

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу  
Міністерство освіти і науки України  
Інститут інформаційних технологій  
Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій та енергетичного  
менеджменту

Малоглова Андрій Віталійович

---

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 620.179.143

(індекс)

## БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Розроблення приладу для вимірювання товщини фарбових покриттів

(назва роботи)

---

Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка

(назва освітньої програми)

---

152 "Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка"

(шифр і назва спеціальності)

**Робота містить результати власних досліджень, використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне  
джерело:**

Здобувач освітнього ступеня Малоглова А. В.

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник Біліщук В. Б., к.т.н., доцент

(підпис, прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання керівника)

**Допущено до захисту**

**Завідувач кафедри**

---

В. С. Цих

(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

**Івано-Франківськ – 2026**

**Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу**

(повне найменування закладу вищої освіти)

Інститут інформаційних технологій

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій та енергетичного менеджменту

Освітній рівень бакалавр

Спеціальність 152 "Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка"

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІВТЕМ

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ року

**З А В Д А Н Н Я**

**НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ**

Малоглові Андрію Віталійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення приладу для вимірювання товщини фарбових покриттів

керівник роботи, Біліщук В. Б., к.т.н., доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від 13 травня 2026 року № 215/7

2. Строк подання студентом роботи 30 червня 2026 р.

3. Вихідні дані до роботи: товщина лакофарбового покриття 50-2500 мкм, матеріал основи – алюміній.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Аналіз методів та об'єкту контролю. 2. Розроблення приладу. 3. Метрологічний аналіз розробленого приладу. 4. Охорона праці

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) 1. Теоретичний плакат. 2. Структурна схема. 3. Електрична схема. 4. Конструкція давача. 5. Метрологічний аналіз.

## 6. Консультанти розділів роботи

| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата   |                  |
|--------|-------------------------------------------|----------------|------------------|
|        |                                           | завдання видав | Завдання прийняв |
| 4      | Кривенко Г. М., доцент                    |                |                  |
|        |                                           |                |                  |
|        |                                           |                |                  |

7. Дата видачі завдання 29 травня 2026 р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів бакалаврської роботи         | Термін виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|-------------------------------------------|--------------------------------|----------|
| 1     | Аналіз методів та об'єкту контролю        | 04.06.2026 р.                  |          |
| 2     | Розроблення приладу                       | 09.06.2026 р.                  |          |
| 3     | Метрологічний аналіз розробленого приладу | 12.06.2026 р.                  |          |
| 4     | Охорона праці                             | 18.06.2026 р.                  |          |

Студент \_\_\_\_\_ Малоглова А. В.  
( підпис ) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи \_\_\_\_\_ Біліщук В. Б.  
( підпис ) (прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

Бакалаврська робота: 56 с., 14 рис., 3 табл., 31 джерел, 5 аркушів креслень.

Об'єкт дослідження – лакофарбове покриття на алюмінієвому листі.

Мета роботи – розробка конструкції вихрострумowego перетворювача та підвищення точності вихрострумowego товщиноміра для контролю товщини лакофарбового покриття автомобіля з алюмінієвим кузовом

Метод дослідження – математичне моделювання фізичних процесів які мають місце при контролі товщини лакофарбового покриття автомобіля з алюмінієвим кузовом.

Проведено аналіз методів контролю товщини, обґрунтовано метод вихрострумової товщинометрії, як найбільш відповідного для контролю товщини неруйнівним методом з зовні автомобіля. Розроблено конструкцію вихрострумowego перетворювача, та електричну принципову схему блоку вимірювання. Проведений метрологічний аналіз вихрострумowego перетворювача, який підтвердив більш високу точність вимірювання. Розроблено заходи з забезпечення нормальних умов розробки приладу приладу які стосуються вентиляції приміщення.

ВИХРОСТРУМОВИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ, ЛАКОФАРБОВЕ ПОКРИТТЯ, НАПРУГА, КАТУШКА, ТОВЩИНА.

## ABSTRACT

Thesis: 56 c., 14 figs, 3 tables, 31 sources, 5 sheets of drawings.

The object of research is a paint coating on an aluminum sheet.

The purpose of the work is to develop a design for an eddy current transducer and increase the accuracy of an eddy current thickness gauge for controlling the thickness of a paint coating on a car with an aluminum body

The research method is mathematical modeling of the physical processes that occur when controlling the thickness of a paint coating on a car with an aluminum body.

The analysis of thickness control methods was carried out, the method of eddy current thickness measurement was substantiated as the most suitable for controlling the thickness by a non-destructive method from the outside of the car. The design of the eddy current transducer and the electrical schematic diagram of the measurement unit were developed. A metrological analysis of the eddy current transducer was carried out, which confirmed higher measurement accuracy. Measures were developed to ensure normal conditions for the development of the device of the device related to room ventilation.

EDDY CURRENT CONVERTER, PAINT COATING, VOLTAGE, COIL, THICKNESS

## ЗМІСТ

|                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Вступ.....                                                                                           | 7  |
| 1 Аналіз методів та об'єкту контролю .....                                                           | 8  |
| 1.1 Аналіз об'єкту контролю.....                                                                     | 8  |
| 1.2 Аналіз методів і приладів для контролю товщини .....                                             | 9  |
| 1.3 Класифікація і види вихрострумових перетворювачів (ВСП) .....                                    | 12 |
| 2 Розроблення приладу .....                                                                          | 16 |
| 2.1 Теоретичні основи методу контролю .....                                                          | 16 |
| 2.2 Розробка структурної схеми та електричної принципової схеми<br>вихрострумового товщиноміра ..... | 21 |
| 2.3 Розроблення вихрострумового перетворювача .....                                                  | 23 |
| 2.4 Побудова годографа.....                                                                          | 28 |
| 2.5 Вимірювання товщини .....                                                                        | 31 |
| 3 Метрологічний аналіз розробленого приладу.....                                                     | 33 |
| 3.1 Загальні основи використання концепцій невизначеності при<br>метрологічному аналізі .....        | 33 |
| 3.2 Аналіз складових сумарної невизначеності .....                                                   | 36 |
| 3.3 Розрахунок сумарної невизначеності.....                                                          | 37 |
| 4 Охорона праці.....                                                                                 | 39 |
| 4.1 Значення охорони праці в забезпеченні безпечних та здорових умов<br>праці .....                  | 39 |
| 4.2 Забезпечення нормальних умов праці .....                                                         | 40 |
| 4.3 Вентиляція робочого місця .....                                                                  | 42 |
| 4.4 Вплив електромагнітних полів на організм людини.....                                             | 47 |
| Висновки .....                                                                                       | 51 |
| Перелік літературних джерел.....                                                                     | 52 |

## ВСТУП

Вимірювання товщини захисних покриттів відіграє провідну роль у забезпеченні якості продукції автомобільної та суднобудівної галузей. Цей процес є необхідним як для контролю технологічних параметрів при виготовленні транспорту, так і для діагностики зносу металоконструкцій у процесі їхнього обслуговування та ремонту.

При роботах зв'язаних з нанесенням захисного шару лакофарбового покриття (ЛФП) на металеві поверхні, часто виникає необхідність виміру товщини шару. Для цієї процедури використовується спеціальний прилад вимірювання товщини – товщиномір.

Товщиномір дозволяє за лічені хвилини провести комплексну оцінку стану кузова автомобіля. Завдяки вимірюванню шару лакофарбового покриття можна ідентифікувати сліди ДТП, які часто маскуються під шаром шпаклівки. Головна перевага методу полягає у визначенні ступеня тяжкості минулих аварій: прилад допомагає розрізнити дрібне пошкодження від критичного удару на великій швидкості, що несе ризик деформації силових елементів конструкції та передчасного розвитку корозії. По сьогоднішній день існує ряд суттєвих невирішених проблем, вирішення яких дало б можливість підвищити точність та надійність вимірювання товщини, що в свою чергу, зробило б їх застосування більш ефективним.

Проаналізувавши всі методи вимірювання товщини, визначено, що найбільшій уваги слід надати проблемі точності вимірювання вихрового товщиноміра Метою роботи є вирішення науково-прикладного завдання вимірювання товщини шляхом підвищення точності із застосуванням вихрострумового товщиноміра.

## 1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ОБ'ЄКТУ КОНТРОЛЮ

### 1.1 Аналіз об'єкту контролю

Використання алюмінію у виробництві кузова здається настільки новою технологією, що забувається, що вона походить з першої половини двадцятого століття. Як конструктивний матеріал для авто, його спробували відразу, як тільки почали відмовлятися від дерева і шкіри, причому саме з деревом він виявився так добре сумісним.

Алюміній у металевій формі відомий не так давно - його вивели лише наприкінці XIX століття, і він зразу став цінуватися дуже високо. І не із-за своєї дефіцитності, просто до відкриття електролітичного методу відновлення виробництво обходилося дуже дорого, алюміній був дорожче золота і платини. Питомий опір алюмінію високої чистоти (99,99%) при температурі 20°C становить  $2,6548 \cdot 10^{-8}$ . Електропровідність алюмінію перебуває у прямій залежності від рівня його чистоти. Характер впливу різних домішок визначається як їхньою масовою часткою, так і структурним станом речовини, зокрема рівнем розчинності елементів у кристалічній ґратці (перебуванням у твердому розчині або виділенням у формі гетерогенних включень). Найбільш сильно підвищують опір алюмінію домішки хрому, літію, мангану, магнію, титану і ванадію. У цілому конструкції з алюмінію мають всі шанси бути помітно легше, мінімум на третину, але в окремих випадках перевага в масі деталей може бути більше, адже алюмінієві деталі мають більш високу жорсткість і помітно більш технологічні у виробництві. Для авіації це суттєвий подарунок, адже більш міцні титанові сплави більш дорожче, і масове виробництво недоступне, а магнієві сплави відрізняються високою корисною активністю та підвищеною пожежостійкістю. Масово алюмінієві кузови використовують в автомобілях марки Audi. Це була одна з перших крупносерійних цільноалюмінієвих машин, хоча рядова доля крилатого металу була фірмовою

особливістю таких марок, як LandRover і AstonMartin протягом десяти років.

Стальні конструкції залишаються справою дешевих виробників, але з мірою дешевого використання алюмінієвих технологій вони, безсумнівно, теж не утримують перед схильністю, тим більше що теоретичну перевагу алюмінію можна і навіть потрібно реалізувати.

## 1.2 Аналіз методів і приладів для контролю товщини

Сучасні товщиноміри забезпечують прецизійне вимірювання товщини матеріалів та захисних шарів (лакофарбових покриттів, ґрунтів, шпаклівок, антикорозійних та вогнетривких складів) без порушення їхньої структурної цілісності. У будівельній галузі такі прилади є незамінними для верифікації параметрів захисних покриттів металоконструкцій. За принципом функціонування та фізичною природою взаємодії з об'єктом контролю прилади поділяють на механічні, ультразвукові, електромагнітні (індукційні) та вихрострумові. [1]

В основу роботи електромагнітних товщиномірів покладено принципи магнітної індукції та ефекту Холла для детектування щільності магнітного поля. Конструкція зазвичай містить феромагнітне осердя з котушками: перша генерує магнітний потік, а друга реєструє його зміни при взаємодії з основою. Товщина покриття визначається як функція щільності магнітного потоку, при цьому допустима похибка для приладів такого типу становить  $\pm 4\%$ . [2]

Для неруйнівного контролю діелектричних покриттів на струмопровідних основах (переважно з кольорових металів, зокрема алюмінію) застосовують вихрострумовий метод. Високочастотний струм (від десятків кГц до одиниць МГц), проходячи крізь котушку зонда, створює змінне магнітне поле. Це поле індукує в основі об'єкта вихрові струми (струми Фуко), які генерують вторинне електромагнітне поле протилежного напрямку. Товщина непровідного шару обчислюється на основі амплітуди напруги на вимірювальній обмотці, яка корелює

з відстанню між зондом та провідною поверхнею. [2]

Товщиноміри ультразвукового типу використовують ефект відбиття акустичних хвиль. Датчик генерує ультразвуковий імпульс, який проходить крізь шар покриття, відбивається від межі розділу середовищ і повертається назад, перетворюючись на електричний сигнал. Після оцифрування та аналізу часу проходження імпульсу прилад визначає товщину шару. Середня похибка ультразвукових товщиномірів становить близько  $\pm 3\%$ . [3]

Магнітні товщиноміри призначені для контролю товщини захисного покриття на виробах з феромагнітних матеріалів або для вимірювання товщини феромагнітних листів. Велику групу таких приладів складають товщиноміри пондеромоторної дії, принцип дії яких базується на вимірюванні сили відриву чи притягування постійних магнітів і електромагнітів до контрольованого об'єкту. [3]

В індукційних товщиномірах, використовують однострижневий магнітопровід і змінене електромагнітне поле, завдяки чому крайовий ефект не проявляється на відстані в декілька міліметрів. Із зменшенням товщини покриття асиметрія магнітного поля зростає і відповідно зростає вихідна напруга перетворювача, яка несе інформацію про товщину покриття. [4]

Товщиномір - прилад, за допомогою якого можна заміряти товщину шару фарби на кузові автомобіля. Напевно, багато хто з них знайомі або ж просто бачили, як чоловік, проходячи навколо автомобіля, прикладає невеликий прилад до різних місцях кузова і перевіряє отримані дані. Робиться це з однією метою - перевірити, чи відповідає товщина фарби заводським даними, такі дані нескладно отримати на будь-яку модель. Слід зазначити, що далеко не всі, навіть професійні фарбувальні майстерні здатні пофарбувати автомобіль за заводським стандартам. Візуально автомобіль буде пофарбований ідеально, але прилад вловить будь-які щонайменші відхилення, особливо це стосується тих місць, де автомобіль був битий, шпаклювати і пофарбований. Прилад товщиномір здатний відрізнити соті частки відхилень від заводських значень. [4]

Товщиноміри, виходячи з заводів, повинні бути відкалібровані, однак перед першим користуванням їх перевіряють. Роблять це на спеціальних калібрувальних

пластинках, які є еталоном виміру. Пластини в наборі є для всіх типів товщиномірів, з різною товщиною фарби і з різних матеріалів (пластик, чорний метал, кольоровий метал). На кожній пластині написані дані про товщину і матеріалів. Якщо після перевірки спостерігається розходження в даних, то проводять корекцію приладу під еталон. Щоб добитися ідеальних показників, потрібно зробити кілька вимірів однієї і тієї ж пластини, таким чином, отримавши кілька даних, виводиться середній результат. При вимірюванні самої товщини є декілька нюансів, наприклад, для самого точного виміру варто виставляти товщиномір з запасом. Якщо потрібно заміряти товщину фарби на поверхні в 300 мкм, товщиномір для покращення результатів виставляється на 400 мкм в результаті чого отримуються найточніші дані, оскільки запас дозволить дізнатися надлишок. [5]

У більшості сучасних вітчизняних та імпорتنих виробників товщина ЛФП деталей кузова нової машини однаково і складає 90 ... 165 мкм, а на кутах і округленнях може досягати до 180 мкм. Якщо автомобіль перемальовували, товщина ЛФП вже складатиме не менше 200 ... 250 мкм. Зашпакльовані місця можуть сягати в декілька міліметрів: в більшості 0,5 ... 2,5 мм (або 500 ... 2500 мкм). В таблиці 1.1 приведені товщини та їх відповідність. Якщо пошкоджений елемент кузова замінив нову оригінальну деталь, а потім її помалювали, то товщина ЛФП буде відрізнятися від заводської на більшій або меншій стороні і буде неоднорідною, так як маляр не може витримувати однакові розпилення по всій поверхні. Крім того, науково доказано, що товщина ЛФП в 90 мкм для ряду покриттів є критичною відміткою, нижче якої істотно знижуються експлуатаційні та фізико-механічні властивості покриття і, як слід, можливе виявлення різних видів корозійних руйнувань. [6, 7].

Таблиця 1.1 – Товщина лакофарбового покриття

| Товщина лакофарбового покриття, мкм | Коментарі                      |
|-------------------------------------|--------------------------------|
| 90...165                            | Товщина лакофарбового покриття |

|                               |                                                                              |
|-------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
|                               | нового автомобіля                                                            |
| до 180                        | Товщина на кутах і заокругленнях деталей нового автомобіля                   |
| не менше 200...250            | Товщина покриття перемальованих деталей кузова автомобіля                    |
| 500...2500                    | Зашпакльовані місця деталей кузова автомобіля                                |
| менше 90                      | Можлива поява різних видів корозії                                           |
| нерівномірна товщина покриття | Елемент кузова автомобіля замінили новою деталлю, після чого її перемалювали |

### 1.3 Класифікація і види вихрострумових перетворювачів (ВСП)

Залежно від положення відносно об'єкта контролю (ОК), вихрострумові перетворювачі поділяють на три основні групи: накладні, прохідні та комбіновані.

Накладні перетворювачі конструктивно реалізовано у вигляді однієї або системи котушок, які під час вимірювання прикладаються торцевою частиною до поверхні об'єкта. Геометрія котушок варіюється залежно від завдань контролю і може бути:

- круглою коаксіальною (рис.1.2 ,а);
- прямокутною (рис. 1.1, б);
- прямокутною хрестоподібною (рис. 1.1, в);
- із взаємно перпендикулярним розташуванням осей (рис. 1.1 г). [8, 9]

Накладні ВСП можуть комплектуватися феромагнітними осердями. Використання осердя дозволяє підвищити чутливість приладу завдяки локалізації магнітного потоку, проте це одночасно призводить до звуження зони миттєвого контролю. [10]

Характерною ознакою прохідних перетворювачів є те, що об'єкт контролю під час дефектоскопії проходить крізь них або вони переміщуються вздовж нього. За способом взаємодії їх класифікують на: [10]

- зовнішні: охоплюють об'єкт ззовні (наприклад, при контролі дротів чи труб);
- внутрішні: розміщуються всередині порожнин об'єкта;
- занурювальні: призначені для роботи безпосередньо у рідкому середовищі.

Комбіновані ВСП поєднують в собі конструктивні особливості та функціональні можливості накладних і прохідних перетворювачів, що дозволяє вирішувати специфічні завдання дефектоскопії. [11]

По виду перетворення параметрів об'єкта у вихідний сигнал перетворювача ВСП поділяються на трансформаторні (містять не менше двох обмоток) і параметричні (однообмоткові). Параметричні ВСП хоча і простіші, однак в них більш суттєва залежність вихідного сигналу від температури у порівнянні з трансформаторними. [11]

Класифікація вихрострумових перетворювачів (ВСП) за принципом формування вихідного сигналу передбачає їх поділ на параметричні (з однією обмоткою) та трансформаторні (мають дві та більше обмоток). Попри конструктивну простоту, параметричні пристрої демонструють значну термозалежність, тоді як трансформаторні аналоги є більш стабільними. [11]

За схемою комутації обмоток ВСП бувають: [12]

- абсолютними, де результат вимірювання залежить від сукупного значення характеристик об'єкта;
- диференціальними, які фіксують лише зміну (приріст) контрольованої величини. Це дозволяє ефективно відсіювати перешкоди та суттєво покращувати якість сигналу.

Конструктивні особливості визначають сферу застосування. Накладні моделі є оптимальними для діагностики площин, виробів складної конфігурації, а також у випадках, що потребують високої локальної роздільної здатності. Прохідні та накладні типи застосовують для перевірки протяжних об'єктів або серійного виробництва дрібних деталей. [12]

Внутрішні прохідні датчики незамінні при обстеженні порожнин труб та отворів. Варто враховувати, що прохідні системи здійснюють усереднену (інтегральну) оцінку стану вздовж периметра, тому вони можуть бути менш чутливими до точкових дефектів. [12]

Накладні ВСП найчастіше від інших використовуються в приладах електромагнітного контролю внаслідок їх універсальності. [13]

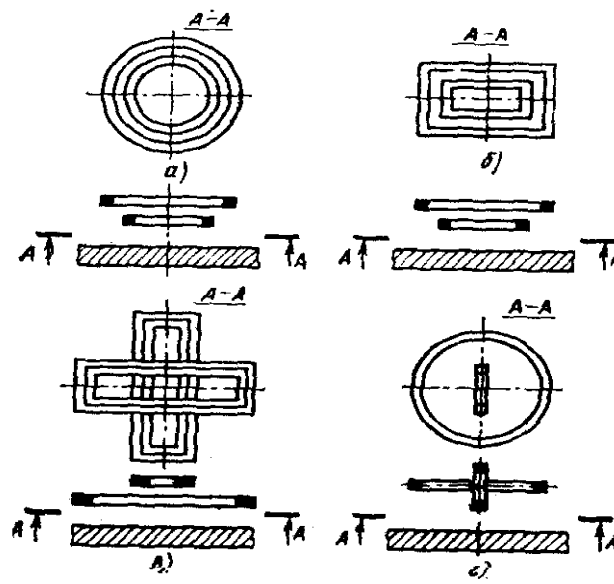


Рисунок 1.1 - Види накладних перетворювачів

Так як основною метою є вимірювання товщини лакофарбового покриття на алюмінієвій основі, тобто на алюмінієвому кузові автомобіля, потрібно вибрати тип товщино міра яким б можна було вимірювати товщину лакофарбового покриття з зовнішньої сторони кузовних деталей. Розглядаючи магнітний товщиномір можна зробити висновок що він не підходить для даної цілі тому що, алюміній є парамагнетиком і даних про товщину покриття не можливо отримати. В свою чергу вибираючи ультразвуковий товщиномір, знаючи, що в середньому діапазон вимірювання цього товщино-міра є 0,8 ... 300 мм, а товщина вимірюваного покриття близько 250 мкм, тобто значення вимірюваної товщини заходяться в зоні нечутливості ультразвукового товщино міра і можна сказати, що товщиномір цього типу не підходить для поставленої цілі. Індукційний товщиномір

не має потрібної чутливості для виміру потрібної товщини ЛКП. Проаналізувавши можливі прилади для вимірювання товщини ЛКП на алюмінієвому кузові було вибрано вихрострумний товщиномір з накладним ВСП завдяки чому можна виміряти з зовнішньої сторони кузовних деталей. [13]

Метою роботи є вимірювання товщини лакофарбового покриття з зовнішньої сторони деталі алюмінієвого кузова, вирішення прикладного завдання шляхом підвищення точності вимірювання товщини із застосуванням вихрострумного товщиноміра.

## 2 РОЗРОБЛЕННЯ ПРИЛАДУ

### 2.1 Теоретичні основи методу контролю

Електромагнітний (вихрострумівий) метод контролю базується на взаємодії зовнішнього електромагнітного поля з електромагнітним полем вихрових струмів, які наводяться обмоткою збудження в електропровідному об'єкті контролю. Густина вихрових струмів є функцією від геометричних розмірів і електромагнітних параметрів ОК, а також від взаємного розташування вимірювального вихрострумівого перетворювача (ВСП) та ОК. [12]

Конструктивно ВСП – це є індуктивні котушки (одна або декілька). Струм, який проходить через обмотку збудження створює електромагнітне поле, яке перетинає поверхню ОК і в електропровідному шарі наводить вихрові струми. Електромагнітне поле цих струмів діє на ВСП одним із двох шляхів спочатку наводиться ЕРС індукції (якщо є дві обмотки), після змінюється повний комплексний опір обмотки (однообмотковий ВСП). [12]

ЕРС і опір  $Z$  залежить від багатьох параметрів. З одного боку це добре, але з іншого – погано, бо вплив цих параметрів треба розділяти при побудові системи обробки вимірювальної інформації. Даний метод контролю забезпечує можливість безконтактного контролю, що є основною його перевагою. При цьому досягається велика продуктивність, мала залежність від стану середовища на результат контролю, велика надійність, можливість роботи в середовищах з підвищеною радіацією або запиленістю. Недоліком даного методу є можливість контролю тільки електропровідних об'єктів або при наявності електропровідних основ при контролі діелектричних матеріалів, а також складність побудови пристроїв обробки багато параметричної вимірювальної інформації. Отримання первинної інформації у вигляді електричних сигналів, безконтактність і висока продуктивність визначають широкі можливості автоматизації вихрострумівого

методу контролю. Простота конструкції перетворювача – ще одна з переваг даного методу. [11]

Конструктивно котушки зазвичай розміщують у захисних корпусах із герметизацією компаундом. Таке рішення забезпечує їхню надійність при механічних навантаженнях, атмосферних чинниках, а також стабільну роботу в широкому діапазоні температур і тиску. [11]

Метод вихрових струмів ґрунтується на явищі електромагнітної індукції, що обмежує сферу його застосування виключно електропровідними матеріалами: металами, їхніми сплавами та напівпровідниками. Ключовою особливістю методу є невелика глибина сканування, яка безпосередньо залежить від здатності електромагнітного поля проникати вглиб середовища. Цю технологію активно впроваджують у дефектоскопії, структуроскопії та для точного вимірювання геометричних параметрів виробів. Зокрема, вона дозволяє виявляти поверхневі та підповерхневі порушення суцільності, як-от тріщини чи сторонні неметалеві включення. [12]

В основі роботи лежить аналіз інтенсивності та просторового розподілу вихрових потоків, що залежать від фізичних властивостей об'єкта та дистанції до перетворювача (ВСП). Змінне поле котушки збуджує струми в провіднику, причому їхня щільність є найвищою на поверхні безпосередньо під обмоткою. По мірі віддалення від осі перетворювача або заглиблення в матеріал інтенсивність вихрових струмів поступово згасає до нуля. [12]

Глибину проникнення  $\delta$  електромагнітного поля накладного ВСП в об'єкт контролю можна наближено оцінити такою формулою:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu_a \cdot \sigma}}, \quad (2.1)$$

де  $\omega$  - колова частота струму збудження ВСП;  $\mu_a$  - абсолютна магнітна проникність, Гн/м;  $\sigma$  - питома електрична провідність матеріалу об'єкта контролю, См/м. [12]

Величина  $\delta$  відповідає затуханню напруженості магнітного поля в  $e$  раз у порівнянні із значенням напруженості магнітного поля на поверхні об'єкта.

Формула (2.2) надає завищене значення глибини проникнення, яке тим ближче до реального, чим більшим є значення узагальненого параметра

$$\beta = R\sqrt{\omega \cdot \mu_a \cdot \sigma}, \quad (2.2)$$

де  $R$  - радіус збуджуючої обмотки ВСП. [12]

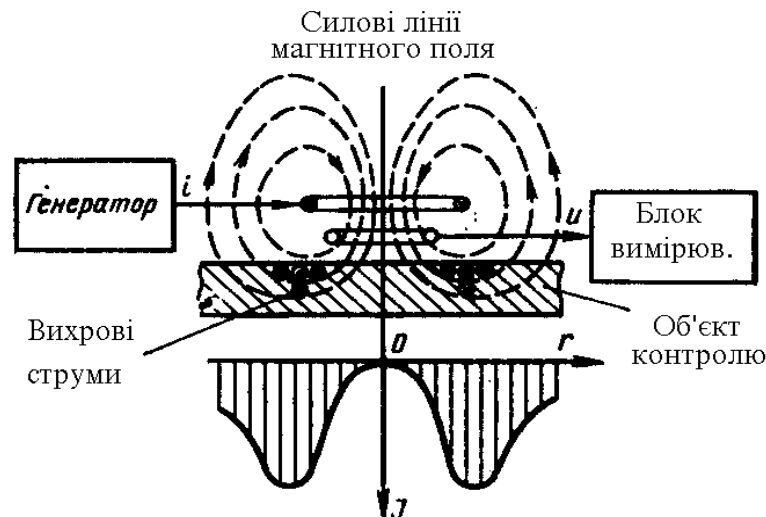


Рисунок 2.1 – Узагальнена схема вихрострумowego контролю за допомогою накладного ВСП

Так при  $\beta = 1.5$  реальне значення  $\delta$  менше знайденого за формулою (2.2) в 2,2 рази, а при  $\beta = 5$  - в 1.5 рази.

Для визначення  $\delta$  при відомому значенні  $\beta$  можна використовувати наступну формулу:

$$\delta = \frac{R\sqrt{2}}{\beta} \quad (2.3)$$

Дійсне значення глибини проникнення для зовнішнього прохідного ВСП з однорідним магнітним полем перевищує оцінку за формулою (2.1). електромагнітного поля прохідного ВСП з однорідним полем в круговий циліндр від параметра  $x^2$  (суцільна лінія – дійсні значення, пунктирна – наближені). [12]

На рис. 2.2 вказані графіки залежності відносної глибини проникнення  $\delta_* = \delta/R$  від квадрату узагальненого параметра контролю  $x$ :

$$x = R\sqrt{\omega \cdot \mu_a \cdot \sigma}, \quad (2.4)$$

де  $R$  – радіус контрольованого циліндра або зовнішній радіус труби ( $\delta_* = \sqrt{2}/x$ ). [12]

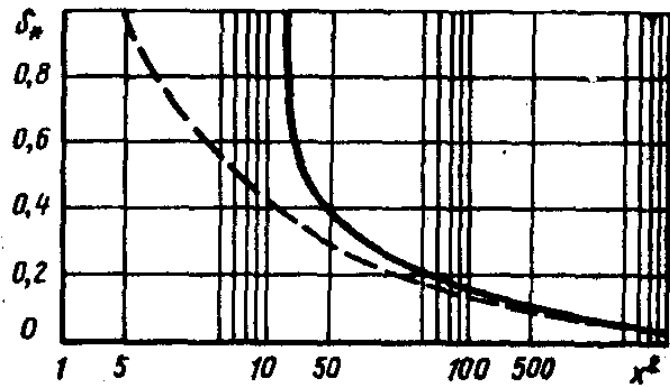


Рисунок 2.2 – Залежність відносної глибини  $\delta_*$  проникнення

Для лінійного середовища та осьосиметричного монохроматичного магнітного поля комплексна е.р.с становить:

$$\left. \begin{aligned} \dot{E} &= -j\omega \cdot w_B \cdot \dot{\Phi}; \\ \dot{E} &= -j\omega \cdot w_B \cdot l \cdot \dot{A}, \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

де  $l$  – довжина контуру вимірювальної обмотки, яка коаксіальна із збуджуючою.

Для розрахунків переважно використовують відносну ЕРС:

$$\dot{E}_* = \frac{\dot{E}}{E_0}, \quad (2.6)$$

де  $E_0$  – модуль вектора початкової е.р.с (відповідає відсутності об'єкта у зоні контролю). [12]

Комплексний опір параметричного ВСП визначається виразом:

$$Z = \dot{U} / \dot{I}_3 = -\frac{\dot{E}}{\dot{I}_3}, \quad (2.8)$$

де  $\dot{I}_B$  – струм збудження в обмотці ВСП. [12]

Нормоване по початковому індуктивному опору значення комплексного опору параметричного ВСП становить:

$$Z_* = \frac{Z}{\omega \cdot L_0} = \dot{U}_* = -\dot{E}_*. \quad (2.9)$$

В довідниках і спеціальній літературі подаються вирази для визначення значень товщини напруги при контролі товщиноміра листів і такого ж півпростору. Однак аналітичні залежності характеризуються значною математичною складністю і великою кількістю змінних параметрів.

$$\beta = R_3 \sqrt{\omega \cdot \mu \cdot \mu_0 \sigma^2}, \quad (2.10)$$

$$T_* = \frac{T}{T_3}, \quad (2.11)$$

$$h_* = \frac{(h_3 + h_b)}{R_3}, \quad (2.12)$$

де  $R_3$  - середній радіус обмотки збудження;  $T$  – товщина контролюваного листа;  $h_3, h_b$  - віддалі по поверхні листа до середини висоти обмоток збуджуючої і вимірювальної відповідно;  $\mu$  – магнітна проникність між об'єктом контролю та перетворювачем. [11]

На рис. 2.3 зображено годографи  $\dot{U}_{BH*}(\beta, T_*)$  для немагнітного листа. Годографи показані на рис.2.3 обмежені з однієї сторони товщиноміра кривою, що відповідає нескінченній товщині листа ( $T \rightarrow \infty$ , півпростір), з другої сторони годографами для тонких ( $T_* \ll 1$ ) листів. Суцільними лініями показані годографи  $\dot{U}_{BH*}$  при зміні товщини ( $\beta = const$ ), штрихові лінії показують годограф  $\dot{U}_{BH*}$  при зміні  $\sigma$  (параметру  $\beta$ ).

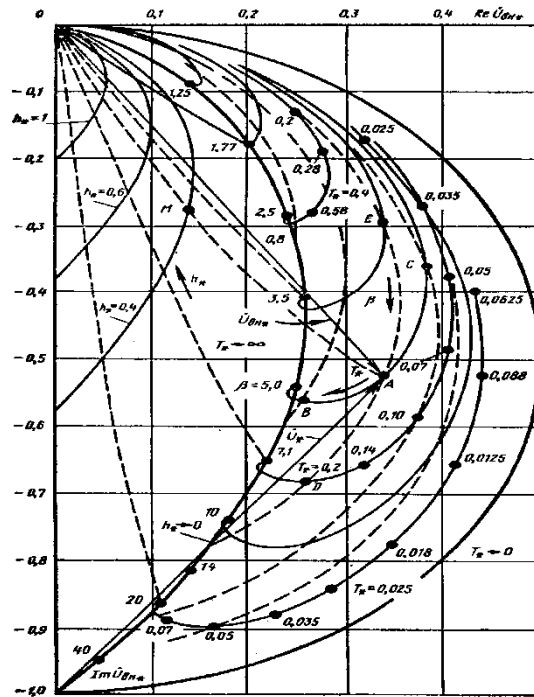


Рисунок 2.3 – Годографи відносної напруги накладного ВСП при контролі неферромагнітного листа

Аналізуючи приведені годографи, можна відмітити, що в загальному випадку можливий роздільний контроль  $T$  і  $\sigma$ .

Для тих значень, які не вказані на годографі, вихідний сигнал знаходять методом інтерполяції між двома відомими змінними [14– 16].

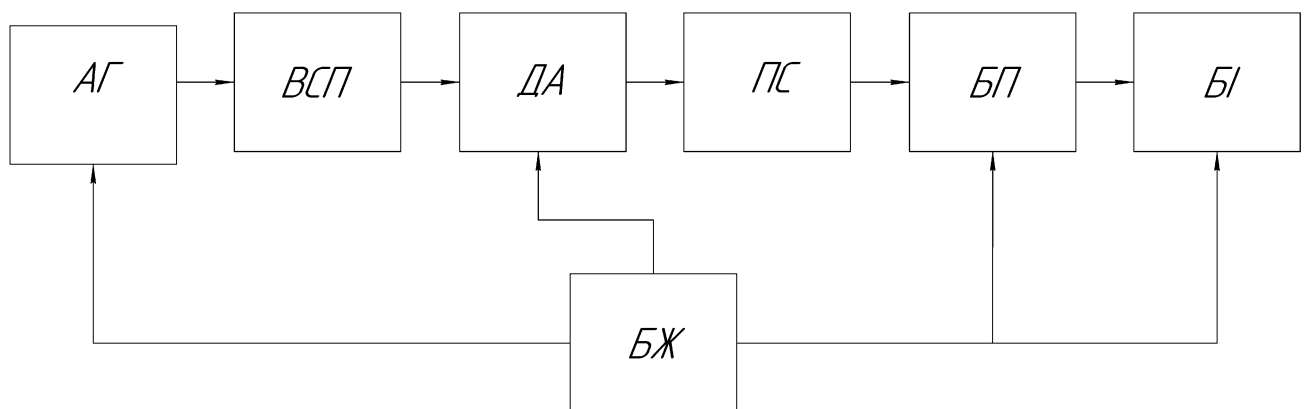
## 2.2 Розробка структурної схеми та електричної принципової схеми вихрострумового товщиноміра

Структурна схема зображена на рисунку 2.4. Схема працює наступним чином автогенератор АГ виробляє синусоїдальне напруга частотою 1 МГц для живлення перетворювача ВСП, представляє собою котушку індуктивності, включену в паралельний резонансний контур. Напруга з перетворювача, надходить на вхід амплітудного детектора АД, з виходу якого постійне напруга через підсилювач ПС

подається на вхід процесорного блоку ПБ. Процесорний блок управляє параметрами підсилювача, перетворює вхідний напруга в цифровий код, виробляє його обробку по заданому алгоритму, передає інформацію про товщині вимірюваного покриття в блок БІ індикації. В підсилювачі процесорний блок задає коефіцієнт посилення і початкове зміщення напруги в залежно від конкретного поєднання матеріалів контрольованих виробів. Блок індикації висвічує інформацію про вимірюваної товщині покриття. Крім того на дисплеї блоку індикації може відображатися інформація про виконанні товщиноміром тієї або інакший операції. Електроживлення всіх вузлів товщиноміра здійснюється від стабілізуючого блоку живлення.

Електрична принципова схема зображена на рисунку 2.5. Працює схема наступним чином. Вихідний сигнал генератора Г, обмежений по амплітуді підсилювачем-обмежувачем, надходить одночасно на ВСП і на один з входів фазового детектора.

При налаштуванні пристрою перетворювач встановлюють на зразок без покриття, а потім на виріб з покриттям. Установка перетворювача на виріб з покриттям викликає розстроювання фазозсуваючого контуру С1-С3, R1-R3 щодо несучої частоти і поява фазового зсуву. Вимір цього фазового зсуву здійснює фазовий детектор, виконаний по схемою диференціального підсилювача (на транзисторах VT4; VT6) з каскадом (на транзисторі VT5).



АГ – автогенератор, ДА – детектор амплітудний, БІ – блок індикації, БЖ – блок живлення, ВСП – Перетворювач вихрострумівий, ПС – підсилювач, БП – блок процесорний

Рисунок 2.4 – Структурна схема товщиноміра

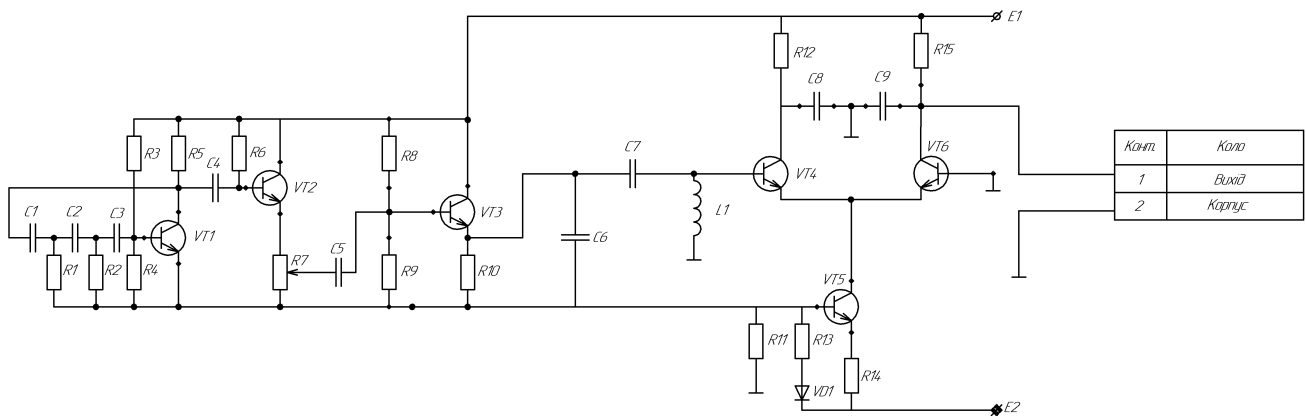


Рисунок 2.4 – Електрична схема товщиноміра

Розподіл колекторного струму транзистора VT3 при подачі на нього опорного напруги  $U_1(t)$  змінюється під дією подається на транзистори VT1 і VT2 напруги  $U_2(t)$ , зсуненої щодо опорного на кут  $\varphi = \frac{\pi}{2} \pm \Delta\varphi$ , де  $\Delta\varphi$ - фазовий кут, залежить від розстроювання контуру L1C2.

На виході фазового детектора виділяється напруга, пропорційне різниці постійних складових колекторних струмів транзисторів VT4 і VT6 і відповідне зміни фазового кута контуру C7 - L1, реєструючи індикатором вихідна напруга частотного детектора збільшується з збільшенням частоти фазозсуваючого контуру C1 - L1 і зменшується з її зменшенням в межах лінійного ділянки Характеристики детектора, яка, в свою чергу, буде лінійної в області частот, близьких до резонансної частоті фазозсуваючого контуру C1 – L1.

### 2.3 Розроблення вихрострумового перетворювача

Давач (рис. 2.6) складається з декількох частин основним елементом якого є катушка, яка розміщена в корпусі (4). Спочатку установлюється нижня частина корпусу на робочу частину, в який монтується катушка. Після установки

компонентів підпаюються провідники від катушки до місця контакту проводів (п.2), установлюється провід (1) роз'єму (5) в верхню частину корпусу (2) та підпаюється до місця пайки з провідниками від катушки (п.2). Виконавши всі монтуєчі дії внутрішня частина корпусу давача заповнюється компаундом 0-11 ГОСТ Р 52373-2005 (3), що не мало важливим фактором є рівномірне заповнення, з метою герметизації та збільшення довговічності давача. Після повного висихання компаунду давач готовий до експлуатації.

Спочатку в розрахунку ВСП потрібно розрахувати геометричні параметри.

Розрахуємо радіус збуджуючої катушки.

$$D_{зк} = 2D_{кат}, \quad (2.13)$$

де  $D_{зк}$  - діаметр зони контролю,  $D_{кат}$  - діаметр збуджуючої катушки. Підставляючи значення в (2.1) знайдемо:

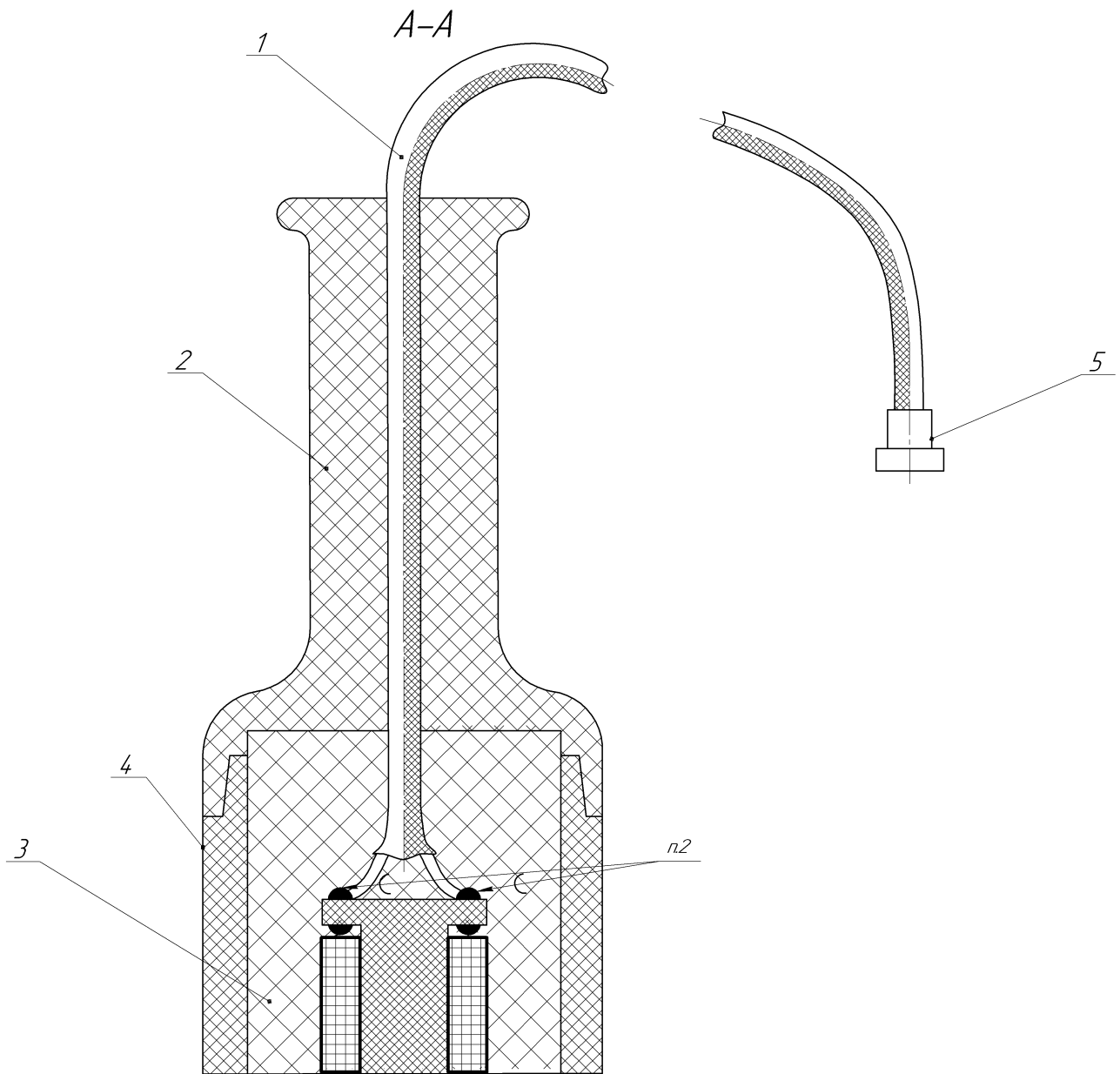
$$R_{кат} = \frac{D_{кат}}{2} = \frac{10}{2} = 5 \text{ мм}$$

Діаметр проводу обмоток збуджуючої обмотки коливається від 0.01 до 0.3 мм, для покращення чутливості було вибрано діаметр проводу 0,2мм.

Кількість витків одного шару збуджуючої катушки визначається за формулою

$$W_{сл} = \frac{L_{кат}}{d_{пр}}, \quad (2.14)$$

де  $L_{кат}$ -довжина катушки,  $d_{пр}$  – діаметр проводу обмотки.



1 – електричний кабель, 2 – корпус, 3 – компаунд, 4 – гільза, 5 – роз'єм

Рисунок 2.6 – Конструкція накладного перетворювача

Знаходження висоти катушки:

$$L_{кат} = 0,1 \cdot D_{кат} = 0,1 \cdot 10 = 1 \text{ мм.} \quad (2.15)$$

Довжину катушки було вибрано рівній її довжині:

$$r_{кат} = L_{кат} = 1 \text{ мм.} \quad (2.16)$$

Підставивши (2.15) в (2.14) знайдено кількість витків в одному шарі збуджуючої катушки:

$$W_{ш} = \frac{1}{0,2} = 5 \text{ витків,} \quad (2.17)$$

Виходячи з (2.16) знаходиться число шарів котушки:

$$N = \frac{r_{кат}}{d_{пр}} = \frac{1}{0,2} = 5, \quad (2.18)$$

Виходить катушка з п'яти шарів проводу, у кожному шарі по п'ять витків, загальна кількість збуджуючої обмотки:

$$W = N \cdot W_{сл} = 25, \quad (2.6)$$

Площа проводу рівна:

$$l_{пр} = \pi \cdot D_{кат} \cdot W = 785 \text{ мм}, \quad (2.7)$$

$$S_{пр} = \frac{\pi \cdot d_{пр}^2}{4} = 0,0314 \text{ мм}^2, \quad (2.8)$$

Виходячи з отриманих геометричних параметрів катушки було вибрано товщину протектора рівну  $t_2 = 0,5 \text{ мм}$ .

Робоча частота  $f_{роб}$  розрахована за формулою:

$$\beta = R_{кат} \sqrt{\omega \mu_a \sigma}, \quad (2.11)$$

де  $\beta$  - загальний параметр,  $R_{кат}$  - радіус збуджуючої катушки, м,  $\omega$  - кругова частота, рад/с,  $\mu_a = \mu \mu_0$ ,  $\mu$  - відносна магнітна проникність,  $\mu = 1$ ;  $\mu_0$  - магнітна постійна  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ .

$$f_{роб} = \frac{\beta^2}{2 \cdot \pi \cdot R_{кат}^2 \cdot \mu_a \cdot \sigma} = 35 \text{ кГц}, \quad (2.12)$$

Тоді  $\omega = 2\pi f_{роб} = 220 \text{ кГц}$ . При  $\beta = 1$  гранична частота рівна  $f_{гп} = 87 \text{ Гц}$ .

Струм, який протікає в збуджуючій котушці  $I_{max}$ , знайдено а формулою:

$$I_0 = j S_{пр}, \quad (2.12)$$

де  $j$  - густина струму в мідному провіднику, для багатошарової катушки густину струму  $j = (3-4) \frac{A}{\text{мм}^2}$ ,  $j = 4 \text{ А/мм}^2$ ;  $S_{пр}$  - площа поперечного січення проводу:

$$I_0 = 4 \cdot 0,0314 = 0,126 \text{ А}, \quad (2.13)$$

Напруженість магнітного поля всередині збуджуючої катушки  $H_0$ , А/м:

$$H_0 = \frac{I_0 \cdot W}{L_{кат}}, \quad (2.14)$$

$$H_0 = 0,126 \cdot 25 / (1 \cdot 10^{-3}) = 3142 \text{ А/м}, \quad (2.15)$$

Розрахунок індуктивності  $L_0$ , Гн, катушок:

$$L_0 = \frac{\mu_0}{4\pi} W^2 D_{кат} \Phi(\alpha), \quad (2.16)$$

де  $W$  - число витківкатушки,  $D_{кат}$  її діаметр,  $\Phi(\alpha)$  - величина стала

$$\alpha = \frac{L_{кат}}{D_{кат}} = 0,1, \quad (2.17)$$

$$\Phi(\alpha) = 0,946, \quad (2.18)$$

$$L_0 = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 25^2 \cdot 1 \cdot 10^{-2} \cdot 0,946}{4 \cdot \pi} = 0,59 \text{ мкГн.}, \quad (2.19)$$

Опір катушки  $R_0$ , Ом,:

$$R_0 = \frac{4 \cdot L_{кат} \cdot D_{кат}}{\sigma \cdot d_{пр}^3} \cdot N, \quad (2.20)$$

де  $\sigma$ -електрична провідність проводу, МСм/м.

$$R_0 = \frac{4 \cdot 1 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 10^{-2} \cdot 5}{5,8 \cdot 10^7 \cdot (0,2 \cdot 10^{-3})^3} = 0,43 \text{ Ом}, \quad (2.21)$$

Комплексний опір:

$$z_0 = R_0 + j\omega L_0 = 0,43 + j0,13 \text{ Ом}, \quad (2.22)$$

$$|z_0| = \sqrt{R_0^2 + (\omega L_0)^2} = 450 \text{ мОм}, \quad (2.23)$$

Напруга холостого ходу  $U_{xx}$ , В на ВСП без ОК буде рівна:

$$U_0 = I_0 \cdot z_0 = 196 \cdot 10^{-3} \cdot 450 \cdot 10^{-3} = 10 \text{ мВ}, \quad (2.24)$$

Додатковий опір  $R_d$  вибирається приблизно в 10 разів менше  $z_0$ ,  $R_d = 50 \text{ мОм}$ , задаючи  $C1 = 100 \text{ мкФ}$ , для того щоб, ємність опору була маленька.

Напруга на ВСП вимірюваного ОК при товщині ЛКП – 90 мкм розраховується:

$$U = I_0 \cdot (z_0 + R_d + X_C), \quad (2.25)$$

де  $X_C = \frac{1}{\omega C1} = \frac{1}{2,2 \cdot 10^5 \cdot 10^{-4}} = 46 \text{ мОм}$ .

$$U = 0,196 \cdot (0,45 + 0,05 + 0,046) = 107,05 \text{ мВ}, \quad (2.26)$$

Виходить напруга на ОК при товщині 90 мкм буде рівна  $U = 107 \text{ мВ}$ .

## 2.4 Побудова годографа

Задається різний зазор для побудови годографа:

$$h_1 = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м},$$

$$h_2 = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ м},$$

$$h_3 = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Годограф буде побудований за формулою:

$$Z_{\text{вн}} = -j \frac{L_{\text{кат}}}{K_a} \int_0^{1500} J_1^2(\lambda R_{\text{кат}}) \cdot e^{-2h\lambda} \frac{(q^2 - \lambda^2)(1 - e^{2qd})}{(q - \lambda)^2 - e^{2qd}(q + \lambda)^2} d\lambda, \quad (2.27)$$

де  $q = \sqrt{\lambda^2 + j\omega\sigma\mu_0}$ ,  $K_a(\alpha) = 0,203324$ .

Для реалізації амплітудного способу виділення інформації, необхідно знайти амплітуду вносимого опору у всіх побудованих точках, тобто знайти  $Z_{\text{вн}}$ .

Точка компенсації в даному випадку буде співпадати з початком координат.

Розрахуємо чутливості і погрішності відповідно формулам

$$S = \frac{\Delta Z_{\text{вн}}}{\Delta h}, \quad (2.28)$$

де  $\Delta h$ - зміна зазору, а  $\Delta Z_{\text{вн}}$ - зміна вносимого опору.

$$\gamma = \frac{\Delta p_k}{h_{\text{ном}}} \cdot 100\%, \quad (2.29)$$

де  $h_{\text{ном}}$  - номінальне значення зазору, а  $\Delta p_k$ - чутливість інформативного параметру до мішаючого фактора.

Розрахунок напруги на додатковому резисторі (с присутністю об'єкта контролю) для значень  $Z_{\text{вн}}$  за формулами:

$$Z_{\text{ВТП}} = z_0 + Z_{\text{вн}}, \quad (2.20)$$

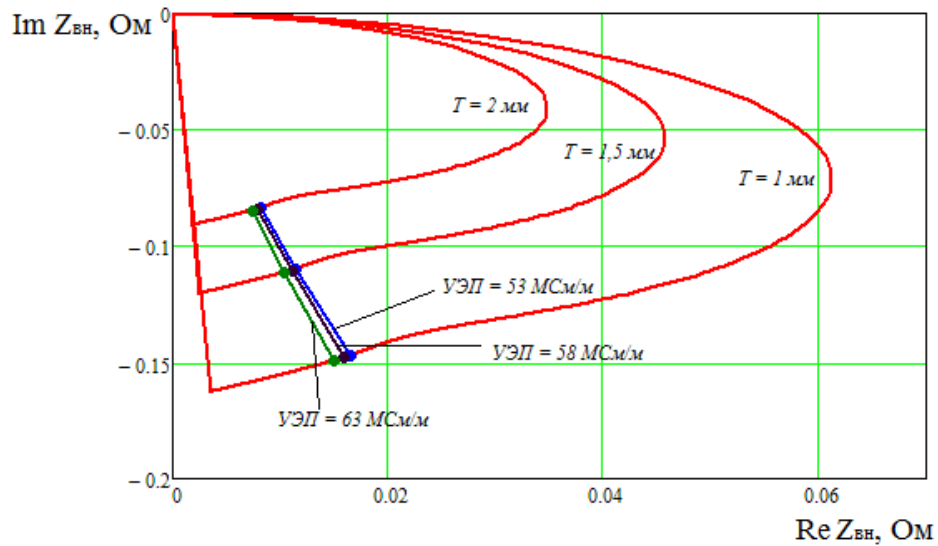


Рисунок 2.6 - Годографи  $Z_{вн}$  накладного ВСП при контролі товщини ізоляції

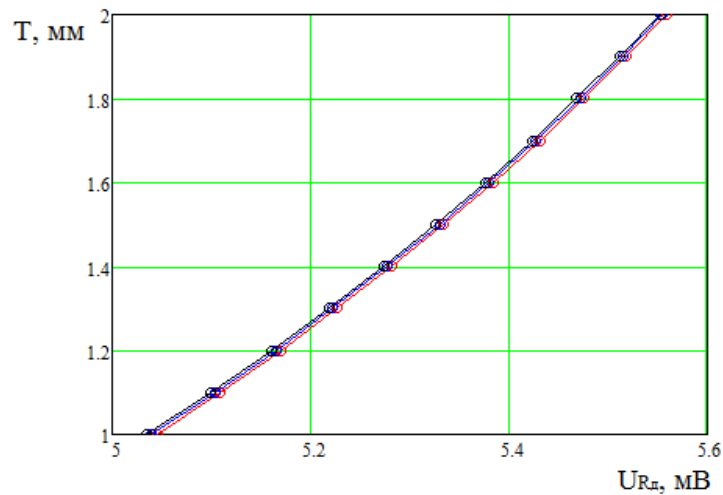


Рисунок 2.7 - Графік залежності напруги від товщини покриття

$$I = \frac{U_{xx}}{Z_{впп} + R_d + X_c}, \quad (2.21)$$

$$U_{R_d} = I \cdot R_d. \quad (2.22)$$

Приклад для  $Z_{lвн}$ :

$$Z_{лвпп} = 0.45 + 0.148 = 0.598 \text{ Ом},$$

$$I = \frac{70 \cdot 10^{-3}}{0.598 + 0.05 + 0.046} = 100,9 \text{ мА},$$

$$U_{R_d} = 98.8 \cdot 0.05 = 4.94 \text{ В}.$$

Розрахунок чутливості і похибки відповідно формулам:

$$S = \frac{\Delta U_{R_d}}{\Delta h}, \quad (2.23)$$

де  $\Delta h$ - зміна зазору, а  $\Delta U_{R_d}$  - зміна напруги з додаткового резистора.

Розрахунок мінімального зазору:

$$S_{1h} = \frac{U_3 - U_2}{h_{\max} - h_{\text{ном}}} = \frac{(5,55854 - 5,33446) \cdot 10^{-3}}{(3 - 2,5) \cdot 10^{-3}} = 0,44816 \frac{B}{\text{мм}}$$

$$S_{2h} = \frac{U_1 - U_2}{h_{\min} - h_{\text{ном}}} = \frac{(5,0454 - 5,33446) \cdot 10^{-3}}{(2 - 2,5) \cdot 10^{-3}} = 0,57812 \frac{B}{\text{мм}}$$

$$S_{1\sigma} = \frac{U_7 - U_4}{\sigma_{\max} - \sigma_{\text{ном}}} = \frac{(5,02996 - 5,03959) \cdot 10^{-3}}{(63 - 58) \cdot 10^6} = -1,926 \cdot 10^{-12} \frac{B}{\text{МСм} / \text{м}}$$

$$S_{2\sigma} = \frac{U_1 - U_4}{\sigma_{\min} - \sigma_{\text{ном}}} = \frac{(5,0454 - 5,03959) \cdot 10^{-3}}{(53 - 58) \cdot 10^6} = -1,162 \cdot 10^{-12} \frac{B}{\text{МСм} / \text{м}}$$

$$\Delta p_{1k} = \frac{S_{1\sigma} \cdot \Delta \sigma}{S_{1h}} = \frac{-1,926 \cdot 10^{-12} \cdot 5 \cdot 10^6}{0,44816} = -2,14879 \cdot 10^{-5} \text{ мм}$$

$$\Delta p_{2k} = \frac{S_{2\sigma} \cdot \Delta \sigma}{S_{2h}} = \frac{-1,162 \cdot 10^{-12} \cdot (-5 \cdot 10^6)}{0,57812} = 1,00498 \cdot 10^{-5} \text{ мм}$$

$$\gamma_1 = \frac{\Delta p_{1k}}{h_{\text{ном}}} \cdot 100\% = \frac{-2,14879 \cdot 10^{-5}}{2,5 \cdot 10^{-3}} 100\% = -0,9\%$$

$$\gamma_2 = \frac{\Delta p_{2k}}{h_{\text{ном}}} \cdot 100\% = \frac{1,00498 \cdot 10^{-5}}{2,5 \cdot 10^{-3}} 100\% = 0,4\%$$

З розрахунків видно, що чутливість до контролюючого параметру (товщини покриття) набагато більше, ніж чутливість до мішаючого фактору. Похибка не перевищує  $\pm 5\%$ . Отримані дані занесені в табл. 1.1

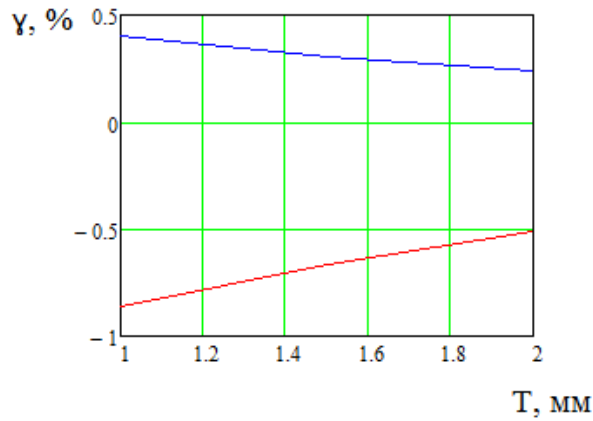


Рисунок 2.6 - Графік залежності похибки від товщини покриття

Таблиця 1.1 –Значення товщини покриття від мінімального зазору

| $\gamma, \%$ | Різні значення товщини покриття $T, \text{мм}$ |                        |                |
|--------------|------------------------------------------------|------------------------|----------------|
|              | $T_{\min} = 2$                                 | $T_{\text{nom}} = 2,5$ | $T_{\max} = 3$ |
| $\gamma_1$   | -0,9                                           | -0,7                   | -0,5           |
| $\gamma_2$   | 0,4                                            | 0,3                    | 0,2            |

## 2.5 Вимірювання товщини

За товщиною лакофарбового покриття визначають, чи піддавався кузов машини повторної фарбування або ремонту після аварії.

Автомобіль фарбують в двох випадках:

- у косметичних цілях - через подряпини або дрібної аварії;
- після серйозного ДТП.

Якщо ж машина була в сильній аварії, в якій постраждала конструкція кузова, то це не машина, а мотлох на колесах. Перебувати в такій машині небезпечно для життя, адже не знати які саме пошкодження залишилися в кузові, що може відірватися або заклинити, а в разі ДТП взагалі величезний ризик. То ж вимірювання товщини ЛКП є досить важливим фактором для впевненого керування автомобілем.

До кожного автомобіля у паспортних даних вказана товщина того чи іншого кузовного елемента. У більшості популярних виробників автомобілів заводська товщина ЛКП коливається від 80 мкм. до 200 мкм., якщо покази приладу більші ніж 200 мкм., то можна зробити висновки о автомобіль повторно перемальовували. Про покази в 300 мкм. можна судити, що на місці вимірювання була подряпина. Якщо прилад показує значення від 300мкм. до 1000 мкм., то це може означати, що автомобіль був не тільки перемальований але й ще його шпаклювали, швидше за все через серйозніші пошкодження кузовного елемента.

Перед вимірюванням товщини прилад потрібно відкалібрувати для підвищення точності показів приладу. Розроблений прилад призначений для вимірювання товщини ЛКП на алюмінієвій поверхні, тому калібрування проводиться на алюмінієвій пластині з нанесеним шаром покриття, товщина якого вказана на пластині. Калібрування проводиться приклавши давач товщиноміра до поверхні пластини та зрівнявши покази приладу та указаної товщини покриття на пластині. Якщо значення відповідають указаній товщині, то можна приступати до використання, якщо значення відрізняються, то потрібно повторити калібрування повторно. Обв'язковим фактором впливу на точність показу приладу , є чистота поверхні, яку потрібно очистити від бруду та пилу перед вимірюванням.

Для того щоб можна було судити про стан кузовного елемента проводити вимірювання товщини потрібно як мінімум в п'яти точках кузовного елемента.

### 3 МЕТРОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ РОЗРОБЛЕНОГО ПРИЛАДУ

#### 3.1 Загальні основи використання концепцій невизначеності при метрологічному аналізі

Результат будь-якого вимірювання не збігається точно з істинним значенням величини. Це зумовлено низкою чинників, серед яких:

- недосконалість застосованого методу вимірювання;
- обмеження та похибки засобів вимірювальної техніки (ЗВТ);
- вплив взаємодії між ЗВТ і об'єктом дослідження;
- суб'єктивний фактор оператора;
- дія умов і параметрів випробувального середовища тощо [19, 20].

Невизначеність вимірювань класифікують за способом її оцінювання [21]:

а) стандартна невизначеність типу А ( $u_a$ ) — визначається статистично на основі розсіювання результатів спостережень;

б) стандартна невизначеність типу В ( $u_b$ ) — обумовлена різними впливовими чинниками та оцінюється за допомогою ймовірнісних підходів;

в) сумарна невизначеність — результат об'єднання окремих стандартних складових;

г) розширена невизначеність — інтервал навколо отриманого результату, в межах якого з заданою ймовірністю знаходиться більшість можливих значень вимірюваної величини.

За походженням невизначеність поділяється на методичну, інструментальну та суб'єктивну. До основних причин формування методичної складової належать [20]:

- похибки у встановленні параметрів випробувального середовища;
- неточності у відтворенні умов проведення вимірювань;
- неповне або некоректне врахування зовнішніх впливів;

- недостатньо точне визначення об'єкта дослідження та його характеристик, а також неповна ідентифікація вимірюваної величини;
- недосконалість реалізації методики вимірювання;
- використання спрощень, припущень або апроксимацій;
- похибки метрологічних характеристик ЗВТ;
- вплив взаємодії між засобом вимірювання та об'єктом;
- неточності у значеннях коефіцієнтів перерахунку та фізичних констант;
- похибки значень, приписаних еталонам і стандартним зразкам;
- розбіжність між реальною фізичною системою та її математичною моделлю;
- наявність неврахованих систематичних похибок;
- похибки, що виникають при введенні поправок.

Причинами інструментальних невизначеностей є базова похибка засобів вимірювальної техніки (ЗВТ) у стандартних умовах, а також додаткові відхилення, що виникають під впливом зовнішнього середовища. Окрім цього, враховується нестабільність показів у часі та їхня варіативність (гістерезис). [18]

Суб'єктивні фактори впливу визначають невизначеність, яка зумовлена людським чинником, охоплює вплив персоналу на прилад чи об'єкт дослідження, похибки при зчитуванні шкал, округленні чисел або порушенні регламенту випробувань. Сюди також відносять прорахунки під час роботи з графіками, таблицями та помилки в процесі передачі інформації. [18]

Невизначеності оцінюють апріорним та апостеріорним методом, які стосується як самої методики, так і окремих вимірів. [18]

Апріорна оцінка (попередня) проводиться на етапі розробки методу для встановлення нормативних меж точності або прогнозування максимально допустимих відхилень. Сьогодні важливим напрямом є автоматизація таких обчислень. Базуючись на теорії ймовірностей, вона дозволяє розраховувати сумарну стандартну та розширену невизначеності (за типом В). [20]

Апостеріорна оцінка (фактична) здійснюється за підсумками реального експерименту з використанням конкретного обладнання.

Ключова відмінність: попередньо оцінена (апріорна) невизначеність відображає найгірший сценарій, тоді як реальна (апостеріорна) невизначеність конкретного результату часто виявляється значно меншою.

Оцінювання невизначеності типу А [20] проводять при проведенні багаторазових вимірювань. У випадку, коли кількість проведених експериментів  $n < 10$ , невизначеність типу А ( $u_a$ ) не визначають. Якщо  $10 \leq n < 20$  і закон розподілу ймовірності є невідомим, то оцінюють  $u_a$  на основі рівномірного розподілу. При  $n \geq 20$  закон розподілу встановлюють шляхом апроксимації отриманих експериментальних результатів. [20]

У разі прямих вимірювань результат приймають рівним середньому арифметичному значенню вибірки, а невизначеність типу А розраховують за відповідною формулою:

$$U_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n \cdot (n-1)}}, \quad (3.1)$$

де  $x_i$  –результат вимірювання;  $\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$  – середнє арифметичне результатів вимірювання;  $n$  = кількість вимірювань. [20]

Оцінювання невизначеності типу В. Виходячи з функціональної залежності між вимірюваною величиною та вхідними параметрами, формують перелік складових: вимірювані вхідні величини; невимірювані впливові фактори; поправки на відомі систематичні відхилення; коефіцієнти й сталі; а також інші додаткові похибки. [18]

Невизначеності всіх вхідних величин спочатку задаються у вигляді інтервальних оцінок, після чого розраховують значення середньоквадратичного відхилення. У випадку, коли закон розподілу ймовірностей невідомий, зазвичай припускають рівномірний розподіл. Перехід від інтервальної характеристики до середньоквадратичного відхилення здійснюється за відповідною залежністю:

$$\sigma = b/t, \quad (3.2)$$

де  $\sigma$  – середньоквадратичне відхилення;  $b$  – півширина інтервалу;  $t$  – значення функції Лапласа для нормального закону розподілу. [18]

### 3.2 Аналіз складових сумарної невизначеності

Сумарна невизначеність розробленого приладу поділяється на методичну та інструментальну, які в свою чергу поділяються на складові.

Методична сумарна невизначеність поділяється на такі складові:

- чистота поверхні;
- шорсткість поверхні
- неоднорідність товщини прошарку між катушкою і поверхнею;
- вплив температури навколишнього середовища;
- вплив вологості навколишнього середовища.

Для того щоб значення невизначеності чистоти ( $U_{\text{чп}}$ ) поверхні мінімізувати потрібно перед використанням приладу очистити поверхню ВСП та ОК від можливих забруднень, за допомогою спеціальних засобів очистки поверхні. Шляхом експериментування було визначено, що вплив чистоти поверхні має значення в  $\pm 1$  мВ.

Шорсткість поверхні ( $U_{\text{шп}}$ ) - важливий показник у вимірюванні товщини ЛКП, так як цей показник суттєво впливає на покази приладу, провівши експеримент було визначено приблизне значення впливу шорсткості поверхні, яке становить  $\pm 0,7$  мВ.

Неоднорідність товщини прошарку між катушкою та поверхнею ( $U_{\text{нт}}$ ) є теж неменш важливим фактором впливу на точність вимірювання. Катушка повинна бути розміщена в корпусі ВСП з максимальним значенням паралельного співвідношенням до площини ОК. Було визначено приблизне значення похибки в  $\pm 1$  мВ.

Температура навколишнього середовища ( $U_{\text{тс}}$ ) впливає на точність вимірювання, саме вимірювання повинно проводитись в певних межах температурного діапазону (від  $-25^{\circ}\text{C}$  до  $+35^{\circ}\text{C}$ ), було визначено значення похибки температурного діапазону  $\pm 0,54$  мВ.

Вологість повітря ( $U_{\text{вп}}$ ) впливає на правильну роботу приладу, точність

вимірювання, а відповідно на невизначеність і було визначено, що похибка має значення  $\pm 0,3$  мВ.

Інструментальна невизначеність поділяється на наступні складові:

- вплив відхилення від даних реальних розмірів катушки;
- невизначеність підсилювача;
- невизначеність індикації.

При розробці приладу не можливо ідеально виготовити деталі з точними розмірами, а саме при виготовленні катушки було визначено що значення похибки відхилення від реальних розмірів ( $U_{BP}$ ) по контролюючому параметру  $\pm 0,6$  мВ.

Підсилювач складається з певних електричних компонентів, кожен з яких має своє певне відхилення від ідеальних параметрів, яке вказується в технічній документації по компоненту, експериментальним шляхом було визначено що похибка підсилювача ( $U_{HP}$ ) сягає значення  $\pm 1$  мВ.

В розробленому приладі елементом індикації показів є рідкокристалічний дисплей, який працює на АЦП, який в свою чергу має певну похибку дискретизації сигналу, було визначено що відхилення блоку індикації ( $U_{BI}$ ) має значення  $\pm 3$  мВ, і так як використовуваний процесор 12-ти розрядний значення відхилення буде в розмірі  $\pm 3/2^{12}$ .

### 3.3 Розрахунок сумарної невизначеності

Розрахунок невизначеності складових сумарної невизначеності розраховується за формулою:

$$U(q) = \frac{q}{\sqrt{3}} \quad (3.5)$$

$$U_{HP} = \frac{1}{\sqrt{3}} = 0,5774 \text{ мВ},$$

$$U_{BI} = \frac{0,7}{\sqrt{3}} = 0,4046 \text{ мВ},$$

$$U_{HT} = \frac{1}{\sqrt{3}} = 0,5774 \text{ мВ},$$

$$U_{TC} = \frac{0,54}{\sqrt{3}} = 0,3110 \text{ мВ},$$

$$U_{BP} = \frac{0,3}{\sqrt{3}} = 0,1740 \text{ мВ},$$

$$U_{BP} = \frac{0,6}{\sqrt{3}} = 0,3464 \text{ мВ},$$

$$U_{HP} = \frac{1}{\sqrt{3}} = 0,5774 \text{ мВ},$$

$$U_{BI} = \frac{3/2^{12}}{\sqrt{3}} = 0,0004 \text{ мВ},$$

За формулою 3.6 знайдемо сумарну невизначеність:

$$U_{\Sigma} = \sqrt{U_q^2}, \quad (3.6)$$

$$U_{\Sigma} = \sqrt{0,5774^2 + \sqrt{0,4046^2} + \sqrt{0,5774^2} + \sqrt{0,3110^2} + \sqrt{0,1740^2} + \sqrt{0,3464^2} + \sqrt{0,5774^2} + \sqrt{0,0004^2}},$$

$$U_{\Sigma} \approx 2,8 \text{ мВ},$$

Шляхом розрахунку сумарної невизначеності за типом В було знайдено значення сумарної невизначеності 2,8 мВ.

## 4 ОХОРОНА ПРАЦІ

### 4.1 Значення охорони праці в забезпеченні безпечних та здорових умов праці

Охорона праці - це система правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних та лікувально-профілактичних заходів, спрямованих на збереження здоров'я і працездатності людини в процесі праці. [21, 22]

Головне завдання наукової організації праці будь-якого трудового, технологічного процесу - забезпечення оптимальних умов праці, усунення небезпеки, яка завдає шкоди здоров'ю працюючих. Разом з тим оптимальний рівень нормальних для організму умов праці є безпечним та основним елементом високої культури виробництва. [22–25]

Отже, охорона праці вивчає причини та наслідки нещасних випадків, професійних захворювань на виробництві і розробляє принципи оздоровлення та полегшення умов праці, попередження травм та захворювань, ліквідації причин аварій, вибухів та пожеж, усунення забруднення навколишнього середовища та шкідливих впливів на природу та людей, при умові досягнення високого рівня культури виробництва та бажаної ефективності праці. [22]

Небезпечні та шкідливі виробничі фактори поділяються за природою дії на організм людини на групи: фізичні, хімічні, біологічні, психофізичні. [25]

В роботі використовується вихрострумний товщиномір, для його виготовлення в обов'язковому порядку є дотримання правил та умов охорони праці.

## 4.2 Забезпечення нормальних умов праці

Забезпечення здорових і безпечних умов праці у виробничій сфері досягається при проектуванні, за рахунок дотримання діючих нормативних документів, а для існуючих об'єктів шляхом порівняння фактичних значень з нормативними і при виявленні відхилень розробкою та впровадженням заходів зі створення умов праці згідно вимог нормативних документів. [22]

Метрологічні умови виробничого середовища визначаються температурою повітря, його відносною вологістю і швидкістю руху. При високій температурі повітря знижується увага, з'являється поспішливість і необачність, а при низькій — зменшується рухомість кінцівок внаслідок інтенсивної тепловіддачі організму.

Впливає на тепловіддачу організму і вологість повітря. При температурі близько  $+18^{\circ}$  вологість повинна знаходитися в межах від 35 до 70%. При меншій відносній вологості повітря вважається сухим, при більшій - з підвищеною вологістю. Це негативно впливає на організм людини. [24]

При виготовленні приладу використовуються шкідливі речовини (табл. 4.1).

Для забезпечення безпечної роботи з пристроєм працівники повинні виконувати всі правила і інструктажі з безпечної експлуатації установки, до роботи повинні допускатися тільки кваліфіковані спеціалісти. До роботи в лабораторії допускаються працівники віком не молодші 18 років, які пройшли спеціальне навчання з даної спеціальності у навчальних закладах і склали іспит на допуск до роботи на даному підприємстві з урахуванням специфіки виконання робіт в лабораторіях, пройшли виробниче навчання по правилах безпечної експлуатації електроустановок споживачів. При прийнятті на роботу, працівник з неруйнівного контролю зобов'язаний пройти попередній медичний огляд і вступний інструктаж з охорони праці та пожежної безпеки на робочому місці.

Таблиця 4.1 - Характеристика шкідливих речовин

| Назва шкідливої речовини або матеріалу | Технологічний процес, в якому використовуються чи виділяються                        | Граничне допустима концентрація шкідливої речовини, мг/м <sup>3</sup> |             | Дія на організм людини. Перша допомога                                                                                                                        |
|----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Припій ПОС-61                          | Монтажні і налагоджувальні роботи                                                    | В робочій зоні 10 <sup>5</sup> (середньодобові 3-10 <sup>-4</sup> )   | В атмосфері | Запаморочення, можливість отруєння. Винести з шкідливої атмосфери на свіже повітря, спокій. При порушенні дихання дати кисень.                                |
| Флюс ЛТИ-1                             | Монтажні і налагоджувальні роботи                                                    | 300                                                                   |             | Запаморочення, можливість отруєння. Винести з шкідливої атмосфери на свіже повітря, тепло, спокій. При порушенні дихання дати кисень. 10-20 крапель валеріани |
| Спирт етиловий                         | Монтажні і налагоджувальні роботи. Періодичне технічне обслуговування і профілактика | 1000                                                                  |             |                                                                                                                                                               |

### 4.3 Вентиляція робочого місця

Розроблений прилад для вимірювання товщини може бути використовуваний як і зовні приміщення, так і всередині. Наприклад вимірювання товщини може проводитись в гаражному приміщенні такому як СТО (Станція Технічного Обслуговування). Для забезпечення нормальних умов праці в приміщенні одним із основних факторів є хороша вентиляція.

Під вентиляцією розуміють сукупність заходів та засобів призначених для забезпечення на постійних робочих місцях та зонах обслуговування виробничих приміщень метеорологічних умов та чистоти повітряного середовища, що відповідають гігієнічним та технічним вимогам. Основне завдання вентиляції - вилучити із приміщення забруднене, вологе або нагріте повітря та подати чисте свіже повітря. Вентиляція класифікується за такими ознаками:

- за способом переміщення повітря — природна, штучна (механічна) та суміщена (природна та штучна одночасно);
- за напрямком потоку повітря — припливна, витяжна, припливно-витяжна;
- за місцем дії — загальнообмінна, місцева, комбінована;
- за призначенням — робоча, аварійна. [22, 26-28]

Припливна вентиляція слугує для подачі чистого повітря ззовні у приміщення. При витяжній вентиляції повітря вилучається з приміщення, а зовнішнє надходить через вікна, двері, нещільності будівельних конструкцій. [27]

Припливно-витяжна вентиляція поєднує першу й другу. Загальнообмінна вентиляція підтримує нормальне повітряне середовище у всьому об'ємі робочої зони виробничого приміщення (цеху). За допомогою місцевої вентиляції шкідливі виділення вилучаються або розчиняються шляхом припливу чистого повітря безпосередньо у місцях їх утворення. Комбінована вентиляція поєднує загальнообмінну та місцеву. Аварійну вентиляцію влаштовують у тих виробничих приміщеннях, в яких можуть статися аварії з виділенням значної кількості шкідливостей, а також коли при виході з ладу робочої вентиляції в повітрі можуть

утворюватись небезпечні для життя працівників або вибухонебезпечні концентрації. Аварійна вентиляція, як правило, проектується витяжною. [26]

Природна вентиляція відбувається внаслідок теплового та вітрового напорів. Тепловий напір обумовлений різницею температур, а значить і густини внутрішнього і зовнішнього повітря. Вітровий напір обумовлений тим, що при обдуванні вітром будівлі, з її навітряної сторони утворюється підвищений тиск, а підвітряної — розрідження. [28]

Природна вентиляція може бути неорганізованою і організованою. При неорганізованій вентиляції невідомі об'єми повітря, що надходять та вилучаються із приміщення, а сам повітрообмін залежить від випадкових чинників (напрямку та сили вітру, температури зовнішнього та внутрішнього повітря). [22, 28]

Неорганізована природна вентиляція включає інфільтрацію — просочування повітря через нещільності у вікнах, дверях, перекриттях тощо та провітрювання, що здійснюється при відкриванні вікон та кватирок. [22, 28]

Організована природна вентиляція називається аерацією. Для аерації в стінах будівлі роблять отвори для надходження зовнішнього повітря, а на даху чи у верхній частині будівлі встановлюють спеціальні пристрої (ліхтарі) для видалення відпрацьованого повітря. Для регулювання надходження та видалення повітря передбачено перекривання на необхідну величину аераційних отворів та ліхтарів. Це особливо важливо в холодну пору року. [26]

Для збільшення природної тяги за рахунок енергії вітру над витяжними каналами встановлюють спеціальні насадки, які отримали назву дефлекторів. [28]

Дія дефлектора базується на тому, що при його обтіканні вітром приблизно на 5/7 поверхні насадки утворюється розрідження, внаслідок чого у витяжному каналі збільшується тяга. Діаметр горловини (патрубка) дефлектора наближено визначають за формулою:

$$= 0,188\sqrt{L_g}/0,4V_B, \quad (4.1)$$

де  $L_g$  — продуктивність дефлектора, м<sup>3</sup> /год;  $V_B$  — швидкість вітру, м/с. Дефлектори необхідно розташовувати на найвищих ділянках покриття.

Перевагою природної вентиляції є її дешевизна та простота експлуатації.

Основний її недолік у тому, що повітря надходить у приміщення без попереднього очищення, а видалене відпрацьоване повітря також не очищується і забруднює довкілля.

Штучна (механічна) вентиляція, на відміну від природної, дає можливість очищувати повітря перед його викидом в атмосферу, вловлювати шкідливі речовини безпосередньо біля місць їх утворення, обробляти припливне повітря (очищувати, підігрівати, зволожувати тощо), більш цілеспрямовано подавати повітря в робочу зону. Окрім того, механічна вентиляція дає можливість організувати повітряний забір у найбільш чистій зоні території підприємства і навіть за її межами. [28]

При штучній вентиляції повітрообмін здійснюється внаслідок різниці, тисків, що створюється вентилятором. Вона застосовується в тих випадках коли тепловиділення у виробничому приміщенні недостатні для постійного (протягом року) використання аерації, або коли кількість чи токсичність шкідливих речовин, які виділяються у повітря приміщення є такою, що виникає необхідність постійного повітрообміну незалежно від метеорологічних умов навколишнього середовища.

Механічна вентиляція може бути робочою або аварійною. Остання повинна передбачатися у виробничих приміщеннях, де можливе раптове надходження у повітря значної кількості шкідливих чи вибухонебезпечних речовин. [26-28]

Аварійна вентиляція повинна вмикатись автоматично при досягненні граничної концентрації небезпечних виділень і забезпечувати швидке їх вилучення із приміщення. Як правило, аварійна вентиляція повинна забезпечувати 8—12-кратний повітрообмін за годину в приміщенні. [26-28]

Робоча вентиляція може бути загальнообмінною, місцевою чи комбінованою.

Основне завдання розрахунку загальнообмінних систем штучної вентиляції - визначити кількість повітря  $L$  ( $\text{м}^3/\text{год}$ ), що необхідно подати або вилучити з приміщення. При розрахунку вентиляції в цехах, повітрообмін, як правило, визначають розрахунковим шляхом за конкретними даними про кількість шкідливих виділень (теплоти, вологи, парів, газів, пилу). [22]

1. Для цехів, де виділяються шкідливі речовини, повітрообмін визначають за

кількістю шкідливих газів, парів, пилу, що надходять у робочу зону, з метою розбавлення їх припливним повітрям до гранично допустимих концентрацій:

$$L = \frac{U}{k_1 - k_2}, \quad (4.2)$$

де  $U$  — кількість шкідливих речовин, що надходять у повітря цеху, мг/ год;  $k_1$  — гранично допустима концентрація шкідливих речовин, що надходять у повітря цеху, мг/м<sup>3</sup>;  $k_2$  — концентрація тих же шкідливих речовин у припливному повітрі, мг/м<sup>3</sup>.

2. Для цехів з виділенням надлишкового тепла кількість припливного повітря визначається із умови асиміляції цього тепла;

$$L_{np} = Q_{над} / (C \gamma (t_в - t_n)), \quad (4.3)$$

де  $Q_{над}$  — надлишкове тепло в цеху, кДж/год;  $C$  - питома теплоємність повітря при постійному тиску, що дорівнює 1 кДж/(кг°С);  $\gamma$  - густина припливного повітря, кг/м<sup>3</sup>,  $t$  - температура повітря, що виходить з цеху, °С;  $t_n$  - температура припливного повітря, °С.

3. Для цехів зі значним виділенням водяних парів необхідний повітрообмін визначається за надлишком вологи:

$$L = G / (\gamma (d_в - d_n)), \quad (4.4)$$

де  $G$  - маса водяних парів, що виділяються різними джерелами в приміщення, г/год;  $d_в$  - вологовміст повітря, що виходить цеху, г/кг;  $d_n$  - вологовміст повітря, що надходить у цех (припливного), г/кг;  $\gamma$  - густина припливного повітря, кг/м<sup>3</sup>.

4. Для приміщень, де немає шкідливих виділень (або кількість їх незначна) приплив (витяжку) повітря можна визначити за кратністю повітрообміну ( $k$ ) - відношенням об'єму повітря, що подається (вилучається) за одиницю часу  $L$  (м<sup>3</sup>/год) до об'єму приміщення  $V_n$  (м<sup>3</sup>):

$$k = L / V_n, \quad (4.5)$$

Кратність повітрообміну показує скільки разів протягом години необхідно замінити весь об'єм повітря в даному приміщенні для створення нормальних умов повітряного середовища. Визначивши за довідником кратність повітрообміну і знаючи об'єм приміщення можна порахувати кількість припливного повітря чи витяжки.

5. Для приміщень, де не утворюються шкідливі виділення та надлишкове тепло і немає необхідності у створенні метеорологічного комфорту можна використати формулу:

$$L = l \times n, \quad (4.6)$$

де  $l$  - мінімальна подача повітря на одного працівника відповідно до санітарних норм (при об'ємі приміщення, що припадає на одного працівника, до  $20 \text{ м}^3 - l = 30 \text{ м}^3 / \text{год}$ , а при об'ємі більше  $20 \text{ м}^3 - l = 20 \text{ м}^3 / \text{год}$ );  $n$  — кількість працівників у приміщенні.

При розрахунку місцевої витяжної вентиляції кількість повітря, що вилучається місцевою витяжкою (зонт, панель, шафа) можна поррахувати за формулою:

$$L_{\text{sum}} = F \times v \times 3600 \text{ (м}^3 / \text{год)}, \quad (4.7)$$

де  $F$  — площа поперечного перерізу отвору місцевої витяжки,  $\text{м}^2$ ;  $v$  — швидкість руху вилученого повітря в цьому отворі (приймається від 0,5 до 1,7 м/с в залежності від токсичності та леткості газів та парів).

Природна та штучна вентиляції повинні відповідати наступним санітарно-гігієнічним вимогам:

- створювати в робочій зоні приміщень нормовані метеорологічні умови праці
- (температуру, вологість і швидкість руху повітря);
- повністю усувати з приміщень шкідливі гази, пари, пил та аерозолі або розчиняти їх до допустимих концентрацій;
- не вносити в приміщення забруднене повітря ззовні або шляхом засмоктування із суміжних приміщень;
- не створювати на робочих місцях протягів чи різкого охолодження;
- бути доступними для керування та ремонту під час експлуатації;
- не створювати під час експлуатації додаткових незручностей (наприклад, шуму, вібрацій, попадання дощу, снігу і т. п.).

Необхідно зазначити, що до вентиляційних систем, встановлених у пожежо та вибухонебезпечних приміщеннях висувається ціла низка додаткових вимог, які не розглядаються, так як такої потреби не має.

#### 4.4 Вплив електромагнітних полів на організм людини

Принцип роботи приладу для вимірювання товщини в дипломній роботі базується на основі електромагнітного випромінювання. Тому важливим фактором забезпечення нормального використання приладу є вплив електромагнітного поля на організм людини. Ступінь впливу ЕМП на організм людини залежить від діапазону частот, інтенсивності та тривалості дії, характеру випромінювання (неперервне чи модульоване), режиму опромінення, розміру опромінюваної поверхні тіла, індивідуальних особливостей організму. [29-30]

ЕМП можуть викликати біологічні та функціональні несприятливі ефекти в організмі людини. Функціональні ефекти проявляються у передчасній втомлюваності, частих болях голови, погіршенні сну, порушеннях центральної нервової (ЦНС) та серцево-судинної систем. [29]

При систематичному опроміненні ЕМП спостерігаються зміни кров'яного тиску, сповільнення пульсу, нервово-психічні захворювання, деякі трофічні явища (випадання волосся, ламкість нігтів та ін.). Сучасні дослідження вказують на те, що радіочастотне випромінювання, впливаючи на ЦНС, є вагомим стрес-чинником.

Біологічні несприятливі ефекти впливу ЕМП проявляються у тепловій та нетепловій дії. Нині достатньо вивченою можна вважати лише теплову дію ЕМП, яка призводить до підвищення температури тіла та місцевого вибіркового нагрівання органів та тканин організму внаслідок переходу електромагнітної енергії у теплову. Таке нагрівання особливо небезпечне для органів із слабкою терморегуляцією (головний мозок, око, нирки, шлунок, кишківник, сім'яники). [29]

Наприклад, випромінювання сантиметрового діапазону призводять до появи катаракти, тобто до поступової втрати зору. [29]

Механізм та особливості нетеплової дії ЕМП радіочастотного діапазону ще до кінця не з'ясовані. Частково таку дію пояснюють специфічним впливом радіочастотного випромінювання на деякі біофізичні явища: біоелектричну активність, що може призвести до порушення усталеного протікання хімічних та

ферментативних реакцій; вібрацію субмікроскопічних структур; енергетичне збудження (часто резонансне) на молекулярному рівні, особливо на конкретних частотах у, так званих, «вікнах прозорості». [29]

Змінне ЕМП являє собою сукупність магнітного та електричного полів і поширюється в просторі у вигляді електромагнітних хвиль. Основним параметром, що характеризує магнітне та електричне поля є напруженість:

$H$  — напруженість магнітного поля, А/м;  $E$  — напруженість електричного поля, В/м. Простір навколо джерела ЕМП умовно поділяють на ближню зону (зону індукції) та дальню зону (зону випромінювання). Для оцінки ЕМП у цих зонах використовують різні підходи. Ближня зона охоплює простір навколо джерела ЕМП, що має радіус, який приблизно дорівнює  $1/6$  довжини хвилі. В цій зоні електромагнітна хвиля ще не сформована, тому інтенсивність ЕМП оцінюється окремо напруженістю магнітної та електричної складових поля (в більшій мірі несприятлива дія ЕМП в цій зоні обумовлена електричною складовою). В ближній зоні, зазвичай, знаходяться робочі місця з джерелами електромагнітних випромінювань НЧ, СЧ, ВЧ, ДВЧ напрямку свого поширення. [30, 31]

Для кількісної характеристики цієї енергії застосовують значення поверхневої густини потоку енергії, що визначається в  $Wm/m^2$ . Допустимі рівні напруженості ЕМП радіочастотного діапазону відповідно до [30] наведені в табл. 4.2

Дотримання допустимих значень ЕМП контролюють шляхом вимірювання напруженостей  $H$  та  $E$  на робочих місцях і в місцях можливого знаходження персоналу, в яких є джерела ЕМП. Контроль необхідно проводити періодично, однак не рідше ніж один раз на рік, а також при введенні в експлуатацію нових чи модернізованих установок з джерелами ЕМП, після їх ремонту, переналагодження, а також при організації нових робочих місць. [31]

Вихрострумний товщиномір створюючи електромагнітне поле, в певній мірі впливає на організм людини яка проводить вимірювання товщини цим приладом. Тому немало важливим фактором для забезпечення оптимальних умов користування, є захист від електромагнітного випромінювання.

Таблиця 4.2 – Допустимі рівні напруженості ЕМП радіочастотного діапазону

| Діапазон частот, Гц | Допустимі рівні напруженості ЕМП  |                                 | Допустима поверхнева густина потоку енергії, Вт/м <sup>2</sup> |
|---------------------|-----------------------------------|---------------------------------|----------------------------------------------------------------|
|                     | За електричною складовою (E), В/м | За магнітною складовою (H), А/м |                                                                |
| 60 кГц до 3 МГц     | 50                                | 5                               | —                                                              |
| 3 МГц до 30 МГц     | 20                                | —                               | —                                                              |
| 30 МГц до 50 МГц    | 10                                | 0,3                             | —                                                              |
| 50 МГц до 300 МГц   | 5                                 | —                               | —                                                              |
| 300 МГц до 300 ГГц  | —                                 | —                               | 10                                                             |

Робочі місця, на яких знаходяться джерела електромагнітних випромінювання з довжиною хвилі меншою ніж 1 м (УВЧ, НВЧ, НЗВЧ) знаходяться практично завжди у дальній зоні, у якій електромагнітна хвиля вже сформувалася. В цій зоні ЕМП оцінюється за кількістю енергії (потужності), що переноситься хвилею у

— «захист часом» — перебування персоналу в зоні дії ЕМП обмежується мінімально необхідним для проведення робіт часом;

— «захист відстанню» — віддалення робочих місць на максимально допустиму відстань від джерел ЕМП;

— «захист кількістю» — потужність джерел випромінювання повинна бути мінімально необхідною;

— виділення зон випромінювання ЕМП відповідними знаками безпеки;

— проведення дозиметричного контролю.

Технічні засоби колективного захисту передбачають:

— екранування джерел випромінювання ЕМП;

— екранування робочих місць;

— дистанційне керування установками, до складу яких входять джерела ЕМП;

— застосування попереджувальної сигналізації. [31]

До лікувально-профілактичних заходів колективного захисту належать:

— попередній та періодичні медогляди;

— надання додаткової оплачуваної відпустки та скорочення тривалості робочої зміни;

— допуск до роботи з джерелами ЕМП осіб, вік яких становить не менше 18 років, а також таких, що не мають протипоказів за станом здоров'я.

Одним із найбільш ефективних технічних засобів захисту від ЕМ випромінювань радіочастотного діапазону, що знаходить широке застосування у промисловості є екранування. Для екранів використовуються, головним чином, матеріали з великою електричною провідністю (мідь, латунь, алюміній та його сплави, сталь). Екрани виготовляються із металевих листів або сіток у вигляді замкнутих камер, шаф чи кожухів, що ід'єднуються до системи заземлення. [30]

Принцип дії захисних екранів базується на поглинанні енергії випромінювання матеріалом з наступним відведенням в землю, а також на відбиванні її від екрана. [30]

Основною характеристикою екрана є його ефективність екранування  $E$ , тобто ступінь послаблення ЕМП. Товщину екрана  $b$  із суцільного листового матеріалу, що забезпечує необхідне послаблення інтенсивності ЕМП можна визначити за формулою:  $b = \frac{E_3}{(15,4\sqrt{f\mu\rho})}$ ,

$$b = \frac{E_3}{(15,4\sqrt{f\mu\rho})}, \quad (4.8)$$

де  $E_3$ - задане значення послаблення інтенсивності ЕМП, яке визначається шляхом ділення дійсної інтенсивності поля на гранично допустиму;  $f$  — частота ЕМП, Гц;  $M$ . — магнітна проникність матеріалу екрана, Г/м;  $\rho$  — питома провідність матеріалу екрана, Ом/м.

Захист приміщення від впливу зовнішніх ЕМП можна забезпечити шляхом оклеювання стін металізованими шпалерами та встановлення на вікнах металевих сіток. [30]

Як засоби індивідуального захисту від ЕМ випромінювань застосовуються халати, комбінезони, рахисні окуляри та ін. Матеріалом для халатів та комбінезонів слугує спеціальна радіотехнічна тканина, в структурі якої тонкі металеві нитки утворюють сітку. [30]

Для захисту очей використовують спеціальні радіозахисні окуляри ОРЗ-5 (ЗП5-90), на скло яких нанесено тонку прозору плівку напівпровідникового олова. [30]

## ВИСНОВКИ

У даній роботі було теоретично обґрунтовано вихрострумний метод контролю товщини лакофарбового покриття автомобіля з алюмінієвим кузовом та розроблено вихрострумний давач до данного приладу. Розроблено структурну схему товщиноміра для визначення товщини лакофарбового покриття автомобіля з алюмінієвим кузовом, складальне креслення вихрострумного давача з обґрунтуванням складових конструктивних елементів. Також було розроблено електричну принципову схему вимірювального блока товщиноміра.

Здійснено метрологічний аналіз розробленого товщиноміра, визначено та розраховано складові сумарної невизначеності вимірювання на основі факторів впливу на процес вимірювання і розроблено схему сумарної невизначеності розробленого товщиноміра.

Розроблено заходи із забезпечення нормальних умов при виготовленні вихрострумного товщиноміра.

## ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Фарби та лаки. Визначення товщини плівки (ISO 2808:2019, IDT) : ДСТУ EN ISO 2808:2022. [Чинний від 2022-12-31]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022. 54 с.
2. Немагнітні покриття на магнітних основах. Вимірювання товщини покриття. Магнітний метод (ISO 2178:2016, IDT) : ДСТУ EN ISO 2178:2019. [Чинний від 2020-01-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019. 18 с.
3. Непровідні покриття на немагнітних електропровідних основах. Вимірювання товщини покриття. Амплітудний метод вихрових струмів (ISO 2360:2017, IDT) : ДСТУ EN ISO 2360:2019. [Чинний від 2020-01-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019. 16 с.
4. Бабак В. П., Кошевий М. Д., Щербак Л. М. Метрологічне забезпечення контролю параметрів технічних об'єктів : підручник. Київ : Либідь, 2010. 432 с.
5. Учанін В. М., Кошевий М. Д. Вихрострумівий контроль товщини діелектричних покриттів на електропровідних основах. Методи та прилади контролю якості. 2015. № 1 (34). С. 12–18.
6. Контроль якості лакофарбових покриттів : навч. посіб. / уклад. О. В. Савченко, Г. П. Смирнова. Харків : НТУ «ХП», 2015. 112 с.
7. Pauk J., Rybak G., Grudzien K. Review of methods for measuring the thickness of coatings on metal substrates. Measurement Automation Monitoring. 2018. Vol. 64, no. 12. P. 345–350.
8. Сусліков Л. М., Студеняк І. П. Первинні вимірювальні перетворювачі фізичних величин : навч. посіб. Ужгород : Вид-во УжНУ «Говерла», 2018. 108 с.
9. Неруйнівний контроль. Контроль вихрострумівий. Словник термінів (EN ISO 12718:2019, IDT) : ДСТУ EN ISO 12718:2022. [Чинний від 2022-12-31]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022. 54 с.
10. Неруйнівний контроль. Контроль вихрострумівий. Загальні вимоги і

- рекомендації (EN 12084:1997, IDT) : ДСТУ EN 12084:2005. [Чинний від 2007-01-01]. Київ : Держспоживстандарт України, 2005. 14 с.
- 11.Протасов А. Г., Куц Ю. В., Гіглава О. Г. Вихрострумний контроль матеріалів та виробів : навч. посіб. Київ : НТУУ «КПІ», 2012. 180 с.
  - 12.Учанін В. М. Накладні вихрострумові перетворювачі з просторовою вибірковістю : монографія. Львів : Сполом, 2013. 248 с.
  - 13.Федоренко А. С., Огінський М. В. Конспект лекцій з дисципліни «Вихрострумний контроль» (спеціальність 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»). Запоріжжя : ЗНТУ, 2018. 84 с.
  - 14.Білокур І. П. Основи дефектоскопії : підручник. Київ : Азимут-Україна, 2004. 496 с.
  - 15.Учанін В. М. Вихрострумний дефектоскопічний контроль: прилади, методи, засоби : монографія. Львів : СПОЛОМ, 2011. 252 с.
  - 16.Неруйнівний контроль : підручник / Є. П. Бабич та ін. ; за ред. В. В. Ключова. Київ : Техніка, 2005.
  - 17.Бичківський Р. В., Столярчук П. Г., Гамула П. Р. Метрологія, стандартизація, сертифікація і управління якістю : підручник. — Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2013. — 520 с.
  - 18.Кухарчук В. В., Долгий О. М. Основи метрології та вимірювальної техніки : навч. посіб. — Вінниця : ВНТУ, 2012. — 256 с.
  - 19.ДСТУ ISO/IEC Guide 98-3:2018. Невизначеність вимірювання. Частина 3. Настанова з вираження невизначеності вимірювання (GUM:1995). — Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018. — 72 с.
  - 20.ДСТУ-N РМГ 43:2006. Метрологія. Настанова з вираження невизначеності вимірювань. — Київ : Держспоживстандарт України, 2006. — 52 с.
  - 21.Закон України «Про охорону праці» від 14.10.1992 № 2694-ХІІ (зі змінами).
  - 22.Жидецький В. Ц. Охорона праці : підручник. — Львів : Афіша, 2011. — 352 с.
  - 23.Гандзюк М. П., Желібо Є. П., Халімовський М. О. Основи охорони праці : підручник. — Київ : Каравела, 2015. — 408 с.

- 24.Костенко О. М. Охорона праці в галузі : навч. посіб. — Київ : Центр учбової літератури, 2018. — 256 с.
- 25.Сторожук В. Ф. Безпека життєдіяльності та охорона праці : навч. посіб. — Київ : Знання, 2019. — 280 с.
- 26.ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. — Київ : Мінрегіон України, 2013. — 141 с.
- 27.ДСТУ EN 13779:2011. Вентиляція нежитлових будівель. Вимоги до характеристик систем вентиляції та кондиціонування. — Київ : Держспоживстандарт України, 2011. — 98 с.
- 28.Ратушняк Г. С. Інженерне обладнання будівель. Опалення і вентиляція : підручник. — Київ : Вища школа, 2006. — 480 с.
- 29.Сєдов В. В. Електромагнітні поля та їх вплив на людину : навч. посіб. — Київ : КНЕУ, 2017. — 256 с.
- 30.ДСН 3.3.6.096-2002. Державні санітарні норми і правила захисту населення від впливу електромагнітних випромінювань. — Київ : МОЗ України, 2002. — 24 с.
- 31.ДСТУ ІЕС 62311:2014. Оцінювання електронного та електричного обладнання щодо обмеження впливу електромагнітних полів на людину. — Київ : Мінекономрозвитку України, 2014. — 36 с.