

**КОНЦЕПЦІЯ ПОБУДОВИ АПАРАТУРИ БАГАТОПАРА-
МЕТРОВОГО ВИХРОСТРУМОВОГО КОНТРОЛЮ**

Concept of development of Eddy current apparatus for measuring plural characteristics of a test object is presented. Said concept is based on method of constructing direct and / or inverse multi-variable nonlinear transformation function of an EC system. Processing of an EC sensor response with applied said function is guaranteed high accuracy of a test object characteristics measuring.

Keywords: *eddy current apparatus, measuring of test object characteristics, material conductivity, thickness of conductive plate and covering, lift off, nonlinear signal processing, multidimensional Eddy current sensor response, decreasing of measuring method error.*

Подано концепцію створення засобів вихрострумівих вимірювань множини параметрів оболонок, яка базується на єдиному підході до побудови багатовимірної нелінійної прямої чи / та зворотної функції перетворення системи. Нелінійна обробка відгуку вихрострумівого давача за такою функцією забезпечує високу точність багатопараметрового контролю.

Ключові слова: *вихрострумівая апаратура, вимірювання параметрів об'єкта контролю, питома електрична провідність матеріалу, товщина оболонок і покриття, зазор, нелінійна обробка сигналу, багатовимірний відгук давача, зменшення похибки методу вимірювань.*

У світовій практиці засоби вихрострумівого (ВС) неруйнівного контролю (НК) широко використовують в авіації, енергетиці, залізничному транспорті, хімічному й трубному виробництві, машинобудуванні тощо для контролю нормативних характеристик матеріалів, окремих деталей та виробів з метою діагностики їхнього технічного стану і прогнозування працездатності та ресурсу елементів конструкцій. Поліпшення точності оцінок параметрів об'єкта контролю (ОК) є важливим чинником підвищення достовірності результатів технічної діагностики. Проте зменшення похибки оцінок множини параметрів ОК є проблематичним через їх взаємозалежний нелінійний вплив на відгук вихрострумівого первинного перетворювача (ВСПП). Для вимірювань таких характеристик (*параметрів*) ОК, як питома електрична провідність (ПЕП) матеріалу, товщина оболонок (*стінка труби, тонкі плівки, фольга* та ін.), товщина захисного металевого чи діелектричного покриття, виявлення дефектів типу тріщин тощо. в апаратурі ВС контролю реалізують так званий *фазовий метод* заглушення впливу завад [1]. Як відомо, найбільший вплив на відгук ВСПП має зміна зазору між ВСПП та ОК [2], що є головним джерелом формування похибки методу в задачах двопараметрового ВС контролю. В основі фазового методу заглушення впливу зазору під час контролю одного із зазначених параметрів ОК (ПЕП, товщина чи дефекти) є розходження функцій впливу окремих параметрів і функції впливу зазору в комплексній площині відгуку ВСПП. На розв'язання задачі зменшення похибки від впливу зазору спрямовано численні технічні рішення, зокрема, в роботах [3–5]. Однак застосування фазового методу по суті реалізує лінійну обробку відгуку ВСПП, що через нелінійний вплив параметрів принципово погіршує точність і в цілому можливість селективного контролю параметрів ОК, особливо тоді, коли їх більше двох. Зокрема, при контролі корозійного зношування та деградації матеріалу обшивки літака чи стінки труб теплообмінників таких параметрів як мінімум три, а саме: товщина і ПЕП матеріалу, що підлягають контролю, та зазор, зміна якого формує заваду. Розв'язати такі задачі оцінки контрольованих параметрів з прийнятними похибками (хоча б на рівні 3...5%) сучасними засобами ВС контролю неможливо. Застосування і розвиток методів нелінійної обробки багатови-

мірного відгуку ВСПП дає змогу розв'язувати сучасні задачі багатопараметрового ВС контролю з приведеною похибкою оцінки параметрів ОК на рівні 1...2% і менше [6].

Мета роботи – визначити особливості побудови апаратурних і програмних засобів контролю множини параметрів ОК, що базується на концепції побудови моделі нелінійної багатопараметрової прямої та зворотної функції перетворення (ФП) системи ВСПП – ОК [6] і розв'язанні за моделлю ФП оберненої задачі ВС контролю.

Аналіз задачі контролю параметрів оболонки. Множина X параметрів ОК охоплює різні класи задач ВС контролю а саме: *структуроскопію, товщинометрію та дефектометрію* або *дефектоскопію*. Зазначеним задачам відповідають два класи електродинамічних задач про взаємодію ВСПП із кусково однорідними структурами [1] і структурами, що містять дефект [6]. Такі задачі розв'язано в строгій постановці, і за ними можна дослідити вплив параметрів ОК на відгук ВСПП.

У множині X параметрів, що характеризують оболонку, означимо множину *інтегральних параметрів*, що контролюють із застосуванням ВСПП *абсолютного* типу, і які становлять задачі структуроскопії та товщинометрії, а також множину *локальних параметрів*, що контролюють із застосуванням ВСПП *диференційного* типу в задачах дефектоскопії та дефектометрії. Інтегральними параметрами ОК є питома електрична провідність σ та відносна магнітна проникність μ матеріалу, товщина оболонки чи електропровідного покриття d і товщина діелектричного покриття або зазор h . Відповідно до позначень у розв'язку задачі про взаємодію ВСПП з пластиною вектор інтегральних параметрів оболонки має такий вигляд:

$$x = (x_1, x_2, x_3)^{\dot{O}} = (\beta, T, \alpha)^{\dot{O}}, \quad (1)$$

де $\beta = R \cdot \sqrt{\omega \sigma \mu \epsilon_0}$ – безрозмірний узагальнений параметр; $T = d / R$, $\alpha = h / R$ – безрозмірні величини товщини пластини та зазору; R – радіус еквівалентного витка зі струмом, або еквівалентний радіус ВСПП [1].

Загальний підхід до розв'язання оберненої задачі селективного контролю параметрів ОК базується на створенні із заданою похибкою наближення прямої та зворотної функції перетворення системи, за якою в апаратурі реалізується нелінійна обробка відгуку ВСПП.

Особливості створення засобів селективного ВС контролю. Апаратурна реалізація селективного ВС контролю базується на принципах побудови інформаційно-вимірювальних систем, що працюють у реальному часі і забезпечують обробку великих масивів даних. У структурі такої ВС системи за функціональним призначенням можна визначити такі складові:

- *підсистему* ВСПП – ОК, на виході якої під дією множини X параметрів ОК формується багатовимірний відгук

$$Y = f(\vec{O}); \quad (2)$$

- *підсистему первинної, або локальної обробки* відгуку ВСПП, в якій в дійсному просторі R^m формуються компоненти багатовимірного вектора інформаційних параметрів

$$y = (y_1, y_2, \dots, y_m)^T, \quad (3)$$

де компоненти вектора інформаційних параметрів є нелінійними функціями вектора параметрів підсистеми ВСПП – ОК дійсного простору R^n :

$$y_v = \varphi_v(x), \quad v = 1, \dots, m; \\ x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T, \quad m \geq n; \quad (4)$$

- та *підсистему глобальної обробки* багатовимірного вектора інформаційних параметрів і *відображення результатів* контролю, в якій за підмножиною B множини Y інформаційних параметрів і відомою функцією перетворення системи визначають її прообраз S у множині X параметрів об'єкта контролю

$$S = f^{-1}(B), B \subset Y, S \subset X. \quad (5)$$

Важливою умовою задачі контролю є принципове зменшення (до десятих часток відсотка) методичної похибки вимірювань параметрів ОК за умови їх нелінійного взаємозалежного впливу на відгук ВСПП. Зауважимо, що сьогодні у світовій практиці таких розробок немає.

Для досягнення малих похибок вимірювань параметрів ОК при побудові ФП підсистеми ВСПП – ОК необхідними є вимоги зменшення похибки вимірювань складових вектора інформаційних параметрів (3) та похибки наближення функції перетворення. Функція перетворення будується за поданим таблицею масивом $\{x_k, y_k\}$, $k = 1, \dots, M$ реалізацій вектора інформаційних параметрів і вектора параметрів ОК по M точках області моделювання [6]

$$y_k \in B \subset Y; x_k \in S \subset X. \quad (6)$$

Масив $\{x_k, y_k\}$, $k = 1, \dots, M$ в області побудови моделі ФП системи може бути сформованим двома способами:

- 1) за даними обчислень на основі розв'язку відповідної прямої задачі;
- 2) за даними фізичного чи натурального експерименту з використанням контрольних зрізів або фрагментів ОК.

Створення масиву $\{x_k, y_k\}$, $k = 1, \dots, M$ за даними фізичного чи натурального експерименту пов'язано з певними технічними проблемами виготовлення та атестації необхідного комплексу зрізів. Тому *першочергове значення має опрацювання моделі ФП системи за даними обчислень розв'язку прямої задачі*, що дає можливість попередньо оптимізувати вибір режимів і методу формування та відбору первинної інформації.

Як подано в [6], похибка оцінки параметрів ОК співмірна з похибками вимірювань складових вектора інформаційних параметрів та похибкою наближення ФП. У цьому разі *останні повинні бути меншими за похибку оцінки параметрів ОК*, яка задається в конкретній задачі контролю. Зауважимо, що загалом обернена задача, яка розглядається, відповідає умові коректності за А. М. Тихоновим [7] і для неї зі зменшенням похибки вхідних даних оцінка вектора параметрів ОК прямує до точного значення $x_5 \rightarrow x_7$.

Під час побудови апаратури селективного ВС контролю розв'язок оберненої задачі може бути реалізований за двома класами моделей, а саме:

◇ за моделлю *прямої функції перетворення*, за якою оцінка параметрів ОК визначається із розв'язку системи нелінійних рівнянь,

◇ та за моделлю *зворотної функції перетворення*, за якою складові вектора параметрів ОК відображаються як нелінійні функції вектора інформаційних параметрів.

Моделі прямої ФП та зворотної ФП системи будуються за єдиним підходом методами наближення функції багатьох змінних, заданої масивом $\{x_k, y_k\}$, $k = 1, \dots, M$. Для j -ї складової моделі ФП має такий загальний вид:

$$t_j^* = w_{jN}^{\hat{O}} \cdot g(v); \quad j = 1, \dots, n, \quad (7)$$

де $t_j = y_j, (t_j = x_j)$ – модель прямої (зворотної) функції перетворення системи;

$w_{jN}^{\hat{O}} = (w_{0j}, w_{1j}, \dots, w_{Nj})$ – вектор з $(N + 1)$ невідомих коефіцієнтів; N – розмірність моделі $g(v) = (1, g_1(v), \dots, g_N(v))^{\hat{O}}$ – вектор параметрів ОК ($v = \hat{o}$) чи вектор інформаційних параметрів ($v = \hat{o}$) моделі; $g_r(v), r = 1, \dots, N$ – ортогональні функції за вектором параметрів v .

Коефіцієнти моделі (7) визначають із розв'язку системи лінійних алгебраїчних рівнянь за виразом [6, 8]

$$w = (P^{\hat{O}} \cdot P)^{-1} \cdot P^{\hat{O}} \cdot g(v), \quad (8)$$

де P – матриця параметрів ОК для прямої ФП або матриця інформаційних параметрів для зворотної ФП, побудована за M точками області моделювання.

Апаратура багатопараметрового ВС контролю, побудована за прямою ФП, має містити спеціальні програмні засоби для розрахунку моделей прямої і зворотної ФП. Така апаратура зорієнтована на використання більш потужних обчислювальних засобів і має універсальний характер.

Реалізація в апаратурі контролю зворотної ФП доцільна для побудови спеціалізованих приладів селективних ВС вимірювань, для яких розрахована попередньо зворотна ФП вводиться як програма.

Розробка програмованого двочастотного / двоканального приладу для селективного ВС контролю параметрів оболонок. Під час контролю оболонок вище визначено два класи задач, які передусім різняться методами формування і відбору первинної інформації, а саме:

1) *задачі оцінки інтегральних параметрів оболонок* покриття, що відображаються вектором

$$x = (T, \beta, \alpha)^{\hat{O}}, \quad (9a)$$

2) *задачі виявлення локальних дефектів* типу тріщин, різних включень та локальної зміни питомої електричної провідності матеріалу $\Delta\beta$ та радіусу цієї зони $a^* = a/R$ в місцях зародження тріщин та оцінки їхніх головних характеристик, зокрема, за вектором параметрів

$$x = (a^*, \Delta\beta, \alpha)^{\hat{O}}. \quad (9b)$$

Ця розробка спрямована на створення системи універсального типу, що забезпечує вирішення двох класів задач контролю параметрів оболонок. Для формування в цих задачах багатовимірного вектора інформаційних параметрів підсистемою ВСПП – ОК застосовано різні підходи.

Для розв'язання задачі оцінки інтегральних параметрів оболонок найефективніше відбір первинної інформації реалізується параметричним способом на одній частоті збудження ВСПП з різних обмоток давача, які відрізняються еквівалентним радіусом. Це більшою мірою, ніж зміна частоти, впливає на зміну чутливості ВСПП за параметрами підсистеми, що важливо для збільшення точності знаходження коефіцієнтів моделі ФП за формулою (8).

Для задачі контролю локальних дефектів ефективним за впливом на амплітудно-фазові характеристики відгуку ВСПП від дефектів є відбір первинної інформації на різних частотах збудження ВСПП. Проте у ВСПП дефектоскопії можливий також двоканальний відбір первинної інформації.

У підсистемі локальної обробки багатовимірного вектора інформаційних параметрів, беручи до уваги різні підходи відбору первинної інформації, передбачається можливість як двочастотного, так і двоканального (на одній частоті) режиму первинної обробки відгуку ВСПП. У цьому разі вектор інформаційних параметрів містить чотири складові, а саме:

– при двочастотному – $2f$ режимі

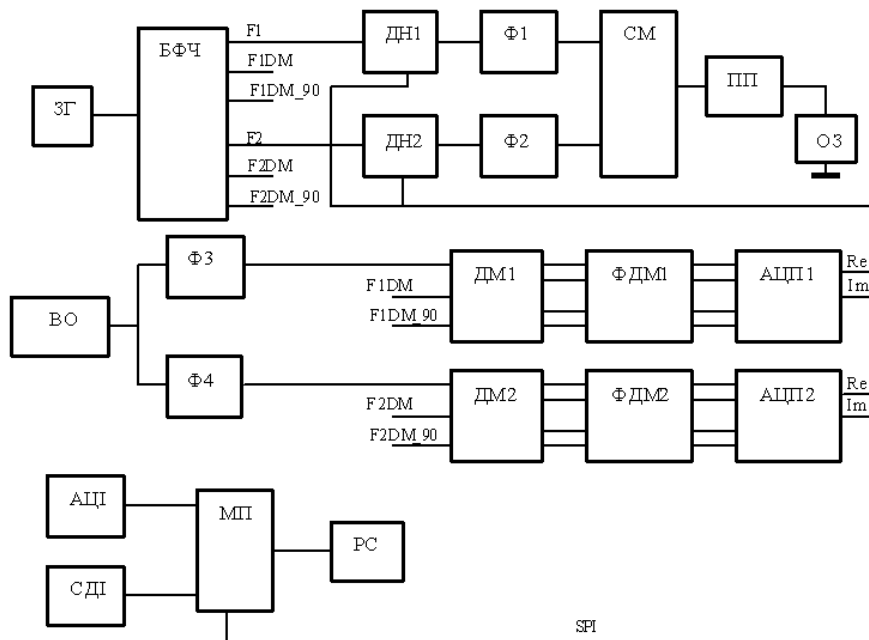
$$y_{2f} = (\text{Re}_{f1}; \text{Im}_{f1}; \text{Re}_{f2}; \text{Im}_{f2})^{\hat{O}}; \quad (10a)$$

– при двоканальному – $2c$ режимі

$$y_{2c} = (\text{Re}_{n1}; \text{Im}_{n1}; \text{Re}_{c2}; \text{Im}_{c2})^T. \quad (10b)$$

На рисунку подано функціональну схему двочастотного / двоканального вимірювального модуля для засобів селективного ВС контролю параметрів оболонок. Режими роботи системи встановлюють програмним способом. Щоб не

зменшувати швидкість підготовки даних, у системі задіяно чотири АЦП. Для забезпечення умов реалізації високої чутливості контролю, особливо в задачах дефектоскопії, коли аномальне поле не перевищує $10^{-3} \dots 10^{-4}$ відсотка від рівня нормального поля, в АЦП використано 16 розрядів.



Функціональна схема програмуємого вимірювального модуля для приладів і систем багатопараметрового вихрострумowego контролю.

Розглянемо коротко його функціонування. Задаючий генератор *ЗГ* формує частоту 40 МГц, з якої блок формування частот *БФЧ* формує всі необхідні для роботи приладу частоти: *F1* – перша робоча частота збудження, яку для задач контролю товщини оболонок та дефектоскопії, що розглядаються, вибрано такою, що дорівнює 2 кГц; *F1DM*, *F1DM_90* – частоти для керування роботою демодулятора *ДМ1* першої частоти; *F2* – друга робоча частота, яку вибрано такою, що дорівнює 20 кГц; *F2DM*, *F2DM_90* – частоти для керування роботою демодулятора *ДМ2* другої частоти. Частоти *F1* і *F2* через керовані програмно подільники напруги *ДН1* та *ДН2* подаються відповідно на фільтри *Ф1* та *Ф2*, які забезпечують виділення основних гармонік з прямокутних імпульсів робочої частоти і формування відповідних синусоїдальних сигналів. Синусоїдальні сигнали змішуються на суматорі *СМ* і через підсилювач потужності *ПП* надходять для збудження ВСПП (*ОЗ*). Сигнал, що формується на виході ВСПП (*ВО*), надходить на фільтри *Ф3* та *Ф4*, які виділяють сигнали першої та/чи другої робочої частоти з вимірювального сигналу. Виділені частоти подаються на демодулятори *ДМ1* і *ДМ2* відповідно, що забезпечують формування по кожному з каналів квадратурних складових сигналу *Re* та *Im* відповідно до формул (10), на основі яких далі проводиться аналіз наявності дефекту або глобальна обробка багатовимірного вектора інформаційних параметрів з використанням обчислювальних засобів (*РС*).

Складові *Re* та *Im* оцифровуються аналого-цифровими перетворювачами *АЦП1*, *АЦП2* після фільтрації за допомогою фільтрів *ФДМ1* та *ФДМ2*. Роботою всіх вузлів приладу керує мікропроцесор *МП* через *SPI* інтерфейс. Мікропроцесор також забезпечує попередню обробку результатів вимірювання, які відтворюються на рідкокристалевому алфавітно-цифровому індикаторі *АЦІ*, а в режимі дефектоскопії також на світлодіодному індикаторі *СДІ*. Крім цього, при заданому

рівні сигналу мікропроцесор запускає реле P , що може бути використано для запуску дефектопомітчика чи сигналізатора дефектів. Для відображення результатів поточного контролю сигнал у цифровій формі подається на PC , а також в аналоговому виді – для запису дефектограм на паперовому носії.

Для реалізації задач структуроскопії, товщинометрії та дефектоскопії на базі вимірювального модуля створено програмувальний багатофункціональний прилад “*Eddy current 2f / 2c programmable system*”. Режим роботи задається введенням спеціалізованих програм обробки сигналів і використанням оптимізованих до конкретної задачі контролю ВСПП, що спрямовано на підвищення чутливості та точності контролю. Зокрема, в приладі передбачена можливість підключення первинного перетворювача ємнісного типу для незалежного вимірювання зазору комплексно з ВСПП з метою реалізації ФП зі змінними коефіцієнтами, а також інших методів селективного контролю.

ВИСНОВКИ

На основі концепції вирішення проблеми селективних вихрострумівих вимірювань параметрів ОК, що полягає в нелінійній обробці багатовимірного відгуку вихрострумівого первинного перетворювача за спеціально побудованою багатопараметровою нелінійною моделлю функції перетворення системи ВСПП – ОК, визначено основні положення розробки апаратури ВС контролю множини параметрів об'єкта, що контролюють.

Обробка відгуку ВСПП в апаратурі може здійснюватись за двома класами моделей нелінійної багатопараметрової ФП системи ВСПП – ОК, а саме: прямої ФП та зворотної. Ці два класи ФП будуються за єдиним підходом методами наближення функції багатьох змінних, яка задається масивом значень вектора параметрів ОК і відповідних до них значень вектора інформаційних параметрів з області зміни параметрів ОК. У цьому разі похибка оцінки параметрів ОК співмірна з похибкою моделі ФП і похибкою вхідних даних і на практиці може не перевищувати десятих часток відсотка. Принципово оцінка вектора параметрів ОК прямує до точного значення, якщо похибка моделі ФП і похибка вхідних даних прямують до нуля.

Для контролю інтегральних і локальних параметрів оболонок в задачах структуроскопії, товщинометрії та дефектоскопії розроблено апаратуру “*Eddy current 2f / 2c programmable system*” з двочастотним або двоканальним, на одній частоті, відбором первинної інформації. Режими відбору та обробки інформації задають програмно із застосуванням сучасних засобів обчислювальної техніки.

1. *Неразрушающий контроль и диагностика: Справ. / Под ред. В. В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1995. – 254 с.*
2. *Гордиенко В. И., Рыбачук В. Г., Тетерко А. Я. Влияние зазора на точность фазовых вихретоковых измерителей удельной электрической проводимости // Техническая электродинамика. – 1988. – № 5. – С. 96–101.*
3. *Тетерко А. Я. Обобщенный фазовый метод увеличения чувствительности селективного вихретокового контроля // Техническая диагностика. и неразрушающий контроль. – 1997. – № 2. – С. 9–19.*
4. *Method and apparatus for measuring thickness of a test part by an eddy current sensor without contact and with lift off compensation: US Pat. 4 727 322. Int. class. G 01B 007/12. Lonchamp, Thierry, Mangenet, Gerard Y. – Publ. 02/23/1988.*
5. *Method and apparatus for measuring thickness of conductive films with the use of inductive and capacitive sensors: US Pat. 6 593 738. Int. class. G 01N 027/72, G 01B 007/10. Kesil R., Margulis D., Gershzon E. – Publ. 07/15/2003.*
6. *Тетерко А. Я., Назарчук З. Т. Селективна вихрострумова дефектоскопія. – Львів: НАН України, Фіз.-мех. інст-т ім. Г. В. Карпенка, 2004. – 248 с.*
7. *Тихонов А. И., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. – М.: Наука, 1986. – 287 с.*
8. *Лоусон Ч., Хенсон Р. Численное решение задач метода наименьших квадратов. – М.: Наука, 1986. – 232 с.*