

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»  
Приладобудівний факультет  
Прилади і системи неруйнівного контролю**

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

— \_\_\_\_\_ Анатолій ПРОТАСОВ  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 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 прилад для виявлення експлуатаційної  
деградації алюмінієвих сплавів»**

Виконав :

студент IV курсу, групи ПК-71

Рябков Сергій Олегович

Керівник:

Професор, д.т.н., професор,

Куц Юрій Васильович

Консультант зі складального креслення:

Ст. викладач, к.т.н., доцент,

Богдан Галина Анатоліївна

Рецензент:

Доцент, к.т.н., доцент,

Богомазов Сергій Анатолійович

Засвідчую, що у цій дипломній роботі  
немає запозичень з праць інших авторів  
без відповідних посилань.

Студент: Рябков С.О.

Київ – 2021 року

### ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

| № з/п | Формат | Найменування        | Позначення                   | Кількість листів | Примітка |
|-------|--------|---------------------|------------------------------|------------------|----------|
| 1     | A4     |                     | Завдання на дипломний проєкт | 2                |          |
| 2     | A4     | ПК 71.130000.000ПЗ  | Пояснювальна записка         | 38               |          |
| 3     | A1     | ПК 71.130000.000Е1  | Структурна схема             | 1                |          |
| 4     | A1     | ПК 71.130000.000Е2  | Електрична принципова схема  | 1                |          |
| 5     | A1     | ПК 71.130000.000 СК | Складальний кресленик        | 1                |          |
|       |        |                     |                              |                  |          |
|       |        |                     |                              |                  |          |
|       |        |                     |                              |                  |          |

|           |                |       |      |                              |                                                     |        |
|-----------|----------------|-------|------|------------------------------|-----------------------------------------------------|--------|
|           |                |       |      | ПК 71.130000.000ПЗ           |                                                     |        |
|           | ПІБ            | Підп. | Дата |                              |                                                     |        |
| Розробн.  | Рябков С.О.    |       |      | Відомість дипломного проекту | Лист                                                | Листів |
| Керівн.   | Куц Ю.В.       |       |      |                              | 1                                                   | 1      |
| Конкульт. | Богдан Г.А.    |       |      |                              | КПІ ім. Ігоря Сікорського<br>Каф. ПСНК<br>Гр. ПК-71 |        |
| Н/контр.  |                |       |      |                              |                                                     |        |
| Зав. Каф. | Протасов А. Г. |       |      |                              |                                                     |        |

**Пояснювальна записка**  
**до дипломного проєкту**  
**на тему: «Вихрострумний прилад для виявлення**  
**експлуатаційної деградації алюмінієвих сплавів»**

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

**Приладобудівний факультет**

**Прилади і системи 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

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 р.

**ЗАВДАННЯ**

на дипломний проєкт студенту

**Рябкову Сергію Олеговичу**

1. Тема проєкту «Вихрострумний прилад для виявлення експлуатаційної деградації алюмінієвих сплавів», керівник проєкту Куц Юрій Васильович, д.т.н., професор затверджені наказом по університету від «26»\_травня\_ 2021 р. №\_1347-с\_

2. Термін подання студентом проєкту \_\_\_\_\_

3. Вихідні дані до проєкту: Матеріал ОК: дюралюміній, товщина ОК: 3 мм, радіус кривизни ,  $R_{кр} > 10$  см , шар фарби на ОК: 0,2 мм. Діапазон вимірювань ПЕП 14...37,1 МСм/м. ВСП – трансформаторний, накладний.

4. Зміст пояснювальної записки:

- 1) аналітичний огляд;
- 2) розрахункова частина;
- 3) розрахунок та підбір елементів принципової схеми;
- 4) методика контролю;

- 5) висновок;
- 6) список літератури.

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

- 1) схема електрична функціональна;
- 2) схема електрична принципальна;
- 3) складальне креслення.

6. Консультанти розділів проєкту

| Розділ                | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата   |                  |
|-----------------------|-------------------------------------------|----------------|------------------|
|                       |                                           | завдання видав | завдання прийняв |
| Складальний кресленик | Богдан Г. А.                              |                |                  |

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

#### Календарний план

| № з/п | Назва етапів виконання дипломного проєкту | Термін виконання етапів проєкту | Примітка |
|-------|-------------------------------------------|---------------------------------|----------|
| 1     | Аналіз особливостей об'єкта контролю      | 08.03.2021                      |          |
| 2     | Аналіз літературних джерел                | 20.03.2021                      |          |
| 3     | Постановка завдання                       | 10.04.2021                      |          |
| 4     | Створення структурної схеми               | 26.04.2021                      |          |
| 5     | Розрахунок елементів                      | 05.05.2021                      |          |
| 6     | Проектування системи «ОК-ВСП»             | 14.05.2021                      |          |
| 7     | Оформлення дипломного проєкту             | 28.05.2021                      |          |
| 8     | Підбиття підсумків                        | 30.05.2021                      |          |
|       |                                           |                                 |          |

Студент

С.О Рябков

Керівник

Ю.В. Куц

## Анотація

Даний дипломний проєкт складається з 54 сторінок, 21 ілюстрації, 95 формул, 30 літературних джерел.

В дипломному проєкті було розроблено вихрострумний прилад для моніторингу деградації алюмінієвих сплавів в авіаційних конструкціях. Рівень деградації визначається за значенням питомої електропровідності сплаву. В приладі реалізовано фазовий метод вимірювання, який менш чутливий до варіацій зазору між об'єктом контролю та перетворювачем.

Розроблено структурну, функціональну та принципіальну схеми приладу, а також складальне креслення вихрострумного перетворювача.

**Мета роботи** полягає в розробленні вихрострумного приладу моніторингу електропровідності алюмінієвих сплавів в процесі їх деградації.

**Об'єкт дослідження** – процес вимірювання питомої електропровідності алюмінієвих сплавів вихрострумовим методом.

**Предмет дослідження** – вихрострумові методи та засоби вимірювання питомої електропровідності алюмінієвих сплавів.

**Наукова новизна** – при конструюванні приладу запропоновано враховувати температуру об'єкту контролю та приводити результат вимірювання питомої електропровідності до нормальної температури.

Ключові слова: авіаційна техніка, алюмінієві сплави, деградація, вихрострумний метод, електропровідність, фазовий метод.

## **Abstract**

Bachelor's degree project of the 4th year student, group PK-71 of the Faculty of Instrument-Making Sergey Ryabkov on the topic: “Eddy current device for detecting operational degradation of aluminum alloys”.

**Key words:** aviation equipment, aluminum alloys, degradation, eddy current method, electrical conductivity, phase method.

In the diploma project the eddy current device for monitoring of degradation of aluminum alloys in aircraft designs was developed. The level of degradation is determined by the value of the specific conductivity of the alloy. The device implements a phase measurement method, which is less sensitive to variations in the gap between the control object and the transducer.

The structural, functional and schematic diagrams of the device, as well as the assembly drawing of the eddy current converter are developed.

**The purpose of the work** is to develop eddy currents of the device for monitoring the electrical conductivity of aluminum alloys in the process of their degradation.

**The object of research** is the process of measuring the specific electrical conductivity of aluminum alloys by the eddy current method.

**The subject of research** - eddy current methods and means of measuring the specific electrical conductivity of aluminum alloys.

**Scientific novelty** - when designing the device, it is proposed to take into account the temperature of the object of control and bring the result of measuring the specific conductivity to normal temperature.

This diploma project consists of 51 pages, 21 illustrations, 95 formulas, 30 literature sources.

## ЗМІСТ

|                                                                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Вступ .....                                                                                                                | 10 |
| 1. Огляд проблем та задач контролю авіаційних конструкцій, методів неруйнівного контролю елементів конструкцій літака..... | 12 |
| 1.1 Підхід до контролю авіаційних конструкцій, перевага неруйнівного методу контролю, основні елементи літаку.....         | 12 |
| 1.1.1 Крило .....                                                                                                          | 15 |
| 1.1.2 Фюзеляж .....                                                                                                        | 16 |
| 1.1.3 Оперення .....                                                                                                       | 17 |
| 1.2 Вплив деградації на властивості сплаву.....                                                                            | 18 |
| 1.3 Використання ПЕП як структурно-чутливого параметра.....                                                                | 23 |
| Висновки до 1 розділу.....                                                                                                 | 26 |
| 2. Розрахункова частина .....                                                                                              | 27 |
| 2.1 Вибір перетворювача та методу вимірювання контрольованого параметра.....                                               | 27 |
| 2.1.1 Вибір ВСП.....                                                                                                       | 27 |
| 2.1.2 Фазовий метод контролю .....                                                                                         | 28 |
| 2.2 Розрахунок ВСП.....                                                                                                    | 30 |
| Висновки до 2 розділу.....                                                                                                 | 41 |
| 3. Вибір та розрахунок електронних схем дефектоскоп.....                                                                   | 42 |
| 3.1 Розробка схеми електричної структурної та опис роботи приладу.....                                                     | 42 |
| 3.2 Підбір та розрахунок елементів принципової схеми.....                                                                  | 43 |
| 3.2.1 МСР601АТхmega32D3.....                                                                                               | 43 |
| 3.2.2 К561ТЛ1.....                                                                                                         | 43 |

|             |             |                 |               |             |                                                                                           |      |         |
|-------------|-------------|-----------------|---------------|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|------|---------|
|             |             |                 |               |             | <b>ПК 71.130000.000ПЗ</b>                                                                 |      |         |
|             |             |                 |               |             |                                                                                           |      |         |
| <b>Змн.</b> | <b>Арк.</b> | <b>№ докум.</b> | <b>Підпис</b> | <b>Дата</b> | <b>Вихрострумовий прилад для виявлення експлантаційної деградації алюмінієвих сплавів</b> |      |         |
| Розроб.     |             | Рябков С.О      |               |             |                                                                                           |      |         |
| Перевір.    |             | Куц Ю.В..       |               |             |                                                                                           |      |         |
| Н. Контр.   |             |                 |               |             |                                                                                           |      |         |
| Затверд.    |             | Куц Ю.В..       |               |             |                                                                                           |      |         |
|             |             |                 |               |             | Лім.                                                                                      | Арк. | Акрушів |
|             |             |                 |               |             |                                                                                           |      |         |
|             |             |                 |               |             | <b>ПБФ, ПК-71</b>                                                                         |      |         |

|                                  |                  |    |
|----------------------------------|------------------|----|
| 3.2.3                            | K122УД1.....     | 44 |
| 3.2.4                            | АТхmega32D3..... | 46 |
| Висновки до 3 розділу: .....     |                  | 48 |
| Висновки .....                   |                  | 48 |
| Список використаних джерел ..... |                  | 49 |

|      |      |          |        |      |                     |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------|------|
|      |      |          |        |      | ПК71.13.0000.000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                     | 9    |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                     |      |

## Вступ

Своєчасний моніторинг деградації алюмінієвих авіаційних конструкцій, є важливою частиною обслуговування, експлуатації та підтримки льотної придатності авіаційної техніки призначений термін служби якої добігає кінця.

Такі перевірки мають відбуватися регулярно, особливо у випадку коли, літак знаходиться в експлуатації вже тривалий час.

Експлуатаційна деградація виникає під дією багатьох факторів, основними з яких є статичні і циклічні навантаження, температура, вплив агресивних середовищ тощо. Зазначені фактори впливають на конструкційні матеріали у різний спосіб, це призводить до збільшення кількості дисперсних інтерметалідів і густини дислокацій, дифузії легувальних елементів і їх сегрегації вздовж меж зерен, мікророзтріскування включень вторинної фази тощо. Особливе значення має також синергія експлуатаційних чинників, коли кожний з факторів окремо не призводить до суттєвої деградації матеріалів, проте їх сумісна дія, вирішальне значення має. Без оцінювання деградаційної зміни механічних властивостей матеріалів неможливе достовірне оцінювання залишкового ресурсу конструкцій і, зокрема, експлуатація літаків за сучасним принципом допустимої пошкоджуваності. Деградацію властивостей алюмінієвих сплавів оцінюють як руйнівними так і неруйнівними методами.

Руйнівні методи встановлення реальних ресурсних характеристик матеріалів засновані на механічних випробуваннях зразків-свідків чи зразків, вирізаних з експлуатованих конструкцій під час ремонту та заміни окремих частин конструкцій. З економічних причин такий підхід до контролю об'єктів що перебувають в експлуатації не є рентабельним, це спонукає до використання інших підходів і актуалізує необхідність експлуатаційного моніторингу деградаційних змін структури матеріалів методами НК.

Для алюмінієвих сплавів структурно-чутливими параметрами НК можуть бути питома електропровідність (ПЕП) і термоелектрорушійна сила (ТЕРС). Для авіаційних конструкцій перспективним структурно-чутливим параметром є саме

|      |      |          |        |      |                     |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------|------|
|      |      |          |        |      | ПК71.13.0000.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                     | 10   |

питома електропровідність. Як структурно-чутливий параметр вона є високопродуктивною і достатньо надійною, також вона не потребує особливих норм щодо підготовки поверхні. До її переваг також належать: відсутність потреби у контакті між ОК та приймачем, відсутність загроз для оператора, дешевизна, тощо.

|      |      |          |        |      |                     |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------|------|
|      |      |          |        |      | ПК71.13.0000.000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                     | 11   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                     |      |

# 1. Огляд проблем та задач контролю авіаційних конструкцій, методи неруйнівного контролю елементів конструкцій літака

## 1.1 Підхід до контролю авіаційних конструкцій, перевага неруйнівного методу контролю, основні елементи літаку

Деградацію властивостей конструкційних матеріалів можливо оцінювати як руйнівними так неруйнівними методами. Руйнівний метод заснований на випробуванні так званих зразків-свідків або зразків вирізаних елементів авіаконструкцій, що перебували в тривалій експлуатації, на етапах їх капітального ремонту чи вилучення з експлуатації. Використовуючи такі зразки встановлюють істинні ресурсні характеристики матеріалів. Виявлено [1], що найбільше погіршення демонструють характеристики пластичності (відносне видовження  $\delta$ ) і циклічної тріщиностійкості (номінальний  $\Delta K_{th}$  ефективний  $\Delta K_{th}^{eff}$  пороги втоми і циклічна в'язкість руйнування  $\Delta K_{fc}$ ) (рис.1.1). Саме вони є найбільш чутливими до деградації. Ці характеристики аналізувались для алюмінієвих сплавів типу Д16 (система Al-Cu-Mg) і В95 (система Al-Zn-Mg-Cu) – вітчизняних аналогів зарубіжних сплавів типу 2024 і 7075. Такі сплави є основними матеріалами що застосовуються в конструкції планера літака (фюзеляжах і крилах). Виходячи з характеристик циклічної тріщиностійкості можливо проводити оцінку втомної довговічності ( $N_f$ ) елементів авіаконструкцій [2, 3] а також встановити понижувальний поправочний коефіцієнт [1] для розрахунку залишкового ресурсу з урахуванням деградації конструкційних матеріалів.[4]

$$\eta_m = N_f^{дегр} / N_f^{вих}$$

|      |      |          |        |      |                     |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------|------|
|      |      |          |        |      | ПК71.13.0000.000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                     | 12   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                     |      |

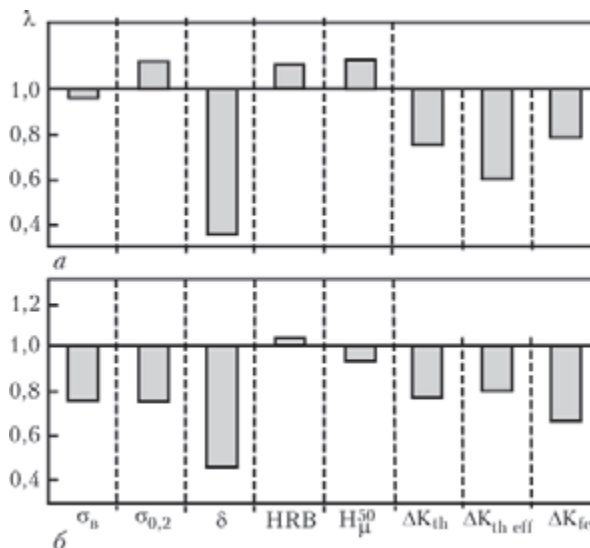


Рис. 1.1. Вплив модельної деградації на механічні характеристики алюмінієвих сплавів Д16чТ (а) і В95пчТ1 (б) ( $\lambda$  – відношення характеристик матеріалу в деградованому і вихідному станах)

Проте вище зазначений руйнівний метод не є можливим для застосовування до авіаконструкцій що перебувають в експлуатації, в них на відміну, наприклад, від атомної техніки, не застосовуються зразки-свідки. В результаті моніторинг їх експлуатаційної деградації можливий лише з застосування неруйнівних методів. Як було зазначено вище, процес деградації визначається структурно-фазовим станом і мікроструктурною пошкоджуваністю матеріалу. Через це такий неруйнівний контроль можливо здійснювати за зміною структурно-чутливих фізичних характеристик об'єкту контролю, використовуючи засоби та методи структуроскопії, а саме встановлення мікроструктурних і механічних параметрів матеріалу за вимірами його питомої електропровідності, коерцитивної сили, магнітної проникності, термоелектрорушійної сили тощо, ґрунтуючись на кореляційних залежностях, що існують між цими характеристиками матеріалів. Таким чином, структуроскопія відіграє значну роль в моніторингу деградаційних змін в авіаційних матеріалах і встановлення періодичності контролю авіаконструкцій що перебувають у тривалій експлуатації. Враховуючи те що основним

конструкційним матеріалом для обшивки фюзеляжу і крила літаку є алюмінієві сплави, що є ферромагнетиками, для таких елементів авіаконструкцій засоби структуроскопії можуть базуватися на вимірюваннях питомої тепло чи електро провідності матеріалів [4].

Елементи літаку як ОК.

Обшивка літака (рис. 1.1) представляє з себе оболонку з дюралюмінію, яка формує поверхню фюзеляжу, крила та оперення. Вона належить до конструктивно-силових елементів літака [5].



Рис. 1.2 Обшивка літаку

У сучасних повітряних суднах найбільшого застосування набула металічна жорстка «робоча» обшивка, котра сприймає різноманітний спектр знакозмінних аеродинамічних, тобто зовнішніх, навантажень. До навантажень такого типу відносять крутні та згинаючі моменти, поперечні сили, що діють на каркас літального апарату. До переваг даного типу обшивки належать: масо-габаритні показники, жорсткість та висока міцність. В минулі часи здебільшого використовувалася «м'яка» несилова обшивка. Вона застосовувалася в літаках першої половини минулого століття, що мали малу швидкість польоту, через свої гвинтові двигуни. Сьогодні до таких літальних апаратів належать хіба що

|      |      |          |        |      |                     |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------|------|
|      |      |          |        |      | ПК71.13.0000.000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                     | 14   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                     |      |

тренувальні чи достатньо легкі спортивні літаки. Таку обшивку будують з фанери та тканини.

Обшивка може бути тонкою та товстою, залежно від типу конструкції. Тонка підкріплена стрингерним набором (повздовжніми балками), товста виконується з монолітної панелі, яка пресується чи фрезерується, та навіть може бути трьохшаровою. Як зазначалося вище, для побудови обшивки використовують металічні листи здебільшого з алюмінію та його сплавів через їх високу міцність. В місцях, де навантаження не набувають великих значень, товщина обшивки може набувати значень  $\sim 0,5$  мм, у високого навантажених, наприклад таких, як кінець крила до 4-6 мм. Здебільшого, верхня частина крила зазнає циклічних стискаючих зусиль, нижня – розтягуючі зусиль.

Сьогодні найчастіше використовується шарова обшивка. До її складу входять 2 несучих шари та заповнювач, який розміщений між ними. Вже було зазначено, що ці шари обшивки виготовляють з алюмінію та його сплавів, а от наповнювач зазвичай являє собою соти що виготовлені з металічної фольги гофруванням та з'єднанням за рахунок склеювання, зварювання, тощо. Окрім сотового наповнювача може використовуватись пористий і такий, що виготовлений з гофрованих листів.

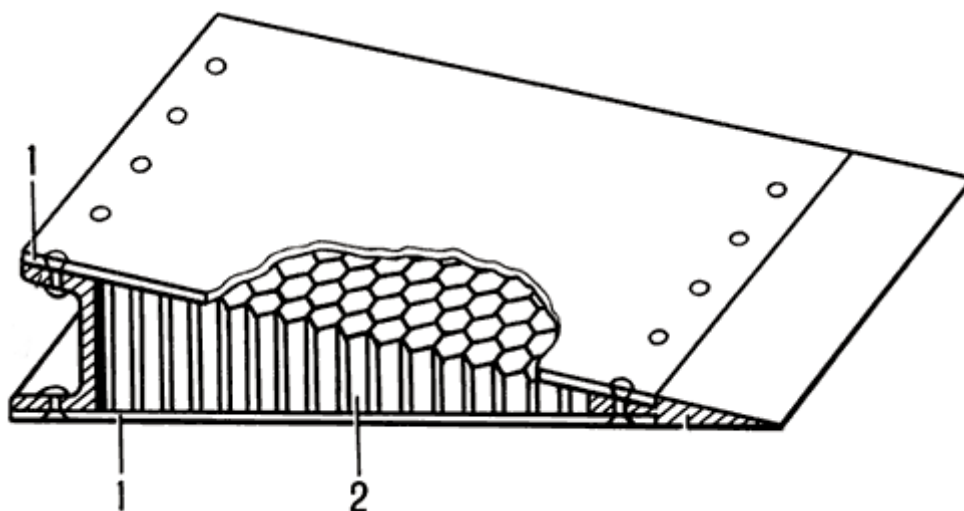


Рис.1.3 Сотова конструкція крила:

1 – листи дюралюмінію; 2 – сотовий наповнювач

Далі приведено короткий огляд основних частин літаку.

|      |      |          |        |      |                     |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------|------|
|      |      |          |        |      | ПК71.13.0000.000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                     | 15   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                     |      |

### 1.1.1 Крило

На крилі знаходяться засоби механізації літаку (передкрилки, закрилки) та рулі крена (елерони). Крило разом з горизонтальним і вертикальним оперенням відноситься до несущих частин літака. Основною функцією крила є створення під'ємної сили та забезпечення поперечної стійкості літака.

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

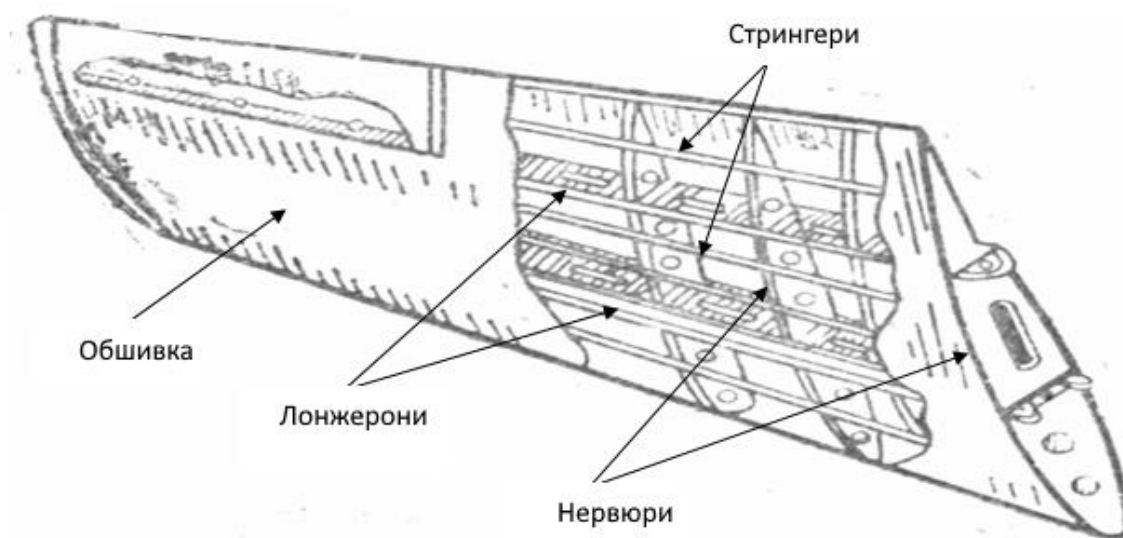


Рис. 1.4 Конструкція крила літака

### 1.1.2 Оперення

Оперення – це аеродинамічна поверхня, необхідна для створення стійкості, керування та балансування літака [6]. 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 [7].

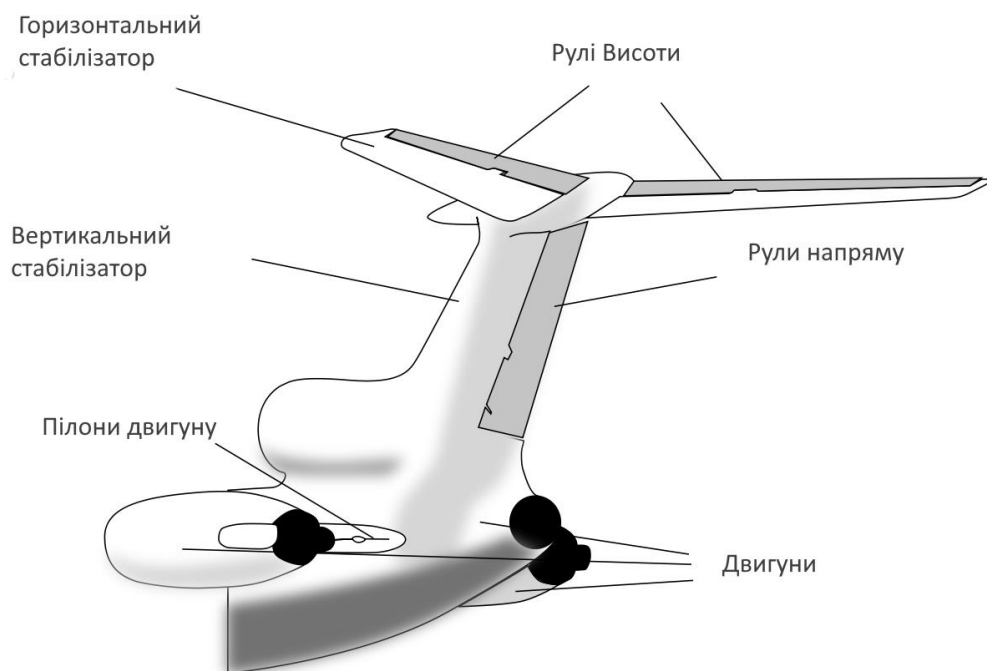


Рис. 1.5 Конструкція оперення

Існують 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.

### 1.1.3 Фюзеляж

Фюзеляж це основа конструкції ЛА, він зв'язує всі частини літака в одне ціле. Його використовують задля розміщення комерційного навантаження, а також пального, шасі, обладнання. [6]

Існує ряд вимог до фюзеляжу:

- раціональне використання його об'ємів
- забезпечення мінімального аеродинамічного супротиву

- забезпечення захисту від впливу зовнішнього середовища та комфортних життєвих умов під час польоту

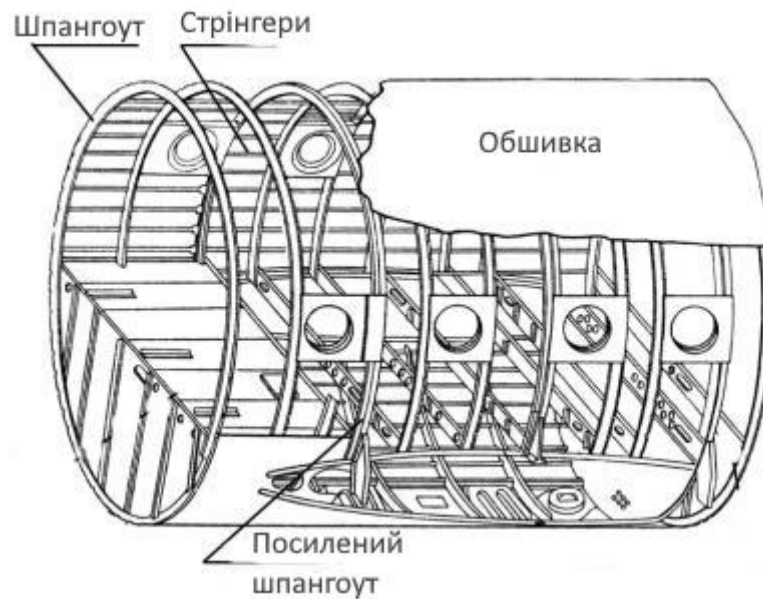


Рис. 1.6 Конструкція фюзеляжу

Особливістю балочно-стрингерного фюзеляжу є те, що згинальний момент 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 Вплив деградації на властивості сплаву

Фізико-механічні властивості сплавів та металів мають суттєву залежність від ступеня спотворення кристалічної ґратки, кількості наявних в ній дефектів тощо [11]. Питомий електроопір  $\rho$  обумовлюється розсіюванням електронних хвиль на неоднорідностях кристалів, тобто він є пов'язаним з хвильовою

природою електронів [11]. Він є оберненою величиною до питомої електропровідності:  $\chi=1/\rho$ . Фізична природа електропровідності визначається рухливістю вільних електронів, тому значення  $\chi$  залежить від площі поверхні Фермі  $A$  і довжини вільного пробігу  $l$  електронів [12]:  $\chi=a_1 l A$  де  $a_1 = 2e^2/3h^3$ ;  $h$  – постійна Планка,  $e$  – заряд електрона [4].

Параметр  $l$  залежить від структури кристалічної ґратки (відстані між атомами), тому відоме наступне співвідношення [13]:  $\chi=a_2 * d$ ,

де  $a_2 = \frac{e^2 E n_0}{\pi m k T V_T N_0}$   $E$ – напруженість електричного поля;  $n_0$  – кількість вільних електронів в одиниці об'єму;  $m$  – маса спокою електрона;  $k$  –постійна Больцмана;  $T$  – температура;  $V_T$  – швидкість теплового руху електронів;  $N_0$  – кількість атомів в одиниці об'єму;  $d$  – період кристалічної ґратки.

Під впливом механічних напружень  $\sigma$  змінюється період ґратки. В праці [14] показано, що в області пружних деформацій існує залежність:  $\Delta \chi=K_\chi \Delta \sigma$  де  $K_\chi$  – коефіцієнт, залежний від властивостей матеріалу.

При цьому відомо [14], що за впливу пружніх напружень значення  $\chi$  змінюється на 1...2 %.

Більш суттєвіші зміни  $\chi$  призводять до пружно-пластичних деформацій: чим вищий рівень пластичної деформації, тим більша електропровідність алюмінієвих сплавів типу 2024 і 7075 [14]. Виявлено [14], що електропровідність попередньо деформованих сплавів цього типу після відпалу змінюється в більшу сторону на 40%. При цьому збільшується поздовжня (longitudinal) складова електропровідності, а поперечна (transverse) складова, навпаки, зменшується, це зумовлює малу чутливість при вимірюванні електропровідності циліндричними вихрострумовими датчиками [14].

Значне збільшення значення  $\chi$  після відпалу може бути викликано здебільшого структурним фактором, ніж зменшенням механічних напружень. Під впливом зовнішніх циклічних напружень електропровідність аустенітної сталі 304 до моменту появи тріщин знизилась лише на 4 % [15], а для алюмінієвого сплаву 2024 практично не зазнала змін. При цьому за статичного

|      |      |          |        |      |                     |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------|------|
|      |      |          |        |      | ПК71.13.0000.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                     | 19   |

розтягу зразка даного сплаву в пружній області значення  $\chi$  не змінюється, а з переходом в пружно-пластичну область до руйнування знизилося на 1,7 % [16].

Складна залежність електропровідності алюмінієвих сплавів типу Д16 і В95 [12, 17-19] від їх хімічного складу і структурно-фазового стану після термічної обробки. У вихідному стані структурно-фазовий склад цих сплавів представляє собою зерна твердого розчину на основі алюмінію та включення вторинної фази, які за розміром можна розподілити по трьох групах [20]: великі (1...100 мкм) нерозчинні включення типу  $(\text{Cu}, \text{Fe}, \text{Mn})\text{Al}_6$ ,  $(\text{Cu}, \text{Fe}, \text{Mn})_3\text{Si}_2\text{Al}_{15}$ ,  $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$ ,  $\text{FeAl}_6$ ,  $\text{Mg}_2\text{Si}$ , які утворюються під час виплавки за участі домішок Fe і Si; середні (0,05...0,5 мкм) інтерметаліди типу  $\text{Al}_{12}\text{Mn}_2\text{Cr}$ , які виділяються під час гомогенізації відливку; дисперсні (0,01...0,1 мкм) інтерметаліди типу  $\text{Al}_{12}\text{Cu}$ ,  $\text{Al}_2\text{CuMg}$ ,  $\text{Zn}_3\text{Mg}_4\text{Al}_3$ ,  $\text{MgZn}_2$  – так звані зони Гіньє–Престона (G.-P.), які утворюються під час старіння гартованих сплавів і відіграють головну роль у їх зміцненні. Електропровідність  $\chi$  таких сплавів залежна від їх здатності розсіювати потік вільних електронів елементами мікроструктури. Після процесу гартування, коли утворюється перенасичений твердий розчин, за більшого впливу Cr, Mn, Fe, Ti, Si і меншого Zn, Mg, Cu спостерігається зменшення значення  $\chi$  порівняно з вихідним станом. Оскільки розчинені елементи, їх сегрегації (виділення), дислокації є основними факторами, які створюють локальні пружно-пластичні поля і відповідно зумовлюють розсіювання електронів, це призводить до зростання електроопору сплавів (падіння  $\chi$ ).

*Природне старіння.* Після процесу вилежування (витримки на повітрі) електропровідність загартованих сплавів зменшується на 10...15 % за зростання міцності і твердості у 1,5...2 рази [12, 21]. Це зумовлюється зростанням кількості і розмірів зон G.-P., які ефективно розсіюють електрони. Хоча при цьому дифузія атомів Zn, Mg і Cu з твердого розчину для формування цих зон очищає матрицю, що зумовлює ріст  $\chi$ , але в данному випадку переважає вплив зон G.-P.

|      |      |          |        |      |                     |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------|------|
|      |      |          |        |      | ПК71.13.0000.000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                     | 20   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                     |      |

*Штучне старіння.* Після витримки загартованих сплавів за підвищених (100...200 °С) температур їх електропровідність зростає разом зі збільшенням температури та часу витримки за рахунок інтенсивного виходу легувальних елементів із твердого розчину. При цьому, зазвичай, збільшується міцність та твердість сплавів після деформаційного зміцнення матриці когерентними й напів когерентними зонами G. -Р. [12, 21-23].

*Перестарювання.* З підвищенням температури (> 200 °С) і часу витримки (більше 8– 10 год.) зростають зони G.-Р., відбувається зрив когерентності з матрицею, виділення вторинної фази укрупнюються, внутрішні напруження зменшуються. В наслідку значно зростає електропровідність  $\chi$ , оскільки розсіювання електронів в кристалічній ґратці матриці стає меншим, і знижується твердість і міцність сплавів [13, 18, 21, 22, 24-26]. При цьому необхідно зазначити, що при перестарюванні зниження міцності і ріст електропровідності може супроводжуватись не підвищенням, а зниженням пластичності, це є пов'язаним з виділенням вторинної фази вздовж меж зерен [21, 24].

*RRA-обробка.* Даний вид обробки (retrogression and re-aging) полягає у витримці сплавів після штучного старіння в соляній ванні до 45 хв за температури 200 °С і повторному штучному старінні, що зумовлює зміну морфології і властивостей вторинних фаз та забезпечує зростання ударної в'язкості і опору корозійно-механічному руйнуванню під напруженням (stress corrosion cracking – SCC). В порівнянні з традиційним зістаренням сплаву типу В95 (7075 і 7079) після RRA-обробки міцність падає, а електропровідність зростає [25, 27].

*Повторний нагрів (перегрів).* Нагрів термічно зміцнених алюмінієвих сплавів вище певних температур під час експлуатації чи механічної обробки призводить до розпаду твердого розчину, коагуляції і розчинення вторинних фаз,

|      |      |          |        |      |                     |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------|------|
|      |      |          |        |      | ПК71.13.0000.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                     | 21   |

росту величини зерна тощо, що зумовлює суттєве зниження міцності і помітний ріст електропровідності цих сплавів [13, 22, 28].

Таким чином, аналіз літературних даних показує, що для термооброблених алюмінієвих сплавів типу Д16 і В95 у вихідному стані для більшості випадків існує кореляційний зв'язок (рис. 1.2.1, заштриховані області): Ріст електропровідності супроводжується зниженням міцності та підвищенням пластичності.

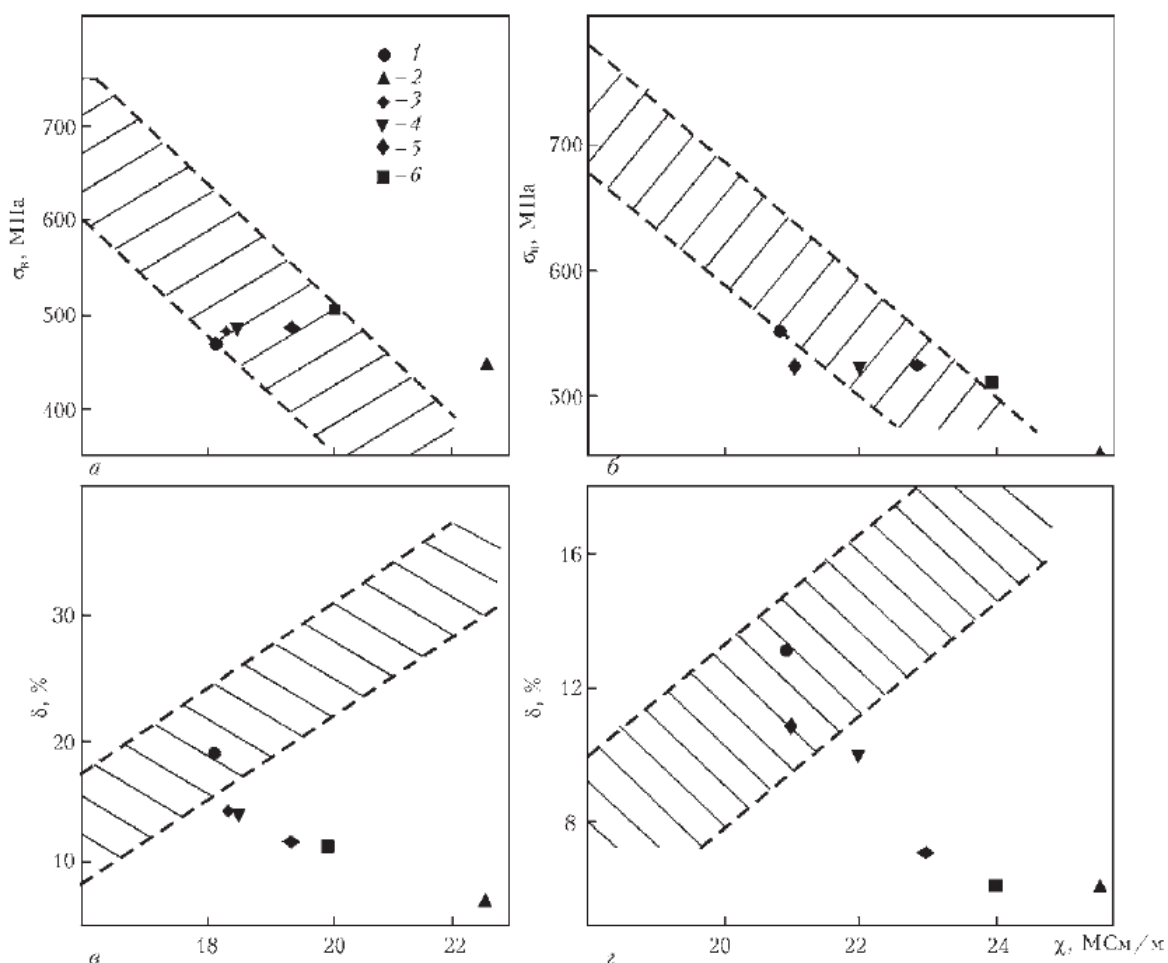


Рис. 1.2.1. Залежності границі міцності  $\sigma_{\text{в}}$ , відносного видовження  $\delta$  і питомої електропровідності алюмінієвих сплавів типу Д16 (а, в) і В95(б, г): заштриховані області – літературні дані [12, 17, 19] для термооброблених сплавів; експериментальні дані [7,28, 29] для сплавів у вихідному стані (символи 1), після модельної (2) та експлуатаційної деградації в зоні нервюру №14 (3), №12 (4), №4 (5) і №2 (6) нижньої і верхньої обшивок крила літака АН-12 (див. рис. 1.2.2)

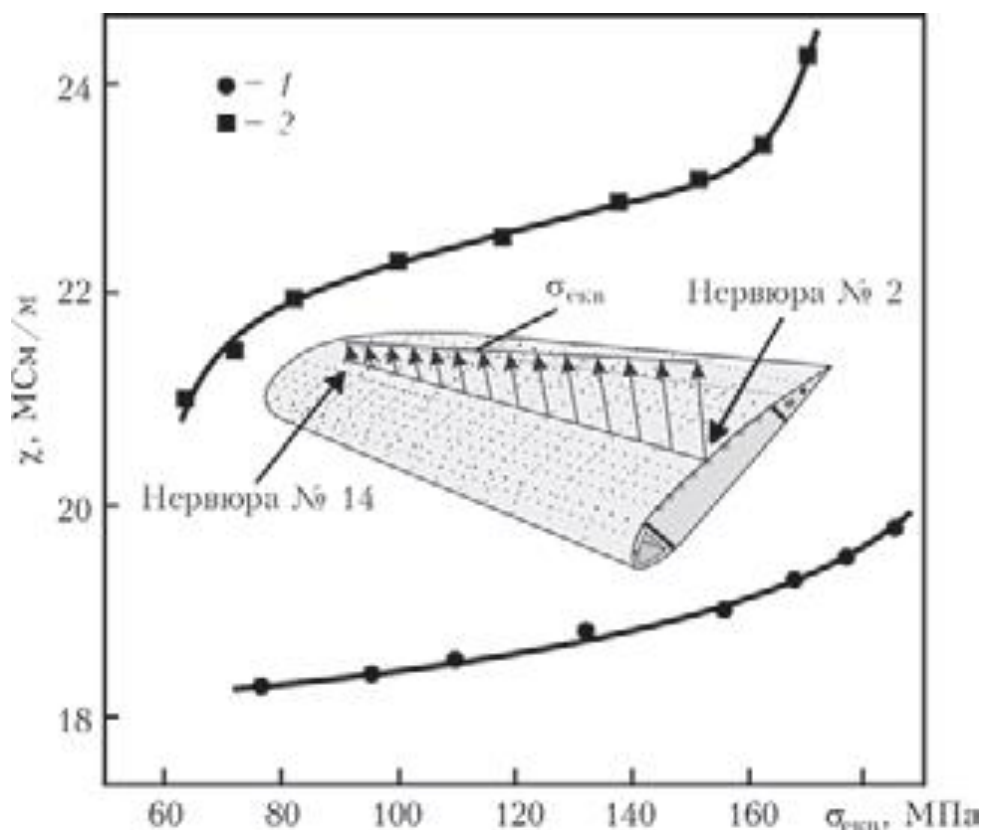


Рис. 1.2.2. Залежності питомої електропровідності  $\chi$  сплавів Д16АТНВ (1) і В95Т1 (2) від експлуатаційних напружень  $\sigma_{\text{екв}}$  в околі різних нервюр для нижньої і верхньої обшивок крила [29]

### 1.3 Використання ПЕП як структурно-чутливого параметра

Для забезпечення НК авіаційних конструкцій під час експлуатації вихрострумовий структуроскоп має відповідати наступним загальним вимогам:

- забезпечити високу локальність контролю авіаційних конструкцій, які характеризуються кривизною поверхні з великою кількістю отворів під заклепку;
- забезпечити контроль через шар захисного ДП без його видалення;
- забезпечити контроль змін структури у внутрішніх шарах матеріалу конструкцій. [30]

Перша вимога може бути вирішена вибором робочого діаметра ВСП, який не повинен перевищувати 1,2 мм. Друга вимога до структуроскопів потребує реалізації способів, які можуть розширити діапазон поверхнею ВСП і поверхнею

об'єкту контролю (ОК) або товщини ДП в діапазоні до 0,5 мм. На використовуваних робочих частотах зазор (повітряний проміжок) між ВСП і поверхнею ОК і шар ДП відповідної товщини впливають на сигнал ВСП однаково. Тому далі будемо використовувати термін «відстроювання від зазору», маючи на увазі і відстроювання від зміни товщини захисного ДП. Для виконання третьої вимоги необхідно зменшити робочу частоту контролю, щоб на вихідний сигнал ВСП впливали зміни ПЕП в нижніх шарах ОК. З точки зору вихрострумового методу кожен елемент поверхні авіаційної конструкції можна представити у вигляді тришарової структури (рис. 1.3.1) [30].

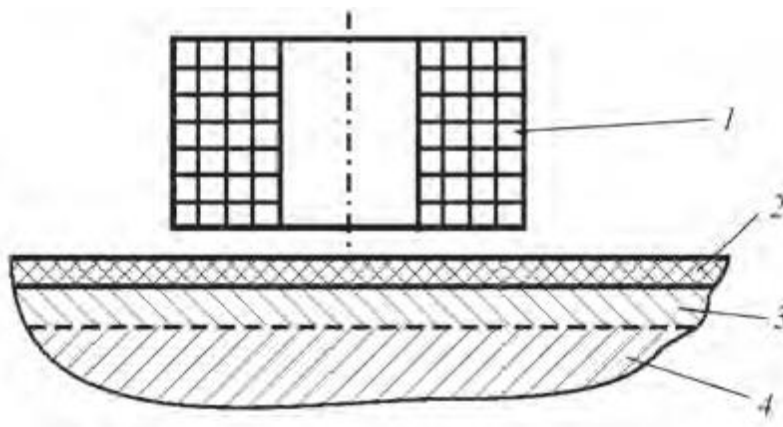


Рис. 1.3.1. ВСП над елементом авіаційної конструкції у вигляді 3-шарового електропровідного ОК:

1 – ВСП;

2 – ДП;

3 – плакувальний шар алюмінію;

4 – алюмінієвий сплав

Верхній шар – це захисне ДП. Другий шар – антикорозійний плакований шар чистого алюмінію. І третій шар – основний алюмінієвий матеріал, який несе експлуатаційні навантаження і структурні деградаційні зміни матеріалу якого необхідно контролювати з відстроюванням від змінних параметрів, що можуть впливати на результати контролю. Для зменшення похибки вимірювання ПЕП,

|      |      |          |        |      |                     |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------|------|
|      |      |          |        |      | ПК71.13.0000.000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                     | 24   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                     |      |

пов'язаної з можливою зміною зазору (або товщини ДП), перспективним є використання фазового способу обробки сигналу ВСП [18, 31, 32].

Фазовий структуроскоп (вимірювач ПЕП) складається з двох каналів – вимірювального і опорного. Для збільшення діапазону відстроювання від впливу зміни зазору вихідний сигнал ВСП підсумовують з сигналом компенсації, що фактично призводить до зміщення початку координат в комплексній площині сигналу. Характеристики фазового детектора мають ключове значення для досягнення високої точності вимірювача ПЕП в цілому і його розробка вимагає особливої уваги. На виході фазового детектора виділяється сигнал, пропорційний фазовому зсуву між вимірювальним і опорним сигналами [30].

|      |      |          |        |      |                     |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------|------|
|      |      |          |        |      | ПК71.13.0000.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                     | 25   |

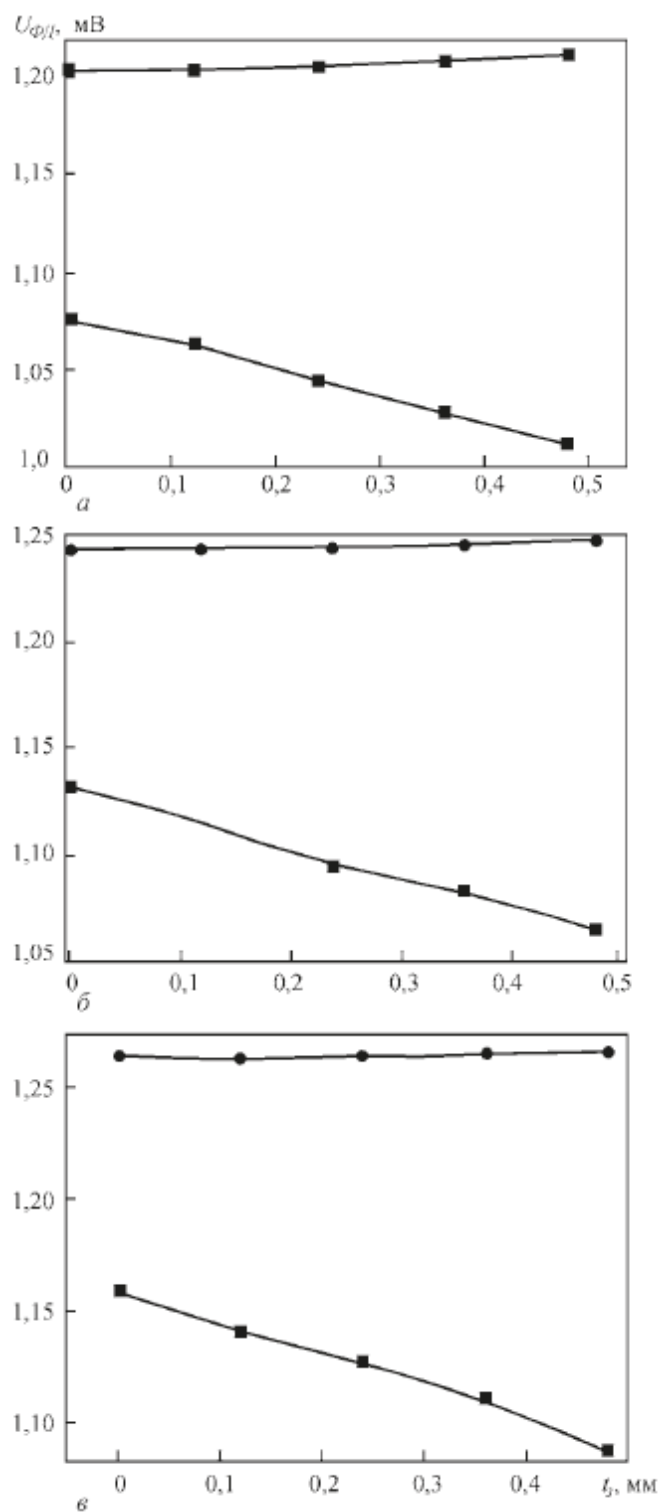


Рис. 1.3.2. Залежність напруги на виході фазового детектора  $U_{ФД}$  від зазору  $t_3$  без відстроювання (●) і з відстроюванням (■) для ВСП, розміщеного на зразках матеріалу з ПЕП 14,0 МСм/м (а), 24,7 (б) і 37,1 (в)

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

ПК71.13.0000.000 ПЗ

Арк.

26

На Рис. 1.3.2. наведено залежності сигналу на виході фазового детектора від зазору, які отримано без відстроювання від нього і з реалізацією способу вихрострумowego контролю з відстроюванням від впливу зазору [19]. Результати наведено для початку, середини і кінця діапазону вимірювань ПЕП (14,0; 24,7 і 37,1 МСм/м відповідно). Дані залежності показують, що сигнал на виході фазового детектора не залежить від величини зазору в діапазоні до 0,5 мм, що забезпечує можливість проведення контролю через шар ДП відповідної товщини. [4]

### **Висновки до першого розділу**

В першому розділі було розглянуто методи контролю авіаційних конструкцій, аргументовано використання неруйнівного методу як основного для літальних апаратів що перебувають в активній експлуатації, було проведено короткий огляд основних частин планеру. Крім цього було приведено залежність між зменшенням міцності алюмінієвих сплавів та ростом їх електропровідності. Розглянуті основні вимоги до структуроскопа та на їх основі обраний фазовий метод обробки сигналу. Наведені статистичні данні що

Виходячи з вище сказаного робимо висновок що використання ПЕП як структурно чутливого параметру є перспективним у вимірюванні деградації конструкцій планеру ЛА.

|      |      |          |        |      |                     |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------|------|
|      |      |          |        |      | ПК71.13.0000.000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                     | 27   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                     |      |

## 2. Розрахунок системи «ВСП-ОК»

### 2.1 Вибір перетворювача та методу вимірювання контрольованого параметра

#### 2.1.1 Вибір ВСП

Найефективнішим типом ВСП для контролю деградації конструкційних елементів ЛА є трансформаторний накладний ВСП. Накладний вихрострумовий перетворювач (НВСП) є достатньо універсальним, йому притаманні дві котушки, що дають трансформаторному ВСП високу стабільність вихідного сигналу, а головною його перевагою для використання в контролі авіаційної техніки є можливість контролю об'єктів різних форм (плоскої, циліндричної, складної) що дає змогу перевірити всю площину ОК, саме тому такі ВСП й достатньо широкий спектр застосування.

До багатьох переваг НВСП також можна додати високу чутливість до місцевих дефектів ( вона є більшою, ніж у прохідних ВСП), тому вони можуть використовуватися в ручних дефектоскопах, що і зумовлює їх широке використання в контролі ЛА адже їх контроль здебільшого здійснюється ручними приладами Нк.

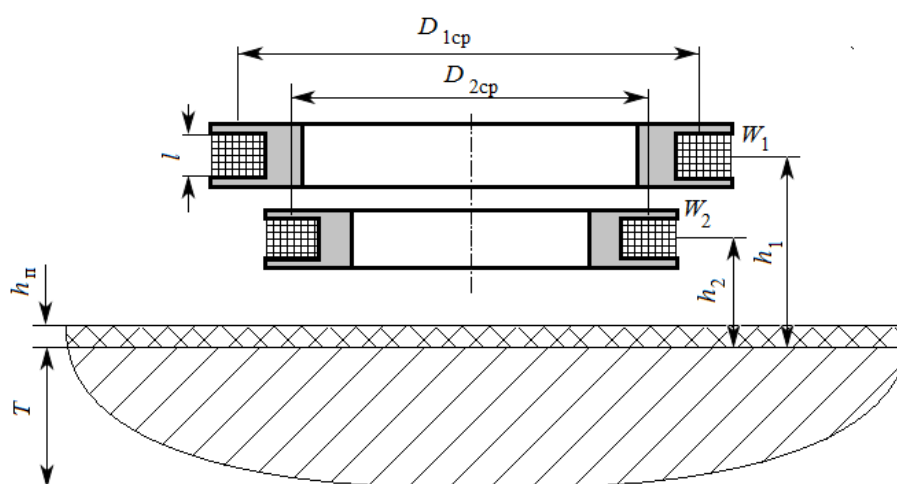


Рис. 2.1. Ескіз накладного ВСП

Перетворювачі для контролю обшивки, як правило, мають мініатюрні розміри, тому в даному випадку доцільним буде використання феритового

|      |      |          |        |      |                     |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------|------|
|      |      |          |        |      | ПК71.13.0000.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                     | 28   |

осердя діаметр якого буде 2 мм (з конструктивних міркувань) для підвищення чутливості.

### 2.1.2 Фазовий метод контролю

Фазовий метод селективного контролю представляє є найбільш ефективним метоом вимірювання питомої електропровідності (зокрема відхилення від номінального значення, а саме ним і визначається деградація АС). Він дозволяє заглушити один із неінформативних параметрів ОК у доволі вузькому діапазоні його зміни. Використовуючи цей метод можливо проводити досить ефективний контроль, так як вводяться певні перетворення, котрі зможуть значно збільшити зміну фазового кута кінцевого сигналу (десь в 5-10 разів) при зміні контрольованого параметра в порівнянні з сигналом, що є на виході датчика. Це можна зробити за рахунок векторного сумування вимірювального і компенсувального сигналів, які є сумірними. Сталим за фазою і модулем, зазвичай, задають компенсувальний сигнал [8,9,10].

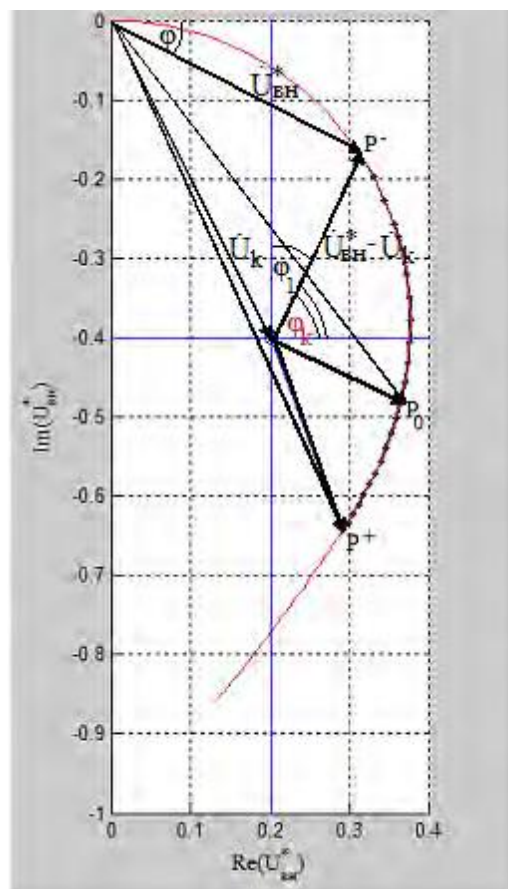


Рис. 2.2 Виділення інформації за допомогою фазового методу

|      |      |          |        |      |                     |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------|------|
|      |      |          |        |      | ПК71.13.0000.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                     | 29   |

Задаючи вектор компенсації  $\dot{U}_k^*$ , переносять початок координат у будь-яку точку комплексної площини. Як зазначено вище цей сигнал має сталі параметри. Зміна фази відносної внесеної напруги  $\dot{U}_{BH}^*$  (ВВН) відбувається в межах від 0 до  $\frac{\pi}{2}$  і дорівнює:

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

де  $\dot{U}_{BH}^*$  відносна внесена наруга,

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

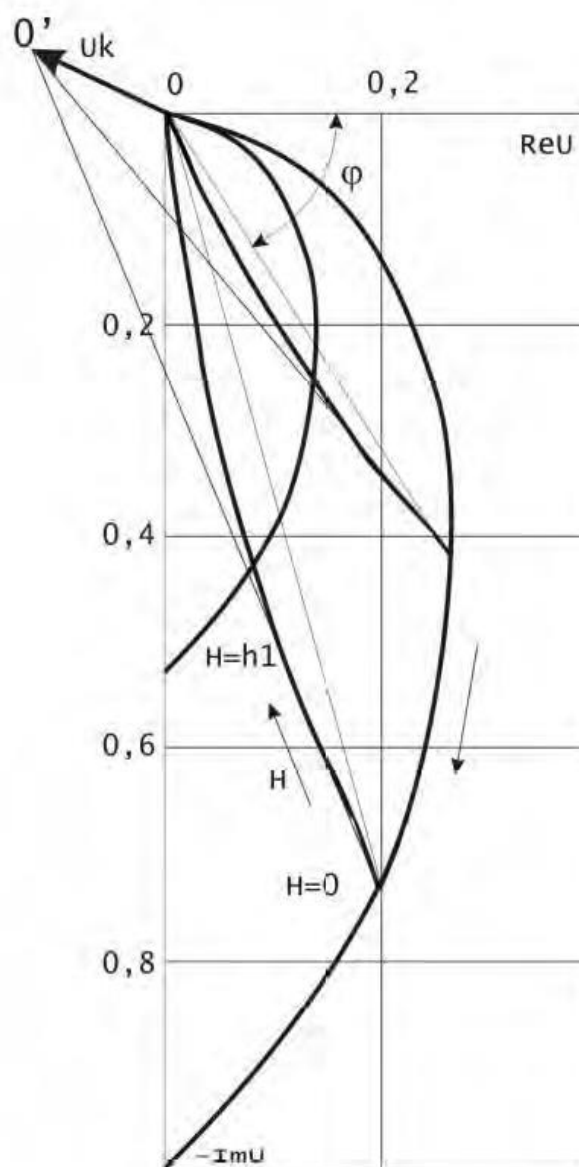


Рис. 2.3 Годографи ВВН накладного ВСП під час контролювання неферомагнітного листа

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

ПК71.13.0000.000 ПЗ

Арк.

30

Уважно проаналізувавши годографи, можна дізнатися, що збільшення фази ВВН при рості питомої електропровідності переважає збільшення фази при змінах зазору. Значення похибки буде значно меншим, якщо початок координат перенести в т.О'. Для цього будемо використовувати вже згаданий раніше вектор компенсації  $\dot{U}_k^*$ . Підбирається він таким чином, щоб початок координат знаходився в точці перетину дотичних до ліній голографів впливу зазору, в діапазоні змін  $H=0...h_1$ . Виходячи з цього, маємо те, що фаза внесеної напруги залежить лише від зміни електропровідності. Таким чином ми робимо висновок, що прилад не буде чутливим до зміни 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. Діапазон вимірювань ПЕП 14...37,1 МСм/м. 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:

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

$$\mu_1 = 1$$

Знаходимо питому електропровідність із електричного опору матеріалу ОК:

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

Електричний опір дюралюмінію за довідником:

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

тоді питома електропровідність дорівнює:

|      |      |          |        |      |                     |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------|------|
|      |      |          |        |      | ПК71.13.0000.000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                     | 31   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                     |      |

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

Приймаємо значення узагальненого параметра  $\beta$  з умов досягнення максимальної чутливості:

$$\beta = 7$$

Вибираємо діаметр обмотки збудження  $D_{\text{ср}}$ :

$$D_{\text{ср}} \leq 0,1 \cdot D_{\text{ок}}$$

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

Кількість витків котушок  $W_z$ ,  $W_v$ , діаметр осердя та кількість шарів обмотки вибираємо з конструктивних міркувань:

$W_z = 91$  – кількість витків збуджуючої котушки;

$W_z = W_v = 91$  – кількість витків вимірювальної котушки;

$n = 7$  – кількість шарів обмотки;

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

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

$$0,05 < d_{\text{бз}} < 0,8$$

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

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

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

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

Знаходимо внутрішній та зовнішній діаметри котушок:

Внутрішній діаметр збуджуючої котушки:

|      |      |          |        |      |                     |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------|------|
|      |      |          |        |      | ПК71.13.0000.000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                     | 32   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                     |      |

$$d_{B1} = D_{oc}$$

$$d_{B1} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Зовнішній діаметр котушки збудження:

$$d_{31} = d_{B1} + d_{iz} \cdot n \cdot 2 + 2 \cdot 0,1 \cdot 10^{-3} \cdot (n - 1)$$

$n$  – кількість шарів обмотки

$$d_{31} = 2 \cdot 10^{-3} + 0,065 \cdot 10^{-3} \cdot 7 \cdot 2 + 2 \cdot 0,1 \cdot 10^{-3} \cdot (7 - 1) = 4,11 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

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

Внутрішній діаметр вимірювальної котушки:

$$d_{B2} = d_{B1}$$

$$d_{B2} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Зовнішній діаметр вимірювальної котушки:

$$d_{32} = d_{31}$$

$$d_{32} = 4,11 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Знаходимо частоту гармонічного сигналу збудження:

$$f = \frac{1}{2\pi} \cdot 4 \frac{\beta^2}{D_{cp}^2 \cdot \gamma_{дюр.} \cdot \mu_0}$$

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

Перевіряємо глибину проникнення вихрових струмів в ОК:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{2\pi \cdot f \cdot \gamma_{дюр.} \cdot \mu_0 \cdot \mu_1}}$$

|      |      |          |        |      |                     |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------|------|
|      |      |          |        |      | ПК71.13.0000.000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                     | 33   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                     |      |

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

Знайдена глибина проникнення вихрових струмів в матеріал ОК є достатньою для контролю деградації його поверхневого шару

Визначаємо аксіальну довжину котушки з умови:

$$0,15 < \frac{L}{D_{\text{ср}}} < 0,3$$

$$L = \frac{W_3}{n} \cdot d_{\text{із}}$$

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

Перевіряємо виконання умови аксіальної довжини котушки:

$$\frac{0,845 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 10^{-3}} = 0,282$$

$0,15 < 0,282 < 0,3$  умова аксіальної довжини котушки виконана

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:

$$h_{\text{ср}} = h_0 + \frac{L}{2}$$

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

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

$$D_{\text{екв}} = D_{\text{ср}} + 1,5 \cdot h_{\text{ср}}$$

|      |      |          |        |      |                     |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------|------|
|      |      |          |        |      | ПК71.13.0000.000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                     | 34   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                     |      |

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

Розрахуємо силу струму збудження з умови відсутності перегріву котушки.

Приймаємо коефіцієнт теплопередачі з умови:

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

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

Приймаємо допустиму температуру перегріву котушки:

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

Знаходимо площу охолодження поверхні котушки:

$$S_{\text{ох}} = S_{\text{ох1}} + S_{\text{ох2}} + S_{\text{ох3}}$$

$$S_{\text{ох1}} = \pi \cdot d_{\text{в1}} \cdot L$$

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

$$S_{\text{ох2}} = \pi \cdot d_{\text{з1}} \cdot L$$

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

$$S_{\text{ох3}} = \pi \cdot \left( \left( \frac{d_{\text{з1}}}{2} \right)^2 - \left( \frac{d_{\text{в1}}}{2} \right)^2 \right)$$

$$S_{\text{ох3}} = \pi \cdot \left( \left( \frac{4,11 \cdot 10^{-3}}{2} \right)^2 - \left( \frac{2 \cdot 10^{-3}}{2} \right)^2 \right) = 1,013 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$$

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

Приймаємо електричний опір матеріалу дроту (мідь) за довідником:

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

|      |      |          |        |      |                     |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------|------|
|      |      |          |        |      | ПК71.13.0000.000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                     | 35   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                     |      |

Опір котушки:

$$R = \frac{4 * \rho_{\text{мід.}} * W_3 * D_{\text{ср}}}{d_{63}^2}$$

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

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

$$I = (0,85 \dots 0,9) * I_{\text{пр}}$$

$$I_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{\lambda * S_{\text{ох}} * \theta_{\text{д}}}{R}}$$

$$I_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{10 * 3,647 * 10^{-5} * 4}{7,644}} = 0,014 \text{ А}$$

$$I = (0,9) * 0,014 = 0,012 \text{ А}$$

**Розрахунок напруги холостого ходу:**

Виконуємо розрахунки потрібні нам для подальших дій:

$$m = \frac{d_{31}}{d_{32}}$$

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

|      |      |          |        |      |                     |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------|------|
|      |      |          |        |      | ПК71.13.0000.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                     | 36   |

Тепер знайдемо відносну відстань між ОК та котушками ВСП:

$$\xi = \frac{h_{cp} * 2}{D_{екв}}$$

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

Отже, напруга холостого ходу дорівнює:

$$U_{xx} = 1,35 * 2\pi * f * \mu_0 * W_3 * W_B * (m - 0,3) * I * \sqrt{d_{31} * d_{32}}$$

$$U_{xx} = 1,35 * 2\pi * 93,78 * 10^3 * 4 * \pi * 10^{-7} *$$

$$* 91 * 91 * (1 - 0,3) * I * \sqrt{4,11 * 10^{-3} * 4,11 * 10^{-3}} = 0,296 \text{ В}$$

Визначимо значення відносної внесеної напруги:

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

|      |      |          |        |      |                     |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------|------|
|      |      |          |        |      | ПК71.13.0000.000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                     | 37   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                     |      |



$$\beta_{23} = \frac{3 \cdot 10^{-3}}{2} \sqrt{2\pi \cdot 93,78 \cdot 10^3 \cdot 25,55 \cdot 10^6 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1} = 6,52434$$

$$\beta_{24} = \frac{3 \cdot 10^{-3}}{2} \sqrt{2\pi \cdot 93,78 \cdot 10^3 \cdot 31,325 \cdot 10^6 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1} = 7,224$$

$$\beta_{25} = \frac{3 \cdot 10^{-3}}{2} \sqrt{2\pi \cdot 93,78 \cdot 10^3 \cdot 37,1 \cdot 10^6 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1} = 7,86191$$

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

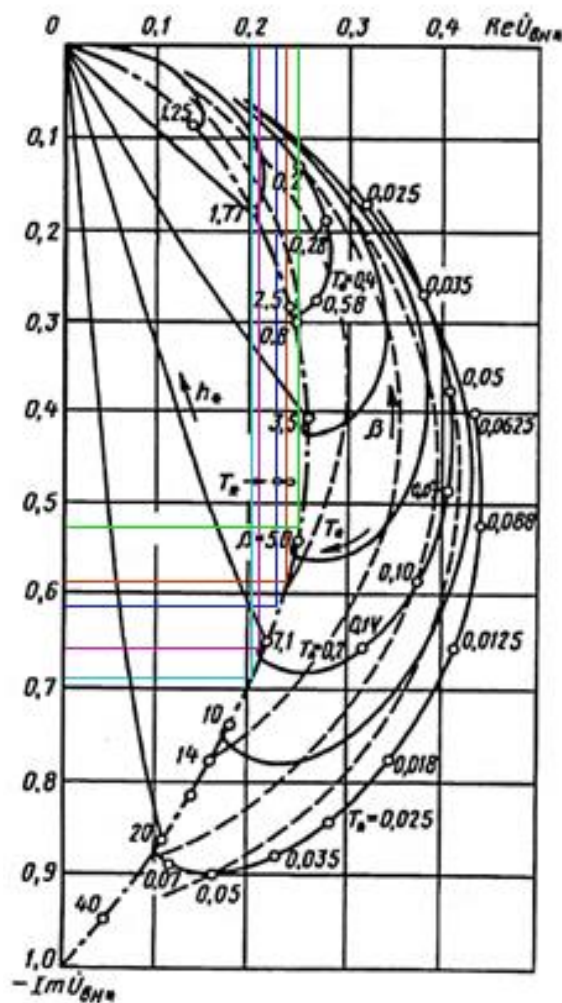


Рис. 2.5 Годограф відносної внесеної напруги накладного перетворювача, який розміщений над провідним неферомагнітним листом для п'яти розрахованих значень узагальненого параметра

$$U_{\text{ВВН}21} = 0,249 - 0,533i$$

$$U_{\text{ВВН}22} = 0,234 - 0,591i$$

$$U_{\text{ВВН}23} = 0,221 - 0,61i$$

$$U_{\text{ВВН}24} = 0,21 - 0,66i$$

$$U_{\text{ВВН}25} = 0,204 - 0,69i$$

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

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

$$\varphi_{21} = \arctg \left( \frac{-0,533}{0,249} \right) = -1,1337 \text{ (рад)}, \text{ в градусній мірі : } -64,96^\circ$$

$$\varphi_{22} = \arctg \left( \frac{-0,591}{0,234} \right) = -1,1938 \text{ (рад)}, \text{ в градусній мірі : } -68,40^\circ$$

$$\varphi_{23} = \arctg \left( \frac{-0,61}{0,221} \right) = -1,2232 \text{ (рад)}, \text{ в градусній мірі : } -70,08^\circ$$

$$\varphi_{24} = \arctg \left( \frac{-0,66}{0,21} \right) = -1,2627 \text{ (рад)}, \text{ в градусній мірі : } -72,35^\circ$$

$$\varphi_{25} = \arctg \left( \frac{-0,69}{0,204} \right) = -1,2833 \text{ (рад)}, \text{ в градусній мірі : } -73,53^\circ$$

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:

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

$$U_{\text{ВВН}} - \dot{U}_{\text{К}}^* = 0,22 - 0,64i - (0,1 - 0,5i) = 0,12 - 0,14i$$

$$U_{\text{ВВН}21} - \dot{U}_{\text{К}}^* = 0,249 - 0,533i - (0,1 - 0,5i) = 0,149 - 0,033i$$

$$U_{\text{ВВН}22} - \dot{U}_{\text{К}}^* = 0,234 - 0,591i - (0,1 - 0,5i) = 0,134 - 0,091i$$

|      |      |          |        |      |                     |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------|------|
|      |      |          |        |      | ПК71.13.0000.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                     | 40   |

$$U_{\text{ВВН23}} - \dot{U}_K^* = 0,221 - 0,61i - (0,1 - 0,5i) = 0,121 - 0,11i$$

$$U_{\text{ВВН24}} - \dot{U}_K^* = 0,21 - 0,66i - (0,1 - 0,5i) = 0,11 - 0,16i$$

$$U_{\text{ВВН25}} - \dot{U}_K^* = 0,204 - 0,69i - (0,1 - 0,5i) = 0,104 - 0,19i$$

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

$$\varphi = \arctg\left(\frac{-0,14}{0,12}\right) = -0,8621 \text{ (рад)}, \text{ в градусній мірі : } -49,40^\circ$$

$$\varphi_{21k} = \arctg\left(\frac{-0,033}{0,149}\right) = -0,2178 \text{ (рад)}, \text{ в градусній мірі : } -12,49^\circ$$

$$\varphi_{22k} = \arctg\left(\frac{-0,091}{0,134}\right) = -0,5965 \text{ (рад)}, \text{ в градусній мірі : } -34,18^\circ$$

$$\varphi_{23k} = \arctg\left(\frac{-0,11}{0,121}\right) = -0,7378 \text{ (рад)}, \text{ в градусній мірі : } -42,27^\circ$$

$$\varphi_{24k} = \arctg\left(\frac{-0,16}{0,11}\right) = -0,9685 \text{ (рад)}, \text{ в градусній мірі : } -55,49^\circ$$

$$\varphi_{25k} = \arctg\left(\frac{-0,19}{0,104}\right) = -1,0699 \text{ (рад)}, \text{ в градусній мірі : } -61,31^\circ$$

|      |      |          |        |      |                     |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------|------|
|      |      |          |        |      | ПК71.13.0000.000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                     | 41   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                     |      |

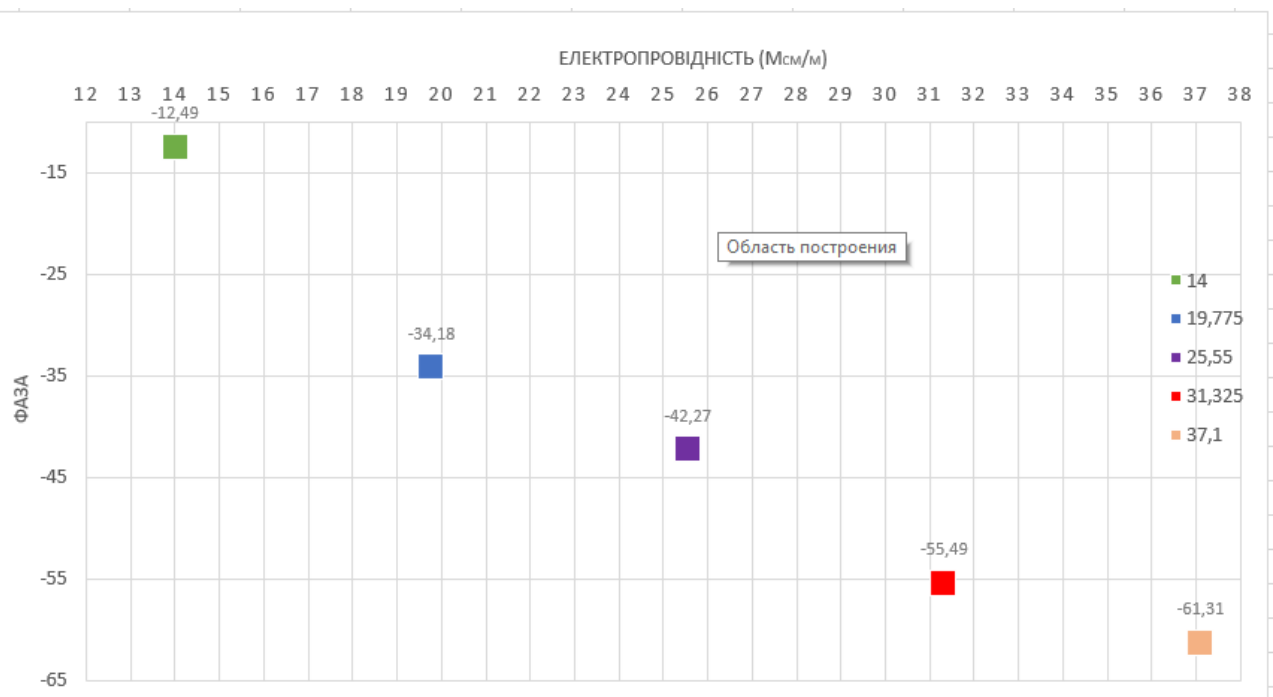


Рис. 2.6 Графік залежності фази результуючого сигналу від зміни електропровідності матеріалу

### Висновки до 2 розділу:

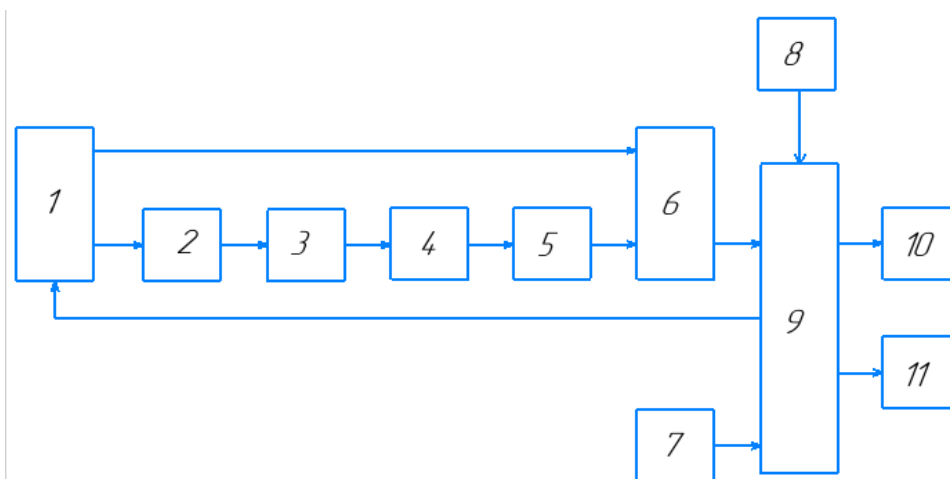
В даному розділі було розраховано трансформаторний НВСП. В якості інформаційного параметра була взята за основу фаза сигналу. Були визначені значення узагальненого параметра на межі електропровідності  $\beta_{25} = 7,86191$  та відносна внесена напруга різницевого сигналу за фазовим методом

$$U_{\text{ВВН25}} - \dot{U}_{\text{К}}^* = 0,104 - 0,19i$$

### 3. Вибір та розрахунок електронних схем дефектоскопу

#### 3.1 Розробка схеми електричної структурної та опис роботи приладу

Двухфазний генератор генерує опорну частоту для Накладного ВСП а також для Фазового Детектора. Ця частота змінюється залежно від ПЕП ОК. Отриманий з ВСП сигнал підсилюється вимірювальним та неінвертованим підсилювачами, проходить через Формувач прямокутних імпульсів та Фазовий детектор де відокремлюється фазова складова сигналу. Після цього вона подається на вмонтований в мікроконтролер АЦП а далі в мікроконтролері порівнюється з температурою ОК яка визначається за допомогою Пірометра. Прилад має Пристрій введення для керування, Дисплей для миттєвого відображення результату. Та USB для збереження результату на носії інформації для подальшого моніторингу.



|    |                                |
|----|--------------------------------|
| 1  | Двухфазний Генератор           |
| 2  | Накладний ВСП                  |
| 3  | Вимірювальний Підсилювач       |
| 4  | Підсилювач                     |
| 5  | Формувач Прямокутних Імпульсів |
| 6  | Фазовий Детектор               |
| 7  | Пірометр                       |
| 8  | Пристрій Введення              |
| 9  | Мікроконтролер                 |
| 10 | Дисплей                        |
| 11 | USB                            |

Рис. 3.1.1 Структурна схема вихрострумового приладу для виявлення експлуатаційної деградації алюмінієвих сплавів.

### 3.2 Підбір та розрахунок елементів принципової схеми

Мікросхеми, які було застосовано для розробки електричної принципової схеми приладу: MCP601, K561ТЛ1, К122УД1, АТхmega32D3

#### 3.2.1 MCP601

Сімейство Microchip Technology Inc. MCP601 / 2 / 3/4 це операційні підсилювачі доступні у, одинарний (MCP601), одинарний із Chip Select (CS) (MCP603), подвійний (MCP602) і четверний (MCP604) конфігурації. Ці операційні підсилювачі використовують вдосконалену технологію CMOS, яка забезпечує струм з низьким зміщенням, високу швидкість роботи та коефіцієнт підсилення з відкритим контуром. Ця лінія ОП працює від однієї напруги живлення, яка може бути до 2,7 В.

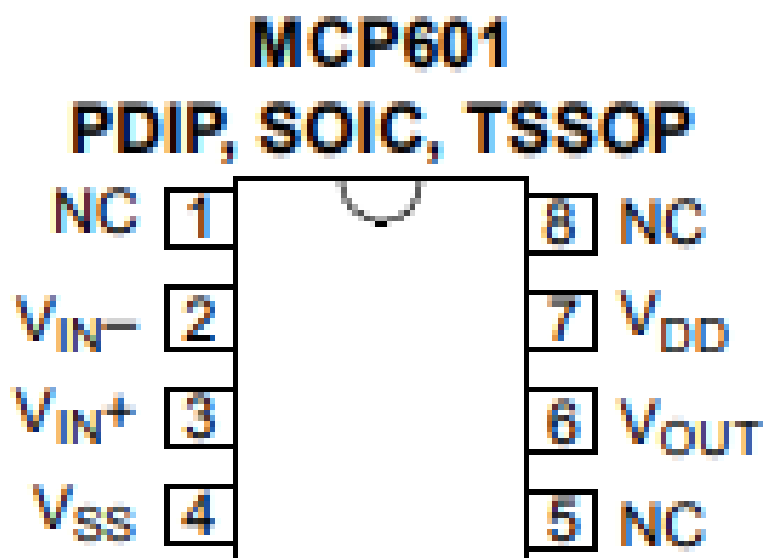


Рис. 3.2.1 Блок-схема підсилювача MCP601

#### 3.2.2 K561ТЛ1

Дані мікросхеми містять 4 елементи 2І-АБО з тригерами Шмітта на входах. Мікросхема є інвертуємим тригером Шмітта, на виході якого можна отримати прямокутні імпульси при вхідному сигналі довільної форми. Для даної

мікросхеми є поріг по напрузі (в імпульсну форму перетворюються лише ті сигнали, поточне значення яких перевищує деяку порогову величину)

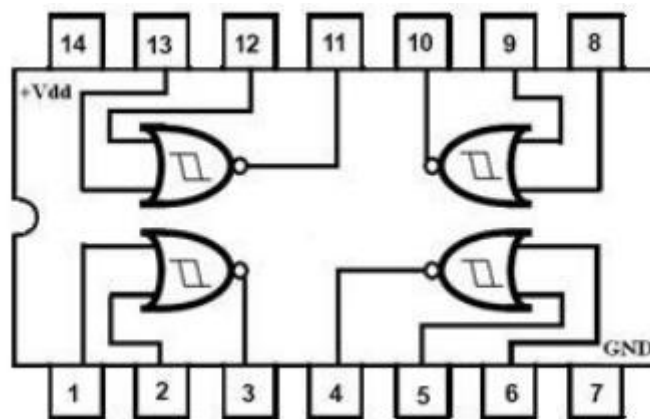


Рис. 3.2.2 Мікросхема K561ТЛ1

### 3.2.3 K122УД1

K122УД1 є однокаскадним диференціальним підсилювачем постійного струму. Основу підсилювача складають транзистори Т1 і Т2 з ідентичними параметрами. Спільно з рівними за опором резисторами  $R_i$  і  $R_i$  ці транзистори утворюють збалансовану мостову схему. В ідеальному випадку напруга на діагоналі моста між висновками 5 і 9 при відсутності вхідного сигналу має дорівнювати нулю.

Одним з найважливіших достатків диференціальних підсилювачів є те що балансування моста не порушується і в разі синфазного впливу на виходах 4 і 10. Зазвичай поява синфазного сигналу пояснюється наявністю наведень або інших перешкод. Вони викликають однакові по амплітуді і фазі зміни напружень на входах обох транзисторів, а отже, і ідентичні зміни струмів через них. В результаті напруга між виходах 5 і 9 не зазнає змін, що свідчить про придушення синфазної перешкоди.

Корисний сигнал зазвичай подається на диференціальний вхід між базовими виходах транзисторів Т1 і Т2. В цьому випадку вхідні сигнали обох транзисторів рівні по амплітуді і протилежні по фазі. Зміна струму колектора одного з транзисторів супроводжується протифазним зміною струму другого транзистора. Як наслідок, з'являється і змінюється відповідно до сигналом

різниця напруги між колекторами транзисторів диференціальної пари (виходи 5 і 9).

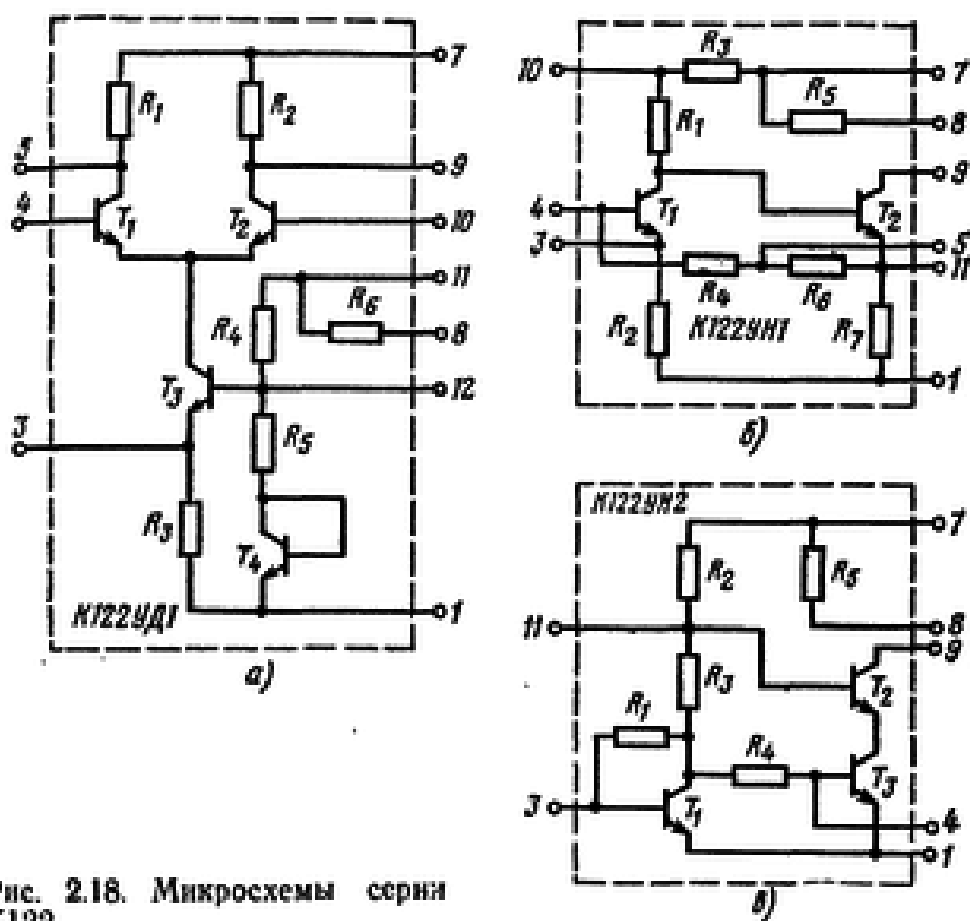


Рис. 2.18. Микросхеми серії К122

Рис. 3.2.3 Микросхема К122УД1

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

ПК71.13.0000.000 ПЗ

Арк.

46

### 3.2.4 ATxmega32D3

ATxmega32D3 – високопотужний та доступний 8/16 бітний мікроконтролер (МК) сімейства XMEGA™ з 64 контактами. Цей МК відноситься до серії мікроконтролерів компанії Microchip з низьким енергоспоживанням, він має 32 кб флеш-пам'ять з можливістю зчитування під час запису. В цьому мікроконтролері наявний вмонтований АЦП з розрядністю 12 біт похибка якого є  $\delta = \frac{1}{2^n} = \frac{1}{2^{12}} = 0,0002441$ . МК має наступні інтерфейси: 2xI2C, 3xUART та 5xSPI. Девайс досягає досить високої пропускної здатності в 1 MIPS на МГц та вдало забезпечує баланс між енергоефективністю та швидкості обробки даних.

#### 2. Pinout/block Diagram

Figure 2-1. Block Diagram and Pinout

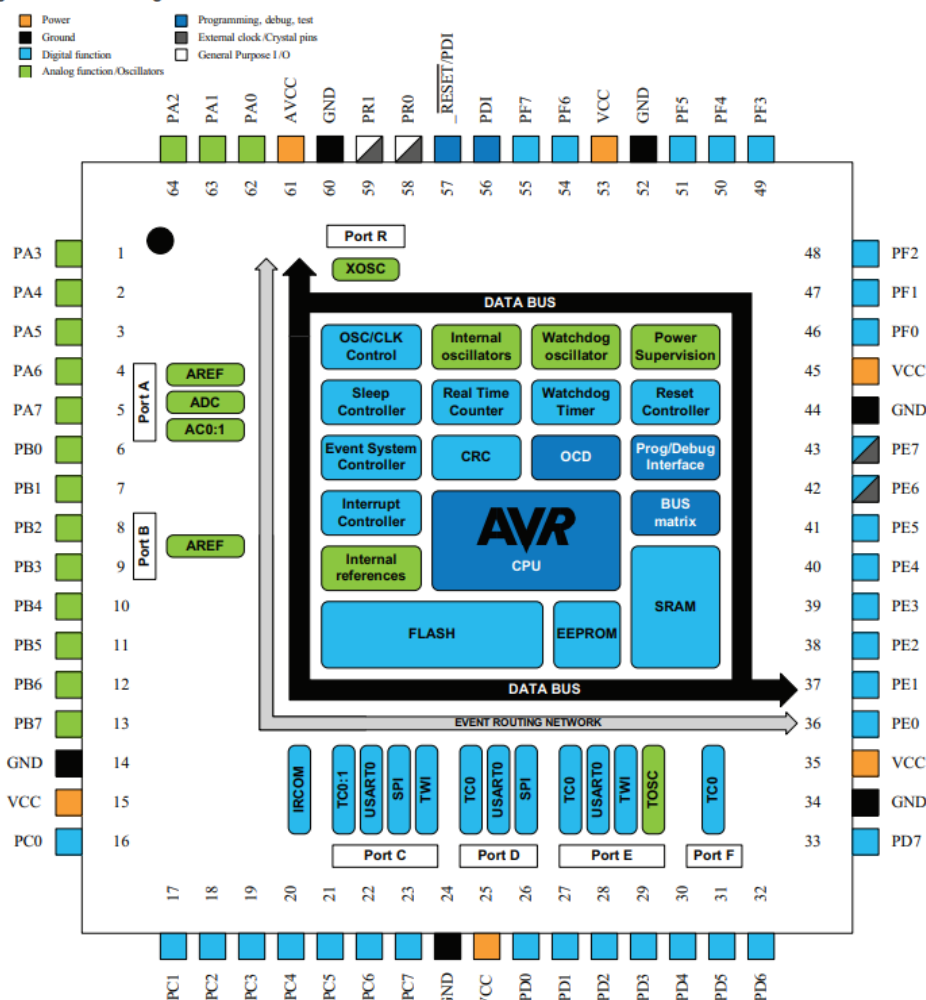


Рис. 3.2.4 Мікросхема ATxmega32D3

### Висновки до 3 розділу:

В третьому розділі було наведено та описано структурну схему вихрострумового приладу, були підібрані потрібні мікросхеми, зокрема, в якості мікроконтролера був обраний ATmega32D3 з вмонтованим АЦП від компанії Microchip. На базі операційного підсилювача МСР601 було складено вимірювальний та неінвертований підсилювачі. Мікросхема К122УД1 стала основою для Фазового детектора а Формувач Прямокутних Імпульсів створений на Мікросхемі К561ТЛ1.

## Висновки

Згідно з задачею дипломного проєкту було розроблено вихрострумовий прилад для виявлення експлуатаційної деградації алюмінієвих сплавів. Основним призначенням розробленого приладу є завчасне оцінювання ступеню деградації алюмінієвих сплавів в авіаційних конструкціях за рахунок вимірювання питомої електропровідності матеріалу .

У процесі виконання було розраховано накладний вихрострумовий перетворювач.

Було розглянуто фазовий метод виміру питомої електропровідності, бо саме цей метод найефективніший при контролю такого параметру як питома електропровідність, бо він не залежний від значення зазору, тобто отриманий результат буде стабільним й мати достатню для коректної роботи приладу ступінь точності.

Крім того, в ході виконання була розроблена структурна схема приладу та електрично-принципова схема каналу передачі інформації, виконане складальне креслення Накладного ВСП с плаваючою катушкою.

|      |      |          |        |      |                     |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------|------|
|      |      |          |        |      | ПК71.13.0000.000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                     | 48   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                     |      |

## Список використаних джерел

1. Остап О.П., Андрейко І.М., Головатюк Ю.В. Дegradaція матеріалів і втомна міцність тривало експлуатованих авіаконструкцій // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2006. – №4. – С. 5–16.
2. Остап О.П. Нові підходи в механіці втомного руйнування // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2006. – №1. – С. 13–25.
3. Вплив корозивного середовища на втомну довговічність деградованих алюмінієвих сплавів типу Д16 і В95 / О.П.Остап, І.М. Андрейко, Ю.В. Головатюк, О.І. Семенець // Там само. – 2008. – № 5. – С. 75–84.
4. Остап О. П. Діагностика технічного стану авіаконструкцій після довготривалої експлуатації / Остап О. П., Д. С. Ківа, В. М. Учанін, О. І. Семенець, І. М. Андрейко, Ю. В. Головатюк // Техническая диагностика и неразрушающий контроль, №2, 2013
5. Shi P. Corrosion fatigue and multiple site damage reliability analysis / P. Shi, s. Mahadevan. /Internation Jornal of Fatigue. 2003, p. 457-469.
6. Ефимова М.Г. Основы авиации. Часть 2. Конструкция и основные функциональные системы летательных аппаратов: Учебное пособие. – М.: МГТУГА, 2005. – 52 с.
7. Корнеев В.М. Конструкция и основы эксплуатации летательных аппаратов: конспект лекций / В.М. Корнеев. – Ульяновск : УВАУ ГА(и), 2009. – 130 с.
8. Неразрушающий контроль качества изделий электромагнитными методами / В.Г. Герасимов, Ю.А. Останин, А.Д. Покровский и др. – М.: Энергия, 1978. – 216 с.
9. Ключев 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:

|      |      |          |        |      |                     |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------|------|
|      |      |          |        |      | ПК71.13.0000.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                     | 49   |

- Ю.К. Федосенко, В.Г. Герасимов, А.Д. Покровский, Ю.Я. Останин. — М.: Машиностроение, 2003. — 688 с.
10. 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.
  - 11.. Смирнов А. А. Теория электросопротивления сплавов. – Киев: Изд-во АН УССР, 1960. –148 с.
  - 12.Дорофеев А. Л., Ершов Р. Е. Физические основы электромагнитной структуроскопии. – Новосибирск: Наука, 1985. –183 с.
  - 13.Берестецкий В. Б., Лившиц Е. М., Питаевский Л. П. Квантовая электродинамика. – Теоретическая физика в 10 т. – Т.4. – М.: Наука, 1989. – С. 421–422.
  - 14.Morozov M., Tian G. Y., Withers Ph. J. Noncontact evaluation of th dependency of electrical conductivity on stress for various Al alloys as a function of plastic deformation andannealing // J. Appl. Physics. – 2010. –108, Paper 024909.– P. 1–9.
  - 15.Пат. № 0083032 A1США. Self-monitoring metals, alloys and materials / Neil J. Goldfine. – Опубл. 21.04.2005.
  - 16.Rajic N., Burke S. K. and Galea S. C. An experimental study of the relationship between electrical conductivity and early fatigue damage in Al 2024 // Technical Note (DSTO- TN-0387) of Aeronautical and Maritime Research Laboratory. – 2001. – P. 1–11
  - 17.Наумов Н. М., Микляев П. Г. Резистомерический неразрушающий контроль алюминиевых деформируемых сплавов – М.: Металлургия, 1974. – 200 с.
  18. Hagemaiier D. J. Applications of eddy current testing to airframes // Nondestructive Testing Handbook (Second Edition), Vol.4, Section 14. – American Society for Nondestructive Testing, 1986. – P. 369–421.

|      |      |          |        |      |                     |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------|------|
|      |      |          |        |      | ПК71.13.0000.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                     | 50   |

19. Неразрушающий контроль. Справ. в 7 т. / Под. общ. ред. В.В. Клюева. Т.2, кн. 2: Вихретоковый контроль / Ю.К. Федосенко, В.Г. Герасимов, А.Д. Покровский, Ю.Я. Останин. – М.: Машиностроение, 2003. – С. 340–687.
20. Фриндландер И. Н. Алюминиевые деформируемые конструкционные сплавы. – М.: Металлургия, 1979. – 208 с.
21. Correlation of strength with hardness and electrical conductivity for aluminum alloy 7010 / M.A. Salazar, Y.Y. Zhao, A. Pitman, A. Greene // Materials Science Forum. – 2006. – 519–521. – P. 853–858.
22. Rummel W. D. Characterization and evaluation of 2014 aluminum alloy by eddy current conductivity techniques // Materials Evaluation. – 1966. – XIV, № 6. – P. 322–326.
23. Gür C. H., Yildiz I. Utilization of nondestructive methods for determining of effect of age-hardening on impact toughness of 2024 Al-Cu-Mg alloy // J. Nondestruct. Evaluation. – 2008. – 27. – P. 99–104.
24. Microstructural evolution of aluminum alloy 7B04 thick plate by various thermal treatments / Zh. Li, B. Xiong, Y. Zhang et al. // Trans. Nonferrous Met. Soc. China. – 2008. – 18. – P. 40–45.
25. Tsai T. C., Chuang T. H. Relationship between electrical conductivity and stress corrosion cracking susceptibility of Al 7075 and Al7475 alloys // Corrosion. – 1996. – 52, №6. – P. 414–416.
26. Starink M. J., Li X. M. A model for the electrical conductivity of peak-aged and overaged Al-Zn-Mg-Cu alloys // Metallurgical and Materials Transactions, Ser. A. – 2003. – 34A, April. – P. 899–907.
27. Zaid H. R., Hatab A. M., Ibrahim A. M. A. Properties enhancement of Al-Zn-Mg-Cu alloy by retrogression and re-aging heat treatment // J. Mining and Metallurgy, Sect. B-Metall. – 2011. – 47, № 1, – P. 31–35.
28. Hagemaiер D. J. Evaluation of heat damage to aluminum aircraft structures // Materials Evaluation. – 1982. – 40, №9. – P. 962–969.

|      |      |          |        |      |                     |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------|------|
|      |      |          |        |      | ПК71.13.0000.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                     | 51   |

29. Вплив тривалої експлуатації на структуру і фізико-механічні властивості алюмінієвих сплавів типу Д16 і В95 / О.П. Осташ, І.М. Андрейко, Л.І. Маркашова та ін. // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2013. – № 1. – С. 18–27
30. Вихрострумовий моніторинг деградації алюмінієвих сплавів під час тривалої експлуатації авіаційної техніки // В.М. Учанін, О.П. Осташ, С.А. Бичков, О.І. Семенець, В.Я. Дереча // Техн. діагностика та неруйнівний контроль, 2021, №1 С. 4–5, ISSN 0235-3474
31. Петрик, В. Ф. Метрологія, стандартизація та сертифікація в неруйнівному контролі [Електронний ресурс] : навчальний посібник з дисциплін «Метрологія» та «Сертифікація і стандартизація» / В. Ф. Петрик, А. Г. Протасов ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 3,04 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2015. – 266 с.
32. Фазовимірювальні системи неруйнівного контролю [Електронний ресурс] / С. М. Маєвський; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 288 с.
33. Grigoriy S. Tymchik, Oleksandr O. Podolian, Andriy V. Pavlovych, Iuliia Iu. Lysenko, Paweł Komada, and Ainur Kozbakova "Quality control system of well-bonded coupling fitting onto high pressure gas-main pipelines", Proc. SPIE 10808, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018, 108085A
34. S. Maievskyi, I. Lysenko, Y. Kuts, A. Protasov, and O. Dugin, “Study of Parametric Transducer Operation in Pulsed Eddy Current Non-Destructive Testing”, in Proc. 2018 IEEE Int. Conf. on Electronics and Nanotechnology, Kyiv, 2018, pp.594 – 597.
35. I. Lysenko, V. Eremenko, Y. Kuts, A. Protasov, V. Uchanin, “Advanced Signal Processing Methods for Inspection of Aircraft Structural Materials”, Transactions on Aerospace Research, vol. 2 (259), pp. 27-35, 2020.

*Додатки надаються за запитом до авторів...*