

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»**

СВІТЛИЧНИЙ ВІТАЛІЙ АНАТОЛІЙОВИЧ



УДК 620.179.147

**РЕЗОНАНСНА ВИХРОСТРУМОВА ДЕФЕКТОСКОПІЯ ТОНКИХ
НЕФЕРОМАГНІТНИХ ПЛІВОК**

**Спеціальність 05.11.13 – прилади і методи контролю
та визначення складу речовин**

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків - 2015

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі проектування та експлуатації електронних апаратів Харківського національного університету радіоелектроніки Міністерства освіти і науки України, м. Харків.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент
Хорошайло Юрій Євгенєвич,
Харківський національний університет радіоелектроніки,
професор кафедри проектування та експлуатації
електронних апаратів

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Гальченко Володимир Якович,
Черкаський державний технологічний університет,
професор кафедри комп'ютеризованих та інформаційних
технологій у приладобудуванні

доктор технічних наук, професор
Сахацький Віталій Дмитрович,
Харківський національний
автомобільно-дорожній університет,
професор кафедри метрології та безпеки життєдіяльності

Захист відбудеться «26» листопада 2015 р. о 14³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.09 при Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21

Автореферат розісланий 21.10.2015 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



С. М. Глоба

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Для здійснення сучасної вихрострумової дефектоскопії застосовують широку номенклатуру серійних приладів. Але в окремому випадку має місце специфіка (структури і властивостей об'єкту контролю, його форми і конструкції тощо), яка обумовлює необхідність додаткових досліджень і розробку спеціалізованих засобів контролю якості продукції. Особливо це проявляється при контролі якості виробів, які мають дефекти структури, зокрема тонких неферромагнітних плівок ($< 0,01$ мкм). При практичному застосуванні вихрострумових дефектоскопів важливим параметром є значення відношення сигнал-завада. Окрім амплітуди корисного сигналу з вихрострумового перетворювача (ВСП), характеристика перетворення обумовлена індустріальними електромагнітними завадами, характеристиками схем контролю, втратами в кабелі тощо. Таким чином, розробка методу резонансної вихрострумової дефектоскопії та створення відповідного пристрою, що забезпечують виявлення дефектів структури тонких неферромагнітних плівок, є актуальним науково-практичним завданням, яке визначило напрям досліджень у дисертаційній роботі.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконана на кафедрі проектування і експлуатації електронних апаратів Харківського національного університету радіоелектроніки відповідно з пріоритетними напрямками реформи державної політики у сфері науки та досліджень, що затверджено в Указі президента України від 12 січня 2015 року №5 «Стратегія сталого розвитку України до 2020 року», а також у рамках договору №131 від 20.07.2011 про науково-технічну співдружність з Науково-дослідницьким експертно-криміналістичним центром при ГУМВС України в Харківській області, де здобувач був виконавцем окремого розділу, та за результатами спільних науково-практичних досліджень з ДНВП «Об'єднання Комунар» (м. Харків) та Державного приладобудівного заводу ім. Т. Г. Шевченка «Моноліт ХГПО» (м. Харків).

Мета і задачі дослідження. Мета роботи – підвищення чутливості виявлення дефектів тонких неферромагнітних плівок на діелектричній основі за рахунок використання резонансного екранного вихрострумового методу контролю.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- провести аналіз існуючих методів і засобів електромагнітної дефектоскопії, виявити їх недоліки і визначити напрямки дисертаційного дослідження;
- удосконалити фізико-математичні моделі взаємодії ВСП з тонкою неферромагнітною плівкою при різних варіантах роботи вихрострумового перетворювача з точки зору забезпечення виявлення дефектів плівок;
- теоретично і експериментально дослідити чинники, які впливають на виявлення дефектів плівки вихрострумовими дефектоскопами;
- розробити метод резонансної вихрострумової екранної дефектоскопії,

який дозволяє ефективно виявляти дефекти структури тонких неферромагнітних плівок;

– розробити макет вихрострумового дефектоскопу, що забезпечує можливість контролю тонких неферромагнітних плівок, оцінити його можливості.

Об'єкт досліджень – процес взаємодії електромагнітного поля з тонкою неферромагнітною плівкою, в результаті якого формується сигнал, що містить інформацію про наявність дефектів структури.

Предмет досліджень – методи і засоби для дефектоскопії електропровідних виробів і матеріалів.

Методи досліджень. Під час вирішення поставлених задач використовувалися положення електротехніки (теорія функції комплексної змінної), методи математичного аналізу (теорія функцій, теорія границь і рядів, диференціальне та інтегральне числення, диференціальні рівняння), чисельні методи апроксимації функцій, методи електричних вимірювань.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Вперше розроблено метод резонансної екранної вихрострумової дефектоскопії тонких неферромагнітних плівок на діелектричній основі, який включає збудження двох локальних електромагнітних полів, одне з яких реагує на наявність дефектів плівок, а друге не реагує на наявність дефектів плівок, сканування плівок збудженими полями, визначення змін амплітуд напруженості електромагнітних полів, обумовлених змінами властивостей плівок, аналіз різниці амплітуд зафіксованих сигналів та прийняття рішення щодо якості плівки за величиною різниці амплітуд зафіксованих сигналів.

2. Отримала подальший розвиток фізико-математична модель процесу взаємодії високочастотного резонансного екранного ВСП з електропровідним виробом за наявності дефектів, що дало можливість виявляти дефекти структури тонких неферромагнітних плівок.

3. Експериментально встановлено, що для ефективного виявлення дефектів структури тонких неферромагнітних плівок на діелектричній основі доцільно використовувати високочастотний резонансний ВСП екранного типу.

4. Теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено, що ефективне виявлення дефектів недосконалості структури плівок товщиною $< 0,01$ мкм забезпечується при частоті збуджуючого струму резонансного ВСП в діапазоні 10–30 МГц.

Практичне значення одержаних результатів для дефектоскопії тонких металевих плівок полягає в наступному:

– розроблено і виготовлено модифікації резонансних високочастотних ВСП для виявлення недосконалості структури тонких неферромагнітних плівок;

– розроблено і виготовлено макет вихрострумового дефектоскопу для виявлення дефектів структури тонких неферромагнітних плівок;

– розроблений спосіб контролю тонких неферромагнітних плівок, (патент України № 83392), дає можливість удосконалити дефектоскопію суцільності структури тонких неферромагнітних плівок;

– розроблений спосіб контролю якості тонких ферромагнітних плівок, (патент України № 93969), дає можливість одночасного визначення електропровідності і товщини тонких ферромагнітних плівок.

Результати роботи впроваджено:

– у виробничу діяльність ДНВП «Об'єднання Комунар» (м. Харків) та Державного приладобудівного заводу ім. Т. Г. Шевченка «Моноліт ХГПО» (м. Харків), при розробці засобів неруйнівного контролю технічної продукції підприємства, у виді: технічних пропозицій по виконанню елементів конструктивних схем резонансних вихрострумів дефектоскопів; методик розрахунку і моделювання параметрів, резонансних перетворювачів вихрострумів дефектоскопів;

– в навчальний процес кафедри приладів і методів неруйнівного контролю НТУ «ХП», при підготовці студентів за напрямком підготовки «Прилади та системи неруйнівного контролю» (спеціальність 8.05100305);

– в навчальний процес кафедри проектування і експлуатації електронних апаратів ХНУРЕ при підготовці студентів за напрямком підготовки «Радіоелектронні апарати та засоби» (спеціальність 8.05090201).

Особистий внесок здобувача. Основні наукові результати роботи отримані здобувачем самостійно. Проаналізовано питання розвитку комплексної автоматизації неруйнівного контролю виробництва і експлуатації виробів, де застосовуються тонкі ферромагнітні плівки. Показано неможливість створення універсального пристрою, придатного для виміру параметрів металевих плівок в широкому діапазоні для різних поєднань матеріалу плівки і підкладки. Проведено теоретичний аналіз та показано, що для контролю структури плівкових ферромагнітних матеріалів доцільне застосування трансформаторних накладних і екранних ВСП. Показано, що отримання первинної інформації у вигляді електромагнітних сигналів, безконтактність і висока продуктивність визначають широкі можливості автоматизації контролю, а для зменшення похибки вимірів і збільшення чутливості до контрольованого параметра необхідно використати методи зменшення впливу чинників, що заважають. Систематизовані проблемні питання теорії аперіодичних та резонансних ВСП.

Апробація результатів дисертаційної роботи. Основні результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на: XX Міжнародному науковому симпозиумі «Metrology and metrology assurance» (м. Созопіль, Болгарія, 2011 р.); на VI Міжнародній науково-технічній конференції і виставці «Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового устаткування» (м. Івано-Франківськ 2011 р.); на VI і VII Регіональної науково-практичної конференції з міжнародною участю «Молодь і глобальні проблеми сучасності» (м. Губкін, Росія, 2011, 2012 рр.); на V Міжнародній науково-практичній конференції «Спеціальна техніка в правоохоронній діяльності» (м. Київ, 2011 р.); на науково-практичному семінарі «Застосування інформаційних технологій в освіті» (м. Харків, 2012 р.); на XX і XXI

Міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (м. Харків, 2012, 2013 рр.); на Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених «Нові матеріали, устаткування і технології в промисловості» (м. Могильов, Білорусія, 2012, 2013 рр.); на науково-практичній конференції «Наукове забезпечення службово-бойовій діяльності внутрішніх військ МВС України» (м. Харків, 2013 р.); на Міжнародній науково-технічній конференції «Nauka dziś: teoria, metodologia, praktyka 2013» (Wrocław: Wydawca: 2013 р.)

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковані у 25 друкованих працях, серед них: 1 монографія, 7 статей у фахових виданнях України, 1 стаття у періодичному виданні України, 2 статті у закордонних періодичних фахових виданнях, 2 патенти України на корисну модель, 12 - у матеріалах наукових конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, 5-х розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг дисертації складає 196 сторінок, з них: 42 рисунка по тексту, 8 рисунків на 6 окремих сторінках, 2 таблиці по тексту, список використаних джерел з 190 найменувань на 22 сторінках, 7 додатків на 23 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність вибраної теми, сформульовано мету та завдання дисертаційної роботи, наведено дані про її зв'язок з науковими програмами, викладено наукову новизну і практичне значення досліджень, особистий внесок здобувача, вказано відомості щодо апробації результатів дисертації, їх публікації та впровадження.

У **першому розділі** виконано аналіз методів і засобів вихрострумового контролю матеріалів і виробів. Використано накопичений в даному напрямку науки і техніки національний та світовий досвід, в який зробили свій внесок наукові школи під керівництвом: В. О. Троїцького, В. В. Ключова, О. М. Карпаша, І. С. Кісіля, С. М. Маєвського, В. М. Учаніна, і вчених: І. П. Білокура, А. С. Бакунова, В. Г. Герасимова, Б. М. Горкунова, Р. М. Джала, М. М. Зацепіна, В. Ю. Кучерука, В. В. Кухарчука, В. Ф. Мужичького, В. П. Себко, В. С. Соболева, Г. М. Сучкова, Й. І. Стенцеля, Ю. К. Тараненко, Ю. К. Федосенко, В. С. Хандецького, Ю. М. Шкарлета, П. М. Шкатова, Fr. Förster, T. Theodoulidis, John R. Bowler, N. Harfield, H. Hoshikawa та багатьох ін.

Проаналізовано відомі методи і засоби вихрострумового контролю виробів і матеріалів, які дають можливість підвищити ефективність вихрострумової дефектоскопії. Дана характеристика загальних принципів побудови вихрострумових дефектоскопів.

На підставі аналізу науково-технічної та патентної літератури,

узагальнень досліджень за вибраним напрямком, визначено основні невирішені задачі та обґрунтовано напрямок дисертаційних досліджень.

Другий розділ присвячено теоретичним дослідженням з виявлення дефектів структури тонких неферромагнітних плівок за допомогою аперіодичних ВСП.

В існуючій теорії аперіодичних трансформаторних ВСП розглядається ідеальний випадок, при якому опір навантаження та внутрішній опір джерела живлення не впливають на характеристики перетворення. Насправді, тонка неферромагнітна плівка, вміщена у вимірювальний зазор ВСП екранного типу, вносить у збуджувальну котушку деякий імпеданс, який залежно від параметрів системи «ВСП–плівка» може в широких межах змінювати навантаження на джерело живлення. Аналогічно і вимірювальна обмотка вносить додатковий імпеданс в збуджувальну обмотку. Показано, що ці фактори значною мірою впливають на модуль і фазу вхідного струму і напруги. Ступінь цього впливу істотно залежить від внутрішнього імпедансу джерела живлення і імпедансу навантаження, а ігнорування цієї обставини приводить до помітної розбіжності розрахункових та експериментальних даних.

В якості моделі аперіодичного екранного ВСП у роботі запропоновано принципову схему, представлену на рис.1. Об'єкт контролю (ОК), – представляє собою тонку неферромагнітну плівку, що має товщину d , електропровідність σ і магнітну проникність μ .

Аналіз роботи аперіодичного ВСП виконано: для початкового режиму (у робочому зазорі – відсутня плівка); робочого режиму (плівка – знаходиться у робочому зазорі); та ряду електричних режимів (холостий хід; навантаження, коротке замикання; режим ідеального генератора струму; режим ідеальної напруги).

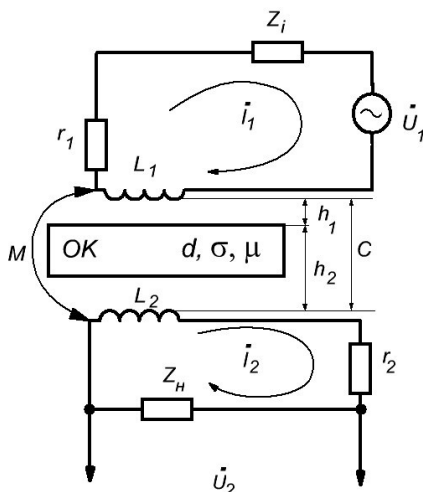


Рисунок 1 – Принципова схема аперіодичного екранного ВСП,

де L_1, r_1, L_2, r_2 – індуктивності і активні опори збудливої та вимірювальної котушок;

Z_i, Z_H – імпеданси, внутрішнього джерела живлення і навантаження; M – коефіцієнт взаємоіндукції між котушками L_1 та L_2 за відсутності в робочому зазорі ОК;

h_1 та h_2 – відстань від однієї з поверхонь пластини до торців котушок L_1 та L_2 ; C – відстань між торцями котушок (робочий зазор)

У робочому режимі вихідна напруга задавалася у вигляді

$$\dot{U}_2 = j\omega M \dot{I}_1 \dot{F}, \quad (1)$$

де \dot{F} – загальна характеристика перетворення екранного ВСП, що є функцією від μ , та узагальнених параметрів ζ , β ;

$$\zeta = 2d/R; \quad \beta = R\sqrt{\omega\sigma\mu_0\mu}. \quad (2)$$

Для даного режиму отримано аналітичний вираз загальної характеристики перетворення у вигляді:

$$\dot{H} = \frac{\dot{P}_{1\text{вн}} \dot{P}_{2\text{вн}}}{\dot{F}} \frac{1 + \frac{K^2 Q_{1\text{вн}} Q_{2\text{вн}}}{(1+jQ_{1\text{вн}})(1+jQ_{2\text{вн}})}}{1 + \frac{K^2 Q_{1\text{вн}} Q_{2\text{вн}} \dot{P}_{1\text{вн}} \dot{P}_{2\text{вн}}}{(1+jQ_{1\text{вн}})(1+jQ_{2\text{вн}})}}, \quad (3)$$

де $\dot{P}_{1\text{вн}} = \dot{F}/(1 + Z_{1\text{вн}}/Z_{1\text{вн}})$, $\dot{P}_{2\text{вн}} = \dot{F}/(1 + Z_{2\text{вн}}/Z_{2\text{вн}})$ – еквівалентні характеристики перетворення вхідного і вихідного ланцюгів; $Z_{1\text{вн}}, Z_{1\text{вн}}, Z_{2\text{вн}}, Z_{2\text{вн}}$ – вносимі і еквівалентні імпеданси; $Q_{1\text{вн}} = \omega L_1/r_{1\text{вн}} = Q_1/(1 + R_i/r_1)$ і $Q_{2\text{вн}} = \omega L_2/r_{2\text{вн}} = Q_2/(1 + R_n/r_2)$ – еквівалентні добротності вхідного і вихідного ланцюгів; Q_1 , та Q_2 , – добротності котушок L_1 та L_2 ; $K = K_0 e^{\frac{-3\alpha_0}{4}}$ – коефіцієнт зв'язку між ними, де K_0 – максимальне значення коефіцієнта зв'язку при повному зближенні котушок.

Отриманий аналітичний вираз (3) загальної характеристики перетворення має достатньо громіздку і складну структуру, тому у роботі проаналізовано кілька окремих випадків:

а) Режим холостого ходу, $R_n = \infty$. Для цього режиму маємо:

$$Q_{2\text{вн}} = 0, Z_{2\text{вн}} = 0, \dot{P}_{2\text{вн}} = \dot{F}, \dot{H} = P_{1\text{вн}};$$

б) Режим ідеального генератора струму, $R_i = \infty$. У цьому режимі:

$$Q_{1\text{вн}} = 0, Z_{1\text{вн}} = 0, \dot{P}_{1\text{вн}} = \dot{F}, \dot{H} = P_{2\text{вн}};$$

в) Режим ідеального генератора струму, $R_i = \infty$ та холостого ходу:

$$R_n = \infty, \dot{H} = \dot{F}.$$

Отримана загальна характеристика перетворення ВСП для режиму холостого ходу з додатковою умовою електроживлення збуджувальної обмотки від ідеального генератора напруги $R_i = 0$

$$\dot{P}_1 = \frac{\dot{F}}{1 + j \frac{K_{10} Q_1}{1 + j Q_1} \varphi_1 e^{-\frac{3}{2} \alpha_1}}. \quad (4)$$

Залежність (4) через параметри (2), та після математичних перетворень, в припущенні, що $R_1 = R_2 = R$, має вигляд

$$\dot{P}_1 = \frac{6\mu e^{\frac{3}{4}\zeta} \sqrt{9 + j4\beta^2}}{6\mu e^{\frac{3}{4}\zeta} \sqrt{9 + j4\beta^2} \operatorname{ch}\left(\frac{\zeta}{4} \sqrt{9 + j4\beta^2}\right) + (9\mu^2 + 9 + j4\beta^2) \operatorname{sh}\left(\frac{\zeta}{4} \sqrt{9 + j4\beta^2}\right)} \times$$

$$\times \frac{1}{K_{10} Q_1 e^{\frac{3}{2}\alpha_1} (1 - jQ_1) (9\mu^2 - 9 - j4\beta^2) \operatorname{sh}\left(\frac{\zeta}{4} \sqrt{9 + j4\beta^2}\right)}$$

$$j \frac{1}{1 + Q_1^2} \quad (5)$$

Показано, що для контролю тонких неферомагнітних плівок, товщина яких значно менше радіуса збуджувальної котушки і глибини проникнення плоскої хвилі, (тобто коли виконуються умови: $\zeta \ll 1$, $\zeta\beta \ll 1$, $\mu = 1$), вираз (5) спрощується і приймає вигляд

$$\dot{P}_1 = \frac{6}{6 + j\gamma + j \frac{K_1 Q_1 (1 - jQ_1)}{1 + Q_1^2}} = \frac{6}{(6 + jA) + j\gamma B}, \quad (6)$$

де $\gamma = \zeta\beta^2 = 2dR\omega\sigma\mu_0$ – введений узагальнений параметр, який пов'язує геометричні розміри ВСП та його електричні початкові данні; коефіцієнти $A = K_1 Q_1 / (1 + Q_1^2)$ і $B = 1 - A Q_1$ визначають взаємозв'язок магнітних K і електричних Q складових виразу.

Модуль і аргумент виразу (6) визначаються наступним чином:

$$\left| \dot{P}_1 \right| = \frac{6}{\sqrt{(6 + \gamma A)^2 + \gamma^2 B^2}}; \quad \varphi_p = -\operatorname{arctg} \frac{\gamma B}{6 + \gamma A}. \quad (7)$$

Чутливість ВСП по відношенню до виявлення несучільності тонких неферомагнітних плівок визначається похідними P'_1 та φ'_p , (рис. 2).

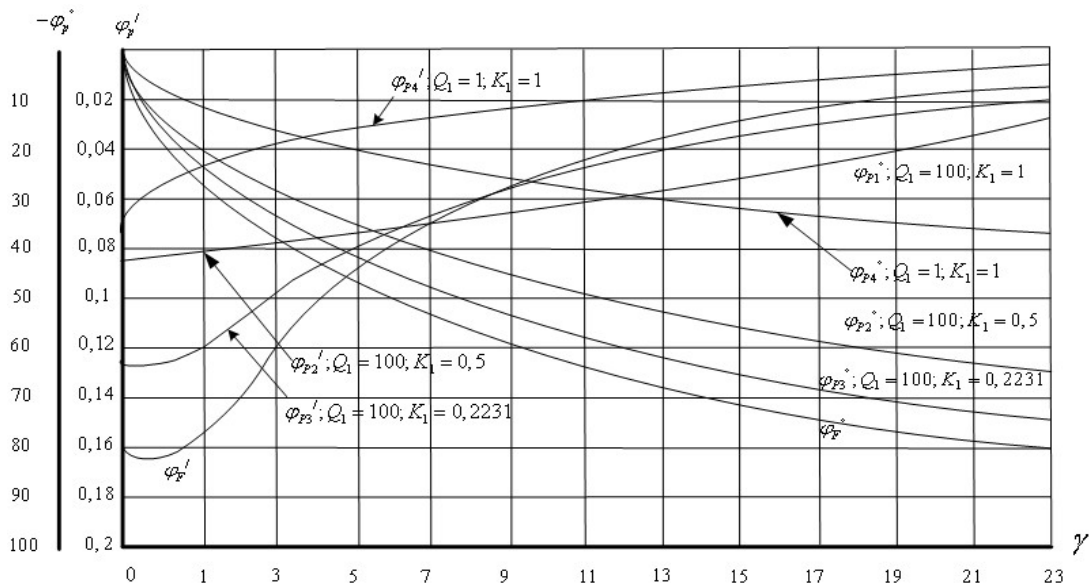


Рисунок 2 – Залежність фазового зсуву $\varphi_p = -\operatorname{arctg}\left(\frac{\gamma}{6}\right)$ та його похідної $\varphi'_p = -P'_1 \frac{B}{6}$

від узагальненого параметру γ

Проведений аналіз чисельних значень, дозволяє зробити висновок про те, що для розглянутої схеми фазовий метод виділення корисної інформації значно переважає амплітудний метод.

У **третьому розділі** наведено теоретичне дослідження виявлення дефектів структури тонких неферомагнітних плівок за допомогою резонансних ВСП. Аналіз та інженерний підхід при розрахунку резонансних ВСП, що застосовуються для виявлення дефектів структури тонких неферомагнітних плівок, потребує подальшого удосконалення. Таким чином, виникла задача адекватного доопрацювання теорії резонансних трансформаторних ВСП, одна з котушок якого включена в коливальний ланцюг, та смугового варіанту ВСП, обидві котушки якого становлять пов'язані коливальні контури.

Проаналізовані різні режими роботи ВСП з урахуванням внутрішнього опору джерела живлення і опору навантаження, способи підключення ВСП до джерела і т.п. Проведено аналіз характеристик, наведено порівняльну оцінку та рекомендації для схемних рішень і параметрів ВСП. Отримані основні формули і аналітичні вирази для характеристик перетворення доведено до вигляду, зручного для інженерних розрахунків.

Виходячи з того, що активні втрати у конденсаторі збуджувального контуру C_1 незначні в порівнянні з втратами в котушці індуктивності L_1 , добротності котушки і в цілому коливального контуру чисельно рівні. Введено поняття «добротність» ВСП

$$V_1 = K_1 Q_1, \quad (8)$$

де Q_1 – максимальне значення добротності; K_1 – максимальне значення коефіцієнту зв'язку (3).

Отримано вираз для характеристики перетворення ВСП

$$\begin{aligned} \dot{P}_{10} = & \frac{6\mu e^{\frac{3}{4}} \sqrt{9 + j4\beta^2}}{6\mu \sqrt{9 + j4\beta^2} ch^{\frac{3}{4}} \sqrt{9 + j4\beta^2} + (9\mu^2 + 9 + j4\beta^2) sh^{\frac{3}{4}} \sqrt{9 + j4\beta^2}} \times \\ & \times \frac{1}{jK_1 Q_1 (9\mu^2 - 9 - j4\beta^2) sh^{\frac{3}{4}} \sqrt{9 + j4\beta^2}}. \end{aligned} \quad (9)$$

Показано, що для тонких неферомагнітних плівок, коли виконуються умови: $\zeta \ll 1$, $\zeta\beta \ll 1$, $\mu = 1$, вираз (9) може бути представлено у вигляді,

$$\dot{P}_{10} = \frac{6}{6 + V_1 \gamma + j\gamma}. \quad (10)$$

Чутливість резонансного ВСП по відношенню до виявлення несущільності тонких неферомагнітних плівок визначається похідними модуля та аргументу виразу (10). На рис. 3 наведено залежність характеристики перетворення резонансного ВСП від параметру γ .

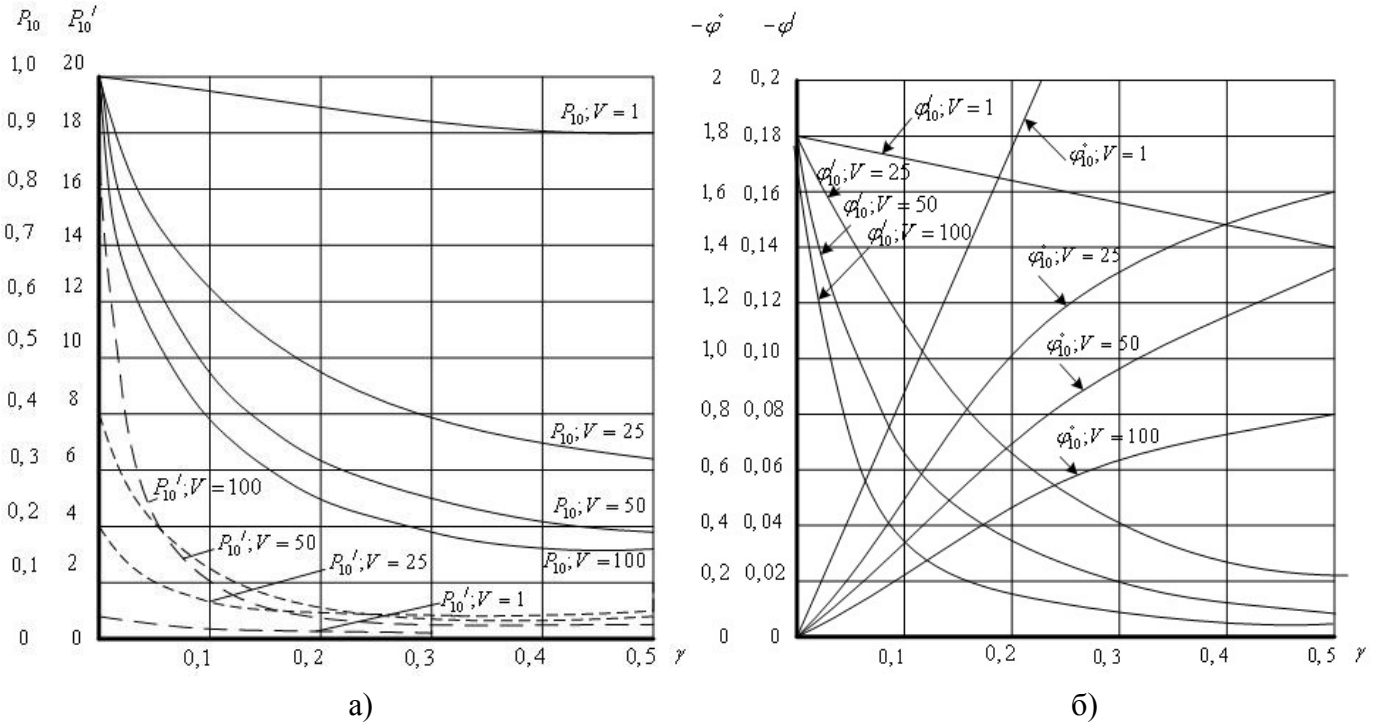


Рисунок 3 – Залежність характеристики перетворення резонансного ВСП від параметру γ :

- а) – модулю $P_{10}(\gamma)$ та його похідної $P_{10}'(\gamma)$;
 б) – аргументу $\varphi_p(\gamma)$ та його похідної $\varphi_p'(\gamma)$

Аналіз залежності показує, що зі збільшенням γ функція P_{10} зменшується, має негативну похідну з максимумом по негативному значенню при $\gamma = 0$, тобто

$$\lim_{\gamma \rightarrow 0} P_{10}' = -V_1/6. \quad (11)$$

Порівняльний аналіз функцій перетворення для резонансної системи P_{10} і аперіодичної P_1 , показує, що робоча область ВСП, де похідна P_{10}' має порівняно більше значення, помітно зміщується в зону малих величин параметра γ . Це означає, що для виявлення несущільності тонких ферромагнітних плівок, оптимальна частота живлячого струму має бути на 1-2 порядки нижче. При цьому максимальне значення похідної P_{10}' , значно більше P_1' . Таким чином, максимальна чутливість резонансного ВСП вище в $2V_1$ раз, ніж у аперіодичного.

Аналіз залежності аргументу та його похідної від параметра γ (рис. 3б) дозволяє зробити висновок, що максимальне абсолютне значення φ_{P10}' має місце при $\gamma = 0$, тобто

$$\lim_{\gamma \rightarrow 0} \varphi_{P10}' = -1/6. \quad (12)$$

З чого випливає, що максимальне значення похідної аргументу $|\varphi_{P10}'|_{max}$ в V_1 раз менше, ніж похідній модулю $|P_{10}'|_{max}$.

Таким чином, на основі виконаних у розділі досліджень встановлено, що чисельні значення аргументу і його похідної порівняно малі, відносно чисельних значень модуля і його похідної, та можна констатувати, що для виявлення несущільності тонких неферромагнітних плівок за допомогою резонансних ВСП доцільно застосовувати амплітудний спосіб виділення інформації. Також встановлено, що при однакових значеннях добротностей контурів і конструкції котушок смуговий ВТП не має більшої чутливості до виявлення несущільності тонких неферромагнітних плівок в порівнянні з резонансним ВТП.

У четвертому розділі встановлено, що одним з основних факторів, який впливає на результат вимірювань у вихрострумовій дефектоскопії, є вплив непостійності робочого зазору. Також показано, що метрологічні показники ВСП залежать від нестабільності параметрів тонких плівок, тобто зміни питомої електропровідності, наявності пористості структури тонких неферромагнітних плівок, характеру дефектів і т.п.

Збільшення зазору призводить до ослаблення зв'язку між котушкою ВСП і тонкою неферромагнітною плівкою, відповідно однаково зменшуючи як активну, так і реактивну складові імпедансу. Проведений аналіз дозволяє встановити, що найбільш часто в дефектоскопах застосовуються наступні методи відсторонення від впливу робочого зазору ВСП:

- використання конструктивних особливостей індукційних котушок;
- застосування резонансних ВСП, які працюють в режимі розладнаних контурів;
- застосування резонансних ВСП другого виду, які використовують різні варіанти вимірювальних та компенсаційних каналів.

Показано, що найбільш простими вихрострумовими приладами з точки зору можливостей компенсації впливу зміни робочого зазору є прилади, засновані на використанні резонансних ВСП, що працюють в режимі розладнаного контуру.

У п'ятому розділі наведено результати розробки способу контролю несущільності, пористості тонких неферромагнітних плівок, та експериментальне підтвердження теоретичних положень розділу.

Показано, що на високих частотах екранній трансформаторний ВСП, який має котушки індуктивності циліндричної форми, здатний виявляти недосконалість структури тонких неферромагнітних плівок. Даний спосіб контролю захищений патентом України на корисну модель. При розміщенні в робочому зазорі екранного ВСП, тонкої неферромагнітної плівки (товщина $< 0,01 \mu\text{м}$) з дефектами структури, у налаштованого в повний резонанс ВСП вихідний сигнал U_2 збільшується в порівнянні з опорним вихідним сигналом U_{20} . Відносне підвищення сигналу U_2 , склало у процентному відношенні до 10%.

Показано, що підвищення вихідного сигналу викликано не властивостями пов'язаних контурів, якими є даний екранний ВСП (рис. 4), а залежить від недосконалості структури плівки.

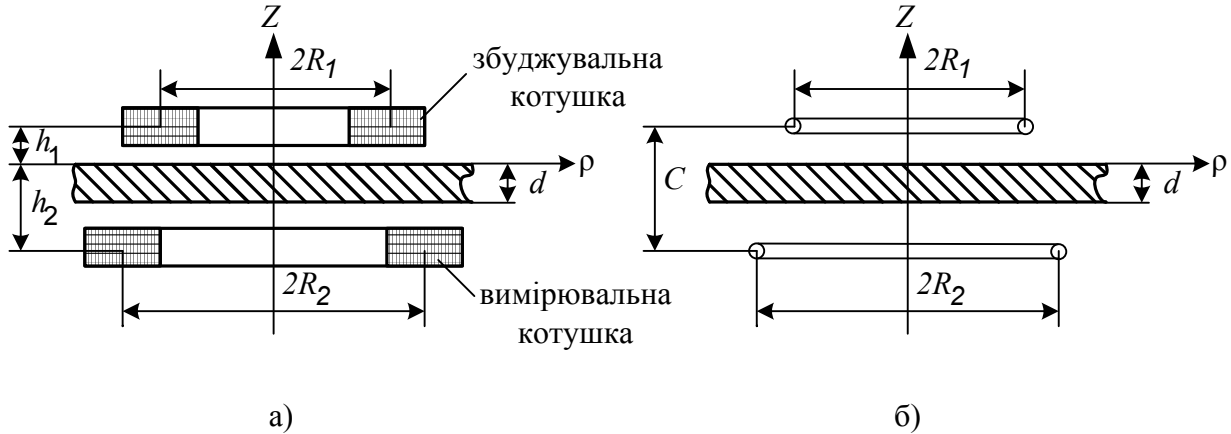


Рисунок 4 – ВСП екранного типу з циліндричними котушками:
 а) – розташування котушок;
 б) – електрична схема заміщення

Виходячи з фізичних аспектів створення електромагнітних полів, описаних відомими рівняннями Максвелла, отримано співвідношення для сигналу вихідної напруги вимірювальної котушки екранного ВСП:

$$\dot{U}_2 = -j\pi\mu_0\omega W_1 W_2 R_1 R_2 \dot{I}_1 \int_0^\infty J_1(\lambda R_1) J_1(\lambda R_2) \frac{4q_2 \lambda e^{\lambda(d-c)}}{(\lambda + q_2)^2 e^{dq_2} - (\lambda - q_2)^2 e^{-dq_2}} d\lambda, \quad (13)$$

де $q_2 = \sqrt{\lambda^2 + j\omega\sigma\mu_0}$ – узагальнений параметр, λ – параметр інтегрування; μ_0 – магнітна стала, ω – циклічна частота; W_1, W_2, R_1, R_2 – число витків і радіуси збуджувальної і вимірювальної котушок ВСП, відповідно; \dot{I}_1 – струм, що протікає в обмотці збуджувальної котушки ВСП; $J_1(\lambda R_1), J_1(\lambda R_2)$ – функції Бесселя першого порядку від аргументів $\lambda R_1, \lambda R_2$, відповідно; d, σ – товщина і електропровідність тонкої ферромагнітної плівки, відповідно; c – відстань між котушками ВСП.

Аналіз залежності (13) підтверджує, що вихідна напруга ВСП залежить від робочих параметрів (розмірів та кількості витків циліндричних котушок, відстані між ними), струму збудження, його частоти, товщини та електропровідності матеріалу об'єкта контролю. Плівка з дефектами структури має електропровідність, яка відрізняється від електропровідності суцільної плівки.

Таким чином, можливо стверджувати, що екранний ВСП, який має котушки індуктивності циліндричної форми, здатний виявляти недосконалість структури тонких ферромагнітних плівок.

Для підтвердження дослідження несучільності контрольованих тонких неферромагнітних плівок виготовлений макет вихрострумове дефектоскопа (рис. 5).

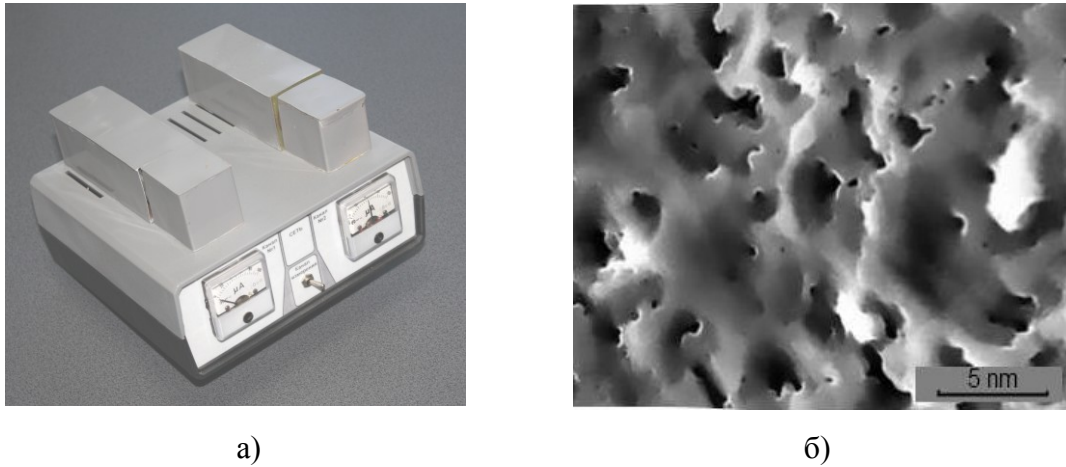


Рисунок 5 – Макет вихрострумове дефектоскопа що дозволяє контролювати дефекти структури тонких неферромагнітних плівок:
 а) – зовнішній від макету дефектоскопу;
 б) – дефектна плівка

З його допомогою, на основі репрезентативності виконаних експериментальних досліджень, отримані відповіді на такі питання:

- вплив окремих параметрів ВСП на основну характеристику перетворення;
- вибір робочої частоти та пошук найбільш доцільного способу створення компенсаційної напруги;
- уточнення особливостей роботи трансформаторних ВСП на циліндричних і плоских котушках;
- вибір типу ВСП і схеми його включення;
- перевірка відповідності розрахункових теоретичних співвідношень з експериментальними.

Для практичного підтвердження теоретичних положень проведені наступні експериментальні дослідження: змінювалася робоча частота струму живлення; застосовувалися вимірювальні котушки різної висоти; використовувалися три типи ВСП (з двома плоскими котушками, з двома циліндричними котушками, з комбінацією плоскої і циліндричних котушок).

У дослідженнях застосовувалися неферромагнітні металеві плівки на полімерній діелектричній основі (таблиця 1). Структура всіх плівок контролювалася растровим електронним мікроскопом РЕМ-106И. Суцільну структуру представляв зразок № 5.

На рис.6. представлені типові характеристики ВСП з циліндричними (пунктирна лінія) і плоскими (суцільна лінія) котушками. Результати досліджень характеристики розподілу вихідного сигналу ВСП уздовж

вимірювального проміжку $U_2(h_1)$ для циліндричних котушок і алюмінієвих зразків, представлені на рис.7.

Таблиця 1 – Експериментальні структури виготовлені методом вакуумної конденсації

Номер зразка	Час конденсації τ_k, c	Товщина, мкм	Матеріал
1	10	0,005	Al
2	15	0,007	Al
3	18	0,008	Al
4	20	0,009	Al
5	50	0,1	Al

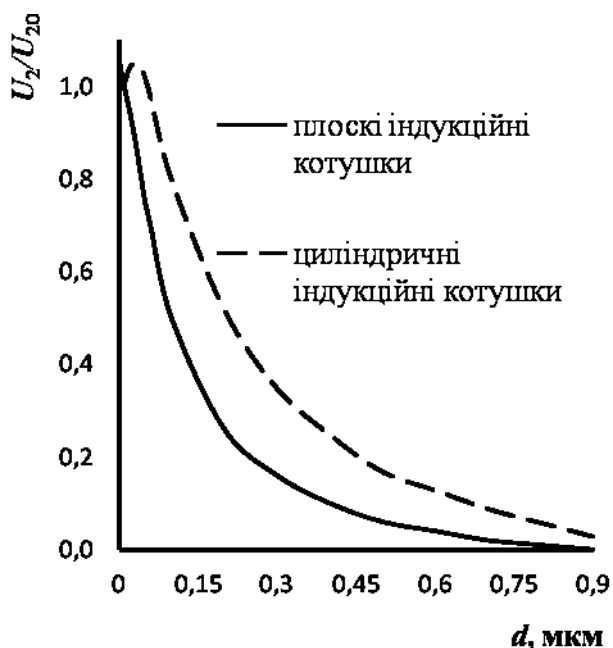


Рисунок 6 – Типові залежності модулів характеристик перетворення для ВСП з циліндричними і плоскими котушками

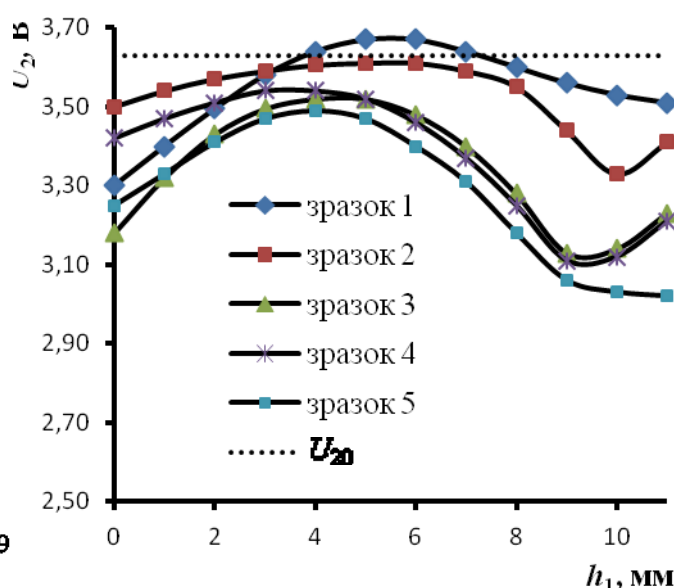


Рисунок 7 – Розподіл вихідної напруги резонансного ВСП з циліндричними котушками

У процесі експериментальних досліджень виявлено явище, породжене пористістю. Якщо змінювати кут положення ОК у вимірювальному зазорі, то величина вихідного сигналу залежить від останнього. У суцільних плівках ОК це явище було відсутнє.

Аналіз результатів виконаних досліджень показує, що збільшення зв'язку між котушками ВСП при внесенні ОК в робочий зазор обумовлюються недосконалістю структури (острівкової, пористої, сітчастої і т.і.) тонкої ферромагнітної плівки. Таким чином, про наявність пористості тонких ферромагнітних плівок, можна судити за трьома ознаками:

- перевищення робочої вихідної напруги U_2 над опорною напругою U_{20} ;
- помітні зміни у формі функцій розподілу в порівнянні з теоретичними («нормальними»);

– наявність залежності вихідної напруги від зміни кута положення ОК у вимірювальному зазорі.

Таким чином, результати експериментальних досліджень з виявлення дефектів структури тонких неферомагнітних плівок підтвердили теоретичні положення роботи.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У результаті виконаних теоретичних та експериментальних досліджень вирішено науково-практичну задачу, що полягає в удосконаленні вихрострумowego методу контролю тонких неферомагнітних плівок та створенні засобу, який забезпечує виявлення дефектів структури.

Основні результати дисертаційного дослідження:

1. На основі аналізу літературних джерел встановлено можливість створення методів і приладів для виявлення дефектів структури тонких неферомагнітних плівок і виробів з них з використанням вихрострумowych перетворювачів екранного типу.

2. На основі дослідження вдосконалених фізико-математичних моделей взаємодії аперіодичних, смугових та резонансних ВСП з тонкими неферомагнітними плівками доведено, що найбільшою чутливістю щодо виявлення дефектів структури об'єктів контролю мають резонансні перетворювачі. При цьому в якості інформативного признаку наявності дефекту слід використовувати амплітуду прийнятого сигналу. Використання амплітудного признаку дозволило підвищити чутливість контролю приблизно в 2 рази. Показано, що використання резонансних ВСП дає можливість виконувати дефектоскопію на частотах на 1-2 порядки нижчою, ніж при використанні аперіодичних перетворювачів, що знижує вимоги до конструкції приладу.

3. Розв'язано задачу створення нового типу ефективних приладів для вихрострумowego екранного резонансного контролю тонких неферомагнітних плівок. Суть її розв'язання полягає в збудженні двох локальних електромагнітних полів, одне з яких реагує на наявність дефектів плівок, а друге не реагує на наявність дефектів плівок, сканування плівок збудженими полями, визначення змін амплітуд напруженості електромагнітних полів, обумовлених змінами властивостей плівок, аналіз різниці амплітуд зафіксованих сигналів та прийняття рішення щодо якості плівки за величиною різниці амплітуд зафіксованих сигналів. Використання різницевого сигналу та резонансних властивостей дало можливість суттєво збільшити відношення корисного сигналу по відношенню до завад і за рахунок цього підвищити чутливість більш чим в 2 рази.

4. Розроблено ВСП, що дозволяє підвищити чутливість виявлення дефектів тонких неферомагнітних плівок товщиною менше 0,01 мкм на діелектричних основах (патент України № 93969), а також дає можливість визначення інших параметрів (електропровідність, товщина) тонких

неферромагнітних плівок.

5. Розроблено макет резонансного екранного дефектоскопу для контролю тонких ферромагнітних плівок (патент України № 83392).

6. Результати дисертаційної роботи застосовані у виробничій діяльності Харківського ДНВП «Об'єднання Комунар» і Харківського державного приладобудівного заводу ім. Т.Г. Шевченка «Моноліт ХГПО». Положення дисертаційного дослідження, використані в навчальному процесі на кафедрі приладів і методів неруйнівного контролю НТУ «ХПІ», кафедрі проектування та експлуатації електронних апаратів ХНУРЕ.

СПИСОК ПРАЦЬ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Светличный В. А. Вихретоковый контроль тонких электропроводящих пленок и неэлектропроводящих покрытий: монография / Ю. Е. Хорошайло, Г. М. Сучков, В. А. Светличный, В. Н. Ероценков. – Харків. : «Щедра садиба плюс», 2014. – 228 с.

Здобувачем розглянуто використання вихрострумів вимірювальних перетворювачів для дослідження параметрів тонких ферромагнітних плівок.

2. Светличный В. А. Неруйнующий контроль ферромагнітних плівок і покриттів / В. А. Светличный, В. В. Тулупов // Системи озброєння і військова техніка. – Харків. : ХУПС ім. І. Кожедуба, 2010. – Вип. № 3(23). – С. 160–162.

Здобувачем розглянуто питання, пов'язані з неруйнівним вихрострумівим контролем ферромагнітних покриттів.

3. Светличный В. А. Контроль пористості тонких ферромагнітних плівок за допомогою вихрострумівого вимірювального перетворювача / В. А. Светличный, В. В. Тулупов // Системи управління навігації та зв'язку. – Харків. : ХУПС ім. Івана Кожедуба, 2010. – № 4(16). – С. 176–180.

Здобувачем виявлені критерії наявності пористості структури і розроблений спосіб контролю пористості тонких металевих плівок.

4. Светличный В. А. Некоторые особенности применения вихретокового метода неразрушающего контроля / В. А. Светличный, Ю. Е. Хорошайло, В. М. Райков // Экономика, наука, производство: сборник научных трудов. – Москва : Издательство ФГБОУ ВПО «Московский государственный открытый университет имени В.С. Черномырдина», 2011. – № 24. – С. 137–141.

Здобувачем визначені особливості і перспективи розвитку засобів неруйнівного контролю.

5. Хорошайло Ю. Є. Математична модель накладного трансформаторного вихрострумівого перетворювача / Ю. Е. Хорошайло, В. А. Светличный // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків. : НТУ «ХПІ», 2011. – № 19. – С. 127–132.

Здобувачем проведено аналіз моделі взаємодії накладного перетворювача і плоского, однорідного, ферромагнітного об'єкта.

6. Светличный В. А. Оценка диапазона измерений на основе критерия допустимой относительной погрешности / В. А. Светличный, Ю. Е. Хорошайло

// Системи обробки інформації. – Харків. : ХУПС ім. Івана Кожедуба, 2011. – Вип. 6 (96). – С. 194–197.

Здобувачем досліджений критерій оцінки діапазону вимірів різних типів вихрострумів перетворювачів.

7. Светличный В. А. Применение метода вторичных источников для расчета квазистационарных электромагнитных полей вихревых токов в тонких ферромагнитных пленках / В. А. Светличный, Ю. Е. Хорошайло, В. В. Тулупов // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків. : НТУ «ХПІ», 2012. – № 40. – С. 131–139.

Здобувачем визначені особливості розрахунку електромагнітних полів вихрових струмів.

8. Светличный В. А. Застосування вихрострумів дефектоскопів в експертній практиці / В. А. Светличный, І. О. Князев // Криміналістичний вісник : наук.-практ. зб. НДЕКЦ МВС України; НАВСУ. – Київ. Тов. «Елітпрінт», 2012. – № 2(18). – С. 131–137.

Здобувачем розглянуто використання вихрострумів дефектоскопів у судово-експертній практиці органів внутрішніх справ України.

9. Светличный В. А. Расчет электромагнитных полей в тонких пленках / В. А. Светличный, Ю. Е. Хорошайло, Л. И. Константинова // Экономика, наука, производство: сборник научных трудов. – Москва. : Издательство ФГБОУ ВПО «Московский государственный открытый университет имени В.С. Черномырдина», 2012. – №25. – С. 116–122.

Здобувачем розглянуто деякі питання розрахунку електромагнітних полів в тонких плівках.

10. Светличный В. А. Анализ модели апериодического экранного вихретокового преобразователя для контроля тонких ферромагнитных пленок / В. А. Светличный, Ю. Е. Хорошайло, А. Е. Орлов // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків. : НТУ «ХПІ», 2013. – № 51. – С. 117–125.

Здобувачем розглянуто питання теорії аперіодичних трансформаторних вихрострумів перетворювачів.

11. Щербаковский М. Г. Применение методов неразрушающего контроля при проведении судебно-экспертных исследований / М. Г. Щербаковский, В. А. Светличный, Ю. Е. Хорошайло, Ю. Н. Онищенко // Право і безпека. – 2011. – Вип. 3 (40). – С. 221–223.

Здобувачем розглянуто використання вихрострумів дефектоскопів в практиці органів внутрішніх справ України.

12. Пат. 83392 U (Україна), МПК G 01N 27/90; Резонансний вихрострумівий спосіб контролю досконалості структури тонких ферромагнітних плівок / Ю. Е. Хорошайло, В. А. Светличный; Харківський національний університет радіоелектроніки (UA). – № u201302206; заяв. 21.01.2013; опубл. 10.09.2013, бюл. № 17. – 3 с.

Здобувачем запропоновано спосіб електромагнітної дефектоскопії контролю досконалості структури тонких ферромагнітних плівок.

13. Пат. 93969 U (Україна), МПК G 01N 27/90, G 01N 22/00, Двопараметровий спосіб контролю якості тонких плівок / Ю. Е. Хорошайло, В. А. Светличный, О. Д. Миняйло, Е. О. Лямін; Харківський національний

університет радіоелектроніки (UA). – № u201404525; заяв. 28.04.2014; опубл. 27.10.2014, бюл. №20. – 3 с.

Здобувачем запропоновано двопараметровий спосіб електромагнітної дефектоскопії тонких ферромагнітних плівок.

14. Светличный В. А. Анализ факторов, ограничивающих метрологические показатели резонансной вихретоковой дефектоскопии / В. А. Светличный, Ю. Е. Хорошайло, Ю. Н. Александров // Сборник докладов XXI научного симпозиума с международным участием «Метрология и метрологическое обеспечение». – София : Технический университет, 2011. – С. 152–158.

Здобувачем проведено аналіз чинників, що обмежують метрологічні показники резонансної вихрострумової дефектоскопії.

15. Светличный В. А. Особенности применения вихретокового метода неразрушающего контроля промышленных изделий / В. А. Светличный, Ю. Е. Хорошайло // Сборник материалов VI Региональной научно-практической конференция с международным участием «Молодежь и глобальные проблемы современности, г. Губкин, 21.04.2011 / ГОУ ВПО «Московский государственный открытый университет». – 2011. – С. 70–74.

Здобувачем виконано дослідження особливостей вихрострумового методу контролю, застосування основних видів вихрострумових перетворювачів для контролю промислових виробів.

16. Светличный В. А. Некоторые вопросы построения вихретоковой аппаратуры неразрушающего контроля / В. А. Светличный // Збірник тез доповідей 3-ої науково-практичної конференції «Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання», м. Івано-Франківськ, 29-30 листопада 2011 р. / ФЕ і ІВТ, ІФНТУНГ. – 2011. – С. 134–136.

17. Светличный В. А. Исследование основных математических условий вихретоковой дефектоскопии / В. А. Светличный, Ю. Е. Хорошайло // Материалы XV Международного молодежного форума «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке» – Харків. : ХНУРЭ. – 2011. – С. 119–120.

Здобувачем проведено аналіз основних математичних схем моделей вихрострумових дефектоскопів.

18. Світличний В. А. Застосування вихрострумових дефектоскопів в експертній практиці / В. А. Світличний, О. М. Рвачов // Збірник матеріалів V Міжнародної науково-практичної конференції «Спеціальна техніка у правоохоронній діяльності», м. Київ, 25 листопада 2011 р. – Київ. : Нац. акад. внутр. справ, 2011. – С. 165–168.

Здобувачем розглянуто призначення і напрями використання вихрострумових дефектоскопів в практиці органів внутрішніх справ України.

19. Светличный В. А. Расчет электромагнитных полей вихревых токов в тонких пленках / В. А. Светличный, Ю. Е. Хорошайло, В. В. Тулупов // Збірка тез доповідей учасників XX Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» – Харків. : НТУ «ХПІ», 2012. – С. 183.

Здобувачем розглянуто застосування методу інтегральних рівнянь для розрахунку електромагнітних полів вихрових струмів.

20. Светличный В. А. Влияние объекта контроля на выходной сигнал вихретокового дефектоскопа / В. А. Светличный, Ю. Н. Онищенко // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Международной научно-технической конференции молодых ученых / М-во образования респ. Беларусь, М-во образования и науки Рос. Федерации, Белорус.-Рос. Ун-т. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2012. – С. 171.

Здобувачем розглянуто питання впливу об'єкту контролю на вихідний сигнал вихреструмowego дефектоскопу.

21. Светличный В. А. Применение вихретоковых дефектоскопов при проведении судебно-экспертных исследований / В. А. Светличный, Ю. Е. Хорошайло // Збірник тез доповідей науково-практичної конференції «Застосування інформаційних технологій у підготовці та діяльності сил охорони правопорядку» / Академія внутрішніх військ МВС України. – Харків. : АВВ МВСУ, 2013. – С. 82–84.

Здобувачем розглянуто призначення, принцип дії вихреструмowych дефектоскопів для потреб органів внутрішніх справ України.

22. Светличный В. А. Контроль и диагностика несплошности тонких ферромагнитных пленок / В. А. Светличный, Ю. Е. Хорошайло // Збірник тез доповідей учасників XX Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» – Харків. : НТУ «ХПІ», 2013. – С. 162.

Здобувачем розглянута несучільність тонких ферромагнітних плівок.

23. Светличный В. А. Показатели качества металлических тонких пленок / В. А. Светличный // Наука сегодня: теория, методология, практика/ Nauka dziś: teoria, metodologia, praktyka, : сборник научных докладов Международной научно-технической конференции. «Nauka dziś: teoria, metodologia, praktyka», 28.09.2013 – 30.09.2013. – Wrocław : Wydawca: Sp. z o.o. Diamond trading tour, 2013. – С. 60–61.

24. Светличный В. А. Моделирование аперидического экранного вихретокового преобразователя / В. А. Светличный, Ю. Н. Онищенко // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Международной научно-технической конференции молодых ученых. / М-во образования Респ.Беларусь, М-во образования и науки Рос. Федерации, Белорус.-Рос. ун-т. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2013. – С. 187.

Здобувачем проведено аналіз теорії аперіодичних трансформаторних вихреструмowych перетворювачів.

25. Светличный В. А. Диагностика лакокрасочного покрытия автомобиля / В. А. Светличный, Ю. Е. Хорошайло // Новейшие технологии развития конструкции, производства, эксплуатации, ремонта и экспертизы автомобиля : сборник тезисов Международной научно-практической конференции. / Харківський національний автомобільно-дорожній університет. – Харків. : ХНАДУ, 2014. – С. 168.

Здобувачем розглянуто використання вихреструмowych пристроїв для проведення автотехнічної експертизи лакофарбного покриття автомобіля.

АНОТАЦІЇ

Світличний В.А. Резонансна вихрострумова дефектоскопія тонких неферромагнітних плівок. На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу речовин. – Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, 2015 р.

Дисертація присвячена розробці методу і приладу для ефективного контролю дефектів структури тонких неферромагнітних плівок.

Проведено аналіз характеристик різних ВСП, здатних виявляти зазначені дефекти. Розглянуті різні режими роботи з урахуванням внутрішнього опору джерела живлення і опору навантаження, способи підключення ВСП до джерела живлення.

Розроблено спосіб, що дозволяє поліпшити виявлення дефектів у тонких неферромагнітних плівках. Досліджено модель оцінки взаємодії резонансного ВСП з неферромагнітною тонкою плівкою. Наведено аналітичні співвідношення, проведено розрахунки залежності вихідного сигналу від параметрів ВСП.

Для експериментальних досліджень був виготовлений лабораторний макет вихрострумового дефектоскопа, за допомогою якого здійснювалася перевірка відповідності розрахункових теоретичних співвідношень з експериментальними.

Ключові слова: дефектоскоп, прилад контролю, вихрострумний перетворювач, вихрострумний контроль, тонкі неферромагнітні плівки, дефект структури.

Светличний В.А. Резонансная вихретоковая дефектоскопия тонких неферромагнитных пленок. На правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 приборы и методы контроля и определения состава веществ. – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, 2015 г.

Диссертация посвящена разработке метода и прибора для эффективного контроля дефектов структуры тонких неферромагнитных пленок.

Рассмотрены общие положения применения вихретоковых преобразователей в дефектоскопии. Показаны характерные общие принципы построения вихретоковых дефектоскопов. Указаны направления улучшения метрологических показателей вихретоковых дефектоскопов тонких пленок. Выполнен анализ дефектов структуры тонких неферромагнитных пленок и методов контроля качества.

Проведен анализ характеристик апериодических ВТП, способных выявлять указанные дефекты. Уточнена теория апериодических ВТП с учетом анализа влияния на характеристики преобразования внутреннего сопротивления источников питания и параметров нагрузки.

Выполнен анализ характеристик вихретоковых резонансных ВТП предназначенных для выявления дефектов тонких неферромагнитных пленок. Рассмотрены различные режимы работы ВТП с учетом внутреннего сопротивления источника питания и сопротивления нагрузки, способы

подключения ВТП к источнику и т.д. Выполнен анализ характеристик, даны сравнительная оценка и рекомендации, обосновавшие схемные решения и параметры ВТП. Доказаны преимущества резонансных ВТП относительно апериодических.

Проведен анализ факторов, влияющих на точность выявления дефектов тонких ферромагнитных пленок средствами высокочастотной резонансной вихретоковой дефектоскопии. Показано, что одним из основных факторов, влияющих на точность измерений в резонансной вихретоковой дефектоскопии, является нестабильность рабочего зазора ВТП. Предложен вариант компенсации влияния изменения рабочего зазора при использовании резонансного ВТП накладного типа, работающего на двух различных частотах.

Разработан способ резонансной дефектоскопии, позволяющий улучшить выявление дефектов в тонких ферромагнитных пленках. Исследована модель оценки взаимодействия резонансного ВТП с ферромагнитной тонкой пленкой. Приведены аналитические соотношения, проведены расчеты зависимости выходного сигнала от параметров ВТП.

Для практического подтверждения аналитических положений работы выполнены экспериментальные исследования: влияние отдельных параметров резонансного ВТП на его основную характеристику преобразования; выбор рабочей частоты; поиск наиболее целесообразного способа создания компенсационного напряжения; уточнение особенностей работы трансформаторных ВТП на цилиндрических и плоских катушках; выбор типа ВТП и схемы его включения. Создан дефектоскоп, позволяющий выявлять дефекты структуры тонких ферромагнитных пленок.

Ключевые слова: дефектоскоп, прибор контроля, вихретоковый преобразователь, вихретоковый контроль, тонкие ферромагнитные пленки, дефекты структуры.

V. A. Svetlichny. Eddy current resonance flaw detection non-ferromagnetic thin films. Manuscript.

Dissertation for the degree of Ph. D. in Engineering Science, specialty 05.11.13 – devices and methods of control and determination of the composition of substances. – Kharkov National University of Radio Electronics, Kharkov, 2015.

The dissertation is devoted to the development of methods and instruments for the effective control of defects imperfections film structure

The analysis of the characteristics of various ECP capable of detecting these defects. Considering the various modes of operation, taking into account the internal resistance of the power supply and the load resistance, how to connect to a power source ECP.

Developed a way to improve the detection of defects in non-ferromagnetic thin films. A model to assess the interaction with non-ferromagnetic resonance ECP thin film. These analytical ratios were calculated according to the output signal from the parameters of the ECP.

For experimental research laboratory prototype was manufactured eddy-current flaw detector by which to check whether the calculation of the theoretical and experimental relations.

Keywords: flaw detector, device of testing, eddy-current probes, eddy-current testing, non-ferromagnetic thin film, defect structure.