

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Світличного Віталія Анатолійовича «Резонансна вихрострумова дефектоскопія тонких ферромагнітних плівок», що подана на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу речовин.

### 1. Актуальність теми дисертації

Тонкоплівкові покриття використовуються в різних областях техніки для вирішення питань боротьби з корозією, захисту конструкцій від хімічних дій і безлічі інших завдань. Особливу значущість тонкоплівкові покриття мають в нанoeлектроніці, що нині швидко розвивається. Різного роду дефекти, які виникають при технологічному процесі покриття плівкою різних матеріалів, істотно погіршують функції, які покладаються на плівку. Тому контроль якості тонкоплівкових покриттів залишається в центрі уваги як вітчизняних, так і зарубіжних вчених.

Серед методів контролю дефектів для металевих матеріалів важливе місце займає вихрострумова дефектоскопія, яка широко поширена на практиці.

Для здійснення сучасної вихрострумової дефектоскопії застосовують широку номенклатуру серійних приладів.

Між тим при контролі металевих плівок мають місце свої специфічні особливості. Це обумовлено тим, що для металевих плівок дефекти не являються одиночними і зосередженими в одному місці об'єкту контролю, а розподілені по поверхні плівки і її товщині. При цьому форма дефекту - різноманітна.

Для підвищення чутливості приладів контролю в них використовують мостові і резонансні схеми датчиків. Електрофізичні особливості тонких плівок викликають необхідність розвитку особливих підходів при побудові приладів контролю тонких металевих плівок.

Дисертаційна робота виконувалась у відповідності 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», де підкреслюється необхідність забезпечення якості продукції і її відповідність міжнародним вимогам, а також з тематикою договору №131 від 20.07.2011 про науково-технічну співдружність з Науково-дослідницьким експертно-криміналістичним центром при ГУМВС України в Харківській області, та спільними науково-практичними дослідженнями з ДНВП «Об'єднання Комунар» (м. Харків) та Державним приладобудівним заводом ім. Т. Г. Шевченко «Моноліт ХГПО» (м. Харків).

Враховуючи вищесказане, тема дисертації, яка пов'язана з удосконаленням якості методів і приладів контролю дефектів структури тонких неферромагнітних плівок з метою підвищення їх чутливості є актуальною.

## **2. Зміст дисертації і основні результати в роботі**

У вступі наведена загальна характеристика роботи, обґрунтована актуальність досліджень, поставлено їх мету і задачі, викладена наукова новизна і практичне значення отриманих результатів, вказано відомості щодо публікації результатів дисертації, їх апробації та впровадження.

У першому розділі проведено аналіз методів і засобів неруйнівного контролю тонких плівок. Розглянуті параметри, які характеризують тонкі плівки, описані дефекти, що виникають в них і їх характеристики. Проаналізовано найбільш розповсюджені методи контролю дефектів тонких плівок. Наведені переваги та недоліки кожного методу. Відзначено, що відомі методи контролю не дозволяють врахувати специфічні особливості дефектів тонких плівок. Наведена доцільність використання вихрострумowego методу для контролю цих дефектів. Розглянуто загальні принципи побудови вихрострумових дефектоскопів і методи виділення інформаційних сигналів та зниження перешкод. Обґрунтовано доцільність застосування трансформаторних накладних і екранних ВСП.

Визначені головні невирішені задачі, обґрунтовано напрямок дослідження, сформульовані завдання досліджень.

У другому розділі з метою оцінки необхідних характеристик виявлення дефектів тонких неферромагнітних плівок за допомогою математичного модулювання аперіодичного екранного ВСП обґрунтовано вибір схеми і типу ВСП, а також метод виділення інформаційного сигналу для подальших досліджень. При розробці математичних моделей враховувався той факт, що в реальних вимірювальних приладах джерело живлення збудливої котушки має внутрішній опір ( $Z_i$ ), а вимірювальна котушка навантажена на певний опір ( $Z_H$ ). За допомогою еквівалентних схем і теорії електричних ланцюгів отримана математична модель характеристики перетворення аперіодичного ВСП. Доведено що ці чинники вносять додатковий імпеданс у збуджувальну обмотку і значною мірою впливають на модуль і фазу вхідного струму і напруги. Результат цього впливу істотно залежить від внутрішнього опору джерела живлення і опору навантаження.

За умови, що неферромагнітна плівка має товщину набагато менше радіуса збудливої котушки і глибини проникнення поля в плівку, проведено чисельний аналіз характеристики перетворення при зміні електрофізичних і геометричних параметрів ВСП і тонкої плівки для різних режимів роботи ВСП.

Для режимів холостого ходу ( $R_H = \infty$ ) при живленні збудливої котушки від ідеального генератора напруги ( $R_i = 0$ ) знайдено чутливість ВСП для фазового і амплітудного методів виділення інформаційного сигналу.

Оптимізацію параметрів ВСП можна здійснити за рахунок вибору значення коефіцієнта зв'язку між котушками, відстані між об'єктом контролю і площини збудливої котушки та її добротності.

Аналогічні результати отримані в режимі роботи ідеального генератора струму ( $Z_i = \infty$ ) і ( $Z_H = \infty$ ).

У третьому розділі розроблені математичні моделі характеристик перетворення для різноманітних конструкцій резонансних ВСП та проведено їх чисельний аналіз. Розглянуто три види схем резонансних ВСП. У першому виді, в коливальний контур включена збудлива котушка. У другому виді в коливальний

контур включена вимірювальна котушка. У третьому – обидві котушки, обмотки яких включені у пов'язані коливальні ланцюги.

Представлені математичні моделі характеристик перетворення, чутливості ВСП для різних режимів роботи ВСП з урахуванням внутрішнього опору джерела живлення і опору навантаження та способів підключення ВСП до джерела. Чутливість ВСП визначалася як похідна модуля та аргументу характеристики перетворення по параметру  $\gamma$ , який залежить від геометричних і електрофізичних параметрів об'єкту контролю. Введено поняття «добротність» ВСП ( $V_1$ ), як добуток максимального значення коефіцієнта зв'язку між котушками на максимальне значення добротності збудливої котушки. Проведений чисельний аналіз розроблених математичних моделей залежно від параметра  $\gamma$  і добротності ВСП  $V_1$ .

Для виявлення чутливості резонансних ВСП до дефектів структури тонких ферромагнітних плівок і порівняння з чутливістю раніше розглянутих аперіодичних перетворювачів проведений порівняльний аналіз досліджуваних характеристик ВСП з нерезонансними (аперіодичними) схемами ВСП.

Розроблені математичні моделі характеристик перетворення і чутливості для конструкції ВСП третього (смугового) типу. Розглянуті схеми з паралельним і послідовним живленням збудливого контуру.

Проведений чисельний аналіз вказаних вище характеристик ВСП залежно від параметра  $\gamma$ , добротності котушок і коефіцієнта зв'язку між ними.

Результати аналізу показали:

- для резонансних ВСП амплітудний метод виділення інформаційного сигналу має більш високу чутливість, ніж фазовий метод;
- включення збудливої обмотки ВСП в послідовний або паралельний коливальний контур дають однакові характеристики перетворення, якщо перший живити від генератора з малим внутрішнім опором, а другий - з великим внутрішнім опором;

Для резонансного ВСП частота живлячої напруги при контролі тонких плівок на 1-2 порядки нижче, ніж для аперіодичного ВСП.

Чутливість резонансного ВСП набагато (у  $2 V_1$  разів) перевищує чутливість аперіодичного ВСП.

Чутливість резонансного ВСП буде тим більшою, чим ближче контролювана плівка розташована до збудливої котушки, яка включена в коливальний контур.

При однакових значеннях добротності контурів і конструкції котушок смуговий ВСП за своїми характеристиками аналогічний резонансному ВСП.

**Четвертий розділ** присвячено вивченню впливу робочого проміжку ВСП на вихідний сигнал і способів зменшення цього впливу стосовно тонких плівок.

Розглянуто питання компенсації впливу зміни проміжку за допомогою розлагоджених контурів резонансних ВСП накладного типу, працюючих на двох різних частотах. Встановлено, що стосовно тонких плівок цей метод вимагає використання робочих частот більше 3400 МГц.

Вивчена ефективність зменшення впливу робочого зазору за допомогою введення в схему вимірів спеціального компенсаційного каналу. Розглянуті алгоритми обробки вимірювальних сигналів.

За результатами порівняльного аналізу різних методів рекомендовано застосовувати метод з використанням компенсаційного каналу, оскільки він дозволяє зменшити вплив проміжку при низьких частотах джерела живлення.

**П'ятий розділ** присвячено розробці методу контролю дефектності плівки, створенню і експериментальному дослідженню макету резонансного вихрострумowego дефектоскопа, що використовує вказаний метод.

За допомогою методу, раніше викладеного в роботі [26] (Соболев В. С. Накладные и экранные датчики (для контроля методом вихревых токов) / В. С. Соболев, Ю. М. Шкарлет. – Новосибирск : Наука, 1967. – 144 с.), проведений розрахунок трансформаторного екранного ВСП стосовно тонких плівок і отримано аналітичне вираження, яке дозволяє визначити напругу на

клеммах вимірювальної котушки залежно від геометричних параметрів ВСП, геометричних і електрофізичних параметрів тонкої плівки.

Виготовлені і експериментально досліджені ВСП з циліндричними і плоскими котушками. Експериментально показано, що ВСП з циліндричними котушками на відміну від ВСП з плоскими котушками має сплеск вихідної напруги, якщо плівка має пористість структури. Встановлено, що цей сплеск проявляється тільки при товщині плівки менше 0,005 мкм і тільки в певному діапазоні розмірів робочих проміжків. Встановлено, що чим вище частота збудливого струму, тим вище вихідна напруга. Результати експерименту також показали, що циліндричні котушки ВСП дозволяли виявити наявність пористості структури тонкої плівки, а плоскі котушки цього не виявляли. Наявність або відсутність дефекту плівки визначалася в цьому досвіді за допомогою растрового електронного мікроскопа (РЕМ-106И).

На підставі проведених досліджень виявлені ознаки, по яких можна судити про наявність дефектів структури плівки:

- перевищення вихідної напруги для плівки з дефектом вихідної напруги без плівки;
- зміна форми функції розподілу за наявності дефекту;
- залежність вихідної напруги плівки з дефектом від її кута нахилу в робочому зазорі ВСП.

Аналіз технічної реалізації цих ознак і результатів дослідження в цілому дозволив розробити метод контролю дефектів тонких плівок. Його суть полягає в наступному. Враховуючи, що плоскі котушки не реагують на наявність дефектів плівки їх вихідний сигнал використовується в якості опорного. З опорним сигналом порівнюється вихідний сигнал з циліндричної котушки. За наявності дефектів плівки вихідний сигнал циліндричної котушки буде більше опорного.

Для реалізації цього методу контролю була розроблена схема резонансного дефектоскопа із смуговим екранним ВСП і виконаний його реальний макет. Результати експериментальних досліджень підтвердили його ефективність.

У **висновках** наведено основні результати досліджень.

### **3. Ступінь обґрунтованості і достовірності наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації**

Оцінити позитивно ступінь обґрунтованості і достовірності наукових положень розроблених математичних моделей, методу контролю і рекомендацій, наведених в дисертації, дозволяє використання в теоретичних дослідженнях відомих положень теорії ланцюгів, використанням теорії функції комплексної змінної для ланцюгів змінного струму, вирішення крайових завдань методами математичної фізики, коректним застосуванням диференціального і інтегрального числень, чисельним методом аналізу отриманих математичних моделей, використанням апробованих методів теорії і практики електричних вимірів.

Можна стверджувати, що вихідні положення дисертації є коректними, одержані результати логічно та математично аргументовані. Результати теоретичних досліджень при розробці методу і засобу контролю дефектів тонких ферромагнітних плівок показали працездатність і впроваджені на виробництві та в навчальному процесі, про що свідчать акти впровадження.

### **4. Наукова новизна одержаних результатів**

Наукова новизна матеріалів дисертації полягає в тому, що:

1. Науково обґрунтовано запропонований резонансний двоканальний метод контролю дефектів тонких ферромагнітних плівок.
2. Науково обґрунтовано використання частоти збудливого струму ВСП в діапазоні 10-30 МГц при виявленні дефектів тонких плівок товщиною  $< 0,01$  мкм.

3. Отримали подальший розвиток (стосовно тонких неферромагнітних плівок) математичні моделі характеристик перетворення та чутливості ВСП для аперіодичних і резонансних схем з урахуванням опорів джерела живлення, збуджувальної котушки та опору навантаження вимірювальної котушки, які дозволили визначити особливості їх використання при контролі дефектів плівки.

### **5. Практичне значення**

Розроблені математичні моделі характеристик перетворення та чутливості ВСП, функціональні схеми та реальний макет вимірювальної установки, є основою для створення більш ефективних промислових приладів контролю дефектів тонких неферромагнітних плівок в різноманітних галузях промисловості.

Результати роботи прийняті до впровадження у виробництво Державного науково виробничого підприємства «Об'єднання Комунар» (м. Харків) та Державного приладобудівного заводу ім. Т. Г. Шевченко «Моноліт ХГПО» (м. Харків), а також у навчальний процес НТУ «Харківський політехнічний інститут» та Харківського національного університету радіоелектроніки.

### **6. Перспективи використання результатів роботи**

Результати проведених досліджень можуть бути застосовані в різноманітних галузях народного господарства, на підприємствах та організаціях, де проводиться розробка та виготовлення тонкоплівкових покриттів, а також пристроїв та систем контролю дефектів тонких плівок, зокрема на підприємствах радіоелектронного, машинобудівельного, енергетичного виробництва, в конструкторських бюро та проектних інститутах.

### **7. Повнота викладення результатів в опублікованих працях**

Основні результати дисертації опубліковано у 25 наукових 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.

Дисертація пройшла апробацію на 12 науково-технічних і науково-практичних конференціях, симпозіумах і семінарах, з них на 10 міжнародних. Її результати опубліковані в матеріалах конференцій.

Це дозволяє зробити висновок про ознайомлення широкого кола науковців з основними положеннями дисертаційної роботи. В опублікованих працях забезпечена повнота викладення наукових положень, висновків і рекомендацій дисертаційної роботи.

## **8. Оформлення дисертаційної роботи**

Матеріал роботи викладено за деяким виключенням послідовно, грамотно, математично коректно з використанням загальноприйнятої термінології та з дотриманням сучасних правил подання наукової інформації. Дисертацію та автореферат оформлено згідно з вимогами до оформлення науково-технічної документації. Результати дослідження в достатній мірі проілюстровані графічним матеріалом.

Автореферат ідентичний за змістом основним науковим положенням, висновкам та результатам дисертації.

Таким чином, дисертаційна робота та автореферат за змістом і оформленням відповідають вимогам ВАК України.

## **9. Зауваження за дисертацією**

До недоліків дисертації можна віднести наступне:

1. У дисертації хоча і приведені посилання на ряд робіт, але належний їх аналіз з зазначенням достоїнств, недоліків і невирішених проблем резонансних методів вихреструмової дефектоскопії не проведений.

2. У формулі (2.16) не приведені розшифровка імпедансу  $Z_{13}$  і  $Z_{23}$  і їх фізичний сенс.

3. У формулі (2.20) фігурує загальна характеристика перетворення аперіодичного екранного ВСП, яка позначена як  $H$  і вона є функцією  $F$ . При цьому функція  $F$  визначена також як загальна характеристика перетворення екранного ВСП. Проте в роботі не описаний фізичний сенс функції  $F$  і принцип її обчислення.

4. Формула (2.40) приведена без виводу, тому можливість її застосування для тонких плівок вимагає свого пояснення.

5. Дані, які наведені на рис. 2.5 і рис. 2.6, потребують пояснення чому вони не суперечать висновку, що для аперіодичних ВСП доцільно застосувати фазовий метод контролю вихідного сигналу.

6. У дисертації відзначається, що формула (3.2) отримана за умови, що в послідовному коливальному контурі при резонансі індуктивний опір котушки дорівнює її активному опору. Це може бути тільки на певній частоті і при певній індуктивності. Тому можливість її використання для різних індуктивностей збудливої котушки і резонансних частот викликає сумнів. Те ж саме відноситься до формули (3.4 1), яка впливає на характеристику перетворення резонансного ВСП другого виду і до формули (3.44). Тут відмічено, що при резонансі у паралельному коливальному контурі його опір дорівнює активному опору котушки індуктивності. Відомо, що при резонансі опір цього контуру різко зростає.

7. У розділі 5 описано експериментально виявлене явище, що на вихідну напругу плоскої котушки смугового екранного ВСП не впливає наявність дефекту тонкої плівки. В той же час фізичне обґрунтування такого важливого для принципу дії розробленого макету дефектоскопа явища в дисертації не приведене.

8. Наведені на рис. 5.4 и рис. 5.5 результати експерименту свідчать, що вихідна напруга циліндричної котушки менш ніж плоскої, а розроблений метод контролю передбачає, що це повинно бути навпаки. Чому виникла така суперечка в дисертації не пояснено.

9. При дослідженні тонких плівок в якості параметра, який характеризує електрофізичні властивості плівки прийнято використати опір квадрата поверхні (див. Слуцкая В.В. Тонкие пленки в технике СВЧ - М : Сов.радио, 1967.- 456с.). У дисертації має місце відхилення від прийнятої характеристики і використовується замість неї питома провідність матеріалу.

Однак ці зауваження не торкаються принципів положень роботи і не можуть знизити її позитивної оцінки.

### **10. Загальний висновок по дисертації**

З урахування вищенаведеного можна зробити висновок, що роботу здобувача Світличного Віталія Анатолійовича «Резонансна вихрострумова дефектоскопія тонких неферромагнітних плівок», слід вважати закінченим науковим дослідженням. В роботі отримані нові науково-обґрунтовані результати, які в сукупності вирішують важливу для народного господарства України науково-прикладну задачу підвищення якості контролю дефектів тонких неферромагнітних плівок на діелектричній основі в галузі неруйнівних методів контролю. Робота відповідає вимогам п. 9, 11, 12 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника» щодо кандидатських дисертацій, затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 24.07. 2013 р. № 567 (зі змінами), а її автор заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу речовин.

Офіційний опонент, доктор технічних наук, професор,  
професор кафедри «Метрологія та безпека життєдіяльності»  
Харківського національного  
автомобільно-дорожнього університету

В.Д. Сахацький  
8.11.15

