

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

Приладобудівний факультет

Кафедра приладів та систем неруйнівного контролю

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Анатолій ПРОТАСОВ

«__» _____ 20__ р.

Дипломний проєкт

на здобуття ступеня бакалавра

**за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи
та технології неруйнівного контролю і діагностики»**

спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

**на тему: «Вихрострумний дефектоскоп для визначення експлуатаційної
пошкодженості елементів конструкцій»**

Виконав:

студент IV курсу, групи ПК-61 Кібаленко Вадим Віталійович _____

Керівник:

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

Консультант з графічного розділу:

ст.вик., к.т.н. Богдан Галина Анатоліївна _____

Консультант з розробки ел. схеми:

к.т.н., доцент Баженов Віктор Григорович _____

Рецензент: _____

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

Студент _____

Київ – 2020 року

**Пояснювальна записка
до дипломного проєкту
на тему: «Вихрострумний дефектоскоп для визначення
експлуатаційної пошкоджуваності елементів
конструкцій»**

Київ – 2020 року

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

Приладобудівний факультет
Кафедра приладів 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 неруйнівного контролю і діагностики»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Анатолій ПРОТАСОВ

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту

Кібаленко Вадим Віталійович

1. Тема проєкту «Вихрострумовий дефектоскоп для визначення експлуатаційної пошкоджуваності елементів конструкцій», керівник проєкту Куц Юрій Васильович, доктор технічних наук, професор, затверджені наказом по університету від «25» травня 2020 р. № 1180-с

2. Термін подання студентом проєкту 16 червня 2020 року

3. Вихідні дані до проєкту: ОК – елементи конструкцій літальних апаратів з листа дюралюмінію, товщина листа – 3 мм

4. Зміст пояснювальної записки

Вступ

1. Обґрунтування вихрострумового методу виявлення експлуатаційної пошкоджуваності елементів конструкцій літальних апаратів

2. Розрахунок системи «ВСП-ОК»

3. Вибір та розрахунок електричних схем дефектоскопу

Висновки

Список використаних джерел

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) 3 креслеників

1 – Схема електрична принципова

2 – Схема електрична структурна

3 – Трансформаторний вихрострумний перетворювач

6. Консультанти розділів проєкту*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Графічний	ст.вик., к.т.н. Богдан Г.А.		
Електричний	к.т.н., доцент Баженов В.Г.		

7. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Формулювання завдання проєкту	10.02.2020	
2	Обговорення змісту ПЗ	18.02.2020	
3	Розрахунок компонентів	20.03.2020	
4	Оформлення пояснювальної записки	24.04.2020	
5	Розробка креслеників	03.06.2020	

Студент

Вадим КІБАЛЕНКО

Керівник

Юрій КУЦ

Анотація

У цій роботі був спроектований вихрострумний дефектоскоп для визначення експлуатаційної пошкоджуваності елементів конструкцій. У вступі обґрунтовується актуальність і необхідність розробки.

У першому розділі проведено аналітичний огляд, в якому були розглянуті: основні частини планера літака, зокрема, їх обшивку та матеріал, з якого її виготовляють. Також було наведено дефекти, які з'являються в обшивці під час експлуатації. Крім того, було проведено загальний огляд та нормативно-технічну базу вихрострумного контролю та наявні прилади за темою проєкту.

У другому розділі було обрано тип вихрострумного перетворювача, метод вимірювання інформаційного параметра та проведений розрахунок цього перетворювача. В розрахунку перетворювача були обрані конструктивні параметри перетворювача, розраховано вихідні сигнали, граничне значення струму перегріву котушки, тощо.

У третьому розділі було розроблено та описано структурну схему приладу та підібрані компоненти схеми, такі як мікроконтролер, синтезатор частоти, операційний підсилювач, тощо. Крім того, був розрахований фільтр низьких частот. Розроблений вихрострумний дефектоскоп для визначення експлуатаційної пошкоджуваності конструкцій відповідає всім вимогам.

Annotation

In this work, an eddy current flaw detector was designed to determine the operational damageability of structural elements. The introduction substantiates the relevance and necessity of development.

In the first section, an analytical review was conducted, which considered: the main parts of the aircraft glider, in particular, their skin and the material from which it is made. Defects that appear in the casing during operation have also been reported. In addition, a general review and regulatory framework for eddy current control and available devices on the project topic were conducted.

In the second section, the type of eddy current transducer, the method of measuring the information parameter and the calculation of this transducer were selected. In the calculation of the converter, the design parameters of the converter were selected, the output signals, the limiting value of the coil overheating current, etc. were calculated.

The third section developed and described the block diagram of the device and selected components of the circuit, such as a microcontroller, frequency synthesizer, operational amplifier, etc. In addition, a low-pass filter was calculated. The developed eddy current flaw detector for determination of operational damageability of designs meets all requirements.

ЗМІСТ:

Вступ	8
1. Обґрунтування вихрострумowego методу виявлення експлуатаційної пошкоджуваності елементів конструкцій літальних апаратів.....	10
1.1 Фізичні основи ВСК	10
1.1.1 Типи ВСП.....	12
1.1.2 Конструкції накладних ВСП та їх типи	21
1.1.3 Вихрострумова структуроскопія	24
1.2 Аналіз ОК	25
1.2.1 Крило	27
1.2.2 Фюзеляж.....	28
1.2.3 Оперення.....	30
1.3 Види експлуатаційних пошкоджень	32
1.3.1 Причини та види пошкоджень елементів конструкцій ПС.....	32
1.3.2 Втомні пошкодження	34
1.3.3 Корозійні ураження	35
1.3.4 Випадкові експлуатаційні пошкодження.....	38
1.4 Аналітичний огляд існуючих приладів за темою проекту.....	38
1.4.1 Дефектоскоп ВД-81 Eddyson	38
1.4.2 Структуроскоп ВЭ-26НП.....	40
Висновки до 1 розділу.....	42
2. Розрахунок системи «ВСП-ОК».....	43
2.1 Вибір перетворювача та методу вимірювання контрольованого параметра	43
2.1.1 Вибір ВСП.....	43

					ПК 61.080000.000ПЗ			
ЗМН	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Кібаленко В.В.			Вихрострумовой дефектоскоп для визначення експлуатаційної пошкоджуваності елементів	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.		Куц Ю.В.						70
Н. Контр.					ПБФ, ПК-61			
Затверд.		Куц Ю.В.						

2.1.2	Фазовий метод контролю	43
2.2	Розрахунок ВСП.....	46
Висновки до 2 розділу:		56
3.	Вибір та розрахунок електронних схем дефектоскопу	58
3.1	Розробка схеми електричної структурної та опис роботи приладу.....	58
3.2	Підбір та розрахунок елементів принципової схеми	59
3.2.1	MAX4165	59
3.2.2	K155JA3	61
3.2.3	AD9834	62
3.2.4	ATxmega32D3	63
3.2.5	Розрахунок ФНЧ	65
Висновки до 3 розділу:		66
ВИСНОВКИ		67
Список використаних джерел.....		68

					<i>ПК61.08.0000.000 ПЗ</i>	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Перелік умовних позначень, символів, скорочень і термінів:

ПС – повітряне судно;

ЛА – літальний апарат;

НК – неруйнівний контроль;

ВСК – вихрострумний контроль;

ОК – об'єкт контролю;

АЦП – аналого-цифровий перетворювач;

ПК – персональний комп'ютер;

ВП – вихрострумові прилади;

НВСП – накладний вихрострумний перетворювач;

МК – мікроконтролер.

					<i>ПК61.08.0000.000 ПЗ</i>	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вступ

Сьогодні моніторинг важливих компонентів повітряних апаратів є найістотнішим заходом для надійного використання та продовження життєвого циклу конструкцій літаків. Адже без відповідних заходів з певною періодичністю в конструкціях авіалайнерів можуть виникнути критичні пошкодження і це може стати не тільки небезпекою для життя пасажирів, так і багатомільйонними втратами коштів.

Компоненти літака перевіряються на всіх етапах: від збирання та монтування їх в повітряне судно (ПС) до закінчення терміну експлуатації. Найтривалішим періодом в життєвому циклі ПС є сама експлуатація і на цьому етапі важливо не лише подбати про передчасне виявлення втомних, корозійних, втомно-корозійних та інших дефектів, а і розробити сукупну програму заходів (правильна періодичність контрольних заходів, тощо), яка дозволить чітко оцінювати та прогнозувати ушкодження, об'єми та час ремонту, який і попереджує виникнення дефектів. Але все ж таки зі збільшенням років експлуатації ПС зростають також як й імовірність виникнення дефектів в різних місцях конструкцій, так і об'єми робіт по ремонту. Як правило, компоненти конструкції ПС постійно піддаються надто високим навантаженням відносно міцності їх матеріалу, тому навіть невеликі пошкодження можуть заподіяти поломку певної деталі чи навіть декількох відразу. Авіація якраз є однією з тих галузей, де період переходу від невеликих тріщин в деталях так конструкціях до поломки один із найшвидших. Не менш важливим є те, що літаки постійно піддаються циклічним навантаженням (завантажуються і розвантажуються) під час керування, польоту, посадки, зростання тиску в салонні, тощо. Тому виникнення втомного розтріскування в деталях конструкції ПС фактично неминуче – це стається постійно через певний час. Це лише один із видів дефектів в компонентах повітряних суден, але навіть він вже дає зрозуміти важливість неруйнівного контролю (НК) в цій галузі. Саме НК може стати головною сходинкою між життям і смертю.

					ПК61.08.0000.000 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

В авіаційній галузі одним з провідних методів НК є вихрострумний контроль (ВСК). Він є високопродуктивним і надійним, який не має особливих норм щодо підготовки поверхні. В арсеналі ВСК також є інші важливі переваги, до них відносять: безконтактність поміж приймачем та об'єктом контролю (ОК), дешевизна, безпечність для контролера, тощо.

					ПК61.08.0000.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1. Обґрунтування вихрострумowego методу виявлення експлуатаційної пошкоджуваності елементів конструкцій літальних апаратів

1.1 Фізичні основи ВСК

Магнетизм, який лежить в основі генераторів, стерео динаміків, реле та електродвигунів також є тією силою, яка забезпечує важливу категорію інструментів неруйнівного контролю – вихрострумові прилади (ВП).

Контроль цими приладами активно застосовується в аерокосмічній та інших промисловостях, де обов'язкова перевірка тонкого металу на наявність проблем, які пов'язані з безпекою та якістю. Крім того, ВСК може застосовуватись не лише для виявлення тріщин, несучільностей в структурі металічних листів та труб, він також використовується для вимірів певних змін товщини металу: визначення наявності корозії під обшивкою літака, для вимірювання електропровідності, моніторинг ефекту термічної обробки та визначення товщини непровідних покриттів над струмопровідними підкладками.

ВСК дає змогу швидко контролювати великі площі і не потребує нанесення спеціальних рідин на ОК для зчеплення. Також вихрострум може застосовуватись для перевірки твердості матеріалу, вимірювання тонкого шару непровідного покриття, такого як фарба на деталях із металу. ВСК дещо обмежений матеріалами, які можуть проводити електрику і легко можна здогадатись, що він не підходить для контролю пластмас. ВСК може використовуватись разом із ультразвуковим методом НК як взаємодоповнюючі, так ВСК має переваги для швидкого поверхневого контролю, а ультразвуковий краще проникає в глибину ОК.

Вихрострумний контроль заснований на фізичному явищі електромагнітної індукції [1]. У вихрострумному датчику змінний струм протікає через дротяну котушку і генерує коливальне магнітне поле. Якщо зонд та його магнітне поле підносяться до провідного матеріалу, наприклад до металевого ОК, круговий потік електронів, відомий як вихровий струм, почне переміщатися по металу, подібно до закручення води. Вихровий струм,

					ПК61.08.0000.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

який протікає через метал буде генерувати власне магнітне поле, котре буде взаємодіяти з котушкою і її полем через взаємну індуктивність. Дефекти або зміни в товщині металів, такі як, наприклад, розтріскування змінять або ж перервуть амплітуду та картину вихрового струму, і результуюче магнітне поле. В свою чергу, це впливає на рух електронів в котушці, змінюючи електричний імпеданс котушки. За допомогою змін в амплітуді та фазового кута імпедансу, які відображає пристрій ВСК, сертифікований оператор буде реєструвати зміни у випробовуваному ОК.

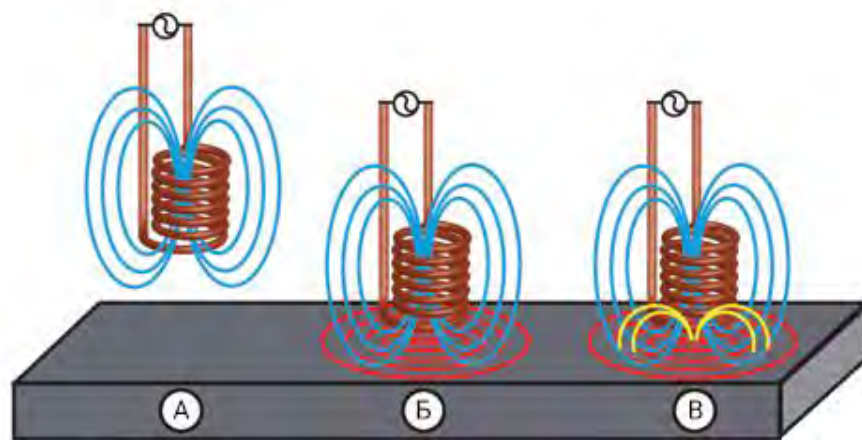


Рис. 1.1 Виявлення дефекту за допомогою ВСК:

а – змінний струм протікає через котушку з вибраною частотою та генерує магнітне поле навколо котушки;

б – в електропровідному матеріалі з'являються вихрові струми, коли котушка розміщується над провідним матеріалом;

в – дефекти в деталі будуть порушувати кружляння вихрових струмів, що призведе до переміни індуктивного зв'язку, так за зміною імпедансу ми і отримаємо інформацію про наявність дефекту.

За допомогою ВСК можуть бути проведені безліч різноманітних вимірів та перевірок. При відповідних обставинах **вихрострумівий НК може використовуватися для:**

- вимірів товщини покриття
- знаходження тріщин

									Арк.
									11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ПК61.08.0000.000 ПЗ				

- вимірів товщини матеріалу
- виміру електропровідності для контролю структури, однорідності хімічного складу, механічних властивостей матеріалу і таке інше [4].

Деякі з переваг вихрострумowego НК:

- висока чутливість до малих дефектів та тріщин
- моментальний результат контролю
- портативність
- універсальність (може використовуватися не тільки для ідентифікації дефектів)
- практично відсутність підготовки поверхні
- безконтактність
- контроль ОК складної форми та великих розмірів
- легко ідентифікує підповерхневі дефекти
- незалежність від тиску, вологості, тощо

До недоліків вихрострумowego НК можна віднести:

- обмеженість глибини проникнення
- довідникові стандарти, які потрібні для налаштування
- потреба в більш обширних навичках, ніж в інших методах НК
- контроль лише електропровідних матеріалів
- доступність поверхні для датчика
- розшарування, які лежать паралельно котушці датчика і напрямку сканування не виявляються

1.1.1 Типи ВСП

На рис. 1.2 показана наглядна схема, на якій показана вся типологія датчиків. Серед них не можна виділити якийсь основний тип, всі ВСП мають як свої плюси, так і мінуси. Тому кожна галузь вибирає перетворювач під конкретну деталь в залежності від її параметрів [2].

					ПК61.08.0000.000 ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

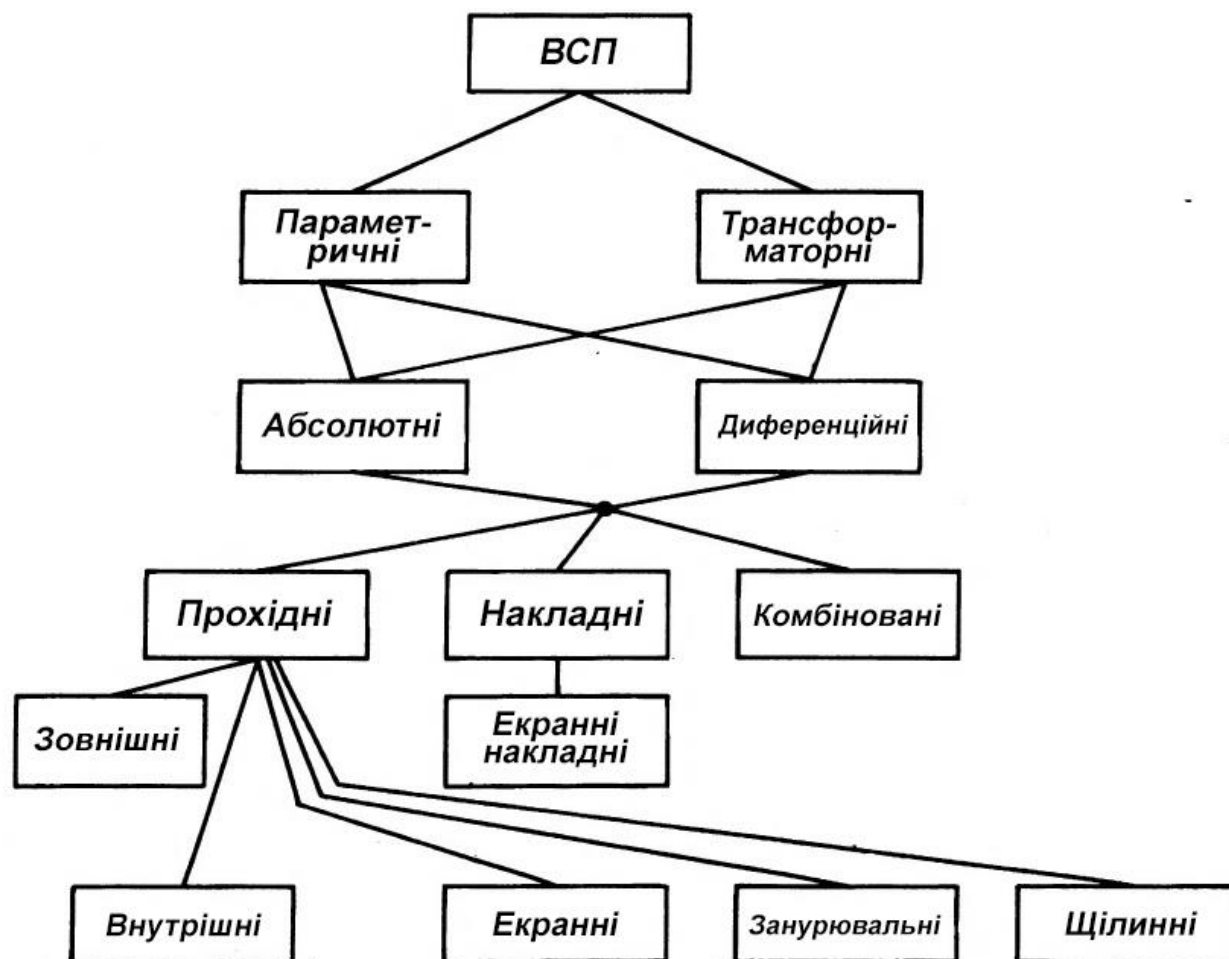


Рис. 1.2 Типи ВСП

В залежності від того, як параметри досліджуваного об'єкта перетворюються в вихідні сигнали ВСП поділяються:

- параметричні;
- трансформаторні.

В складі параметричного ВСП (рис. 1.3, б) наявна лише збуджуюча котушка (котушка індуктивності). Такі датчики хороші через свою простоту по конструкції та можливість бути виконаними в більш компактних розмірах. Але характеристики їх сигналів дуже сильно залежать від температури об'єкта та навколишнього середовища через те, що власний опір такої котушки додається до внесеного, яке несе інформацію про параметри ОК, і температурна нестабільність параметрів котушки дуже істотно впливає на

результат. Температурна стабільність набагато легше досягається в трансформаторних ВСП (рис. 1.3, а) [3].

Трансформаторний ВСП, в свою чергу, має дві обмотки – вимірювальну та збуджуючу. Сигнал таких перетворювачів більш стійкий до температурних впливів. Тому такі перетворювачі мають пріоритет перед параметричними в ситуаціях, коли вплив температури спричиняє значний вплив на характеристики, які отримуються з сигналу ВСП.

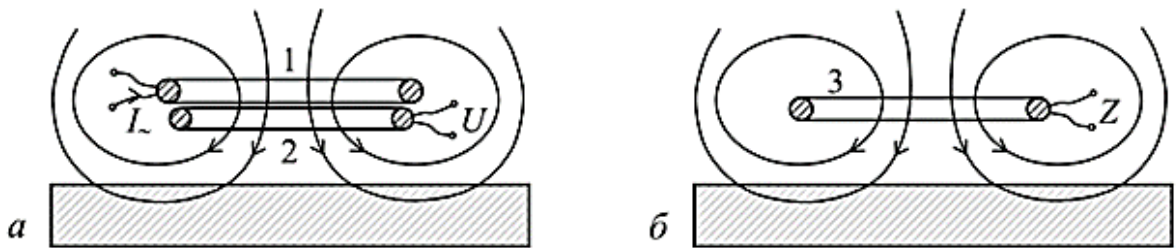


Рис. 1.3 Трансформаторний (а) та параметричний (б) ВСП. 1 – котушка збудження; 2 – вимірювальна котушка; 3 – котушка індуктивності.

В залежності від того, як котушки поєднуються, їх ділять на абсолютні (рис. 1.4, а) та диференціальні (рис. 1.4, б). Вихідний сигнал абсолютного ВСП залежить від абсолютного значення параметра ОК, який контролюється. А в диференціальному – від різниці цих параметрів на двох ділянках ОК.

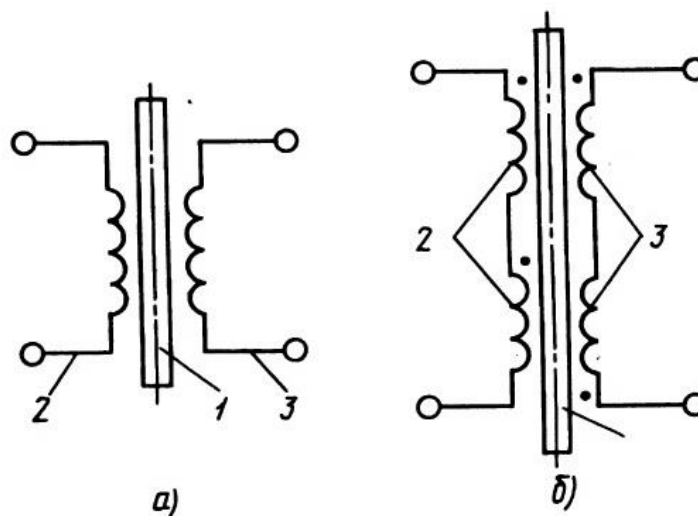


Рис 1.4 Абсолютний (а) та диференціальний (б) ВСП:
1 – ОК; 2 – збуджуючі котушки; 3 – вимірювальні котушки

Перетворювачі по просторовому розташуванню ВСП щодо ОК
 поділяються на:

- екранні накладні;
- накладні;
- прохідні занурювальні;
- прохідні внутрішні;
- прохідні зовнішні;
- прохідні екранні
- прохідні щілинні
- комбіновані.

Як правило, прохідні ВСП поділяються на занурювальні, внутрішні та зовнішні. Відмітною особливістю таких ВСП являється те, що вони проходять (в процесі контролю) або зовні об'єкта, охоплюючи його (зовнішні), або всередині (внутрішні), або занурюються в рідкий електропровідний об'єкт.

На рис. 1.5 можна побачити деякі різновиди зовнішніх прохідних ВСП трансформаторного типу. За допомогою такого типу перетворювачів можна контролювати труби, овальність дротів чи прутків, тощо. Крім того, цей тип перетворювачів дуже ефективний на серійному виробництві через те, що він дозволяє з легкістю контролювати велику кількість дрібних виробів [2].

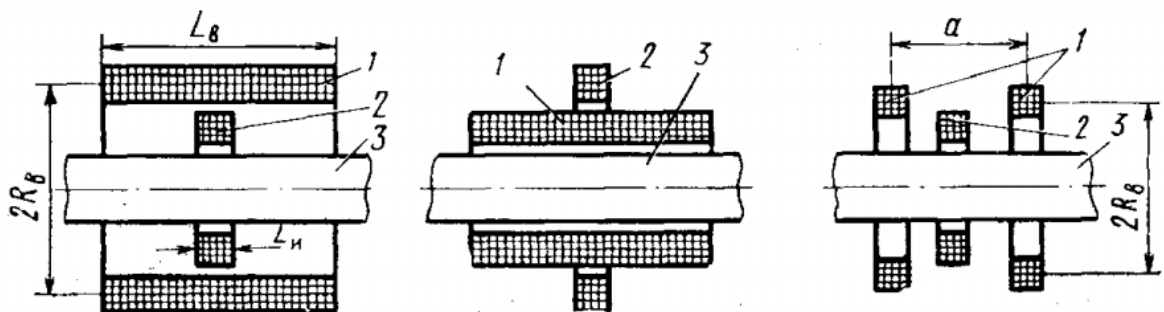


Рис. 1.5 Прокідні ВСП (зовнішні):

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

										Арк.
										15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ПК61.08.0000.000 ПЗ					

На рис. 1.6 зображені внутрішні прохідні ВСП, їхньою особливістю є те, що вони мають достатньо короткі вимірювальні та збуджуючі котушки. Це дозволяє розмістити їх всередині ОК та контролювати, як правило, труби ти подібні їм вироби, куди б можна було помістити наш вихрострумний перетворювач.

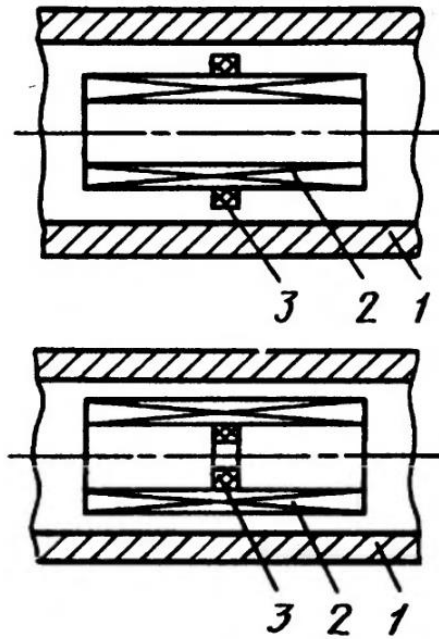


Рис. 1.6 Прохідні ВСП (внутрішні):

1 – об’єкт контролю; 2 – збуджуюча котушка; 3 – вимірювальна котушка

Прохідні ВСП занурювального типу, котушки яких такі ж як наведеному рис 1.7, занурюються у рідке середовище, яке проводить електричний струм [2].

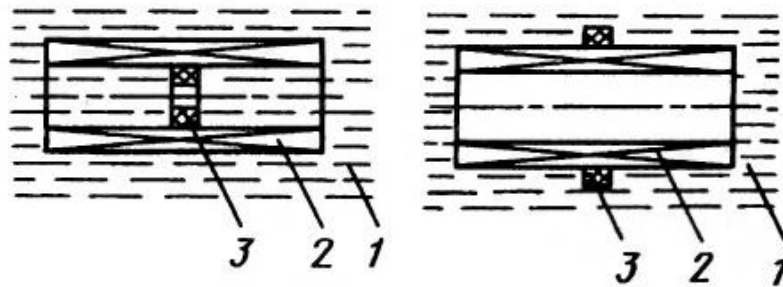


Рис. 1.7 Занурювальні ВСП:

1 – об’єкт контролю; 2 – збуджуюча котушка; 3 – вимірювальна котушка

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ПК61.08.0000.000 ПЗ

Арк.

16

Що стосується екранних ВСП, там об'єкт контролю знаходиться між збуджуючою та вимірювальною котушками. ВСП такого типу зображені на рис. 1.8. Ці перетворювачі доцільно використовувати при двосторонньому доступі до ОК (наприклад, при контролі труб, стрічок, тощо). Екранні перетворювачі, на відміну від занурювальних, зовнішніх та внутрішніх, бувають лише трансформаторного типу.

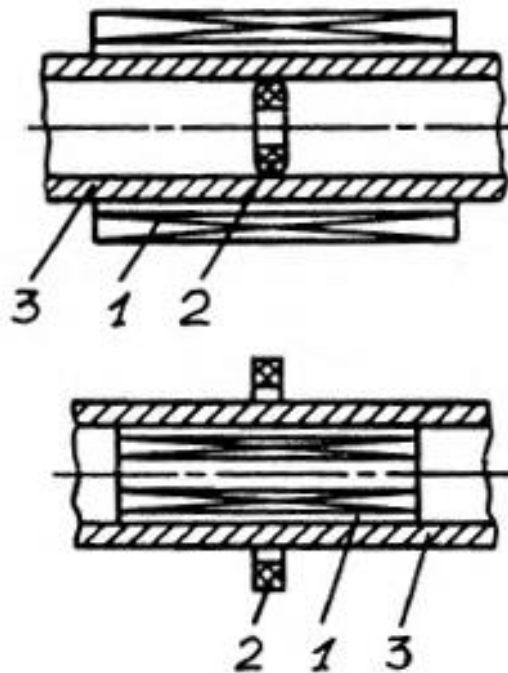


Рис. 1.8 Прохідні екранні перетворювачі:

1 – збуджуюча котушка; 2 – вимірювальна котушка; 3 – об'єкт контролю

Щілинні ВСП (рис. 1.9) також належать до прохідних, зазвичай їх використовують, коли з'являється необхідність у значній локалізації зони контролю при збереженні початкових розмірів перетворювача. Це можна зробити за допомогою концентраторів та правильно вибравши форму обмотки. Після цих маніпуляцій ми досить сильно можемо звузити контрольовану зону, підвищити чутливість та отримати гарний захист від перешкод.

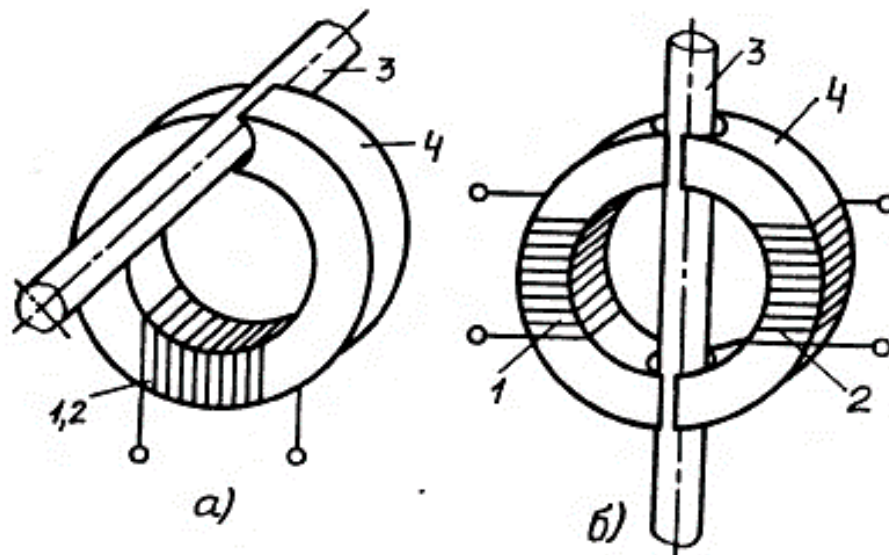
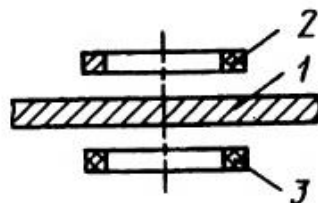
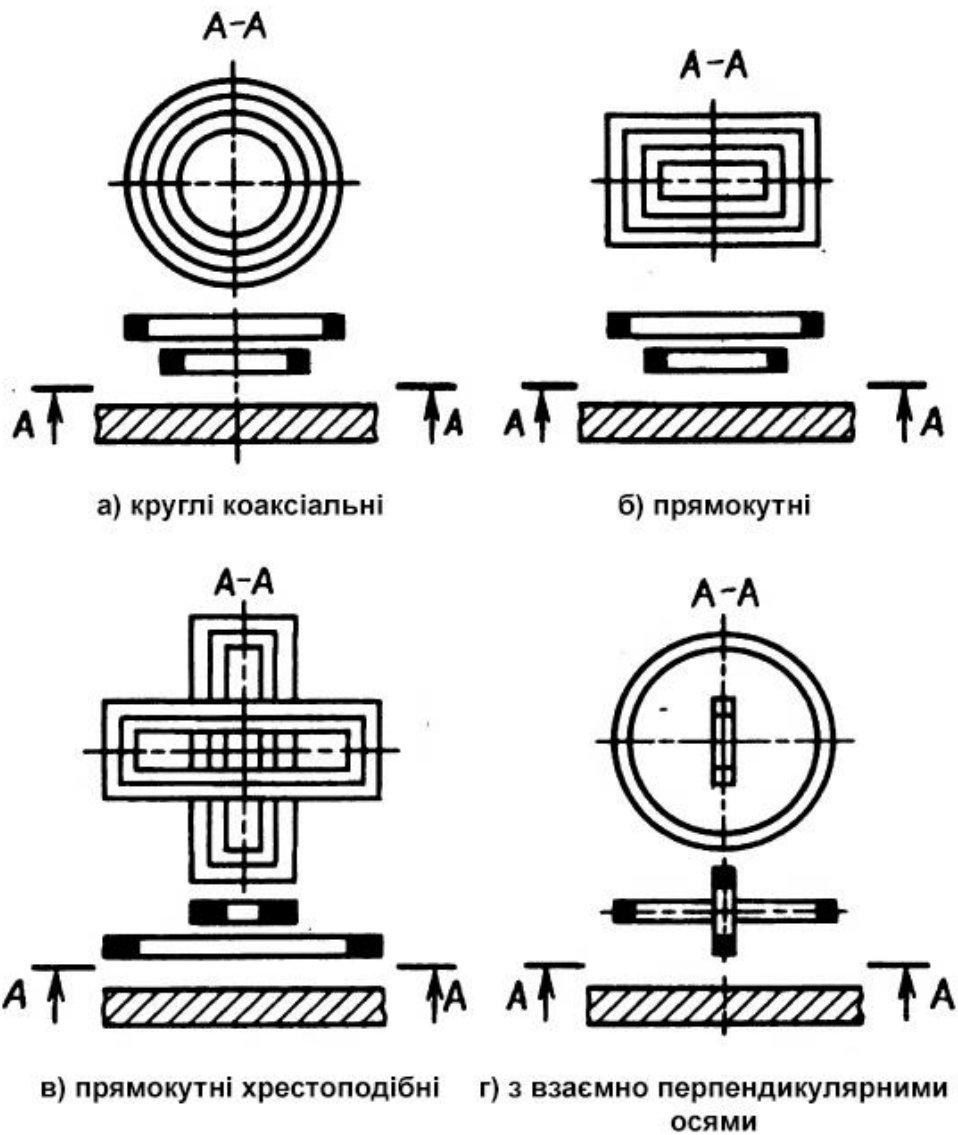


Рис. 1.9 Щілинні вихрострумові перетворювачі:

а – параметричний; б – трансформаторний; 1 – котушка збудження; 2 – вимірювальна котушка; 3 – об’єкт контролю; 4 – магнітопровід

Перейдемо до накладних перетворювачів (рис. 1.10). До них відносяться ВСП, які розташовуються над поверхнею об’єкта контролю. В залежності від того, до якого типу за перетворенням параметру вони належать (трансформаторного чи параметричного), ВСП накладного мають одну чи декілька котушок. Вони досить універсальні, адже їх можна використовувати для контролю об’єктів різних форм (плоскої, циліндричної, складної), тому вони і мають більш широкий спектр застосування, ніж прохідні ВСП. Обмотки накладних вихрострумових датчиків бувають круглі коаксіальні, прямокутні хрестоподібні та інші [2]. Більш детальну їх класифікацію можна побачити на рис. 1.10.

Накладні ВСП використовують для контролю питомої електропровідності металів та сплавів, задач структуроскопії деталей, контроль об’єктів складної форми, тощо. Цим ВСП притаманна висока чутливість до місцевих дефектів (більша, ніж у прохідних), тому вони можуть використовуватися в ручних дефектоскопах і автоматизованих комплексах потокового контролю прокату та труб [1].



д) екранний ВСП з розміщенням збуджуючих 2 і вимірюючих 3 обмоток по різні сторони ОК 1

Рис. 1.10 Види котушок накладних вихрострумових перетворювачів

Досягнення дуже високого рівня локальності контролю можливе завдяки застосуванню концентраторів поля, спеціальної конструкції вихрострумового перетворювача та його малих габаритів. Для збільшення

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

чутливості ВСП можна застосувати феромагнітний сердечник, як правило феритовий. На рис. 1.11 можна побачити ВСП з різними типами сердечників.

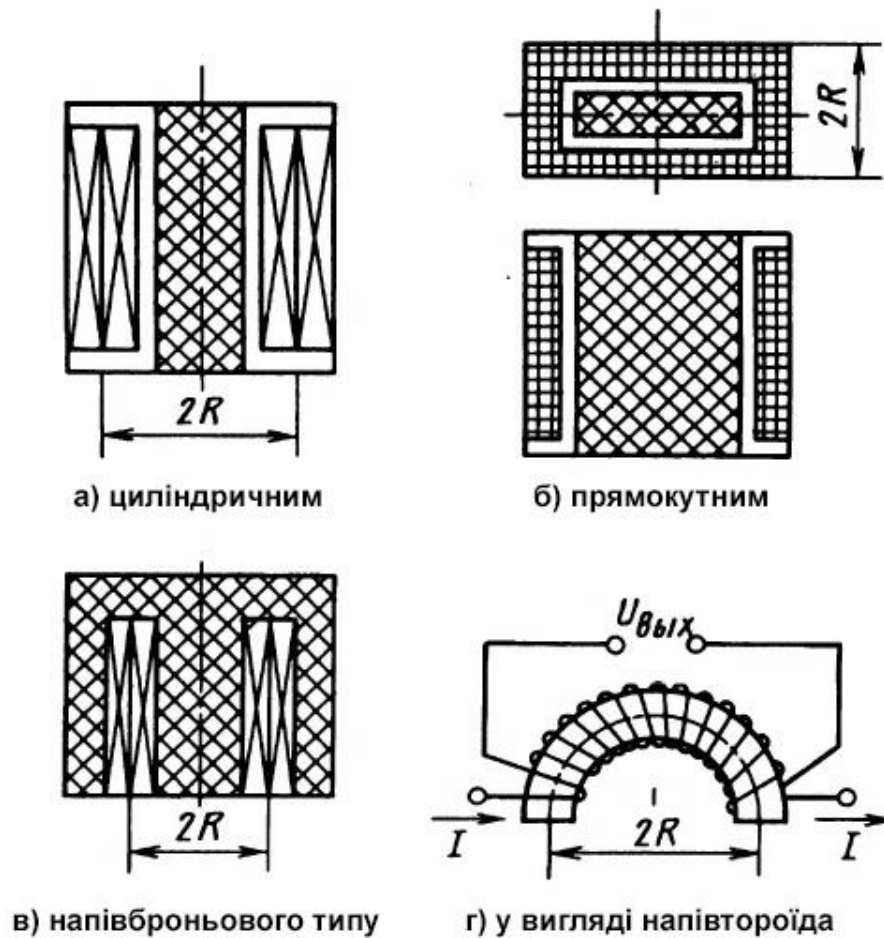


Рис. 1.11 ВСП накладного типу з сердечниками

Також за рахунок сердечників можна добре локалізувати магнітне поле та, відповідно, ділянку контролю. На рис. 1.12 зображені саме такі перетворювачі.

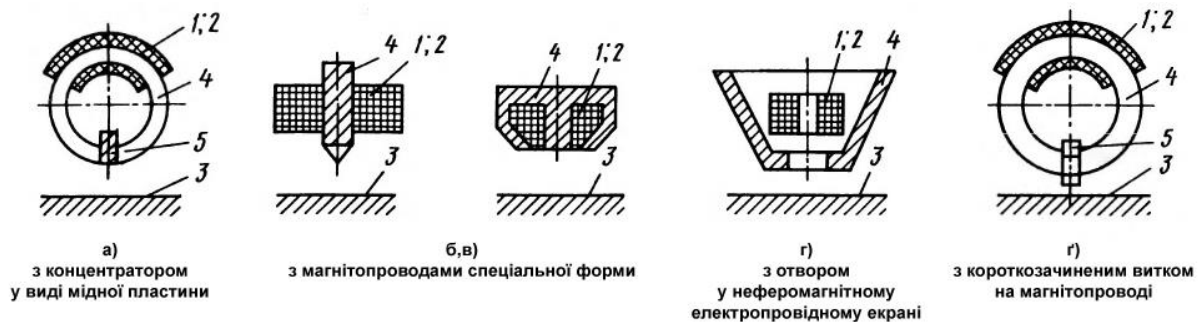


Рис. 1.12 Локальні ВСП накладного типу:

1 – збуджуюча котушка, 2 – вимірювальна котушка, 3 – об’єкт контролю, 5 – магнітопровід, 5 – концентратор

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Значною перевагою накладних ВСП є можливість створення приладу контролю з надзвичайно малою масою (0,3-0,5 кг), а також автоматизованих комплексів та переносних приладів із застосуванням під різні задачі. Сьогодні прилади ВСК з використанням накладних перетворювачів дають змогу архівувати, переглядати результати за певний період (це може бути як певний день чи місяць, рік, так і робоча зміна, тощо) завдяки використанню мікропроцесорів в поєднанні з комп'ютерами вищого рівня. Тобто сьогодні ми вже можемо не лише аналізувати дефект та приймати рішення щодо нього (в тому числі і автоматично), а й порівнювати результат з попереднім.

Основним мінусом ВСП є переміна зазору між ВСП та ОК - саме це лімітує сферу його застосування.

ВСП, які складаються з накладних вимірювальних та прохідних збуджуючих обмоток, отримали назву комбінованих (рис. 1.13) [2].

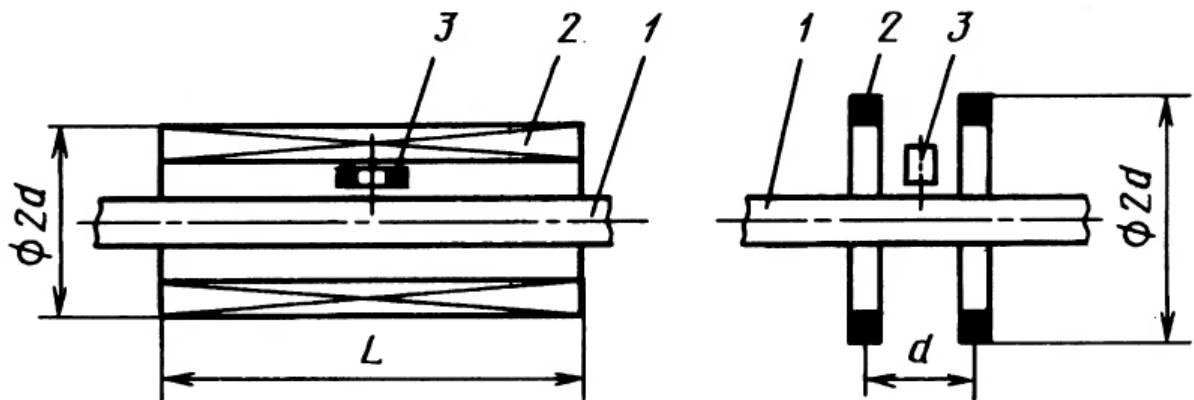


Рис. 1.13 Комбіновані ВСП:

1 – об'єкт контролю, 2 – прохідна збуджуюча обмотка, 3 – накладна вимірювальна обмотка

1.1.2 Конструкції накладних ВСП та їх типи

В залежності від поставленої мети застосовують накладні ВСП (НВСП) різних конструкцій (рис. 1.14).

Існують параметричні (з однією котушкою) та трансформаторні ВСП (з двома чи декількома котушками). Активний опір R та індуктивність L основні характеристики, що притаманні параметричним ВСП. В трансформаторному ВСП струм тече по збуджуючій котушці, а показники

									Арк.
									21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ПК61.08.0000.000 ПЗ				

напруги знімаються з вимірювальної котушки. Ці показники містять інформацію про характеристики нашого ОК. Крім активного опору R та

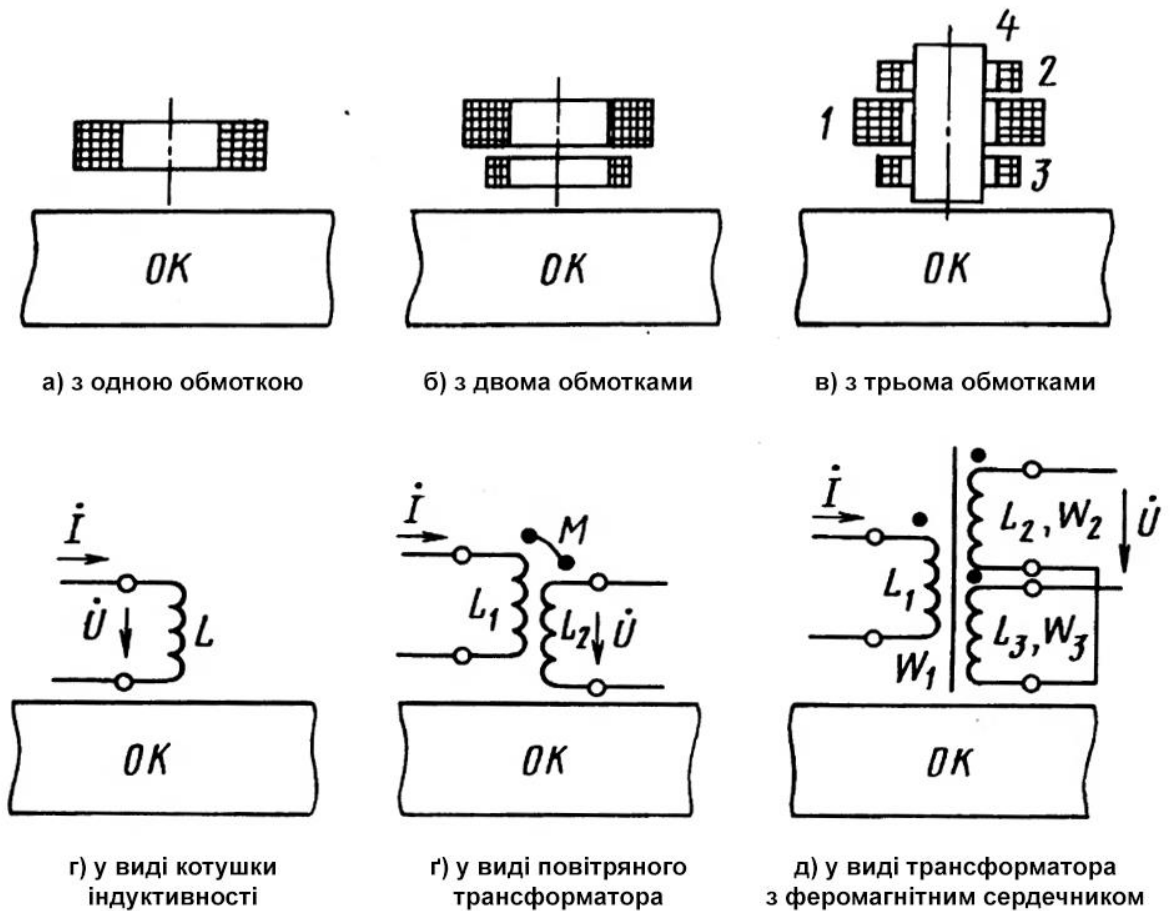


Рис. 1.14 Основні типи конструкцій накладних вихрострумівих перетворювачів

індуктивності L котушки до вихідних величин, несущих інформацію про об'єкт контролю, відноситься і взаємоіндукція M . Ця величина може бути комплексною, так як вона зв'язана з напругою (вихідною) та її фазою.

В параметричному ВСП є лише одна котушка (рис. 1.14, а), яка являється котушкою індуктивності (рис. 1.14, г). Вторинне магнітне поле вихрострумів з'являється коли ВСП підносять до ОК. Через це відбувається зміна індуктивності (як правило вона зменшується) і збільшення активного опору. Про властивості ОК можна зробити умовиводи по зміні цих параметрів.

Не менше двох котушок міститься в трансформаторних ВСП (рис 1.14 б, в), які по факту є котушкою взаємної індукції у виді повітряного трансформатора (рис. 1.14, г) чи трансформатора сердечником із феромагнітних матеріалів (рис 1.14 д). В даному випадку його вихідною величиною є напруга на обмотках \dot{U}_1, \dot{U}_2 яка є описується модулем U і фазою φ або дійсною $\text{Re}\dot{U}$ Ре і уявною $\text{Im}\dot{U}$ Ім складовими, що формують напругу на 2-й обмотці [2]

Коли ми підносимо накладний перетворювач до ОК, змінюються не тільки індуктивність та активний опір, а й взаємна індукція M поміж котушок (як правило вона зменшується), при цьому також змінюється і модуль напруги на обох котушках (U_1, U_2) та фази φ_1, φ_2 . В свою чергу, трансформаторні ВСП набули широке застосування через високу інформативність, бо ми можемо зробити висновок про стан ОК та його властивості по одному з цих параметрів, або по всім чи деяким разом [2]. Значною перевагою трансформаторних перетворювачів є стабільність їх параметрів та стійкість до умов зовнішнього середовища.

Внесені значення – це зміни значень вихідних величин, які визначають вплив ОК на НВСП. Потрібні дані про стан ОК значно легше виділити та проаналізувати на фоні завад, якщо значення внесених величин будуть перевищувати (чим більше – тим краще) власні параметри НВСП. Отже, потрібно завжди аналізувати внесені величини за їх значенням в залежності від всіх особливостей перетворювача.

Дослідження властивостей двообмоткового НВСП є найзагальнішим з погляду на аналіз вихідних сигналів. Так як ми можемо без зайвих складнощів отримати внесені значення цих параметрів, приймаючи радіуси обмоток (первинної та вторинної) однаковими. Для виділення значень, що вносяться і мають корисну інформацію, створюють компенсацію таких же параметрів НВСП, адже модуль внесених величин, як правило, менше власних. Для трьохобмоткового ВСП, який зображений на рис. 1.14 в,

					<i>ПК61.08.0000.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

кількість витків вторинних обмоток роблять однаковою (як на рис. 1.14, д), вмикають зустрічно та роблять так, щоб вихідна напруга була рівна нулю, коли біля ВСП не знаходиться ОК. Це робиться шляхом переміщення одної із обмоток, скажімо верхньої. Напруга, котра з'являється на виході, дорівнює внесеним значенням нашого об'єкту контролю, коли його розміщують у вимірювальній зоні НВСП чи сам датчик наближують до нього і він попадає в цю зону. [2]

Найчастіше збуджуюча і вимірювальна обмотки для різних конструкцій накладних ВСП можуть бути для спрощення розрахунку та аналізу змінені витками безмежного тонкого поперечного перерізу, які є еквівалентними та збігаються за формою з середнім витком котушки [1].

Основною метою вирахування вихідних сигналів накладного ВСП є розрахунок комплексної напруги, що вноситься на вимірювальній обмотці двообмоточного ВСП. Зазвичай на практиці використовують котушки з круговими витками, саме тому головний погляд буде зосереджений на аналізі сигналів ВСП такої конфігурації. Вихрострумний контроль дає можливість демаскувати підповерхневі і поверхневі дефекти.

1.1.3 Вихрострумова структуроскопія

Структуроскопія є одним із головних завдань не тільки вихрострумного контролю, а й взагалі неруйнівного контролю в цілому. Сюди можна віднести контроль та оцінку неоднорідності структури, ідентифікацію матеріалів за марками, перевірка якості обробки деталей, тощо. Існує кореляція між структурними та механічними характеристиками металу та його електропровідністю. Тобто, можна сказати, що питома електропровідність є структурочутливою характеристикою металу чи сплаву і по змінам її значення можна виконувати діагностику механічних властивостей, структури матеріалу та іншого [4]. Коли мова йде про немагнітні метали чи сплави, де відсутній вплив магнітної проникності ОК на результат виміру, завдання виміру електропровідності немагнітних матеріалів вирішується з дуже високою точністю за допомогою ВСК. Питома

					ПК61.08.0000.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

електропровідність доцільно вимірювати за допомогою методу вихрових струмів, так як метод може використовуватися і при забруднених поверхнях ОК непровідними речовинами, тобто він до них нечутливий. Також важливо те, що результат не залежить від вологості, тиску та забрудненості газового середовища [5].

Геометричні розміри, несучільності в матеріалі, електричні та магнітні властивості, взаємне розташування ОК та датчика – всі ці характеристики об'єкта впливають на розподіл та інтенсивність вихрового струму. Якщо поглянути з однієї сторони, то це можна віднести до переваг цього методу, так як це дає змогу проводити багатопараметровий контроль, але коли нам потрібно контролювати один параметр, то всі інші представляють собою завади і вплив цих параметрів потрібно зменшувати. Температура об'єкта, зазор між вихрострумовим датчиком та ОК, товщина нашого об'єкта (зазвичай при товщинах, які менше 1 мм) є основними заважальними факторами при контролі електропровідності.

1.2 Аналіз ОК

Обшивка літака (рис. 1.15) являє собою оболонку з дюралюмінію, яка формує поверхні фюзеляжу, крила, оперення. вона належить конструктивно-силових елементів літака [7].



Рис. 1.15 Обшивка літака

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ПК61.08.0000.000 ПЗ

Арк.

25

В новітніх повітряних суднах найбільш використовуваним типом є металічна жорстка «робоча» обшивка, котра сприймає дуже багато різних знакозмінних аеродинамічних навантажень (зовнішніх). До таких навантажень належать крутні та згинаючі моменти, поперечні сили, які діють на каркас літального апарату. До переваг такої обшивки належать: масо-габаритні показники, жорсткість та висока міцність. Раніше активно застосовувалася так звана «м'яка» несилова обшивка в літаках, які мали малу швидкість польоту. Сьогодні до таких аеропланів належать лише досить легкі спортивні та тренувальні літаки. Таку обшивку будують з фанери та тканини.

Обшивка буває тонкою та товстою, все залежить від типу конструкції. Тонка підкріплена стрингерним набором (повздовжніми балками), а товста виконується з монолітної панелі, яка пресується або фрезерується, чи навіть трьохшаровою. Для побудови обшивки використовують металічні листи здебільшого з алюмінію та його сплавів через високу міцність. В місцях, що мало навантажені, обшивка має товщину ~0,5 мм, у сильно навантажених, зокрема таких, як кінець крила до 4-6 мм. Зазвичай, верхня частина крила піддається циклічним стискаючим зусиллям, а нижня – розтягуючим.

Сьогодні найчастіше використовується шарова обшивка. До її складу входять 2 несучих шари та заповнювач, який розміщується між ними. Уже знаємо, що ці шари обшивки виготовляються з алюмінію та його сплавів, а от наповнювач зазвичай використовується сотовий, виготовлений з металічної фольги гофруванням та з'єднанням за рахунок склеювання, зварювання, тощо. Окрім сотового також використовуються пористі наповнювачі і ті, що виготовляються з гофрованих листів.

					ПК61.08.0000.000 ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

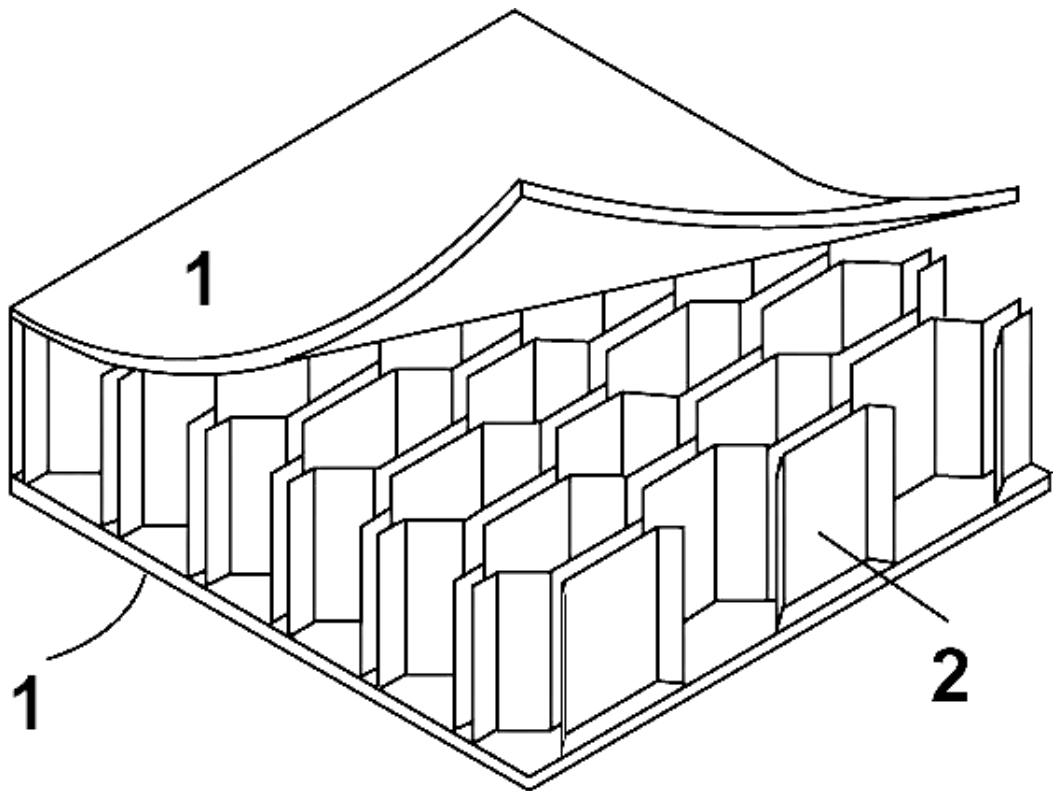


Рис.1.16 Сотова конструкція крила:

1 – листи дюралюмінію; 2 – сотовий наповнювач

Розглянемо більш детально основні частини планера літака.

1.2.1 Крило

На крилі знаходяться засоби механізації (передкрилки, закрилки) та рулі крена (елерони). Крило відноситься разом з горизонтальним і вертикальним оперенням до несущих частин літака. Основним завданням крила є створення піднімної сили та забезпечення поперечної стійкості літака.

Від форми, розмірів і розташування крила залежить літно-технічні характеристики ЛА, саме тому воно є важливою частиною конструкції.

Крило становить значну масу ЛА. Для дозвукових літаків:

$$m_{кр} = (0,07 \dots 0,16) m_0 = (0,35 \dots 0,45) m_{кон}, \text{ де}$$

$m_{кр}$ – маса крила,

m_0 – взлітна маса ЛА

									Арк.
									27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ПК61.08.0000.000 ПЗ				

$m_{\text{кон}}$ – мама конструкції ЛА

До крила виноситься ряд вимог: малий лобовий опір і висока аеродинамічна якість (аеродинамічна вимога), можливість розміщення кузова, агрегатів, засобів механізації на крилі при незначному збільшенні його опору (компонуюча вимога).

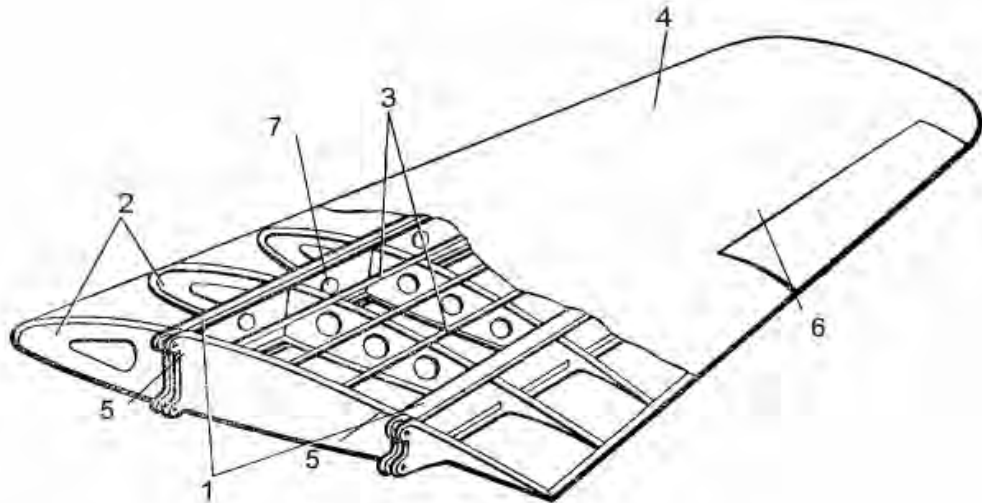


Рис. 1.17 Конструкція крила літака

На рис. 1.17 зображена проста конструкція крила. Під номером 4 – тонка обшивка, яка підкріплена елементами поздовжнього силового набору стрингерами 3 і поперечним набором – нерв'юрами 2. Під номером 5 – моментні вузли, які передають навантаження від посиленого бортового нерв'юри до фюзеляжу. 6 – навіска електрону, де також встановленні нерв'юри. Під номером 7 показані отвори полегшення нормальних нерв'юр. Поперечну силу сприймають своєю стінкою лонжерони 1. Навантаження на них розподіляється пропорційно їх жорсткості. Таким чином, більш навантаженими є передні лонжерони в даній конструкції і, як більш міцніші, називаються стінками.

1.2.2 Фюзеляж

Фюзеляж є основою конструкції, яка зв'язує всі частини літака в одне ціле [8]. Його використовують задля розміщення комерційного навантаження, а також топлива, шасі, обладнання.

					ПК61.08.0000.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

Маса фюзеляжу $m_{\phi} = (0,08...0,15)m_0$ – це є 30-40% маси конструкції фюзеляжу.

Існує ряд вимог до фюзеляжу:

- раціональне використання його об'ємів
- забезпечення мінімального аеродинамічного супротиву
- забезпечення захисту від зовнішнього середовища та комфортних життєвих умов під час польоту

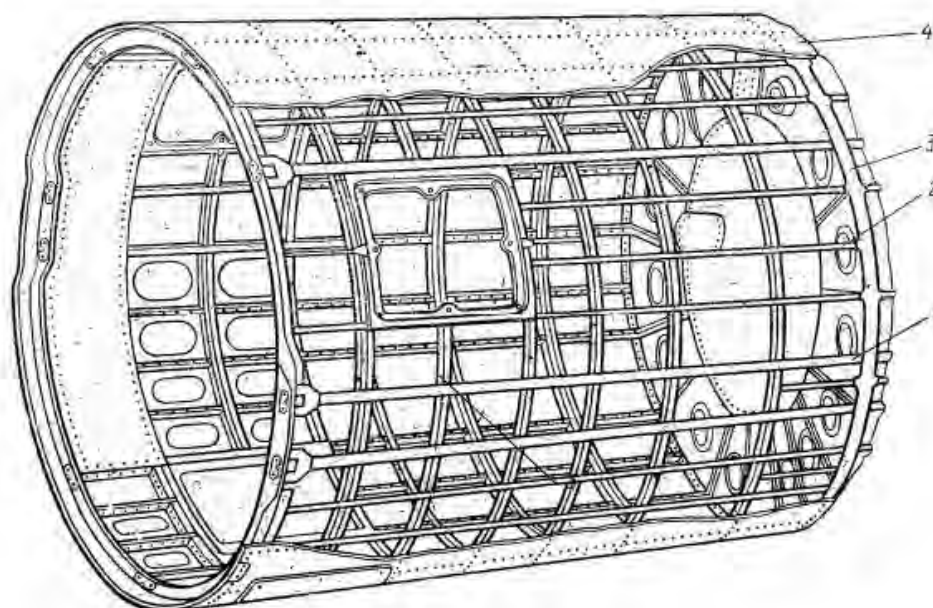


Рис. 1.18 Конструкція фюзеляжу

На рис. 1.18 показано приклад найпростішої конструкції фюзеляжу. Під номером 2 показано стрингери, які підкріплюють обшивку 4 в повздовжньому напрямку. Шпангоут 5 підкріплюють обшивку в поперечному напрямку. У місцях з'єднання фюзеляжу з крилом, а також у тих місцях, де до конструкції прикладаються велика сила встановлюють посилені шпангоути 3. Під номер 1 показані посилені стрингери, які потрібні для компенсації цілеспрямованих навантажень, прикладених до фюзеляжу.

Конструктивно-силові схеми до фюзеляжу

Фюзеляж, описаний вище є балочним. Такі фюзеляжі більш затребувані, ніж фюзеляжі фермового типу, адже вони мають ряд переваг, такі як:

- висока міцність при мінімальних затратах маси

									Арк.
									29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ПК61.08.0000.000 ПЗ				

- раціональне використання об'ємів
- найвигідніші аеродинамічні форми та гладку поверхню

Особливістю балочно-стрингерного фюзеляжу є те, що момент вигину у нього сприймається розтягуванням-стягуванням склепінням обшивки, яка підкріплена стрингерами і шпангоутами.

У свою чергу балочно-обшивні фюзеляжі складаються із обшивки, яка підкріплена набором нормальних та посилених шпангоутів. Внаслідок того, що обшивка сприймає всі види навантаження і має бути достатньо стійкою – це призводить до збільшення маси конструкції фюзеляжу загалом.

1.2.3 Оперення

Оперення – це аеродинамічна поверхня, необхідна для створення стійкості, керування та балансування літака [8]. Оперення складається з нерухомих і рухомих частин та поділяється на вертикальне та горизонтальне. Горизонтальне оперення забезпечує повздовжнє балансування, а вертикальне – шляхове балансування, стійкість і керованість літаком [9].

На рис. 1.19 зображено конструкцію оперення.

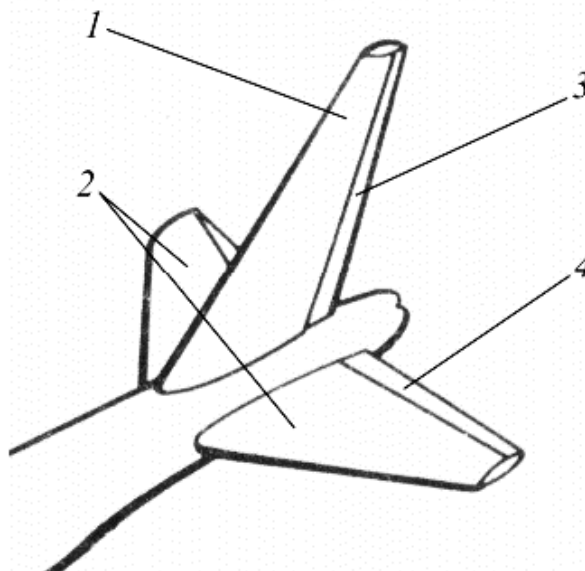


Рис. 1.19 Конструкція оперення

Де 2 – нерухома частина горизонтального оперення (стабілізатор), рухома частина – кермо висоти 4. Кіль показано під номером 1, він є нерухомою частиною вертикального оперення, а рухомою частиною є кермо напрямку 3.

Маса оперення $m_{оп} = (0,015 \dots 0,025)m_0$

Є такі вимоги до оперення:

- на всіх експлуатаційних режимах польоту розміри та розташування оперення мають забезпечувати його максимальну ефективність при найменшій масі;
- відсутність різких змін щодо стійкості та керування;
- виніс оперення із зони дії струменів, які зриваються з крила та із установки двигуна.

За своєю конструкцією кіль та стабілізатор є подібними, так само як кермо висоти і напрямку.

У невеликих літаків кіль та стабілізатор найчастіше за своєю конструкцією є дволонжеронними, а на великих літаках – моноблокові із робочою обшивкою. Стабілізатор і кіль прикріплюють до фюзеляжу за допомогою вузлів на лонжеронах та шпангоутах [9].

На рис. 1.20 зображено конструкцію кіля.

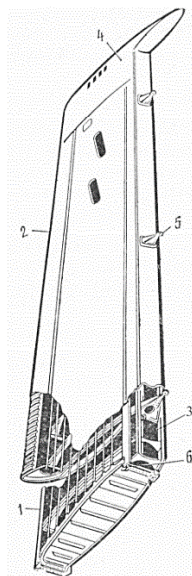


Рис. 1.20 Конструкція кіля

					ПК61.08.0000.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

Елементами конструкції кіля є: 1 – передній лонжерон; 2 – обшивка; 3 – задній лонжерон; 4 – кінцевий обтікач; 5 – вузол навіски керма напрямку; 6 – нервюра.

У свою чергу кермо і елерони частіше є однолонжерними з набором стрингерів і нервюр. Використовують рулі з сотовим і пінопластовим наповнювачем. Така конструкція дозволяє збільшити жорсткість керма і зменшити його масу [9].

1.3 Види експлуатаційних пошкоджень

1.3.1 Причини та види пошкоджень елементів конструкцій ПС

На літак та його елементи під час експлуатації постійно діють циклічні знакозмінні сили, складні кліматичні умови (наприклад тиск атмосфери, температура та її перепади) і таке інше. Слід розуміти, що всі ці чинники діють не окремо, вони комбінуються і створюють дуже значний вплив на окремі елементи літака, зокрема обшивку. Так, з плином часу, відбувається деградація фізико-механічних властивостей матеріалу. Від цього складно захистити елементи ПС, так як утворення і перебіг подібних процесів неможливо спрогнозувати, що і призводить до появи усіляких видів дефектів (рис 1.21), наприклад таких, як корозійні дефекти (найчастіше), випадкові ушкодження (зокрема атмосферні, зношування) і втомні тріщини [8]. Ніякі захисні шари під час експлуатації ПС не дають 100 відсоткову гарантію, ці шари також зношуються дуже швидко, так що надіятися на них не варто і потрібно періодично контролювати структуру та фізичні властивості матеріалів, щоб завчасно виявити зміни властивостей та попередити руйнування елементів. Так ми можемо зменшити можливість негативних наслідків, які неминуче виникають при експлуатації, виявляти і виправляти до того як вони призведуть до зниження рівня міцності нижче допустимого.

					ПК61.08.0000.000 ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рис. 1.21 Пошкодження конструкції в експлуатації

В таблиці 1.1 показано орієнтовні дані про співвідношення кількості дефектів планера в експлуатації, які обумовлені тим чи іншим фактором пошкодження. Дані в таблиці є наближеними, адже вони засновані лише на аналізі результатів дефектів конструкцій, що проводяться при дослідженнях технологічного стану та технічному обслуговуванні вітчизняних літаків [10].

Таблиця 1.1 Співвідношення кількості дефектів планера за типом

Тип дефекта	Втомні тріщини	Корозійні пошкодження	Випадкові механічні пошкодження	Інші
%	3-5	70-80	10-15	10-15

Таблиця 1.1 ілюструє ступінь небезпеки цих факторів пошкодження та вказує на те, скільки уваги йому необхідно приділи при експлуатації чи розробці.

1.3.2 Втомні пошкодження

Як показує практика, втомні пошкодження конструкції несуть найбільшу небезпеку, особливо це стосується силових елементів [9,11,12]. Обшивка також належить до конструктивно-силових установок.

Після серії катастроф через такі пошкодження, в середині минулого століття, вчені та конструктори всього світу направили свої сили на створення безпечної конструкції, яка була б захищена від втомних пошкоджень. Так і виникла система вимог та методів забезпечення відповідності до створення та технічного огляду елементів ЛА, котра базується на теорії втомлення і механіці крихкого руйнування. Ці дані були отримані в ході обширних експериментальних досліджень і досвіду експлуатації. Цей комплекс заходів контролю елементів авіалайнерів, які активно експлуатуються, з року в рік покращується і нині вона вже фактично гарантує високу надійність та стійкість елементів літаків до втомних пошкоджень.

Як ми бачимо з таблиці 1.1, відсоток виявлення втомних тріщин при експлуатації сьогодні досить малий, а це свідчить про високу ефективність побудови безпечних конструкцій літаків та якісний контроль на основі досконалого методичного забезпечення [13].

Варто відзначити, що на протязі довгого періоду система забезпечення безпеки конструкції від втомних пошкоджень тривалий час базувалась на принципі недопустимості втомних тріщин в силовій конструкції.

Сьогодні ж, зазвичай, застосовується система методів та заходів націлена на живучість конструкцій, що забезпечує можливість експлуатації силової конструкції до появи тріщин допустимого розміру. Кількість тріщин може значно зрости для конструктивних елементів, які відповідають умовам живучості.

					ПК61.08.0000.000 ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.3.3 Корозійні ураження

Корозійні ураження (див. приклад на рис. 1.23) найчастіше зустрічаються в металічних елементах планера [14].



Рис. 1.23 Корозійне ураження фюзеляжу

Жоден спосіб запобігання корозії не гарантує повний захист від неї, не дивлячись на проведення об'ємних досліджень цієї проблеми та розробки на її основі конструктивно-технологічних заходів.

Це пов'язано з наступними причинами:

- сучасні методи захисту конструкції від агресивних середовищ та власне самі метали не дають 100% гарантії виключення утворення корозійних уражень;
- незважаючи на наявність величезної кількості праць щодо виникнення різних видів корозії, нинішня наука не може надати конструкторам

					ПК61.08.0000.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

методи щодо зародження та швидкості розповсюдження корозії [15,16];

- корозійним ураженням, зазвичай, не притаманне швидке неконтрольоване розповсюдження, яке могло б призвести до жахливих наслідків.

Корозійні ураження, що виявляються при візуальному контролі, як правило, не призводять до недопустимого зниження фізико-механічних властивостей матеріалу та не є загрозою для безпеки. Програма, яка розроблена для попередження та контролю корозії у переважній кількості випадків надає потрібний рівень безпеки від корозійних уражень, але при цьому зростає і кількість робіт, які потрібно виконувати під час контрольовано-відновних робіт при експлуатації.

Спеціальні заходи, котрі створені з ціллю безпеки конструкції при появі втомних пошкоджень, відіграють важливу позитивну роль. Вони також забезпечують і високу стійкість конструкцій до корозійних уражень.

Таким чином, велика кількість корозійних уражень обумовлена відносною толерантністю до них силовою конструкцією, це і не стимулює розробку ефективних заходів по їх мінімізації.

Ось саме то корозійні ураження і є найрозповсюдженішими і до того ж, їх появу дуже важко спрогнозувати.

Все було б чудово, якби корозійні ураження не могли перебігати в корозійні чи корозійно-втомні дефекти. Вже відомо, що при експлуатації ПС деградують фізико-механічні характеристики матеріалу, що і викликає розвиток корозії різних типів:

- електрохімічна корозія (виразкова, міжкристалітна, тощо);
- хімічна корозія.

Метали, що використовуються в конструкціях ПС є термодинамічно нестійкими, через що вони і схильні до корозії електрохімічного типу. Зокрема, в обшивці досить часто виникає виразкова (пітингова) корозія. На рисунку 1.24 можна побачити типовий приклад виразкової (пітингової)

					<i>ПК61.08.0000.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

корозії обшивки фюзеляжу ПС з дюралюмінію, який експлуатувався протягом 30 років.



Рис. 1.25 Виразкова (пітингова) корозія обшивки фюзеляжу ПС

Поява корозійних уражень, зазвичай, відбувається через великий вміст кремнію, що входить до складу нашого сплаву [17].

Ще одним розповсюдженим типом корозійного ураження в обшивці є міжкристалітна. Цей вид корозії рахується одним із самих найнебезпечніших, так як її неможливо помітити візуально. Він утворює локальне руйнування металу, переважно по границям його зерен (кристалів), через що між ними послаблюється зв'язок та виникають тріщини. Це може призвести до крихкого (це дуже погано і може нести жахливі наслідки) руйнування металу. Такий вид корозії проілюстровано на рисунку 1.10 на прикладі авіалайнера, який експлуатувався в морському кліматі на протязі 15 років. Його обшивка зроблена зі сплаву Д16Т.

					ПК61.08.0000.000 ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рис. 1.26 Пітингове корозійне ураження в отворі обшивки фюзеляжу (без захисту за допомогою анодування), яке перебігло у міжкристалітну корозію.

1.3.4 Випадкові експлуатаційні пошкодження

До випадкових пошкоджень літака належить дуже широкий спектр різноманітних ушкоджень.

У деяких випадках до таких можуть бути віднесені і втомні пошкодження, корозійні пошкодження, адже етіологія їх випадкова і виникають вони при експлуатації. Але, зазвичай, до цього типу пошкоджень відносять атмосферні, механічні, зношувальні та пошкодження, які виникли під час затриманого руйнування.

1.4 Аналітичний огляд існуючих приладів за темою проекту

1.4.1 Дефектоскоп ВД-81 Eddyson

Це ручний вихрострумний дефектоскоп (ВД), який належить до класу портативних та легких ВД. Його маса складає лише 0,8 кг, а розміри –

					ПК61.08.0000.000 ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

18,8x10,7 см. Прилад має досить зручну клавіатуру та автономне живлення, тобто його можна використовувати в польових умовах. Також у ньому наявний дисплей з розширенням 320x240. Об'єм пам'яті ВД – 128 МБ, а тактова частота дорівнює 400 МГц. Більше характеристик надано в таблиці 1.2. Цей дефектоскоп активно застосовується в авіаційній, нафтогазовій, хімічній та інших промисловостях.



Рис. 1.27 Дефектоскоп ВД-81 Eddyson

Таблиця 1.2. Технічні характеристики структуроскопа ВД-81 Eddyson

Можливість виявлення дефектів:	
<ul style="list-style-type: none"> • глибиною • розкриттям 	<p>Від 0,1 мм</p> <p>Від 0,002 мм</p>
Діапазон частот	50 Гц...12 МГц
Напруга виходу генератора	Від 0,5 до 6 В
Діапазон регульованого коефіцієнта підсилення	40 дБ
Зміна фази сигналу	Від 0° до 360° з кроком 1°, 10°, 100°
Частота вибірок	Від 1 до 8 кГц

Фільтри	Низьких та високих частот, смуговий, диференційний і усереднювальний
Режим контролю	Одночастотний, двочастотний
Рамки сигналізації	Коло, поріг, сектор, відсікання



Рис. 1.28 Типові ВСП, які застосовуються для даного ВД

1.4.2 Структуроскоп ВЭ-26НП

Серед існуючих приладів для вимірювання питомої електричної провідності найбільшого поширення набув ВЭ-26НП, який призначений для контролю алюмінієвих та мідних сплавів. Прилад малогабаритний, має автономне живлення, забезпечений мініатюрним накладним вимірювальним перетворювачем. Наявність вбудованого калібратора не вимагає стандартних зразків питомої електричної провідності для підготовки його до роботи [23, 24]. В цьому структуроскопі реалізований фазовий метод виділення інформації.

					ПК61.08.0000.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

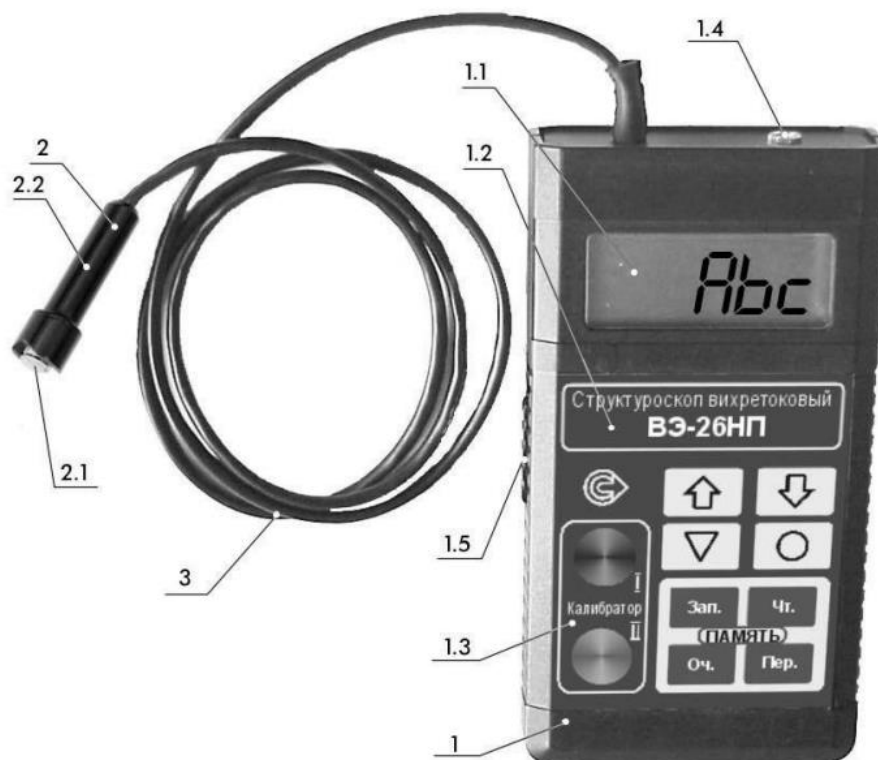


Рис. 1.29 Структуроскоп ВЭ-26НП:

1 – електронний блок; 1.1 – дисплей; 1.2 – панель управління; 1.3 – вмонтований калібратор; 1.4 – роз’єм для підключення комп’ютера; 1.5 – вимикач живлення; 2 – перетворювач; 3 – гнучкий кабель.

Таблиця 1.3. Технічні характеристики структуроскопа ВЭ-26НП

Діапазон вимірювань абсолютного значення питомої електричної провідності	Від 5 до 60 МСм/м
Діапазон вимірювань збільшень питомої електричної провідності	Від -9,99 до +9,99 МСм/м
Границя допустимої основної похибки вимірів <ul style="list-style-type: none"> • в діапазоні від 5 до 40 МСм/м • в діапазоні від 40 до 60 МСм/м 	Не більше 2% Не більше 3%
Індикація результату вимірів	Цифрова

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
------	------	----------	--------	------

ПК61.08.0000.000 ПЗ

Арк.

41

Допустима величина зазору між ВСП та ОК	0,25 мм
Температура навколишнього середовища при роботі	від +5°C до +40°C
Джерело живлення структуроскопа	Елемент типу РРЗ
Струм споживання	10 мА
Об'єм пам'яті для запам'ятовування результатів	4096
Зв'язок з комп'ютером	Інтерфейс RS232

Висновки до 1 розділу

В цьому розділі було оглянуто актуальність ВСК для контролю обшивки літака, його переваги та недоліки. Також було проведено огляд об'єкта контролю в складі планера літака, розглянуто матеріал обшивки та умови експлуатації повітряного судна. Також в цьому розділі були наведені типові дефекти обшивки та обґрунтована важливість її періодичного контролю, розглянуті наявні прилади ВСК за темою проекту.

Зважаючи на важливість та високу відповідальність НК в цій галузі, можемо зробити висновок, що нам потрібний накладний ВСП з феритовим сердечником, який може контролювати з легкістю контролювати поверхні будь-якої геометрії та, за рахунок сердечника, має досить високу чутливість, щоб завчасно запобігати утворенню тих чим інших дефектів.

					ПК61.08.0000.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

2. Розрахунок системи «ВСП-ОК»

2.1 Вибір перетворювача та методу вимірювання контрольованого параметра

2.1.1 Вибір ВСП

Найефективнішим типом ВСП для контролю листів з дюралюмінію буде трансформаторний накладний ВСП. НВСП досить універсальні, адже їх можна використовувати для контролю об'єктів різних форм (плоскої, циліндричної, складної), тому вони і мають більш широкий спектр застосування. Дві котушки, які притаманні трансформаторному ВСП дають високу стабільність вихідного сигналу.

До переваг НВСП також можна додати високу чутливість до місцевих дефектів (більша, ніж у прохідних), тому вони можуть використовуватися в ручних дефектоскопах, зазвичай, контроль обшивки літака якраз таки і виконується ручним способом.

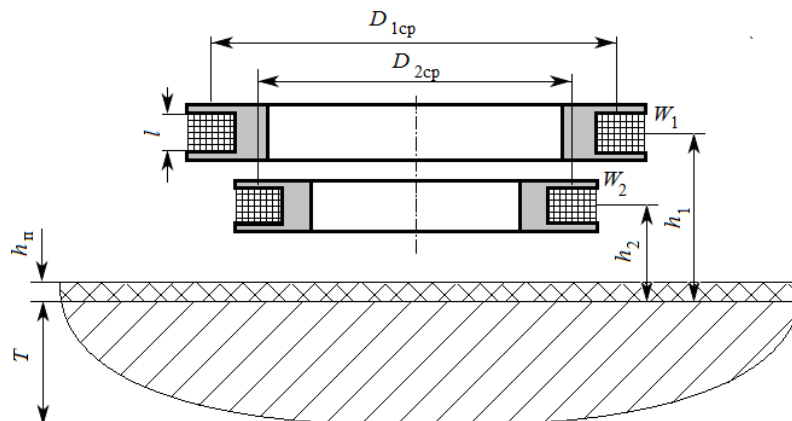


Рис. 2.1 Ескіз накладного ВСП

Через те, що перетворювачі для контролю обшивки, як правило, мають мініатюрні розміри, то доцільно буде використовувати феритовий сердечник діаметром 2 мм (з конструктивних міркувань) для підвищення чутливості.

2.1.2 Фазовий метод контролю

Фазовий метод селективного контролю являється найвдалішим для вимірювання питомої електропровідності (зокрема відхилення від

					ПК61.08.0000.000 ПЗ	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

номінального значення, тощо). Так як він дозволяє заглушити один із параметрів ОК у доволі вузькому діапазоні його переміни. За допомогою цього метода ми можемо проводити досить ефективний контроль, так як ми вводим певні перетворення, котрі зможуть відчутно збільшити зміну фазового кута кінцевого сигналу (приблизно в 5-10 разів) при зміні нашого контрольованого параметра в порівнянні з сигналом, що є на виході датчика [2, 25, 26]. Це можна зробити за рахунок векторного сумування вимірювального і компенсуючого сигналів, які є сумірними [1, 27, 28, 29]. Сталим за фазою і модулем, зазвичай, задають компенсуючий сигнал. На рис. 1.15. продемонстровано цей метод виокремлення інформації.

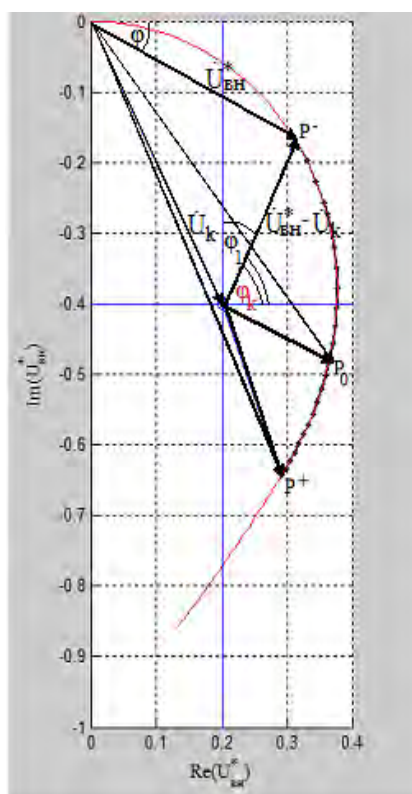


Рис. 2.2 Виділення інформації ВСК за допомогою фазового методу

Задаючи вектор компенсації \dot{U}_k^* , ми переносимо початок координат у будь-яку точку комплексної площини. Цей сигнал має сталі параметри (виходячи з вищесказаного). Зміна фази відносної внесеної напруги (ВВН)

відбувається в межах $\left[0, -\frac{\pi}{2}\right]$ і дорівнює:

					ПК61.08.0000.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

$$\varphi = \arctg \frac{\text{Im}(\dot{U}_{\text{ВН}}^*)}{\text{Re}(\dot{U}_{\text{ВН}}^*)},$$

де $\dot{U}_{\text{ВН}}^*$ - відносна внесена наруга,

$\text{Re}(\dot{U}_{\text{ВН}}^*)$, $\text{Im}(\dot{U}_{\text{ВН}}^*)$ - дійсна та уявна частини вимірювального сигналу.

Залежність ВВН накладного ВСП від зміни електропровідності та зазору між ВСП і ОК продемонстровані на рис. 1.16.

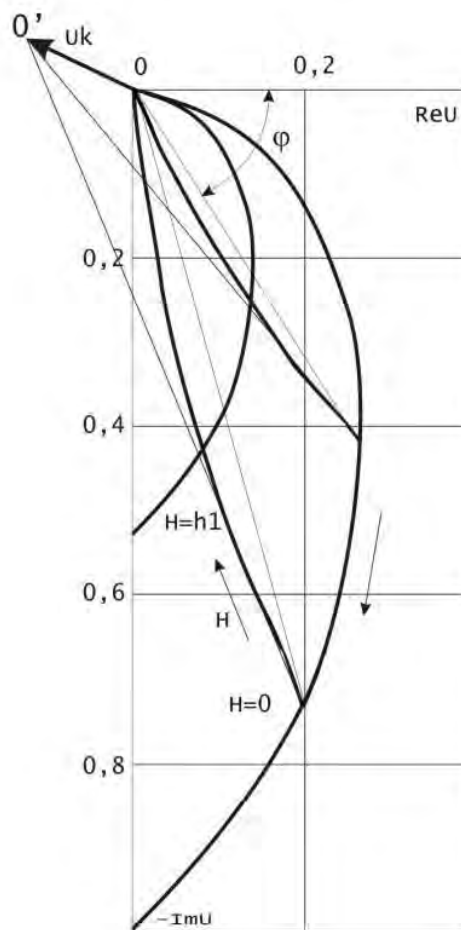


Рис. 2.3 Годографи ВВН накладного ВСП під час контролювання неферомагнітного листа

Детально проаналізувавши годографи, ми бачимо, що збільшення фази ВВН при рості питомої електропровідності переважає, чим при змінах зазору. Похибка значно зменшується, якщо ми перенесемо начало координат в т. O' . Для цього використаєм уже вищезгаданий вектор компенсації \dot{U}_k^* . Його вибирають так, щоб початок координат знаходився в точці перетину

					ПК61.08.0000.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

дотичних до ліній голографів впливу зазору в діапазоні змін $H = 0 \dots h_1$.
Тобто, маємо те, що фаза внесеної напруги залежить лише від зміни електропровідності. Так ми можемо зробити висновок, що наш прилад не чутливий до зазору на всій ділянці виміру.

2.2 Розрахунок ВСП

Вихідні дані:

Матеріал ОК: дюралюміній, товщина ОК: 3 мм, радіус кривизни $R_{кр} > 10$ см, шар фарби на ОК: 0,2 мм. Межа зміни електропровідності обумовлена деградацією металу $\mu_n - 10\%$. ВСП – трансформаторний, накладний.

Якщо радіус кривизни $R_{кр} > 10$ см, тоді діаметр $D_{кр} > 20 \cdot 10^{-3}$ м.

Магнітну сталю та відносну магнітну проникність матеріалу ОК приймаємо за довідником:

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$$

$$\mu_1 = 1$$

Знаходимо питому електропровідність із електричного опору матеріалу ОК:

$$\gamma_{\text{дюр.}} = \frac{1}{\rho_{\text{дюр.}}} \tag{2.1}$$

Електричний опір дюралюмінію за довідником:

$$\rho_{\text{дюр.}} = 0,034 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м},$$

тоді питома електропровідність дорівнює:

$$\gamma_{\text{дюр.}} = \frac{1}{0,034 \cdot 10^{-6}} = 2,941 \cdot 10^7 \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}}$$

Приймаємо значення узагальненого параметра β з умов досягнення максимальної чутливості:

					ПК61.08.0000.000 ПЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\beta = 7$$

Вибираємо діаметр обмотки збудження D_{cp} :

$$D_{cp} \leq 0,1 \cdot D_{ок} \quad (2.2)$$

$$D_{cp} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Кількість витків котушок W_3 , W_B , діаметр осердя та кількість шарів обмотки вибираємо з конструктивних міркувань:

$W_3 = 91$ – кількість витків збуджуючої котушки;

$W_3 = W_B = 91$ – кількість витків вимірювальної котушки;

$n = 7$ – кількість шарів обмотки;

$D_{ос} = 2 \cdot 10^{-3}$ м – діаметр осердя.

Вибираємо діаметр проводу котушки збудження $d_{бз}$ з умови:

$$0,05 < d_{бз} < 0,8 \quad (2.3)$$

$$d_{бз} = 0,05 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

тоді діаметр проводу в ізоляції $d_{із}$ дорівнює:

$$d_{із} = 0,065 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Для котушки вимірювання приймаємо такі ж діаметри проводу (в ізоляції та без неї, як і для збуджуючої).

Знаходимо внутрішній та зовнішній діаметри котушок:

$$d_{в1} = D_{ос} \quad (2.4)$$

$d_{в1} = 2 \cdot 10^{-3}$ м – внутрішній діаметр збуджуючої котушки

$$d_{з1} = d_{в1} + d_{із} \cdot n \cdot 2 + 2 \cdot 0,1 \cdot 10^{-3} \cdot (n - 1) \quad (2.5)$$

n – кількість шарів обмотки

$$d_{з1} = 2 \cdot 10^{-3} + 0,065 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 2 + 2 \cdot 0,1 \cdot 10^{-3} \cdot (2 - 1) = 4,11 \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad \text{– зовнішній}$$

діаметр котушки збудження.

Для вимірювальної котушки приймаємо такі ж значення, як і для збуджуючої:

$$d_{в2} = d_{в1} \quad (2.6)$$

$d_{в2} = 2 \cdot 10^{-3}$ м – внутрішній діаметр вимірювальної котушки

					ПК61.08.0000.000 ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$d_{32} = d_{31} \quad (2.7)$$

$d_{32} = 4,11 \cdot 10^{-3}$ м – зовнішній діаметр вимірювальної котушки

Знаходимо частоту гармонічного сигналу збудження:

$$f = \frac{1}{2\pi} \cdot 4 \frac{\beta^2}{D_{\text{ср}}^2 \cdot \gamma_{\text{дюр.}} \cdot \mu_0} \quad (2.8)$$

$$f = \frac{1}{2\pi} \cdot 4 \frac{7^2}{(3 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 2,941 \cdot 10^7 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} = 93,78 \cdot 10^3 \text{ Гц}$$

Перевіряємо глибину залягання вихрових струмів:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{2\pi \cdot f \cdot \gamma_{\text{дюр.}} \cdot \mu_0 \cdot \mu_1}} \quad (2.9)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{2\pi \cdot 93,78 \cdot 10^3 \cdot 2,941 \cdot 10^7 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1}} = 3,03 \cdot 10^{-4} \text{ м}$$

Знайдена глибина проникнення вихрових струмів в матеріал ОК є достатньою для контролю деградації його поверхневого шару та дає змогу виявляти тріщини на ранніх стадіях їх утворення. Це особливо важливо для контролю виробів авіаційного призначення, бо перехід від невеликої тріщини до стадії руйнування деталі відбувається дуже швидко.

Визначаємо аксіальну довжину котушки з умови:

$$0,15 < \frac{L}{D_{\text{ср}}} < 0,3 \quad (2.10)$$

$$L = \frac{W_3}{n} \cdot d_{i3} \quad (2.11)$$

$$L = \frac{91}{7} \cdot 0,065 \cdot 10^{-3} = 0,845 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Перевіряємо виконання умови 2.10:

$$\frac{0,845 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 10^{-3}} = 0,282 \text{ – умова виконується}$$

					<i>ПК61.08.0000.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

За конструктивними міркуваннями вибираємо зазор h_0 між ВСП та ОК, куди буде враховано і шар захисного покриття:

$$h_0 = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

тоді зазор між середнім витком котушки та ВСП та ОК дорівнює:

$$h_{\text{cp}} = h_0 + \frac{L}{2} \quad (2.12)$$

$$h_{\text{cp}} = 1 \cdot 10^{-3} + \frac{0,845 \cdot 10^{-3}}{2} = 1,422 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Розраховуємо еквівалентний діаметр $D_{\text{екв}}$ ВСП:

$$D_{\text{екв}} = D_{\text{cp}} + 1,5 \cdot h_{\text{cp}} \quad (2.13)$$

$$D_{\text{екв}} = 3 \cdot 10^{-3} + 1,5 \cdot 1,422 \cdot 10^{-3} = 5,134 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Розрахуємо силу струму збудження з умови відсутності перегріву котушки. Приймаємо коефіцієнт теплопередачі з умови:

$$\lambda = (8 \div 12) \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \cdot \text{град} \quad (2.14)$$

$$\lambda = 10 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \cdot \text{град}$$

Приймаємо допустиму температуру перегріву котушки:

$$\theta_{\text{д}} = 4 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Знаходимо площу охолодження поверхні котушки:

$$S_{\text{ох}} = S_{\text{ох1}} + S_{\text{ох2}} + S_{\text{ох3}}, \quad (2.16)$$

де

$$S_{\text{ох1}} = \pi \cdot d_{\text{в1}} \cdot L \quad (2.17)$$

$$S_{\text{ох1}} = \pi \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,845 \cdot 10^{-3} = 5,309 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$$

$$S_{\text{ох2}} = \pi \cdot d_{\text{з1}} \cdot L \quad (2.18)$$

$$S_{\text{ох2}} = \pi \cdot 4,11 \cdot 10^{-3} \cdot 0,845 \cdot 10^{-3} = 1,091 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$$

					ПК61.08.0000.000 ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$S_{\text{ок3}} = \pi \cdot \left(\left(\frac{d_{31}}{2} \right)^2 - \left(\frac{d_{\text{в1}}}{2} \right)^2 \right) \quad (2.19)$$

$$S_{\text{ок3}} = \pi \cdot \left(\left(\frac{4,11 \cdot 10^{-3}}{2} \right)^2 - \left(\frac{2 \cdot 10^{-3}}{2} \right)^2 \right) = 1,013 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$$

тоді $S_{\text{ок}}$ дорівнює:

$$S_{\text{ок}} = 5,309 \cdot 10^{-6} + 1,091 \cdot 10^{-5} + 1,013 \cdot 10^{-5} = 3,647 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$$

Приймаємо електричний опір матеріалу дроту (мідь) за довідником:

$$\rho_{\text{міді}} = 0,0175 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

Опір котушки:

$$R = \frac{4 \cdot \rho_{\text{міді}} \cdot W_3 \cdot D_{\text{ср}}}{d_{\text{б3}}^2} \quad (2.20)$$

$$R = \frac{4 \cdot 0,0175 \cdot 10^{-6} \cdot 91 \cdot 3 \cdot 10^{-3}}{(0,05 \cdot 10^{-3})^2} = 7,644 \text{ Ом}$$

Максимальну силу струму, що протікає в котушці визначаємо за наступних умов:

$$I = (0,85 \div 0,9) \cdot I_{\text{пр}}, \quad (2.21)$$

$$\text{де } I_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{\lambda \cdot S_{\text{ок}} \cdot \theta_{\text{д}}}{R}} \quad (2.22)$$

$$I_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{10 \cdot 1,013 \cdot 10^{-5} \cdot 4}{7,644}} = 0,014 \text{ А}$$

тоді I дорівнює:

$$I = 0,9 \cdot I_{\text{пр}} = 0,012 \text{ А}$$

Розрахунок напруги холостого ходу:

Виконуємо розрахунки потрібні нам для подальших дій:

									Арк.
									50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ПК61.08.0000.000 ПЗ				

$$m = \frac{d_{31}}{d_{32}} \quad (2.23)$$

$$m = \frac{4,11 \cdot 10^{-3}}{4,11 \cdot 10^{-3}} = 1$$

Тепер знайдемо відносну відстань між ОК та котушками ВСП:

$$\xi = \frac{h_{cp} \cdot 2}{D_{екв}} \quad (2.24)$$

$$\xi = \frac{1,422 \cdot 10^{-3} \cdot 2}{5,134 \cdot 10^{-3}} = 0,554$$

Отже, напруга холостого ходу дорівнює:

$$U_{xx} = 1,35 \cdot 2\pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot W_3 \cdot W_B \cdot (m - 0,3) \cdot I \cdot \sqrt{d_{31} \cdot d_{31}} \quad (2.25)$$

$$U_{xx} = 1,35 \cdot 2\pi \cdot 93,78 \cdot 10^3 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 91 \cdot 91 \cdot (1 - 0,3) \cdot 0,012 \cdot \sqrt{4,11 \cdot 10^{-3} \cdot 4,11 \cdot 10^{-3}} = 0,296 \text{ В}$$

Визначимо значення відносної внесеної напруги:

Оцінюємо відносну внесену напругу за годографом відносної внесеної напруги накладного перетворювача, який розміщений над провідним неферромагнітним листом:

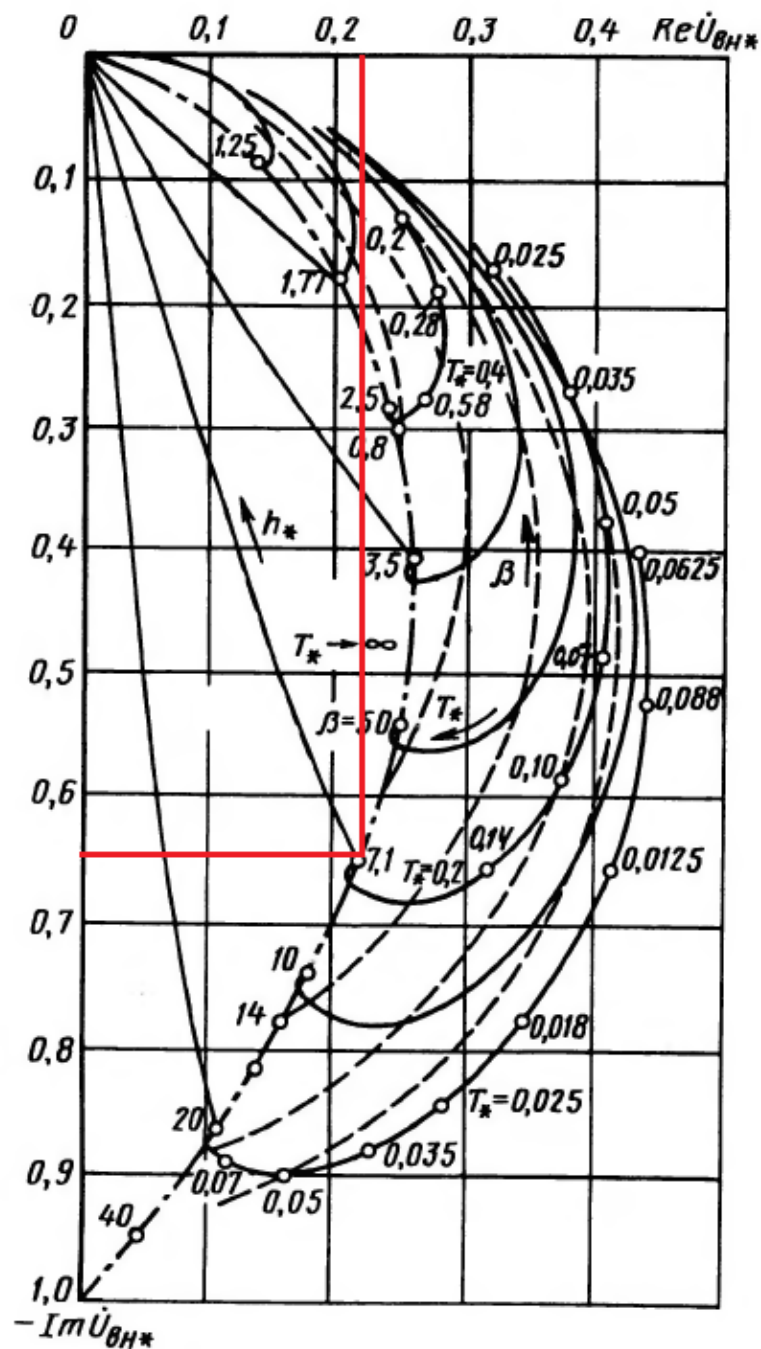


Рис. 2.4 Годограф відносної внесеної напруги накладного перетворювача, який розміщений над провідним неферомагнітним листом

Отже, відносна внесена напруга:

$$U_{\text{ввн}} = 0,22 - 0,647i$$

Визначаємо фазу сигналу:

$$\varphi = \arctg\left(\frac{-0,648}{0,218}\right) = -1,246 \text{ (рад)}, \text{ в градусній мірі: } -71,406^\circ$$

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Повторюємо розрахунок для деградованого стану матеріалу, тобто для зниженої електропровідності на 2%, 4%, 6%, 8% та 10%:

$$\gamma_{21} = 2,941 \cdot 10^7 \cdot 0,98 = 2,88218 \cdot 10^7 \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}}$$

$$\gamma_{22} = 2,941 \cdot 10^7 \cdot 0,96 = 2,82336 \cdot 10^7 \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}}$$

$$\gamma_{23} = 2,941 \cdot 10^7 \cdot 0,94 = 2,76454 \cdot 10^7 \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}}$$

$$\gamma_{24} = 2,941 \cdot 10^7 \cdot 0,92 = 2,70572 \cdot 10^7 \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}}$$

$$\gamma_{25} = 2,941 \cdot 10^7 \cdot 0,9 = 2,6469 \cdot 10^7 \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}}$$

Розраховуємо значення узагальненого параметра при для кожного значення електропровідності:

$$\beta_{2i} = \frac{D_{\text{cp}}}{2} \cdot \sqrt{2\pi \cdot f \cdot \gamma_{2i} \cdot \mu_0 \cdot \mu_1} \quad (2.26)$$

$$\beta_{21} = \frac{3 \cdot 10^{-3}}{2} \cdot \sqrt{2\pi \cdot 93,78 \cdot 10^3 \cdot 2,88218 \cdot 10^7 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1} = 6,92944$$

$$\beta_{22} = \frac{3 \cdot 10^{-3}}{2} \cdot \sqrt{2\pi \cdot 93,78 \cdot 10^3 \cdot 2,82336 \cdot 10^7 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1} = 6,85837$$

$$\beta_{23} = \frac{3 \cdot 10^{-3}}{2} \cdot \sqrt{2\pi \cdot 93,78 \cdot 10^3 \cdot 2,76454 \cdot 10^7 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1} = 6,78655$$

$$\beta_{24} = \frac{3 \cdot 10^{-3}}{2} \cdot \sqrt{2\pi \cdot 93,78 \cdot 10^3 \cdot 2,70572 \cdot 10^7 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1} = 6,71396$$

$$\beta_{25} = \frac{3 \cdot 10^{-3}}{2} \cdot \sqrt{2\pi \cdot 93,78 \cdot 10^3 \cdot 2,6469 \cdot 10^7 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1} = 6,64058$$

За годографом визначаємо значення відносних внесених напруг для відповідних значень узагальненого параметра:

					ПК61.08.0000.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

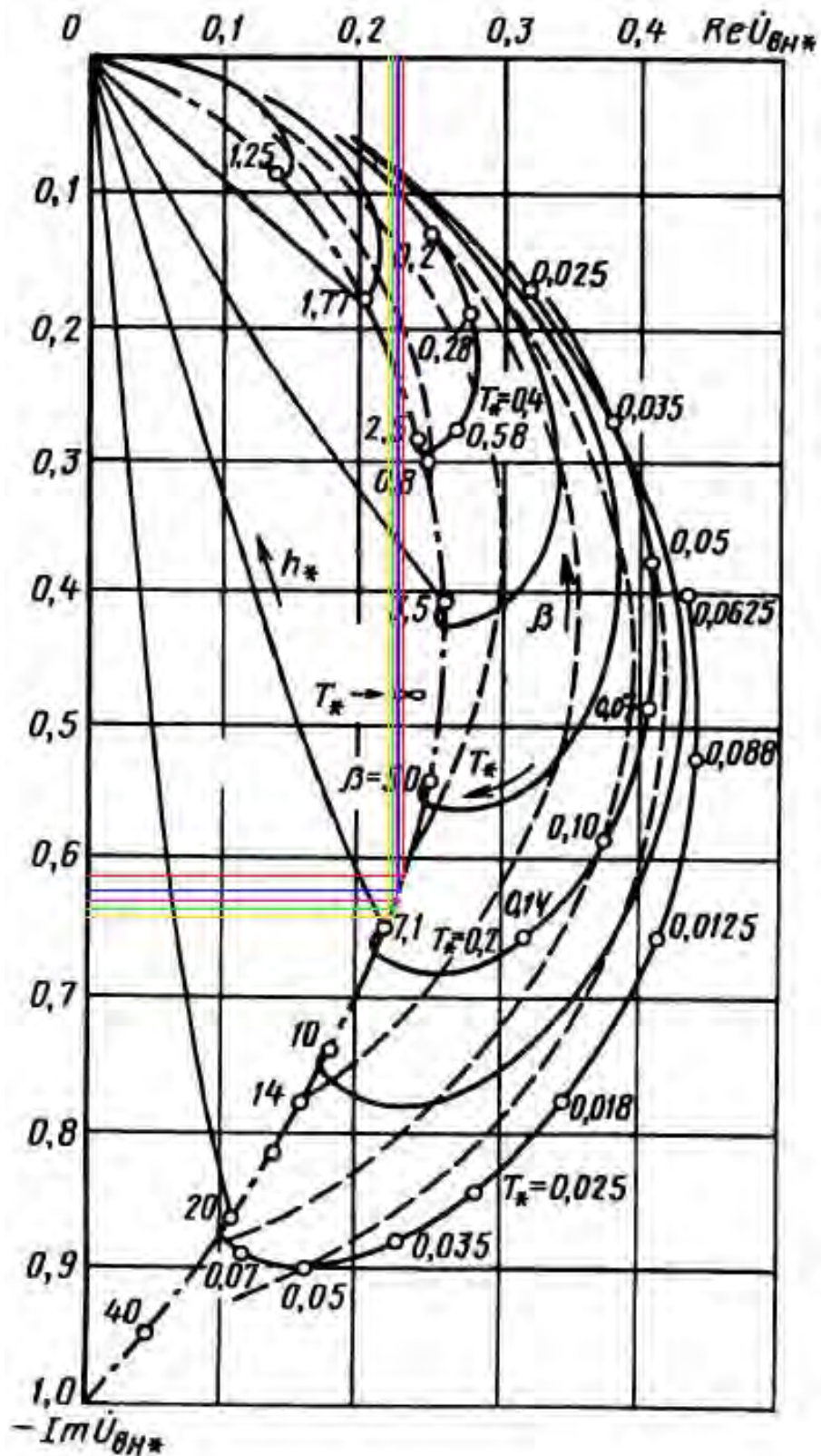


Рис. 2.5 Годограф відносної внесеної напруги накладного перетворювача, який розміщений над провідним неферромагнітним листом для п'яти розрахованих значень узагальненого параметра

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

$$U_{\text{ВВН}21} = 0,219 - 0,644i$$

$$U_{\text{ВВН}22} = 0,222 - 0,638i$$

$$U_{\text{ВВН}23} = 0,225 - 0,632i$$

$$U_{\text{ВВН}24} = 0,226 - 0,624i$$

$$U_{\text{ВВН}25} = 0,229 - 0,614i$$

Визначаємо значення фази сигналу при відповідних значеннях відносної внесеної напруги за формулою:

$$\varphi = \arctg \frac{\text{Im}(\dot{U}_{\text{ВН}}^*)}{\text{Re}(\dot{U}_{\text{ВН}}^*)} \quad (2.27)$$

$$\varphi_{21} = \arctg \left(\frac{-0,644}{0,219} \right) = -1,243 \text{ (рад)}, \text{ в градусній мірі: } -71,219^\circ$$

$$\varphi_{22} = \arctg \left(\frac{-0,638}{0,222} \right) = -1,236 \text{ (рад)}, \text{ в градусній мірі: } -70,814^\circ$$

$$\varphi_{23} = \arctg \left(\frac{-0,632}{0,225} \right) = -1,229 \text{ (рад)}, \text{ в градусній мірі: } -70,404^\circ$$

$$\varphi_{24} = \arctg \left(\frac{-0,624}{0,226} \right) = -1,223 \text{ (рад)}, \text{ в градусній мірі: } -70,091^\circ$$

$$\varphi_{25} = \arctg \left(\frac{-0,614}{0,229} \right) = -1,214 \text{ (рад)}, \text{ в градусній мірі: } -69,546^\circ$$

Тепер за допомогою фазового методу, який був описаний в розділі 2.1.2 введемо перетворення, яке суттєво збільшить зміну фазового кута результуючого сигналу.

В даному випадку приймаємо компенсувальний сигнал:

$$\dot{U}_{\text{К}}^* = 0,1 - 0,5i \text{ та проводимо наступні розрахунки:}$$

$$U_{\text{ВВН}-U_{\text{К}}} = 0,219 - 0,644i - (0,1 - 0,5i) = 0,12 - 0,147i$$

$$U_{\text{ВВН}21-U_{\text{К}}} = 0,219 - 0,644i - (0,1 - 0,5i) = 0,119 - 0,144i$$

$$U_{\text{ВВН}22-U_{\text{К}}} = 0,222 - 0,638i - (0,1 - 0,5i) = 0,122 - 0,138i$$

$$U_{\text{ВВН}23-U_{\text{К}}} = 0,225 - 0,632i - (0,1 - 0,5i) = 0,125 - 0,132i$$

$$U_{\text{ВВН}24-U_{\text{К}}} = 0,226 - 0,624i - (0,1 - 0,5i) = 0,126 - 0,124i$$

$$U_{\text{ВВН}25-U_{\text{К}}} = 0,229 - 0,614i - (0,1 - 0,5i) = 0,129 - 0,114i$$

					<i>ПК61.08.0000.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

Перерозраховуємо фазу результуючого сигналу та спостерігаємо збільшення зміни фази результуючого сигналу від зміни електропровідності:

$$\varphi_{0k} = \operatorname{arctg}\left(\frac{-0,174}{0,12}\right) = -50,774^\circ$$

$$\varphi_{21k} = \operatorname{arctg}\left(\frac{-0,144}{0,119}\right) = -50,43^\circ$$

$$\varphi_{22k} = \operatorname{arctg}\left(\frac{-0,138}{0,122}\right) = -48,521^\circ$$

$$\varphi_{23k} = \operatorname{arctg}\left(\frac{-0,132}{0,125}\right) = -46,556^\circ$$

$$\varphi_{24k} = \operatorname{arctg}\left(\frac{-0,124}{0,126}\right) = -44,545^\circ$$

$$\varphi_{25k} = \operatorname{arctg}\left(\frac{-0,114}{0,129}\right) = -41,468^\circ$$

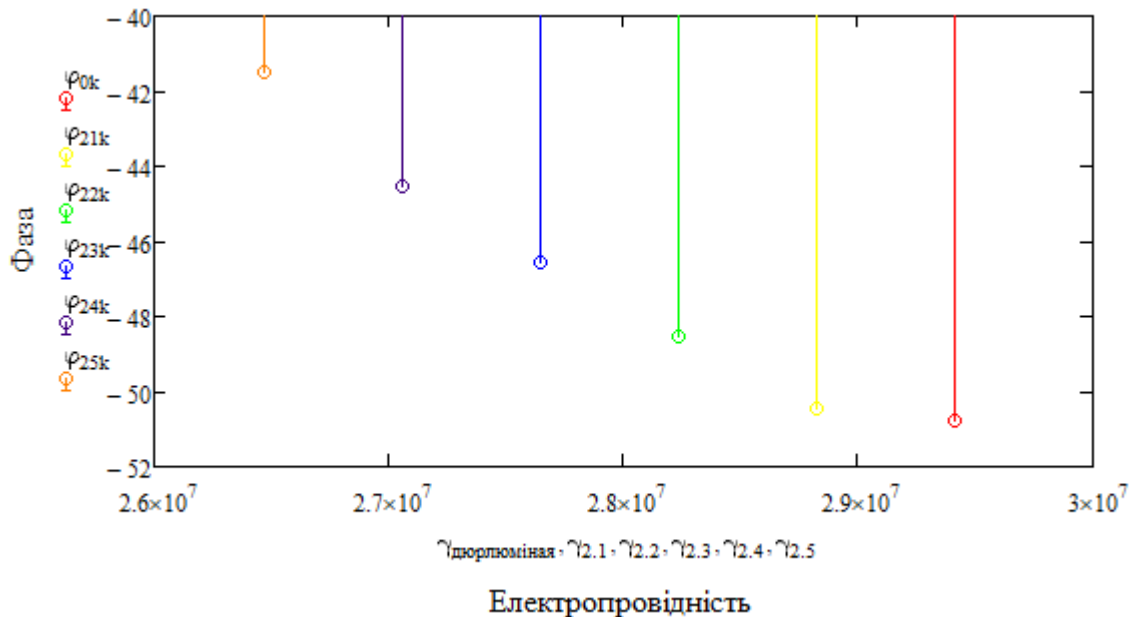


Рис. 2.6 Графік залежності фази результуючого сигналу від зміни електропровідності матеріалу

Висновки до 2 розділу:

В даному розділі було розраховано трансформаторний НВСП. В якості інформаційного параметра була взята за основу фаза сигналу, тож було

детально було описано сутність фазового методу і було встановлено, що фаза недеградованого добре відрізняється від фази деградованого матеріалу на межі зміни електропровідності $\Delta\gamma = -10\%$.

Також були визначені значення узагальненого параметра на межі електропровідності – $\beta_{25} = 6.641$, електропровідність матеріалу – $\gamma_{25} = 2,6469 \cdot 10^7 \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}}$ та відносна внесена напруга різницевого сигналу за фазовим методом – $U_{\text{ввн}25-U_k} = 0,129 - 0,114i$.

					<i>ПК61.08.0000.000 ПЗ</i>	Арк.
						57
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

3. Вибір та розрахунок електронних схем дефектоскопу

3.1 Розробка схеми електричної структурної та опис роботи приладу

Перейдемо до аналізу структурної схеми розробленого вихрострумowego дефектоскопа для визначення експлуатаційної пошкоджуваності елементів конструкцій, котра проілюстрована на рис. 3.1.

Генератор Г генерує опорну частоту для синтезаторів частоти С1 та С2, а також для мікроконтролеру МК. Керування мікроконтролером МК здійснюється за допомогою клавіатури ПВ. З мікроконтролеру МК на синтезатор частоти С1 подається програмуючий послідовний код, який програмує синтезатор таким чином, щоб його вихідний сигнал мав частоту 100 кГц. Цей сигнал подається на вихрострумoвий перетворювач ВСП, де він змінюється в залежності від структури ОК, а також від наявності в ньому дефектів. Сигнал з ВСП підсилюється за допомогою підсилювача П1, після чого поступає на суматор СУ. На інший вхід суматора подається сигнал компенсації з синтезатору частоти С2. Цей сигнал встановлюється за допомогою попереднього програмування синтезатору під час калібрування приладу. На виході СУ отримуємо корисний сигнал без складової холостого ходу. Цей сигнал підсилюється на підсилювачі П2, після чого подається на антiалізінгoвий фільтр нижніх частот ФНЧ. Далі сигнал подається на внутрішній АЦП мікроконтролеру МК для відцифровки, та визначення результату. Результат корегується в залежності від значення напруги, що подається в МК з термометру Т. Результат виміру передається на ПК через USB для запису попередніх даних та порівняння їх з поточними. Крім того, миттєвий результат виміру виводиться на дисплей Д приладу.

					ПК61.08.0000.000 ПЗ	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

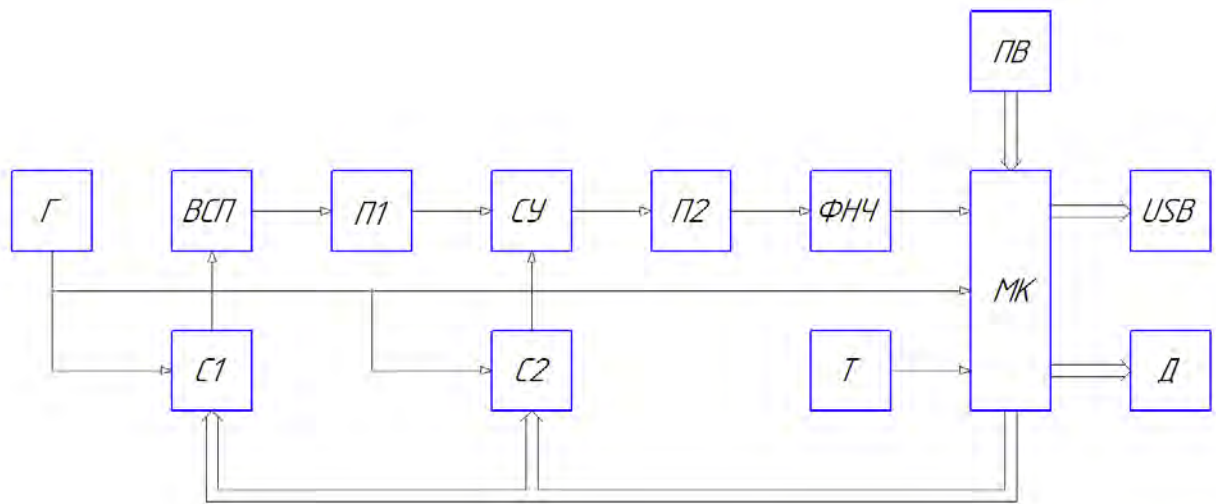


Рис. 3.1 Структурна схема вихрострумowego дефектоскопа для визначення експлуатаційної пошкоджуваності елементів конструкцій

Г – генератор;

ВСП – вихрострумовой перетворювач;

П1, П2 – підсилювачі;

С1, С2 – синтезатори частоти;

СУ – суматор;

ФНЧ – фільтр нижніх частот;

Т – термометр;

МК – мікроконтролер;

ПВ – пристрій вводу;

USB – USB порт;

Д – дисплей.

3.2 Підбір та розрахунок елементів принципової схеми

Мікросхеми, які було застосовано для розробки структурної принципової схеми приладу: MAX4165, K155ЛА3, AD9834, ATxmega32D3.

3.2.1 MAX4165

MAX4165 – це одноканальний прецизійний операційний підсилювач (ОП) сімейства підсилювачів MAX4165-4169 компанії Maxim. Він поєднує в собі високу точність постійного струму з високим значенням струму на

виході. ОП працює від одного джерела напруги від +2,7 В до +6,5 В чи від двох від $\pm 1,35$ В до $\pm 3,25$ В. Підсилювач споживає струм живлення 1,3 мА та забезпечує вихідний струм 125 мА. Ширина смуги пропускання підсилювача – 5 МГц, робоча температура від -40°C до $+85^{\circ}\text{C}$. Звичайні ОП не видають такий широкий розмах вихідного сигналу без спотворення його динамічних характеристик, в той час як MAX4165 забезпечує дуже високу точність в поєднанні з високою вихідною напругою, широким динамічним діапазоном, низьким споживанням енергії та роботою від одного джерела робить ОП такого типу ідеальними для портативних пристроїв. Подібні підсилювачі все більше і більше стають затребуваними через те, що майже всі виробники намагаються випускати легкі портативні пристрої, які працюють від міні-батареєнок чи акумуляторів. Цей ОУ розміщується в SMD корпусі SOT23 з 5-ма контактами.

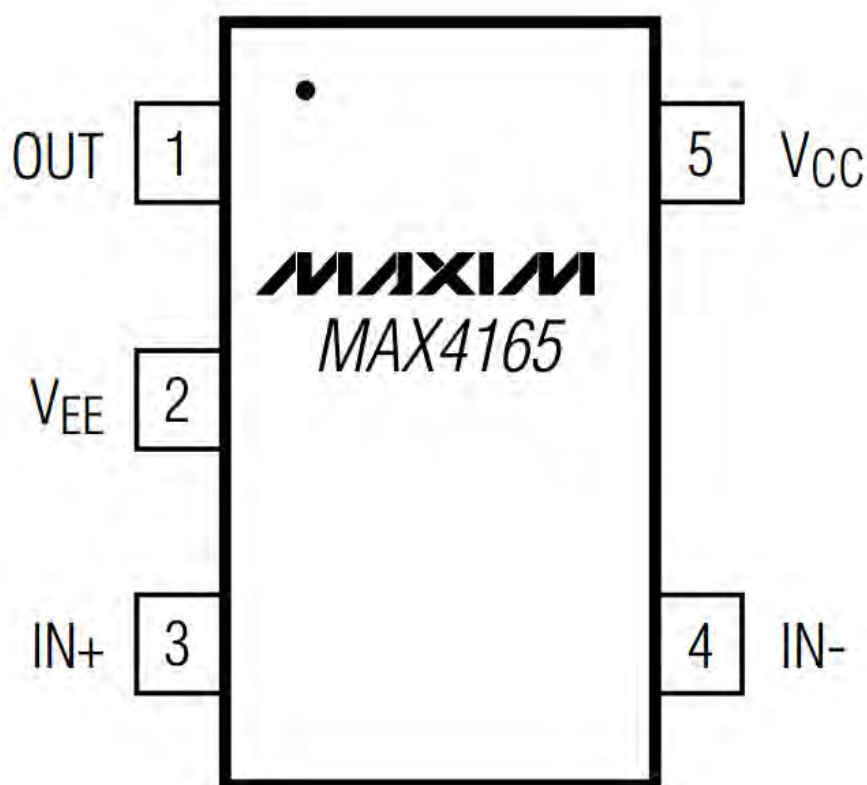


Рис 3.1 Блок-схема підсилювача MAX4165:

1 – вихід; 2 – мінус джерела живлення; 3 – неінвертуючий вхід; 4 – інвертуючий вхід; 5 – плюс джерела живлення.

					ПК61.08.0000.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

3.2.2 К155ЛА3

Структуру мікросхеми К155ЛА3 утворюють 4 логічні елементи 2І-НЕ, які живляться від одного загального джерела постійного струму. Але кожний із них працює як самостійна мікросхема малої степені інтеграції. Вона має 56 інтегральних елементів. Ця мікросхема має пластиковий корпус 201.14-1 (DIP-14), маса якого зазначена не більше 1 грама.

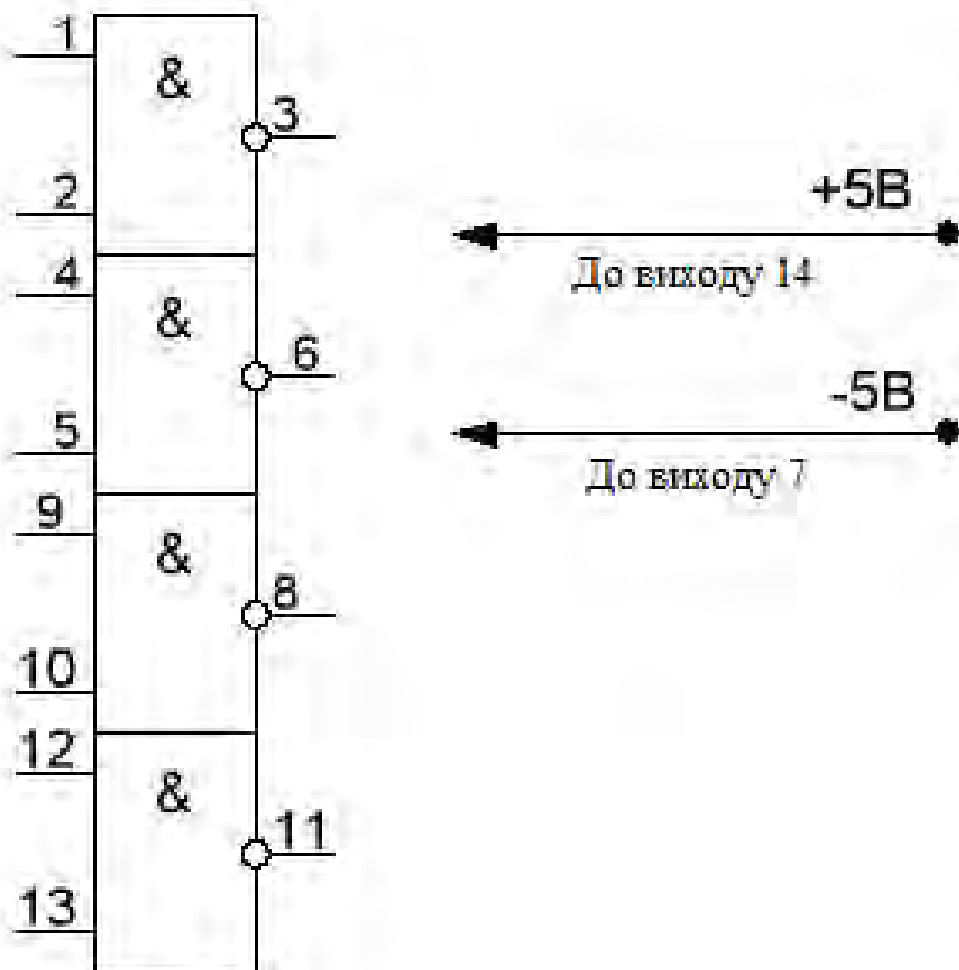


Рис. 3.2 Мікросхема К155ЛА3:

7 – загальний вихід; 14 – додатковий полюс живлення;

3, 6, 8, 11 – виходи Y1, Y2, Y3, Y4 відповідно;

1, 2, 4, 5, 9, 10, 12, 13 – входи X1-X8 відповідно.

Характеристики даної мікросхеми наведені у таблиці 3.1.

					ПК61.08.0000.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

Таблиця 3.1. Основні характеристики мікросхеми K155ЛА3

Напруга живлення	5 В \pm 5%
Вихідна напруга низького рівня	Не більше 0,4 В
Вихідна напруга високого рівня	Не менше 2,4 В
Вихідний струм низького рівня	Не більше -1,6 мА
Вихідний струм високого рівня	Не більше 0,04 мА
Вхідний пробивний струм	Не більше 1 мА
Струм короткого замикання	Від -18 до -55 мА
Струм споживання при низькому рівні вихідної напруги	Не більше 22 мА
Струм споживання при високому рівні вихідної напруги	Не більше 8 мА
Споживна статична потужність	Не більше 19,7 мВт
Час затримки розпізнання при включенні	Не більше 15 нс
Час затримки розпізнавання при виключенні	Не більше 22 нс

3.2.3 AD9834

В ролі синтезатора було використано мікросхему синтезатора AD9834, який базується на прямому цифровому синтезі (DDS) і формує високоякісні трикутні та синусоїдальні вихідні сигнали. Ця мікросхема дозволяє отримати сигнал з частотою, яка швидко перелаштовується. Цей синтезатор був вибраний через те, що він дуже універсальний та його граничні частоти (до 37,5 МГц) підходять під розраховану мною частоту сигналу збудження. До його складу також входить компаратор. Крім того, він дуже

					ПК61.08.0000.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

Таблиця 3.2. Основні характеристики мікроконтролера ATxmega32D3

Тип, сімейство	AVR, XMEGA
Об'єм пам'яті EEPROM	2 кб
Об'єм пам'яті SRAM	4 кб
Об'єм флеш-пам'яті	32 кб
Корпус	TQFP64
Розрядність АЦП	12 біт
Тактова частота	32 МГц
Напруга живлення	1,6-3,6 В (DC)
Кількість каналів ШІМ	18
Кількість таймерів 16 біт	5
Кількість компараторів	2
Робоча температура	від -40°C до +85°C

Не підбираємо АЦП, через те, що цей МК уже містить вмонтований 12-бітний АЦП і розраховуємо тільки його похибку:

$$\delta = \frac{1}{2^n} \quad (3.1)$$

$$\delta = \frac{1}{2^{12}} = 0,00024$$

Figure 2-1. Block Diagram and Pinout

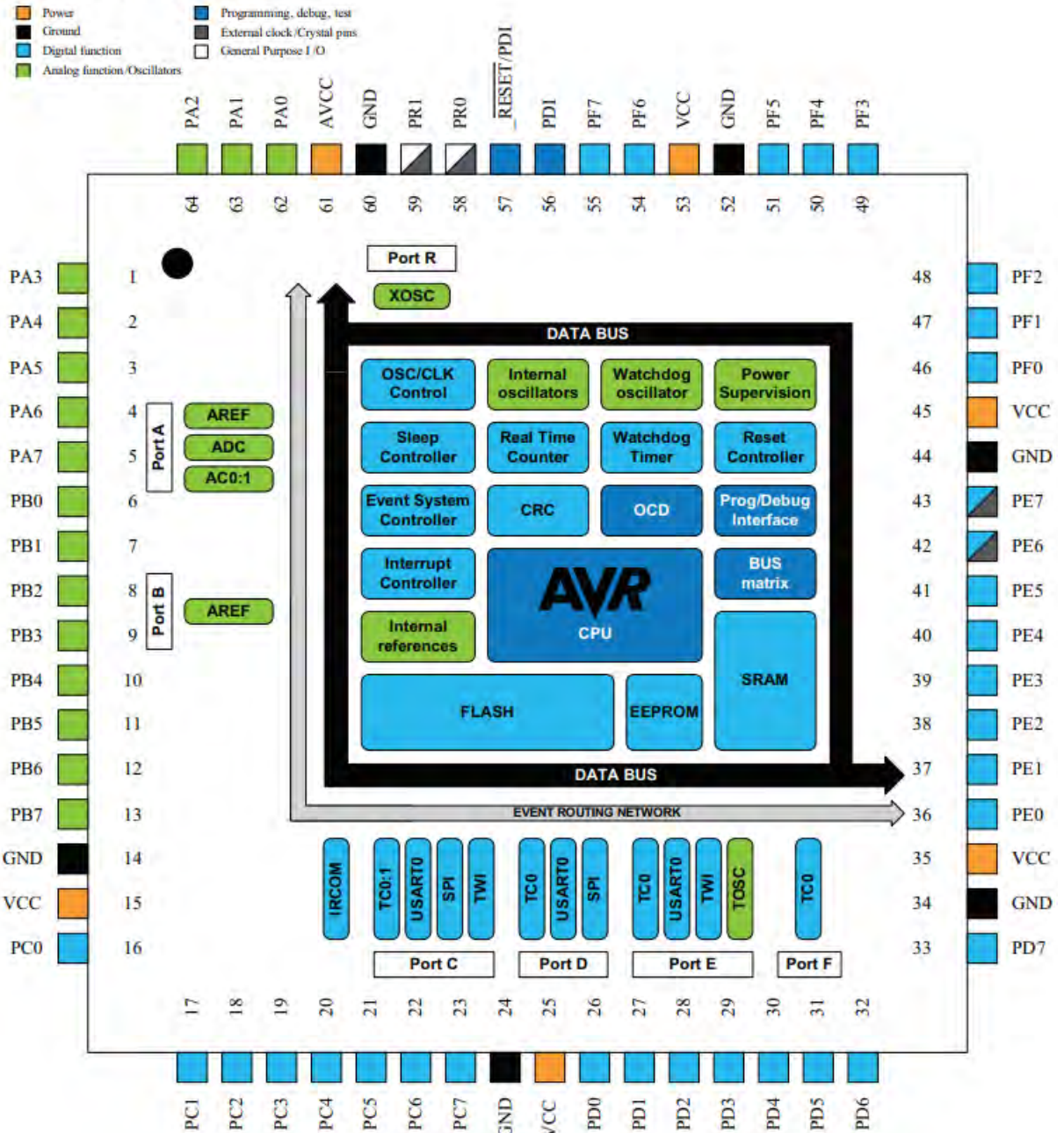


Рис. 3.4 Блок-діаграма мікроконтролера ATmega32D3

3.2.5 Розрахунок ФНЧ

Розраховуємо антилайзінговий фільтр з частотою зрізу, яка дорівнює половині частоти дискретизації, тоді частота зрізу дорівнює:

$$f_{зр} = 0,5f_{дискр} \quad (3.2)$$

$$f_{зр} = 0,5 \cdot 10^6 = 500 \text{ кГц}$$

Приймаємо коефіцієнт передачі $K_f = 1$, тоді $R_{16} = R_{18} = 100 \text{ Ом}$

Визначаємо частоту зрізу за формулою:

									Арк.
									65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ПК61.08.0000.000 ПЗ				

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \cdot R_{16} \cdot C_2} \quad (3.3)$$

Приймаємо $C_2 = 3,3$ нФ, тоді

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \cdot 100 \cdot 3,3 \cdot 10^{-9}} = 482,3 \text{ кГц}$$

Тобто, наш фільтр буде пропускати частоту, яка нижче 482,3 кГц.

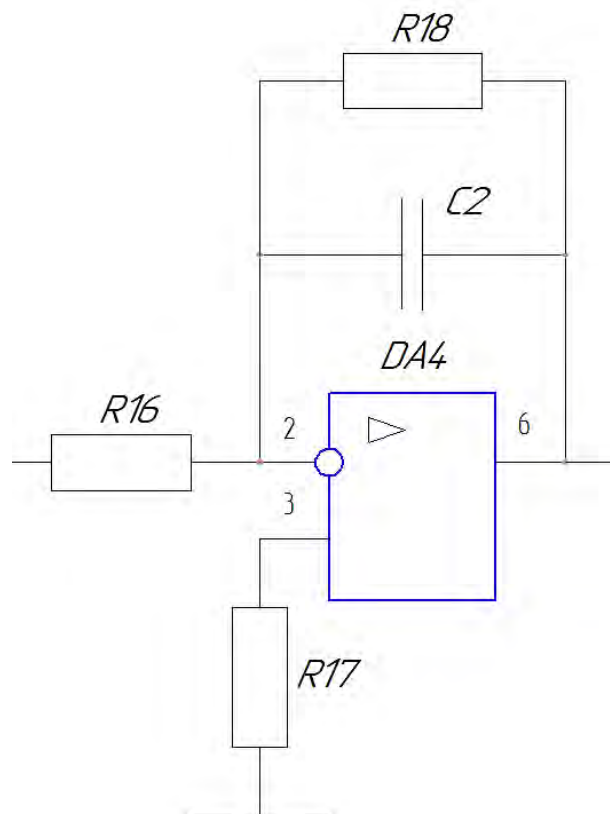


Рис. 3.5 Електрична схема ФНЧ

Висновки до 3 розділу:

В даному розділі була наведена та описана структурна схема приладу, були підбрані потрібні мікросхеми, зокрема, в якості мікроконтролера був вибраний високоефективний та недорогий ATmega32D3 компанії Microchip. Цей МК уже містить в собі АЦП, то ж лише була розрахована похибка АЦП $\delta = 0,00024$. В ролі синтезатора – AD9834, операційного підсилювача – MAX4165. Також було вибрано мікросхему K155ЛА3, яка утворює 4 логічні елементи 2І-НЕ та розрахований фільтр низьких частот.

					ПК61.08.0000.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

ВИСНОВКИ

Згідно до задачі дипломного проєкту був розроблений дефектоскоп для контролю експлуатаційної пошкоджуваності елементів конструкцій, а саме обшивки елементів конструкцій планера літальних апаратів з дюралюмінію.

Основним призначенням розробленого приладу є завчасне виявлення утворення корозійних, втомних чи інших видів дефектів за рахунок контролю питомої електропровідності матеріалу, так як між фізико-механічними властивостями матеріалу і питомою електропровідністю існує кореляція.

У процесі виконання було розраховано накладний вихрострумний перетворювач невеликих розмірів з феритовим осердям для високої чутливості.

Було розглянуто фазовий метод виміру питомої електропровідності, так як він є найефективніший при контролі цього параметру, бо не залежить від значення зазору, тобто результат ми отримуємо максимально стабільний та точний.

Крім того, в ході виконання була розроблена структурна та електрично-принципова схема приладу, виконане складальне креслення та деталювання.

					ПК61.08.0000.000 ПЗ	Арк.
						67
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Список використаних джерел

1. Неразрушающий контроль качества изделий электромагнитными методами / В.Г. Герасимов, Ю.А. Останин, А.Д. Покровский и др. – М.: Энергия, 1978. – 216 с.
2. Клюев В.В. (ред.) Неразрушающий контроль. Том 2. Книга 1. Контроль герметичности. Книга 2. Вихретоковый контроль / Справочник. — В 7 т. — Том 2. — В 2 кн. — Кн.1: А.И. Евлампиев, Е.Д. Попов, С.Г. Сажин, Л.Д. Муравьева С.А. Добротин, А.В. Половинкин, Ю.А. Кондратьев. Кн.2: Ю.К. Федосенко, В.Г. Герасимов, А.Д. Покровский, Ю.Я. Останин. — М.: Машиностроение, 2003. — 688 с.
3. Герасимов В.Г., Клюев В.В., Шатерников В.Е. Методы и приборы электромагнитного контроля промышленных изделий. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 272 с.
4. Бакунов А.С., Мужичкий В.Ф., Попов Б.Е. Контроль механических свойств алюминиевых сплавов электромагнитным методом. – Дефектоскопия, 1995, №2, с. 61-67
5. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник. Под ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1995. – 488 с.
6. Изменение потенциальной склонности к коррозии алюминиевых сплавов в процессе эксплуатации. /Васильев В.Ю., Куколкин А.Г., В.Я. Баянкин и др. / Защита металлов. - Т.31, №1, 1995. С. 16-20.
7. Shi P. Corrosion fatigue and multiple site damage reliability analysis / P.Shi, s. Mahadevan. /Internation Jornal of Fatigue. 2003, p. 457-469.
8. Ефимова М.Г. Основы авиации. Часть 2. Конструкция и основные функциональные системы летательных аппаратов: Учебное пособие. – М.: МГТУГА, 2005. – 52 с.
9. Корнеев В.М. Конструкция и основы эксплуатации летательных аппаратов : конспект лекций / В.М. Корнеев. – Ульяновск : УВАУ ГА(и), 2009. – 130 с.

					ПК61.08.0000.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		68

10. Влияние эксплуатационной наработки на характеристики механических свойств сплава Д16. / С.В. Бутушин, С.Б. Денисов, В.С. Шапкин, В.В.Шупляков /Научный вестник МГТУ ГА: Аэромеханика и прочность. - №60, 2003. С. 32-41.
11. Lincoln JW. The USAF approach to attaining structural integrity of aging aircraft. In: Chang CI, Sun CT, editors. Structural integrity in aging aircraft / JW Lincoln. - New York: ASME:1995. AD-vol.47.
12. Метелкин Е.С. Система контроля и документирования технического состояния ВС ГА. Технология документирования информации // Научный Вестник МГТУ ГА, серия Аэромеханика и прочность. - 2000. - № 28. - С. 57-61.
13. National Research Council (Committee on Aging of U.S. Air Force Aircraft). Aging of of U.S. air force aircraft: final report, Publication NMAВ-488-2. Washington, DC; national Academy Press: 1997.
14. Pitt S. Multiple-site and widespread fatigue damage in aging aircraft./ Pitt S, Jones K. Eng. Fail. Anal. 1997, p. 237-257.
15. Гуревич С.Е. О скорости распространения трещины при пороговых значениях коэффициента интенсивности напряжений в процессе усталостного разрушения. /Усталость и вязкость разрушения металлов. С.Е. Гуревич, Л.Д.Едидович. Наука. С. 63–83.
16. Синявский В.С. Коррозия и защита алюминиевых сплавов. / В.С. Синявский, В.Д. Вальков, В.Д. Калинин. - М.: Металлургия. - 1986. - 368 с.
17. Романив О.Н. Механика коррозионного разрушения конструкционных сплавов /О.Н. Романив. М.: Металлургия. 1986.
18. Екобори Такео. Научные основы прочности и разрушения материалов./ Такео Екобори. - Киев. "Наукова думка", 1978. - 351 с.
19. Структура и коррозия металлов и сплавов/ И.Я. Сокол и др. Атлас. Справ. Изд. - М.: Металлургия, 1989. - 400 с.

					ПК61.08.0000.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		69

20. Куц Ю.В., Петрик В.Ф., Лысенко Ю.Ю., Дугин А.Л. Экспериментальное исследование вихретоковой системы контроля крупногабаритных изделий // Научни известия на НТСМ 2013 (Болгария). – №2 (139). – С.72–74.
21. Лисенко Ю.Ю., Дугин 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.
22. Kuts Y.V., Lysenko Y.Y., Dugin A.L Zakrevskii ., A.F. Analysis of an Eddy-Current Transducer with Impulsive Excitation in the Nondestructive Testing of Cylindrical Objects // Materials Sciences, Vol. 52, No.3, November, 2016. – P.431 – 437.
23. Y. Kuts, A. Protasov, Iu. Lysenko, O. Dugin, O. Bliznuk, V. Uchanin Using multidifferential transducer for pulsed eddy current object inspection // IEEE First Ukraine Conference on Elektrical and computer engineering (Ukrcon). Conference Proceedings. May 29 –June 2, 2017. Kyiv, Ukraine.– P.826 – 829.
24. Kuts Y., Protasov A., Lysenko U., Dugin O. Pulsed Eddy Current Non-Destructive Testing of the Coating Thickness // The e-Journal of Nondestructive Testing.– .2014.– № 12, Vol.19 : web-site. URL : http://www.ndt.net/events/ECNDT2014/app/content/Paper/187_Lysenko-Rev1.pdf (last access: 03.0.2020)
25. А. С. Бакунов, В. Ф. Мужичкий, С. Е. Шубочкин. Структуроскоп вихретоковый ВЭ-26НП. URL: <https://propribory.ru/data/upload/static/files/26np.pdf> (дата звернення: 05.06.2020).
26. Петрик, В. Ф. Метрологія, стандартизація та сертифікація в неруйнівному контролі [Електронний ресурс] : навчальний посібник з дисциплін «Метрологія» та «Сертифікація і стандартизація» / В. Ф.

					ПК61.08.0000.000 ПЗ	Арк.
						70
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Петрик, А. Г. Протасов ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 3,04 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2015. – 266 с.

27.Lashko Olena Experience in the Organization of Non-Destructive Testing Formal Education in Ukraine / International Conference NDT Days 2019, 17-21 June, 2019, Sozopol, Bulgaria (NDT Days 2019). - P. 91-95.

28.Лашко О. В. Окремі аспекти розробки навчальних програм для студентів спеціалізації «Неруйнівний контроль, технічна діагностика» / О. В. Лашко // Матеріали ІІІ науково-технічної конференції «Неруйнівний контроль в контексті асоційованого членства України в Європейському Союзі» з міжнародною участю – NDT – UA 2019, 17-19 вересня 2019 року, м. Київ, Україна. – Київ : УТ НКТД, 2019. – С. 32-37.

29.Куц Ю.В. Магнітний неруйнівний контроль: Навчальний посібник / Ю.В. Куц, А.Г. Протасов, В.К. Цапенко, В.С. Єременко, Ю.Ю. Лисенко – К: НТУУ "КПІ". – 2012. – 139 с.

					ПК61.08.0000.000 ПЗ	Арк.
						71
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Додаток

Додаток А

Структурна схема приладу

Додаток Б

Схема електрична принципова

Додаток В

Складальне креслення вихрострумowego перетворювача

Додаток Г

Специфікація