювача і розрахунок сигналів, які будуть генеруватися цим перетворювачем.

2.1.1 Вибір типу ВСП

Переваги накладних ВСП (вихрострумних перетворювачів) в контексті контролю діелектричних покриттів можуть включати:

Неконтактний контроль: накладні ВСП використовують принцип неконтактного контролю, що дозволяє вимірювати товщину покриття без фізичного контакту з поверхнею. Це унеможливує пошкодження або зміну у стану покриття, що особливо важливо для тонких шарів контрольованих діелектричних матеріалів.

Висока точність: накладні ВСП зазвичай забезпечують високу точність вимірювання товщини покриття. Вони можуть вимірювати навіть дрібні зміни у товщині та виявляти дефекти на поверхні покриття.

Зручність в застосуванні: накладні ВСП мають зручну форму та розміри, що дозволяє оператору зручно тримати їх та спрямовувати на об'єкт контролю. Вони легкі в ручному використанні і не потребують спеціальних установок або фіксацій.

Універсальність застосування: накладні ВСП можуть бути використані для контролю різних видів покриттів, не обмежуючись лише діелектричними. Вони також можуть бути використані для контролю не тільки деталей та конструкцій плоскої форми у виробництві та ремонті літальних апаратів.

Зручність і швидкість контролю: накладні ВСП дозволяють проводити контроль швидко та ефективно. Вони можуть бути легко переміщені по поверхні об'єкта контролю, що дозволяє швидко сканувати і аналізувати велику площу.

					ДП ПК 91.09.1760.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

Ці переваги роблять накладні ВСП привабливими для контролю діелектричних покриттів літальних апаратів, допомагаючи забезпечити точність, неконтактність та зручність в процесі вимірювання товщини покриття.

Використання матричних вихрострумових перетворювачів (МВСП) в системах вихрострумового контролю (ВСК) має кілька переваг, порівняно з іншими типами ВСП. МВСП забезпечують підвищення продуктивності контролю, зниження впливу шумів, підвищення завадостійкості та надійності контролю, отримання високої інформативності та розширення функціональних можливостей контролю і діагностики різних видів продукції. Використання МВСП також дозволяє автоматизувати і роботизувати контроль і розробляти нові ефективні технології контролю та діагностики, особливо для виробів складної форми.

Одним з найбільш поширених застосувань МВСП є пошук і картографування корозійних тріщин в тілі металу, що складно виявити традиційними методами. вчасне виявлення цих дефектів є критично важливим. МВСП забезпечують підвищену зону контролю та забезпечують точність інформації про дефекти.

Основні переваги МВСП полягають у підвищенні продуктивності контролю, можливості контролювати вироби з криволінійною формою поверхні, підвищенні точності вимірювання геометричних параметрів та рішенні дефектометричних завдань. Використання МВСП дозволяє отримати великий обсяг інформації про дефекти, включаючи їх глибину, ширину, конфігурацію, швидкість розвитку, геометричні розміри виробу та неоднорідності фізико-механічних властивостей матеріалу.

Усе це робить МВСП потужним інструментом для вихрострумового контролю, забезпечуючи покращення ефективності, точності та надійності контрольних процесів, а також дозволяючи розробляти нові методи та технології контролю. При розгляді матричних вихрострумових перетворювачів (МВСП) як засобу для отримання інформації про параметри та характеристики об'єктів контролю, важливо класифікувати їх за їхніми інформаційними можливостями.

					ДП ПК 91.09.1760.000ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Можна умовно розділити всю різноманітність МВСП на дві категорії: МВСП зі зосередженими параметрами та МВСП з розподіленими параметрами.

МВСП зі зосередженими параметрами мають кожен свій приймач інформації. Якщо інформація формується приймачем з групи елементів, то такі МВСП вважаються МВСП з розподіленими параметрами.

МВСП зі зосередженими параметрами застосовуються переважно для дефектографії та дефектометрії, для уникнення впливу заважаючих факторів, що ускладнюють ідентифікацію електрофізичних властивостей контрольованих об'єктів.

2.1.2 Розрахунок сигналів ВСП

При виборі трансформаторного типу ВСП ми керуємося кількома факторами, які впливають на ефективність та надійність дефектоскопії. Перш за все, трансформаторні ВСП відрізняються високою чутливістю до змін товщини діелектричних покриттів, що дозволяє виявляти навіть малі дефекти. Вони також забезпечують великий діапазон робочих частот, що дозволяє адаптуватися до різних товщин та властивостей покриттів.

Крім того, трансформаторні ВСП здатні працювати в широкому діапазоні температур та вологості, що є важливим в умовах авіаційного середовища. Вони також мають високу стійкість до шумів, що забезпечує точність та надійність отриманих результатів.

У порівнянні з параметричними ВСП, трансформаторні ВСП є більш універсальними та простими у використанні. Вони не вимагають складних калібрувань та налаштувань, що спрощує процес контролю. Крім того, трансформаторні ВСП мають довгий термін експлуатації та високу надійність, що робить їх вигідним вибором для довгострокового використання.

Отже проведемо розрахунок сигналів трансформаторного типу ВСП. Для отримання початкових даних розглянемо ескіз котушок ВСП, що зображена на рис. 2.1.[13].

					ДП ПК 91.09.1760.000ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

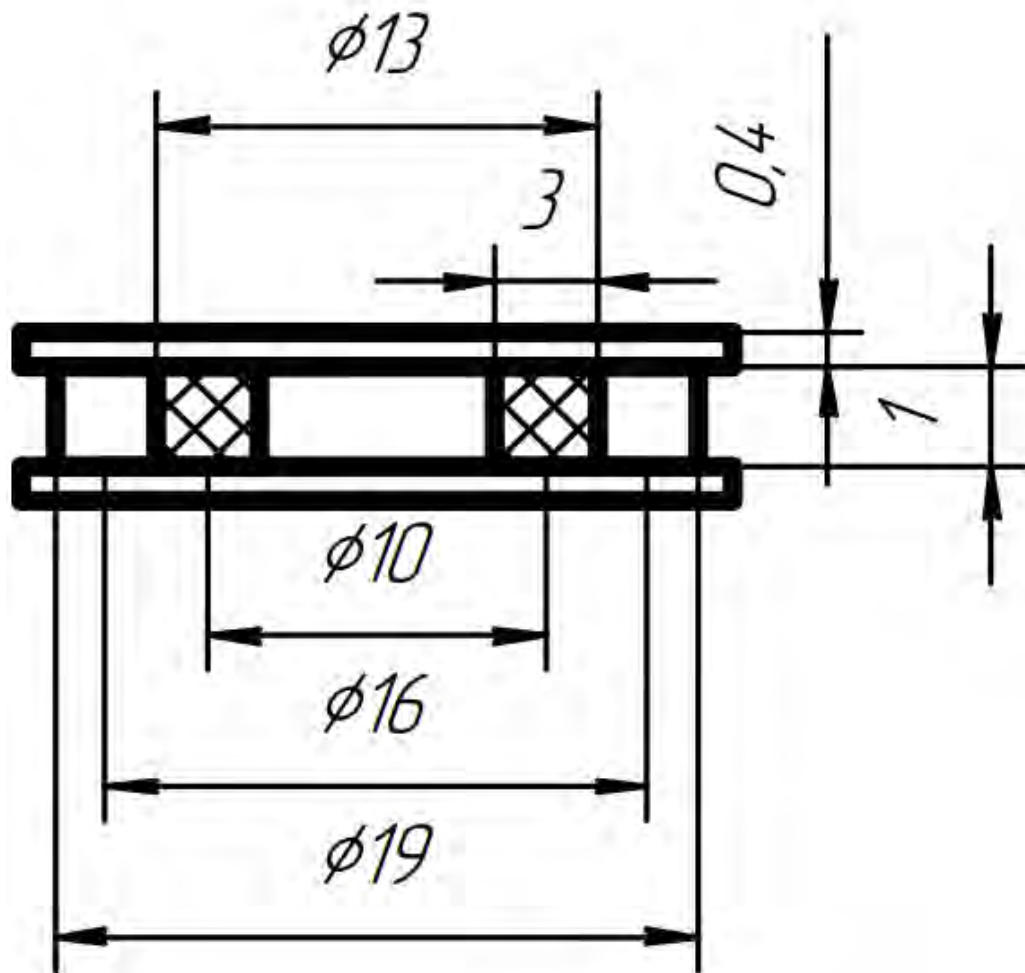


Рис 2.1 Схематичне зображення котушок накладного трансформаторного ВСП

Отже вхідні параметри для розрахунків виглядають наступним чином:

$D_1 = 16\text{мм}$ – діаметр котушки збудження;

$D_2 = 10\text{мм}$ – діаметр вимірювальної котушки;

$h_1 = h_2 = 0.9\text{ м}$ – висота розташування котушок над ОК;

$h = 0.05\text{мм} \dots 0.5\text{мм}$ – товщина покриття;

$l = 1\text{мм}$ – довжина катушки;

$d_1 = 0.1\text{ мм}$ – діаметр дроту обмотки збудження

$d_2 = 0.02\text{ мм}$ – діаметр дроту вимірювальної обмотки

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^7\text{ Гн/м}$ – магнітна стала

$\gamma = 37.7 \cdot 10^6\text{ См/м}$ – питома електропровідність алюмінію

Для початку необхідно обрахувати еквівалентний діаметр контуру вихрових струмів за формулою:

$$D_e = D_{cp1} + 1.5h_1 = 16 + 1.5 \cdot 0.9 = 17.35\text{ мм}$$

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Знаючи це, обрахуємо безрозмірний параметр ξ за формулою:

$$\xi = \frac{(h_1 + h_2)}{D_e} = \frac{0.9 + 0.9}{17.35} = 0.104$$

У випадку контролю товщини діелектричного покриття необхідно визначити частоту струму збудження з формули:

$$\beta = 0.5 * D_e \sqrt{\omega \mu_0 \gamma},$$

де β було обрано 20 з умови досягнення високої чутливості до зміни товщини покриття. Отже для того щоб обрахувати частоту винесемо її з рівняння

$$\omega = \frac{400}{0.25 * 301.0225 * 10^{-6} * 4\pi * 10^{-7} * 37.7 * 10^6} = 0,112 \text{ МГц} * \text{рад.}$$

Отже циклічна частота струму збудження становить $f = 17,8$ кГц.

Розрахунок числа витків котушки збудження W_1 відбувається з конструктивних міркувань за допомогою формули:

$$W_1 = \frac{S_{\text{обм.зб}} * D_1}{d_{1\text{із}}} = \frac{3 * 1 * 16}{0.12} = 400.$$

Для розрахунку сили струму збудження необхідно обрахувати площу поверхні охолодження котушки, для цього застосуємо наступний обрахунок:

$$\begin{aligned} 2S_1 + S_2 + S_3 &= 2 * \left(\frac{\pi d_{\text{зов.обм}}^2}{4} - \frac{\pi d_{\text{вн.обм}}^2}{4} \right) + (\pi d_{\text{зов.обм}} * 1) + (\pi d_{\text{вн.обм}} * 1) = \\ &= 2 * \left(\frac{\pi * 13^2}{4} - \frac{\pi * 7^2}{4} \right) + (\pi * 13 * 1) + (\pi * 7 * 1) = 80\pi = 251,32 \text{ мм}^2. \end{aligned}$$

Наступним чином обираємо коефіцієнт перед граничним струмом 0.8, коефіцієнт теплопередачі $\lambda = 10$ Вт/м²град, допустиму температуру перегріву $[\theta]_д = 5$ °С та активний опір котушки за допомогою формули:

$$R = 4\rho W_1 D_{\text{ср}} / d_1^2,$$

де $D_{\text{ср}} = 10$ мм, ρ – це питомий електричний опір матеріалу проводу, який для міді дорівнює 0,0175 Ом*мм²/ м. Отже:

$$R = 4 * 0,0000175 * 400 * \frac{10}{0.01} = 28 \text{ Ом.}$$

Знаючи вищезазнані дані підрахуємо силу струму збудження за формулою:

					ДП ПК 91.09.1760.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

$$I_{\text{гр}} = \sqrt{\frac{\lambda S_{\text{ох}}[\theta]_{\text{д}}}{R}} = \sqrt{\frac{10 * 251,32 * 10^{-6} * 5}{28}} = 21,18 \text{ мА.}$$

Тоді робочий струм збудження ВСП становить $I = 0.8I_{\text{гр}} = 17 \text{ мА}$.

Оберемо діаметр дроту-для вимірювальної котушки $d_2 = 0.06\text{мм}$. Отже кількість витків вимірювальної котушки дорівнює $W_2 = 500$.

Розрахунок глибини проникнення вихрових струмів приведений нижче:

$$\delta = \sqrt{2/\omega\gamma\mu_0} = \sqrt{2/(0.112 * 10^6 * 4\pi * 10^{-7} * 37.7 * 10^6)} = 0.61 \text{ мм.}$$

Наступним кроком необхідно обрахувати напругу холостого ходу за формулою:

$$U_{\text{оп}} = 1.35\omega\mu_0 W_1 W_2 (m - 0.3) I \sqrt{D_{1\text{ср}} * D_{2\text{ср}}} = 1.35 * 0.112 * 10^6 * 4\pi * 10^{-7} * 500 * 400 * 1.3 * 17 * 10^{-3} * \sqrt{160} * 10^{-3} = 10.62 \text{ В.}$$

Далі необхідно скористатись годографом для визначення значення вихідного сигналу ВСП, годограф зображений на рис 2.2.

					ДП ПК 91.09.1760.000ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\xi = \frac{(h_1 + h_2)}{D_e}, \text{ де } h_2 - \text{ змінний параметр}$$

Визначити вихідний сигнал ВСП :

$$U_{\text{вих}} = E_0 + U_{\text{вн}},$$

де $E_0 = jU_{\text{оп}}e^{-3c/D_1}$, а $c = h_1 - h_2 = 0$

Розрахунок:

Перший розрахунок для $h_2 = 0.05$ мм:

$$U_{\text{вн}}^* = 0.11 - j 0.88 \text{ В}$$

$$\xi = \frac{(0.95)}{17.35} = 0.054755$$

$$U_{\text{вн}} = 10.62(0.11 + j(-0.88))e^{-3 \cdot 0.054755} = 0.991 - j7.930 \text{ В}$$

$$E_0 = j10.62e^{-3 \cdot 0/16} = j10.62 \text{ В}$$

$$U_{\text{вих}} = E_0 + U_{\text{вн}} = (0.991 + j2.69) \text{ В}$$

$$|U_{\text{вих}}| = \sqrt{0.991^2 + 2.69^2} = 2.87 \text{ В}$$

Другий розрахунок для $h_2 = 0.5$ мм:

$$\xi = \frac{(1.4)}{17.35} = 0.080692$$

$$U_{\text{вн}} = 10.62(0.11 + j(-0.88))e^{-3 \cdot 0.080692} = 0.917 - j7.336 \text{ В}$$

$$U_{\text{вих}} = E_0 + U_{\text{вн}} = (0.917 + j3.284) \text{ В}$$

$$|U_{\text{вих}}| = \sqrt{0.917^2 + 3.284^2} = 3.41 \text{ В}$$

Третій розрахунок для $h_2 = 0.25$:

$$\xi = \frac{(1.15)}{17.35} = 0.066282$$

$$U_{\text{вн}} = 10.62(0.11 - j0.88)e^{-3 \cdot 0.066282} = (0.957 - j7.660) \text{ В}$$

$$U_{\text{вих}} = E_0 + U_{\text{вн}} = (0.957 + j2.96) \text{ В}$$

$$|U_{\text{вих}}| = \sqrt{0.957^2 + 2.96^2} = 3.111 \text{ В}$$

Побудуємо графік залежності модуля вихідної напруги від товщини покриття:

					ДП ПК 91.09.1760.000ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

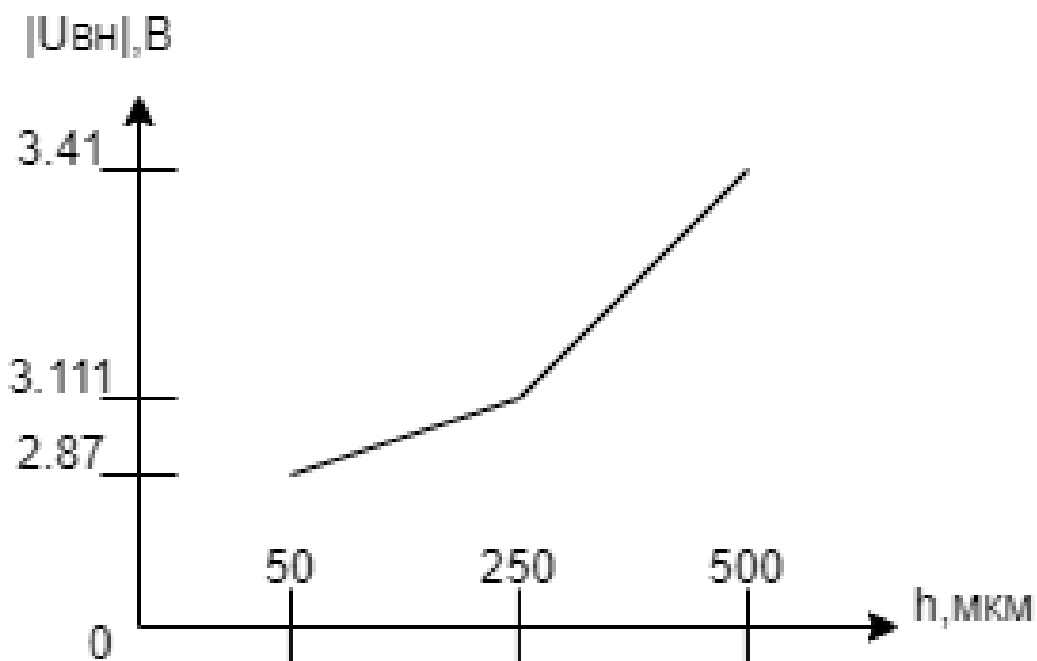


Рис 2.3 Залежність вихідної напруги від товщини покриття.

2.2. Обґрунтування амплітудного методу вимірювання.

Обґрунтування використання амплітудного методу вимірювання в нашій системі, що включає матричний трансформаторний накладний вихрострумний перетворювач (ВСП). Амплітудний метод є одним з основних методів вимірювання вихрострумного контролю і використовується для отримання інформації про властивості та характеристики об'єкта контролю.

Основна ідея амплітудного методу полягає у вимірюванні амплітуди сигналу ВСП, що генерується при взаємодії з ВСП з об'єктом контролю. Цей метод базується на зміні амплітуди вихроструму в залежності від зміни величини контрольованого параметру, в даному випадку – від зміни товщини діелектричного покриття. Вимірювання амплітуди дозволяє отримати кількісні дані про досліджуваній параметр об'єкта контролю.

Використання амплітудного методу вимірювання у розроблюваній системі має декілька переваг:

Амплітудний метод дозволяє з високою точністю вимірювати амплітуду сигналу ВСП, що дозволяє отримати кількісну інформацію про параметри

об'єкта контролю. Це дає можливість здійснювати оцінку стану діелектричних покриттів літальних апаратів.

Амплітудний метод має просту апаратну реалізацію і не потребує високої кваліфікації дефектоскопістів, які працюють з такими засобами.

Враховуючи переваги амплітудного методу вимірювання і специфіку нашої системи з матричним трансформаторним накладним ВСП, вибір цього методу є обґрунтованим і доцільним для досліджень діелектричних покриттів літальних апаратів.

Висновки до 2 розділу

Були розглянуті різні аспекти, пов'язані з розробкою та обґрунтуванням системи контролю з використанням вихрострумовеого перетворювача (ВСП).

У процесі електричного розрахунку було досліджено різні типи ВСП і визначено, що для розв'язання поставленого завдання найбільш підходящим є матричний трансформаторний накладний ВСП. Також були проведені розрахунки сигналів ВСП, що дало змогу отримати орієнтовний вид градуєвальної характеристики вихрострумовеого вимірювача товщини діелектричних покриттів. Оскільки таке вимірювання за своєю суттю є непрямим вимірюванням, уточнення градуєвальної характеристики доцільно виконувати на тестових зразках з діелектричним покриттям відомої товщини, а в самому приладі необхідно передбачити можливість апаратурної реалізації такої процедури.

					ДП ПК 91.09.1760.000ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. Вибір та розрахунок електричних схем дефектоскопу

3.1 Розробка схеми електричної структурної та опис роботи приладу

Для автоматизованих систем неруйнівного контролю рекомендовано використовувати матричні вихрові струмові пристрої (МВСП) з накладними диференційними перетворювачами. Один з можливих варіантів структури такої системи з послідовним підключенням елементів МВСП до одного інформаційно-вимірювального каналу представлений на рис. 3.1 та в додатку на кресленні ДП ПК91.001.000 ТК. Вхідний сигнал котушки збудження ВСП, який формується генератором синусоїдного сигналу 1 та має керований інтерфейс 6, проходить через комутатор 2 для послідовного підключення до кожного з 16 каналів системи.

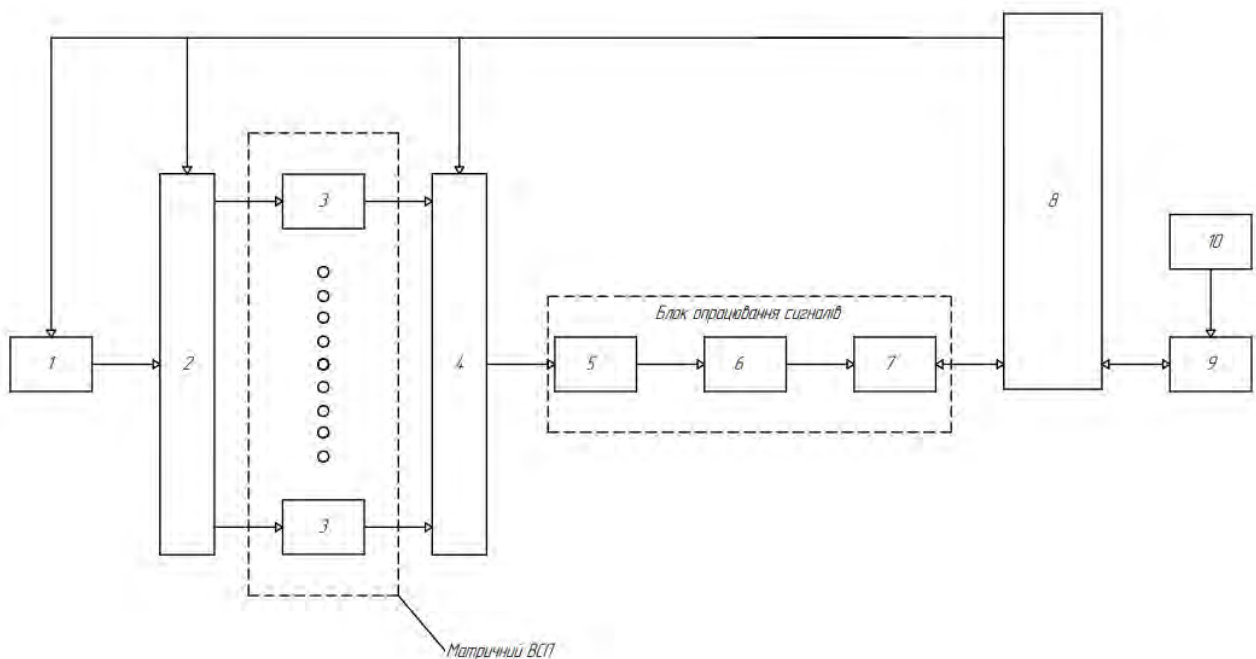


Рис 3.1 Структурна схема послідовної роботи елементів МВСП в дефектоскопі.

Сформований інформаційний сигнал з вибраного перетворювача 3 МВСП проходить через комутатор 4, який виключає можливість потрапляння перешкод з неактивних перетворювачів до блока попереднього опрацювання сигналів. Блок попереднього опрацювання включає в себе вимірювальний підсилювач 5, смуговий фільтр 6 і аналого-цифровий перетворювач (АЦП) 7 з можливістю налаштувати підсилення, частотний діапазон та частоту вибірки. Цифровий

В наступному розділі ми підберемо та обрахуємо необхідні мікросхеми для побудови блоку опрацювання сигналів дефектоскопу з послідовною роботою елементів МВСП.

3.2 Підбір та розрахунок елементів принципової схеми

В цьому розділі переглянуті необхідні мікросхемних елементів, що складають блок опрацювання сигналів, а саме: вимірювальний підсилювач, смуговий фільтр та АЦП.

3.2.1 INA 128P Вимірювальний підсилювач.

INA128P є низькопотужним, універсальним приладовим підсилювачем, який пропонує високу точність. Він має варіант у пластиковому корпусі DIP і є відмінним варіантом для різних застосувань. Ця модель має трьохопераційну конструкцію та компактний розмір, що дозволяє ефективно використовувати її у багатьох областях.

INA128P має велику смугу пропускання, навіть при високому підсиленні, завдяки використанню вхідної схеми зі зворотним зв'язком на основі струму. Завдяки можливості налаштування підсилення за допомогою зовнішнього резистора, цей підсилювач дозволяє встановлювати будь-яке підсилення в діапазоні від 1 до 10 000.

INA128P має дуже низьку вихідну напругу зсуву (50 мкВ), мінімальний дрейф (0,5 мкВ/°C) та високу підтримку спільного режиму (120 дБ при $G \geq 100$). Він працює з дуже низькими значеннями живлення (навіть $\pm 2,25$ В) і вимагає всього 700 мкА квієсцентного струму, що робить його ідеальним для використання в батарейно-живлених системах. Внутрішня захист вхідного сигналу дозволяє підсилювачу витримувати напруги до ± 40 В без пошкоджень.

INA128P поставляється у пластиковому корпусі DIP з 8 контактами і працює в широкому діапазоні температур від -40°C до $+85^{\circ}\text{C}$. Цей підсилювач є надійним і високоякісним рішенням для різних додатків, де потрібна висока точність і низька споживана потужність.[14]

					ДП ПК 91.09.1760.000ПЗ	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

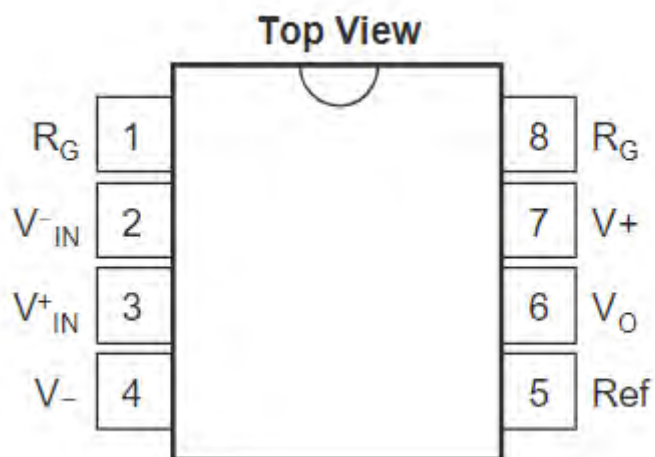


Рис 3.2 Блок-схема підсилювача INA128P:

1,8 – піни для підключення зовнішніх резисторів; 2,3- негативний та позитивний напругові входи відповідно; 6,7 – вихідні напруги 5- вихідна клемма заземлення

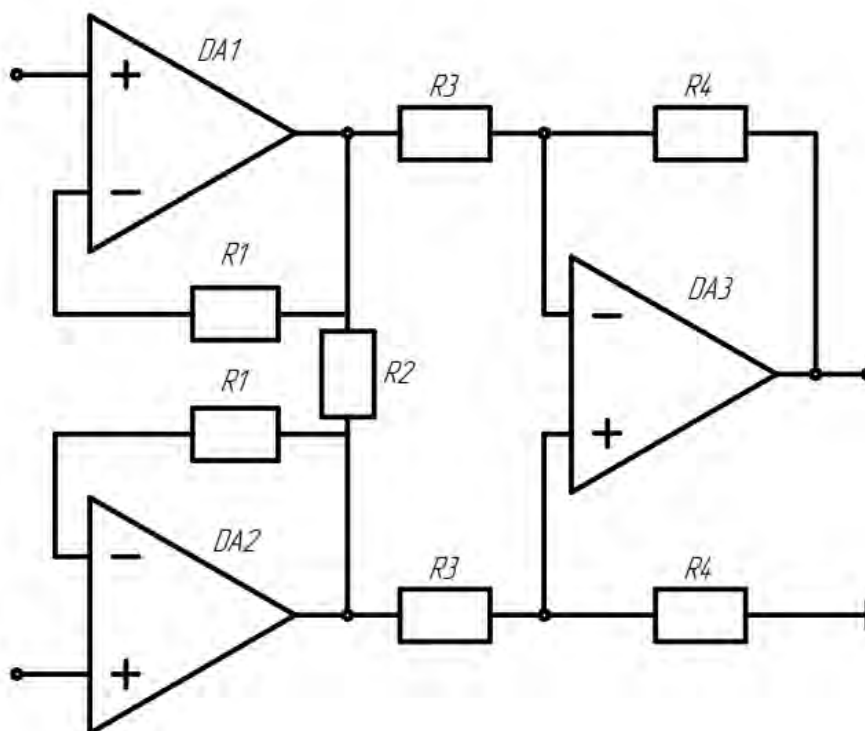


Рис 3.3 Електрична схема підсилювача INA128.

Для необхідного посилення сигналу перед його подальшою обробкою потрібно встановити коефіцієнт підсилення $K_{\Pi} = 8$. Цього можна досягти, підібравши відповідні значення резисторів на схемі, як показано на рисунку 3.3. Треба

обрати номінали резисторів так, щоб отриманий результат був рівним потрібному коефіцієнту підсилення для нашої роботи. Формула:

$$K_{\Pi} = \left(1 + \frac{2 * R_1}{R_2}\right) * \frac{R_4}{R_3}$$

Оберемо номінали резисторів $R_1 = 1.5 \text{ кОм}$ $R_2 = 1 \text{ кОм}$, $R_3 = 1.2 \text{ кОм}$, $R_4 = 2.4 \text{ кОм}$. Обрахуємо:

$$K_{\Pi} = \left(1 + \frac{2 * 1500}{1000}\right) * \frac{2400}{1200} = 4 * 2 = 8$$

Отже підбір номіналів резисторів для підсилювача був проведений успішно[15-22].

3.2.2. АЦП ADS 1115 16-bit Adafruit



Рис 3.4 Загальний вигляд мікросхеми ADS 1115 16-bit Adafruit.

ADS1115 - це 16-бітний аналого-цифровий перетворювач з швидкістю дискретизації 860 вибірок на секунду. Він може працювати як з 4 окремими вхідними каналами, так і з 2 диференційними каналами. Цей чіп має програмований підсилювач з можливістю підсилення до 16 разів для збільшення менших одиночних або диференційних сигналів до повного діапазону. Він працює від 2 до 5 вольт живлення і логіки і дуже простий у використанні.

					ДП ПК 91.09.1760.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

Чіп поставляється на платі з феритовими фільтрами, які допомагають знизити шум, і має програмований адресний вхід, що дозволяє підключити до 4 ADS1115 до однієї шини I2C для отримання 16 окремих входів. Для використання чіпу необхідно заземлити пін GND, підключити пін VDD до джерела живлення логіки, а піни SCL і SDA - до відповідних пінів I2C на мікроконтролері, а потім запустити приклад коду для зчитування даних з АЦП.

-Роздільна здатність: 16 біт

-Кількість вхідних каналів: 4

-Інтерфейс: I2C

-Діапазон напруг вхідного сигналу: $\pm 2.048V$, $\pm 4.096V$, $\pm 6.144V$

-Вбудований опорний генератор напруги: $2.048V$

-Частота дискретизації: до 860 сплесків в секунду (SPS)

-Вбудований програмований підсилювач (PGA) для налаштування підсилення вхідного сигналу

-Можливість програмної настройки режимів роботи та фільтрації сигналу

Розрахуємо параметри АЦП:

Частота дискретизації за завданням дипломного проєкту дорівнює: $f = 1\text{МГц}$

Знаючи розрядність АЦП необхідно розрахувати число рівнів квантування, яке визначається за формулою:

$$L = 2^n$$

де n – значення розрядності АЦП.

Враховуючи визначену розрядність, обрахуємо число рівнів квантування

$$L = 2^{16} = 65536$$

					ДП ПК 91.09.1760.000ПЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Спираючись на максимальне значення вихідної напруги обираємо $b_{max} = 3410\text{мВ}$, яке необхідна для розрахунку кроку квантування.

Крок квантування обраховується за формулою:

$$\Delta b = \frac{b_{max} - b_{min}}{L - 1} = \frac{2b_{max}}{L - 1}$$

Так як нам відомі значення L та b_{max} обрахуємо крок квантування:

$$\Delta b = \frac{2b_{max}}{L - 1} = \frac{2(3410)}{65536 - 1} = \frac{6820}{65535} \approx 0.104 \text{ мВ}$$

За розрахованим значенням Δb визначається середня потужність шуму квантування за формулою:

$$\overline{e_{\text{КВ}}^2} = (\Delta b)^2 / 12$$

де 12 – це коефіцієнт, що походить від розподілу вхідного сигналу рівномірно в межах кожного кванту, що відповідає середньому квадратичному значенню різниці між вхідним сигналом та середнім значенням кожного кванту.

Отже, середня потужність шуму квантування дорівнює:

$$\overline{e_{\text{КВ}}^2} = \frac{(0.104)^2}{12} = \frac{(0.104)^2}{12} \approx 0.0009 \text{ мВ}$$

3.2.3 Розрахунок смугового фільтру.

Смугові фільтри складаються з фільтру верхньої частоти(ФВЧ) та з фільтру нижньої частоти (ФНЧ) тому обрахуємо їх окремо:

Розрахуємо ФНЧ:

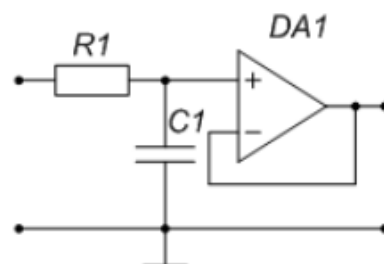


Рис 3.5 Електрична схема ФНЧ

Частота зрізу ФНЧ дорівнює половині частоти дискретизації, тоді частота зрізу буде дорівнювати:

$$f_{зр} = \frac{f}{2}$$

$$f_{зр} = \frac{1000000}{2} = 500 \text{ кГц}$$

Приймаємо що: $C_1 = \frac{10^{-4}}{500000} = 2 * 10^{-9} \text{ Ф}$

Опір резистору R1 знаходимо за формулою:

$$R_1 = \frac{1}{2\pi f_{зр} c C_1}$$

Де c – коефіцієнт, що дорівнює 0.289493

$$R_1 = \frac{1}{2\pi * 500000 * 0.289493 * 2 * 10^{-9}} = 549,77 \text{ Ом}$$

Розрахуємо ФВЧ:

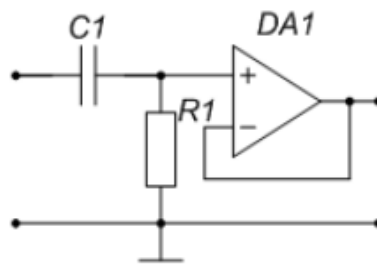


Рис 3.6 Електрична схема ФВЧ

Обираємо для ФВЧ частоту зрізу $f_{зр} = 10 \text{ кГц}$

Опір резистору R1 знаходимо за формулою:

$$R_1 = \frac{c}{2\pi f_{зр} C_1}$$

Де c – коефіцієнт, що дорівнює 0.289493

$$R_1 = \frac{0.289493}{2\pi * 10000 * 2 * 10^{-9}} = 2303,7121 \text{ Ом}$$

3.3. Алгоритм роботи дефектоскопу

Алгоритм роботи дефектоскопу з матричним вихровим струмовим пристроєм (МВСП) і блоком попереднього опрацювання сигналів можна описати наступним чином:

					ДП ПК 91.09.1760.000ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Початок роботи: Запускається дефектоскоп і встановлюються необхідні параметри контролю.

Генерація сигналу: Генератор синусоїдних сигналів формує вхідний сигнал для котушки збудження МВСП. Цей сигнал буде використовуватись для створення вихрових струмів в об'єкті контролю (ОК).

Послідовне підключення каналів: Сигнал від котушки збудження проходить через комутатор і послідовно підключається до кожного з 16 каналів системи. Кожен канал МВСП вимірює вихровий струм, який виникає в ОК.

Опрацювання сигналів: Сигнали з каналів МВСП надходять до блоку попереднього опрацювання сигналів. Тут вони проходять через вимірювальний підсилювач, який підсилює їх для подальшої обробки. Потім сигнали проходять через смуговий фільтр, який обмежує частотний діапазон сигналу, видаляючи непотрібний шум або інтерференцію. Нарешті, сигнали проходять через аналого-цифровий перетворювач (АЦП), який перетворює аналогові сигнали на цифровий формат для подальшого аналізу.

Обробка сигналів: Цифрові сигнали після АЦП передаються до програмного забезпечення, встановленого на персональному комп'ютері (ПК). Тут проводиться подальший аналіз і інтерпретація сигналів, виявлення дефектів або аномалій в ОК. Програмне забезпечення здійснює розрахунки, порівняння зі стандартами і виведення результатів контролю.

Виведення результатів: Результати контролю, такі як виявлені дефекти або аномалії, відображаються на екрані ПК або зберігаються у вигляді звіту.

Оператор може аналізувати ці результати та приймати рішення щодо подальшої обробки ОК.

Завершення роботи: Після закінчення контрольного циклу дефектоскоп може бути вимкнений, і його можна підготувати до наступного контролю.

Отже, алгоритм роботи дефектоскопу з МВСП полягає у послідовному підключенні каналів МВСП до об'єкта контролю, опрацюванні сигналів через блок попереднього опрацювання, аналізі сигналів за допомогою програмного забезпечення і виведенні результатів контролю.

					ДП ПК 91.09.1760.000ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки

У даному дипломному проекті проведено аналіз завдання, пов'язаного з контролем захисних покриттів в технологічному процесі виготовлення деталей літальних апаратів. В розділі проаналізовано існуючі методи безконтактного контролю товщини захисних покриттів, розглянуто фізичну сутність вихрострумовею контролю та вплив адгезії на якість контролю діелектричних покриттів. Досліджено патентну інформацію в галузі вихрострумовею контролю та оглянуто сучасні прилади вихрострумовею контролю.

У розділі розрахункової частини виконано електричний розрахунок системи "вихрострумівий перетворювач-об'єкт контролю". Обґрунтовано вибір амплітудного методу вимірювання.

У наступному розділі вибрано та розраховано електронні схеми дефектоскопу. Розроблено схему електричної структурної та надано опис роботи приладу. Підібрано та розраховано елементи принципової схеми, зокрема вимірювальний підсилювач INA128P, аналого-цифровий перетворювач ADS1115 та смуговий фільтр.

Загальною висновком до диплому є те, що проведений досліджений показав ефективність використання вихрострумовею контролю для здійснення контролю товщини захисних покриттів літальних апаратів. Розроблені електронні схеми дефектоскопу відповідають поставленим завданням та забезпечують необхідну точність та швидкість контролю.

					ДП ПК 91.09.1760.000ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Літературні джерела

- [1] Сусліков Л.М., Студеняк І.П. Неруйнівні методи контролю: Навчальний посібник. – Ужгород: Видавництво УжНУ, 2016. - 192 с.
- [2] Лисенко Ю.Ю., Дугін О.Л., Куц Ю.В., Протасов А.Г. Застосування накладних перетворювачів в імпульсному вихрострумовому контролі // Вісник національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут” серія приладобудування. - Київ : Вид-во НТУУ “КПІ”, 2016, вип. 51.–С.58–63
- [3] Куц Ю.В., Петрик В.Ф., Лисенко Ю.Ю., Дугін А.Л. Експериментальне дослідження вихрострумової системи контролю великогабаритних виробів// Наукові відомості на НТСМ 2013 (Болгарія). – №2 (139). – С.72–74.
- Контроль якості покриттів : навч. посіб. / О. В. Диха, О. Ю. Рудик. Хмельницький : ХНУ, 2021. 166 с.
- [4] Blitz, J., Oaten S.R. and Hajian, N.T. The testing of ferromagnetic metals with eddy-currents. Nondestructive Testing Communications. 1986. №2. P. 189-200.
- [5] Механіка руйнування і міцність матеріалів: довідн. Посібник. Т. 9: Міцність і довговічність авіаційних матеріалів та елементів конструкцій / О.П. Остащ, В.М. Федірко, В.М. Учанін та ін. Львів: Сполом, 2007. 1068 с.
- [6] Патент способу вихрострумової дефектоскопії [Електронний ресурс] Режим доступу:
<https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=40669&chapter=biblio>
- [7] Пристрій для вихрострумового контролю: опис до патенту на корисну модель / І.М. Бучма, К.В. Ферчук Львів: Національний Університет "Львівська Політехніка",2007. 5с.
- [8] Вихрострумовий дефектоскоп: опис до патенту на корисну модель / В.М. Учанін, В.В. Черленевський Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України ,2009. 3с.
- [9] Ручний вихрострумовий дефектоскоп VANTAGE [Електронний ресурс] Режим доступу: <https://www.ptsndt.com/uk/prodazh/et-vykhrostrumovyi-kontrol/et-ethernde-prybory/656-vantage-ruchnij-vikhrostrumovij-defektoskop>

					ДП ПК 91.09.1760.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

[10] Вихрострумовий дефектоскоп ВД-43А [Електронний ресурс] Режим доступу: <https://ultracon.com.ua/produksiia/vykhrostrumovyi-kontrol/vikhrostrumovij-defektoskop-vd-43a/>

[11] Імпульсний вихрострумовий дефектоскоп Eddyfi Lyft [Електронний ресурс] Режим доступу: <https://industry.hlr.ua/nodestructtest/eddy-current-flaw-detection/eddy-current-flaw-detectors/eddyfi-lyft-eddy-current-flaw-detector/>

[12] Маєвський С.М. Основи побудови систем аналізу сигналів у неруйнівному контролі / С.М. Маєвський, В.П. Бабак, Л.М. Щербак – Київ: Либідь, 1993. – 200 с.

[13] INA 128P Вимірювальний підсилювач [Електронний ресурс] Режим доступу: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/545749/TI1/INA128P.html>

[14] Щербаков В.І. Електронні схеми на операційних підсилювачах/ Щербаков В.І, Грездов Г.І.. – Київ: Техніка, 1983. – 214 с

[15] АЦП ADS 1115 16-bit Adafruit [Електронний ресурс] Режим доступу: <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/ads1115.pdf>

[16] 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.

[17] 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.

[18] 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.

[19] Petryk V. F., Protasov A. G., Galagan R. M., Muraviov A. V., Lysenko I. I. SMARTPHONE-BASED AUTOMATED NON-DESTRUCTIVE TESTING DEVICES // Приборы и методы измерений. 2020. №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/smartphone-based-automated-non-destructive-testing-devices> (дата обращения: 16.06.2023).

					ДП ПК 91.09.1760.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

[20] Mei, Z.; Kuts, Y.; Kochan, O.; Lysenko, I.; Levchenko, O.; Vlach-Vyhrynovska, H. Using Signal Phase in Computerized Systems of Non-destructive Testing. Meas. Sci. Rev. 2022, 22, 32–43.

[21] Y. Kuts, O. Kochan, I. Lysenko and R. Humnilovych, "Methodology for Measuring Phase Shifts of Signals Using Discrete Hilbert Transform," 2021 13th International Conference on Measurement, Bratislava, Slovakia, 2021, pp. 18-21, doi: 10.23919/Measurement52780.2021.9446811.

[22] Стислий україно-англійський тлумачний словник термінів з вихрострумowego неруйнівного контролю [Електронний ресурс] : додатковий матеріал для здобувачів ступеня бакалавра та магістра за освітньою програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні» спеціальностей 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології та 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка / Ю. В. Куц, В. М. Учанін, Ю. Ю. Лисенко ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 942 Кбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 63 с.

					ДП ПК 91.09.1760.000ПЗ	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТКИ

					ДП ПК 91.09.1760.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54