

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"

Ду Хіан Янг

УДК 620.179

**БАГАТОПАРАМЕТРОВІ РІЗНИЦЕВІ
ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ МЕТОДИ ТА ПРИСТРОЇ
ДЛЯ КОНТРОЛЮ МАТЕРІАЛІВ І ВИРОБІВ**

Спеціальність 05.11.13 – прилади і методи контролю
та визначення складу речовин

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2003

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут", Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Себко Вадим Пантелійович,
Національний технічний університет "Харківський
політехнічний інститут", завідувач кафедру приладів
і методів неруйнівного контролю.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор,
Гурин Анатолій Григорович,
Національний технічний університет "ХПІ", завідувач
кафедру приладів і методів

кандидат технічних наук, доцент,
Невзлін Борис Ісакович,
Східноукраїнський національний університет імені
Володимира Даля,
доцент кафедри електромеханіки

Провідна установа: Національний технічний університет радіо-
електроніки кафедра метрології та вимірювальної тех-
ніки. Міністерство освіти і науки України, м. Харків

Захист відбудеться: 25.12.3003 р. 14 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради
Д64.050.09 у Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут",
за адресою:
61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету
"Харківський політехнічний інститут"

Автореферат розісланий "20".11.2003 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Горкунов Б.М.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Неруйнівний контроль магнітної проникності μ_r , питомої електричної провідності σ і геометричних параметрів виробів набув в даний час широкий розвиток. Обумовлено це тим, що за цими параметрами визначають фізико-механічні параметри, тобто міцність, твердість, температуру, наявності домінуючих домішок у матеріалі виробу. Якщо до величин μ_r і σ додати ще і вимір геометричних параметрів виробу, то можна визначити механічну напругу і прогнозувати границі текучості, міцності всередині виробу. Як відомо, електромагнітні безконтактні перетворювачі несуть у своїх вихідних сигналах багатопараметрову інформацію про магнітні, електричні і геометричні характеристики виробу. Це дає можливість безконтактно одночасно визначати декілька параметрів виробу, тобто одним і тим же перетворювачем в одній і тій же зоні контролю.

Труднощі такого контролю складаються, насамперед, у складних функціях перетворення, що зв'язують сигнали датчика з параметрами виробу. Однак, шляхом використання спеціальних прийомів і засобів широкий розвиток одержали двохпараметрові методи і пристрої абсолютного спільного контролю параметрів циліндричних виробів. Трьохпараметрові перетворювачі недостатньо були вивчені в існуючій літературі. Слід зазначити, що абсолютний метод контролю матеріалів виробів дозволяє визначати параметри, що істотно відрізняються один від одного, тобто при переході від одного до іншого виробу.

У цьому плані для збільшення розрізняювальної здатності пристроїв контролю необхідно використовувати диференціальні (різницеві) методи і засоби контролю. При цьому виникає практичний інтерес з'ясування області застосування абсолютного і диференціального багатопараметрового методів контролю матеріалів і виробів. У цьому випадку можна буде відібрати асортимент виробів, які можна буде використовувати для абсолютного і диференціального контролю. Однак, до цього часу диференціальні методи і пристрої в основному були розроблені для однопараметрових вимірювань, а багатопараметрові диференціальні методи і засоби контролю практично не були вивчені. Тому задача створення диференціальних методів і пристроїв для безконтактного визначення багатьох параметрів матеріалів і виробів, а також з'ясування меж застосування абсолютного і диференціального контролю є актуальною і своєчасною.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню задач створення абсолютних і диференціальних електромагнітних методів і пристроїв для спільного безконтактного контролю відносної магнітної проникності, питомої електричної провідності і радіуса циліндричного провідного виробу на основі трансформаторного електромагнітного перетворювача (ТЕМП).

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалася відповідно до проектів, що пройшли за конкурсами Міністерства освіти і науки України, та наказом Харківського державного політехнічного університету № 3-II від 4.01.2000 р. (держбюджетні теми М5204 і М5205) Термін виконання 2000 – 2002 р.

Мета і задачі дослідження. Це створення абсолютних і диференціальних безконтактних електромагнітних методів і перетворювачів для спільного контролю магнітної проникності, питомої електричної провідності і радіуса циліндричних провідних виробів на основі використання одночастотного і двохчастотного трансформаторних електромагнітних перетворювачів з вздовжнім магнітним полем, а також з'ясування межі використання абсолютних і диференціальних методів і пристроїв з погляду їхньої чутливості до параметрів виробів різних марок матеріалів і однієї і тієї ж марки.

Для досягнення цієї мети необхідно було розв'язати такі задачі:

- розглянути модифікації двохпараметрового електромагнітного методу спільного визначення магнітного і електричного параметрів виробу з урахуванням впливу одного параметра на інший і без такого урахування;
- розробити методику розрахунку очікуваних значень компонентів вихідних сигналів трансформаторного електромагнітного перетворювача, що працює в абсолютному і диференціальному варіантах;
- оцінити апаратні похибки двох- і трьохпараметрових вимірів магнітної проникності, електропровідності і радіуса циліндричного виробу;
- розглянути схеми установок для двох- і трьохпараметрового контролю на основі використання ТЕМП і стандартними вольтметром, амперметром, фазометром та з фазочуйним ферометром;
- дати теоретичне обґрунтування двох- і трьохпараметрового диференціального методу і ТЕМП для спільного контролю магнітної проникності, питомої електропровідності і радіуса циліндричного виробу;
- розробити методику розрахунку методичних похибок визначення магнітних, електричних параметрів виробу і його радіуса для одно- і двохчастотного диференціальних ТЕМП;
- одержати результати експериментальних абсолютних і диференціальних двох- і трьохпараметрових вимірів магнітних, електричних і геометричних величин;
- привести приклади практичного використання розроблених у дисертації методах і пристроїв для двох- і трьохпараметрового контролю в абсолютному і диференціальному варіантах.

Об'єкт дослідження – це процес дифузії зонduючого вздовжнього магнітного поля в досліджуваний і зразковий циліндричні вироби і порівняння реакцій цих виробів на сигнали ТЕМП, які обумовлені зміною кожного з трьох параметрів (магнітного, електричного і геометричного), причому таке порівняння породжує проблемну ситуацію одночасного контролю двох- і трьохпараметрового контролю досліджуваного виробу в абсолютному і диференціальному варіантах.

Предмет дослідження – створення диференціальних і абсолютних методів спільного неруйнівного контролю магнітної проникності, питомої електричної провідності і радіуса циліндричного виробу за допомогою одно- і двохчастотного ТЕМП із вздовжнім магнітним полем.

Методи дослідження базуються на використанні рівнянь Максвелла, Бесселя, закону Ома, електродинаміка суцільних середовищ, теорії електромагнітного поля, функції комплексних чисел, інтегрального числення, апарата функцій Бесселя, Кельвіна; усе це використовувалося для створення теоретичних основ прохідного ТЕМП, що працює в абсолютному і диференціальному варіантах; теорія рядів Тейлора з функцією багатьох змінних і диференціального обчислення, що використовувалися при визначенні співвідношень, які описують роботу двох- і трьохпараметрових ТЕМП, а також для оцінки апаратних і методичних похибок, обумовлених метрологічними характеристиками вимірювальних приладів і нелінійністю функцій перетворення; теорія електричних кіл реалізовувалася при розробці схем включення ТЕМП для абсолютного і диференціального контролю.

Вірогідність отриманих результатів і висновків, зроблених у дисертації підтверджується даними експериментів, проведених на конкретних виробках.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що

- запропоновано дві модифікації двохпараметрового електромагнітного методу спільного контролю магнітної проникності і питомої електричної провідності виробу з урахуванням впливу одного параметра на інший і без такого урахування;
- розроблено методику розрахунку очікуваних значень компонентів вихідних сигналів трансформаторного електромагнітного перетворювача, що працює в абсолютному і диференціальному варіантах, а також визначені межі застосування ТЕМП у зазначених варіантах його функціонування;
- розроблено схеми установок для двох- і трьохпараметрового контролю на основі використання ТЕМП працюючого зі стандартними вольтметром, амперметром, фазометром і з фазочуйним ферометром;
- дано теоретичне обґрунтування двох- і трьохпараметрового диференціального електромагнітного методу і ТЕМП для спільного контролю магнітного, електричного параметрів і радіусу циліндричного виробу;
- створено методику розрахунку методичних похибок спільного визначення магнітних, електричних параметрів виробу і його радіуса для одно- і двохчастотного диференціального ТЕМП, причому ці методичні похибки обумовлені лінійним наближенням функцій перетворення, тобто відхиленням реальних функцій від лінійних в околиці робочої точки;
- отримано результати експериментальних абсолютних і диференціальних двох- і трьохпараметрових вимірів магнітних, електричних і геометричних величин;
- приведено області практичного використання розглянутих у роботі електромагнітних методів і реалізуючих їх пристроїв для двох- і трьохпараметрового контролю в абсолютному і диференціальному варіантах.

Практичне значення отриманих результатів роботи полягає в тому, що отримані універсальні функції перетворення, знайдені співвідношення, які описують роботу ТЕМП, що використовуються для двох- і трьохпараметрового контролю, електромагнітні абсолютні і диференціальні методи спільного визначення магнітної проникності, електропровідності і радіуса циліндричного виробу, алгоритми визначення двох і трьох параметрів при абсолют-

ному і диференціальному контролю – усе це в значній мірі дозволяє успішно проектувати і розробляти установки на основі двох- і трьохпараметрового контролю. Особливе значення для практики має розроблена методика розрахунку компонентів сигналів ТЕМП, що дозволяє визначати межі зміни параметрів виробу і відповідно діапазони зміни складових сигналів ТЕМП, розрахувати чутливість ТЕМП до параметрів виробу, а також оцінити апаратурні і методичні похибки виміру двох і трьох параметрів виробу, знайти раціональні за похибками і чутливістю режими роботи ТЕМП, підібрати вимірювальні прилади для реалізації методів з трансформаторним перетворювачем.

Результати даної роботи були використані в навчальному процесі за фахом 7.090903 – прилади і системи неруйнівного контролю, а саме в курсах “Електричні, магнітні й електромагнітні види неруйнівного контролю”, “Електромагнітна сумісність”, “Фізичні основи неруйнівного контролю”, “Математичні методи в неруйнівному контролі”.

Особистий внесок здобувача полягає в наступному:

- отримано універсальні функції перетворення, що зв'язують компоненти сигналів перетворювача з параметрами виробу;
- створено дві модифікації електромагнітного методу на основі трансформаторного перетворювача;
- запропоновано методику розрахунку очікуваних значень компонентів сигналів перетворювача для двох- і трьохпараметрових методів контролю, що дозволяє раціонально вибрати вимірювальну апаратуру;
- отримано формули для розрахунку відносних похибок багатопараметрового контролю і визначені оптимальні режими роботи перетворювача, з погляду досягнення максимальної точності і чутливості контролю параметрів виробу;
- отримано формули для розрахунку методичних похибок, обумовлених відхиленням лінійного наближення функцій перетворення в робочій точці від реальних значень цих функцій;
- запропоновано диференціальний трьохпараметровий двохчастотний вихорострумовий метод і ТЕМП для спільного контролю μ_r , σ і радіусу a циліндричного провідного виробу.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи доповідалися на:

- Міжнародній науково-технічній конференції “Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика”, Алушта, Крим, 1999 р.
- Міжнародній науково-технічній конференції “Силова електроніка й енергоефективність”, Алушта, Крим, 1999 р.
- II Міжнародній науково-технічній конференції “Метрологія та вимірювальна техніка (Метрологія–99)”, Харків, 1999 р.

Публікації: основні результати дисертації опубліковані в 8 наукових працях, у тому числі 2 статті в наукових журналах, 3 статті в збірниках наукових праць і 3 у матеріалах Міжнародних науково-технічних конференцій.

Структура й обсяг дисертації. Дисертація складається із вступної частини, чотирьох розділів, висновку, списку літературних джерел і додатка. Дисертація викладена на 163 сторінках ілюстрована 16 малюнками (13 стор.), 6 таблицями (6 стор.), список літературних джерел складається з 107 найменувань (11 стор.) і додатка на 6 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступній частині відмічена актуальність теми дослідження, зв'язок роботи з науковими темами, програмами, вказана мета дисертаційної роботи та сформульовані основні задачі роботи, показана наукова новизна на практичне значення роботи, розглянуто особистий внесок автора у друкованих працях із співавторами, наведена апробація роботи та її структура.

У першому розділі розглянуті існуючі методи неруйнівного контролю.

Багато уваги приділяється електромагнітним (вихорострумовим) методам контролю, тому що ці методи дозволяють одержати багатопараметрову інформацію про магнітні, електричні, та геометричні величини, які характеризують фізичні властивості матеріалів і виробів. В цьому розділі розглянуто електромагнітні прилади і перетворювачі, які реалізують вихорострумові методи (це трансформаторні, параметричні та комбіновані перетворювачі з різною орієнтацією зондуемого виріб магнітного поля).

Наприкінці даного розділу подано основні напрямки теоретичних та експериментальних досліджень, серед яких відмічається те, що в роботі з метою підвищення чутливості перетворювачів треба вирішити питання створення диференційних багатопараметрових електромагнітних методів і пристроїв, а також з'ясувати технічні можливості диференційних і абсолютних методів контролю.

У другому розділі розглянуто теоретичні основи електромагнітного метода контролю і реалізуючого ТЕМП для багатопараметрового контролю матеріалів та виробів.

На рис. 1 показано прохідний трансформаторний електромагнітний перетворювач з провідним циліндричним виробом. ТЕМП має діелектричний каркас, на який нанесені вимірювальна ІО, і намагнічувальна НО обмотки. Довжина НО l_n , по цій обмотці протікає змінний струм I . ІО має радіус a_n . В середині ТЕМП розміщується зразок О з радіусом a і з довжиною l_0 . На рис. 1 показані магнітні потоки: Φ_1 – потік в повітряному зазорі між виробом (зразком) і вимірювальною обмоткою ТЕМП, потік Φ_2 проходить всередині зразка. На виході вимірювальної обмотки з'являється ерс E_Σ , яка обумовлена геометричною сумою магнітних потоків Φ_1 і Φ_2 .

На рис. 2 показана векторна діаграма магнітних потоків, ерс і їх фазових кутів зсуву. З рис. 2 видно, що при контролі параметрів виробу зручно вимірювані ерс E_Σ , E_0 і ϕ_0 замість вимірювання магнітних потоків.

Для контролю двох параметрів (μ_r і σ), було розроблено дві модифікації електромагнітного методу. Перший із них, за створеними функціями перетворення, що встановлюють

зв'язок параметрів циліндричного провідного виробу з компонентами сигналу ТЕМП, дозволяє визначити величини μ_r і σ . Однак, краще використовувати другу модифікацію електромагнітного методу, яка дозволяє працювати в паралельному циклі, коли величини μ_r і σ знаходяться одночасно і не залежать один від одного.

В такому разі було введено два нормованих параметри K і K_x та побудовано залежності цих параметрів від фазового кута φ_2 . Параметр K характеризує собою питому нормовану ерс на одиницю μ_r . Величина K знаходиться з формули

$$K = \frac{E_2}{E_0 \eta \mu_r} \quad (1); \quad \eta = \frac{a^2}{a_{\Pi}^2}, \quad (2)$$

де E_2 і E_0 – ерс, обумовлені магнітними потоками в виробі та зазорі; η – коефіцієнт заповнення;

Параметр K_x характеризує питому нормовану ерс ТЕМП, обумовлену магнітним потоком, який пронизує одиничну площину виробу обмеженою глибиною δ проникнення магнітного поля в зразок. Причому

$$\delta = \sqrt{2/\pi \mu_0 \mu_r f}, \quad (3)$$

де f – частота змінення магнітного поля, μ_0 – магнітна константа.

Параметр K_x виражається співвідношенням

$$K_x = K \cdot x^2 = \frac{2\pi E_2 a_{\Pi}^2 \mu_0 \sigma f}{E_0}. \quad (4)$$

На рис. 3 і 4 представлено дві універсальні функції перетворення, тобто $K=f(\varphi_2)$ і $K_x=f(\varphi_2)$, де φ_2 – фазовий кут між E_2 і E_0 (див. рис. 2). Для більш точних розрахунків в роботі ці функції подані у табличному варіанті. Слід відзначити, що узагальнений параметр x характеризує собою відношення радіуса виробу до глибини проникнення поля, тобто

$$x = \frac{a\sqrt{2}}{\delta}. \quad (5)$$

З урахуванням (3) маємо формулу для визначення параметру x

$$x = a\sqrt{2\pi \mu_0 \mu_r \sigma f} \quad (6)$$

Залежності K і K_x від φ_2 та формули (1) і (4) дають можливість створити алгоритм вимірювальних і розрахункових процедур для одночасного безконтактного контролю параметрів μ_r і σ в паралельному циклі. Для цього треба по виміряному куту φ_2 знайти, користуючись рис. 3 і 4, знайти параметри K і K_x , а далі, маючи виміри величин ерс E_2 , E_0 і частоти f з урахуванням (1) і (4) отримаємо вирази для μ_r і σ у вигляді

$$\mu_r = \frac{E_2}{E_0 \eta K}; \quad (7) \quad \sigma = \frac{K_x E_0}{2\pi E_2 \mu_0 f a_{\Pi}^2}. \quad (8)$$

В даному випадку величини μ_r і σ визначаються незалежно і саме головне параметр μ_r знаходиться з кривої $K=f(\varphi_2)$ а σ - з кривої $K_x=f(\varphi_2)$. Це значно прискорює обчислювальні операції знаходження μ_r і σ .

В розділі розглянута методика розрахунків очікуваних складових сигналів ТЕМП (E_Σ , E_0 , E_2 , φ_2 , φ , і струм I). Методика заснована на розв'язанні прямої задачі, яка формулюється так, по заданим значенням μ_r , σ , a , η , числам витків обмоток ТЕМП та іншим параметрам треба визначити вказані вихідні величини компонентів сигналів ТЕМП. Розроблена схема установки для сумісного визначення величин μ_r і σ (див. рис. 5) Схема включає до себе генератор Γ синусоїдальних сигналів, частотомір $\mathcal{C}$, амперметр A , зразковий опір R_0 , вольтметри B_1 , B_2 , B_3 , робочий РП, компенсаційний КП і опорний ОП перетворювачі, зразок $З$. КП представляє собою варіометр, його друга обмотка включена з вимірювальною обмоткою РП послідовно і назустріч. КП служить для компенсації частини ерс E_Σ , обумовленої магнітним потоком в повітряному зазорі між зразком $З$ і вимірювальною обмоткою РП (тобто E_1). Установка зібрана згідно рис. 5 дозволяє відразу знаходити ерс E_2 вольтметром B_2 , E_0 вольтметром B_3 , фазу φ_2 , струм I амперметром A і вольтметром B_1 , (при частоті $f > 1,5$ кГц), частоту f – частотоміром $\mathcal{C}$. Аналіз похибок вимірювання μ_r і σ проводився при використанні схеми рис. 5. Співвідношення для визначення відносних похибок γ_μ і γ_σ вимірювань параметрів μ_r і σ мають вигляд при довірчій ймовірності 0,95

$$\gamma_\mu = 1,1 \sqrt{\gamma_{E_2}^2 + \gamma_{E_0}^2 + C_\mu^2 \gamma_\varphi^2}; \quad (9)$$

$$\gamma_\sigma = 1,1 \sqrt{C_\mu^2 \gamma_{\varphi_2}^2 + (2\gamma_a)^2 + (\gamma_{E_2})^2 + (\gamma_{E_0})^2 + (\gamma_f)^2}, \quad (10)$$

де γ_{E_2} ; γ_0 ; γ_{φ_2} ; γ_a і γ_f – відносні похибки величин, які вказані індексами; C_μ і C_σ – коефіцієнти впливу, які визначаються, як похідні K по φ_2 і K_x по φ_2 .

На рис. 6 представлені криві залежності γ_μ і γ_σ від параметра x . З цього рисунка видно, що раціональний режим роботи ТЕМП настає при $1 \leq x \leq 3$. В такому діапазоні γ_μ і γ_σ не перевершують 1% і 2% , відповідно.

Все це показує, що абсолютним методом контролю можна користуватися тоді, коли параметри μ_r і σ відрізняються при переході від одного виробу до іншого хоча для μ_r на 10%, а для σ на 20%. Для збільшення чутливості ТЕМП (тобто його розрізнявальної здатності) треба застосовувати диференційні методи контролю. Виразивши функції перетворення $K=f(\varphi_2)$ і $K_x=f(\varphi_2)$ у вигляді рядів Тейлора і обмежившись лінійними членами ряду, а також розв'язавши систему двох рівнянь знайдемо вирази для відносних збільшень μ_r і σ досліджуваного зразка ДЗ по відношенню до μ_{rc} і σ_c стандартного зразка СЗ. При цьому збільшення $\delta\mu_r/\mu_{rc}$ і $\delta\sigma/\sigma_c$ визначають з формул

$$\frac{\delta\mu_r}{\mu_{rc}} = \frac{\delta E_2}{E_{2c}} - A_1 \delta\varphi_2, \quad (12) \quad \frac{\delta\sigma}{\sigma_c} = -\frac{\delta E_2}{E_{2c}} + B_1 \delta\varphi_2, \quad (13)$$

де індекс „с” відноситься до стандартного зразка, $\delta E_2/E_{2c}$; δE_2 і $\delta \varphi_2$ визначаються, як $\delta E_2 = E_2 - E_{2c}$; $\delta \varphi_2 = \varphi_2 - \varphi_{2c}$, E_2 і φ_2 мають відношення до ерс і фази ТЕМП з досліджуваним зразком, постійні коефіцієнти A_1 і B_1 знаходять з похідних K по φ , та x по φ .

Розкладаючи універсальні функції перетворення $K=f(\varphi_2)$ і $K_x=f(\varphi_2)$ в ряди Тейлора, обмежуючись квадратичними членами рядів, знайдемо методичні похибки $\beta_{\mu n}$ і $\beta_{\sigma n}$, як відношення квадратичних членів до лінійних в складових рядів, при цьому величини $\beta_{\mu n}$ і $\beta_{\sigma n}$ обумовлені нелінійністю функцій перетворення мають вигляд:

$$\beta_{\mu n} = \frac{\frac{1}{2} \frac{d^2 K}{d\varphi_2^2} \cdot \delta \varphi_2^2}{K(\varphi_2) \pm \frac{dK}{d\varphi_2} \cdot \delta \varphi_2}; \quad (14) \quad \beta_{\sigma n} = \frac{\frac{1}{2} \frac{d^2 K_x}{d\varphi_2^2} \cdot \delta \varphi_2^2}{K_x(\varphi_2) \pm \frac{dK_x}{d\varphi_2} \cdot \delta \varphi_2}, \quad (15)$$

де $\frac{d^2 K}{d\varphi_2^2}$, $\frac{d^2 K_x}{d\varphi_2^2}$ - другі похідні параметрів K і K_x по φ_2 , знаки „+” і „-” характеризу-

ють приращення $\delta \varphi_2$ справа і зліва від робочої точки φ_{2c} .

На рис. 7 представлена залежність середнього збільшення δx_{cp} з обох сторін, зліва і справа робочої точки від максимальної методичної похибки $\beta_{\max}$. Як слідує з рис. 7 при середньому відхиленні параметра x дослідного зразка, який дорівнює 0,4, тобто $\delta x_{cp} = 0,4$, максимальна похибка нелінійності $\beta_{\max} = 1,6 \%$.

На рис. 8 показана схема включення ТЕМП для диференційного контролю параметрів циліндричного виробу. В схемі використано два ідентичних прохідних ТЕМП (робочого РП і компенсаційного КП). Намагнічувальні обмотки цих перетворювачів включаються послідовно – узгоджено і з'єднуються з генератором Г синусоїдальних сигналів. В РП розміщені дослідний зразок ДЗ, а в КП – стандартний зразок СЗ. Одна пара вимірювальних обмоток РП і КП включається послідовно-назустріч. Сигнал δE_2 вимірюється вольтметром V_1 . Вольтметр V_2 фіксує ерс E_{2c} , пов'язану з наявністю в КП СО. Сигнали з другої пари вимірювальних обмоток подаються на входи фазометра Ф. Вольтметр V_1 і фазометр визначають збільшення δE_2 і $\delta \varphi_2$.

В третьому розділі розглядається трьохпараметрові електромагнітні методи (абсолютні і диференційні) безконтактного контролю радіусу a , магнітної проникненості μ_r та електропровідності σ . Ці методи і пристрої застосовуються в практиці тоді, коли радіус не відомий (виріб покритий шаром ізоляції, окислів, радіус змінюється повздовж довжини виробу та інші). В цьому розділі досліджуються дві модифікації трьохпараметрового методу. Перша модифікація заснована на визначенні спочатку радіусу a шляхом підвищення частоти поля до того моменту, коли ерс E_Σ буде приблизно дорівнюватись ерс E_1 . Такий випадок дозволяє визначити радіус a . А значення μ_r і σ визначають з двохпараметрового методу, описаного в розділі 2 (на низькій частоті f). Друга модифікація виконується на двох близьких частотах поля. Для реалізації на практиці абсолютного методу використовується схема установки (див. рис. 5). В цьому випадку використовуються три функції

$$K_1=f(z_1); \quad (16) \quad K_2=f(z_2); \quad (17) \quad x_1=f(z_1), \quad (18)$$

де індекси „1” і „2” мають відношення до частот f_1 і f_2 ; $z_1 = \operatorname{tg} \varphi_{21}$. Розв’язавши рівняння (16)-(18) з урахуванням табличного завдання цих функцій і вимірювальних величин $E_{\Sigma 1}$, $E_{\Sigma 2}$, φ_{01} , φ_{02} , E_{01} , E_{02} та інших, знайдемо значення a , μ_r і σ .

В диференційному варіанті система рівнянь (16)-(18) розкладається в ряди Тейлора в лінійному наближенні і приймає вид

$$\frac{\delta K_1}{K_1} = \left(\frac{\partial K}{\partial z} \right)_1 \frac{z_1}{K_1} \frac{\delta z_1}{z_1}; \quad (19) \quad \frac{\delta K_2}{K_2} = \left(\frac{\partial K}{\partial z} \right)_2 \frac{z_2}{K_2} \frac{\delta z_2}{z_2}; \quad (20)$$

$$\frac{\delta z_1}{z_1} = \frac{dz_1}{dx_1} \frac{x_1}{z_1} \frac{\delta x}{x}. \quad (21)$$

З другого боку параметри K_1 , K_2 і z_1 можна записати, як

$$K_1 = \frac{E_{21}}{E_{01} \eta \mu_r} = \frac{\sqrt{A_{\Sigma 1}^2 + 1 - \eta^2 - 2 \eta \cos \varphi_{01}}}{\eta \mu_r}; \quad (22)$$

$$K_2 = \frac{E_{22}}{E_{02} \eta \mu_r} = \frac{\sqrt{A_{\Sigma 2}^2 + 1 - \eta^2 - 2 \eta \cos \varphi_{02}}}{\eta \mu_r}; \quad (23)$$

$$z_1 = \operatorname{tg} \varphi = \frac{A_{\Sigma 1} \cos \varphi_{01}}{A_{\Sigma 1} \cos \varphi_{01} - 1 - \eta}, \quad (24)$$

де E_{21} і E_{22} – ерс, пов’язані з магнітними потоками в середині виробу на частотах f_1 і f_2 . $A_{\Sigma 1}$ і $A_{\Sigma 2}$ – нормовані ерс ТЕМП для двох частот, причому $A_{\Sigma 1} = E_{\Sigma 1}/E_{01}$; $A_{\Sigma 2} = E_{\Sigma 2}/E_{02}$. Розкладаючи в ряди Тейлора вирази (22)-(24) в лінійному наближенні відносно всіх аргументів функцій K_1 , K_2 , z_1 і прирівняв вирази для $\delta K_1/K_1$, $\delta K_2/K_2$, і $\delta z_1/z_1$ відносних збільшень значеннями, після розв’язання системи лінійних рівнянь одержимо вирази для визначення відносних збільшень $\delta a/a_c$, $\delta \mu_r/\mu_{r0}$ і $\delta \sigma/\sigma_c$ у вигляді

$$\frac{\delta a}{a_0} = \frac{L_1 D_1 - B_{(1)} \frac{\delta E_{\Sigma 1}}{E_{\Sigma 1}} - L_2 D_2 - B_{(2)} \frac{\delta E_{\Sigma 2}}{E_{\Sigma 2}} + L_1 G_1 - C_1 \delta \varphi_{01} - L_2 G_2 - C_2 \delta \varphi_{02}}{2 \left[A_{(1)} - L_1 K_1 - A_{(2)} - L_2 K_2 \right]}; \quad (25)$$

$$\frac{\delta \mu_r}{\mu_{r0}} = 2 \frac{A_{(1)} - L_1 K_1}{A_{(1)} - L_1 K_1} \frac{\delta a}{a_0} - \frac{L_1 D_1 - B_{(1)} \frac{\delta E_{\Sigma 1}}{E_{\Sigma 1}} + L_1 G_1 - C_1 \delta \varphi_{01}}{A_{(1)} - L_1 K_1}; \quad (26)$$

$$\frac{\delta \sigma}{\sigma} = F_1 D_1 \frac{\delta E_{\Sigma 1}}{E_{\Sigma 1}} + F_1 G_1 \delta \varphi_{01} - 2 \frac{1 - F_1 K_1}{A_{(1)} - L_1 K_1} \frac{\delta a}{a_0} - \frac{\delta \mu_r}{\mu_{r0}}. \quad (27)$$

Параметри $A(1)$, $A(2)$, $B(1)$, $B(2)$, $C(1)$, $C(2)$, $D(1)$, $D(2)$, $G(1)$, $G(2)$, $K(1)$, $K(2)$, $L(1)$, $L(2)$, $F(1)$, $F(2)$, які входять у (25)-(27) визначаються похідними.

Аналіз методичних похибок показує, що максимальні похибки, які обумовлені відносними відхиленнями параметрів досліджуваного зразка від параметрів стандартного зразка з'являються коли змінюються всі три параметра з однаковими знаками (зростають чи зменшуються); при зміні одного або двох параметрів методичні похибки з'являються не тільки у тих параметрах, які змінюються, а і у тих, що не змінюються, правда, у останніх похибки значно менше.

Четвертий розділ присвячений питанням використання абсолютних і диференціальних методів в практиці контролю виробів. Показано, що розглянуті в роботі методи і пристрої були використані для визначення механічних напруг, деформацій, зусиль, ваги вантажів, тиску, моментів та інших величин. Установлено зв'язок граничних значень механічних напруг (границя текучості та міцності) з магнітною проникністю і електропровідністю. Це дозволяє прогнозувати граничні значення міцності матеріалу виробу без його зруйнування. Показана можливість застосування

трьохпараметрового методу для контролю механічних напруг при навантаженні елементів армірованих залізобетонних та інших конструкцій в процесі їх виготовлення і експлуатації. За допомогою трьохпараметрових методів і пристроїв, створених в роботі, розроблена методика надійної розбраковки матеріалів за їх марками та їх радіусами. Вияснено вплив механічних напруг і термічних обробок на величини магнітної проникності слабо феромагнітних сталей.

ВИСНОВКИ

Таким чином, у даній дисертаційній роботі вирішена важлива задача створення одночастотного двохпараметрового абсолютного і диференціального електромагнітних методів для спільного контролю магнітної проникності та електропровідності циліндричного виробу і розробка двохчастотних електромагнітних методів і перетворювачів для спільного визначення радіуса, магнітної проникності та електропровідності циліндричного виробу в абсолютному і диференціальному варіантах. Спільне використання цих методів дозволяє в істотній мірі розширити області використання неруйнівного контролю виробів різноманітного асортименту. Коротко зупинимося на основних результатах роботи:

1. На основі введених універсальних функцій перетворення, що зв'язують компоненти сигналів перетворювача з параметрами виробу, створені дві модифікації електромагнітного методу стосовно до трансформаторного електромагнітного перетворювача. Перша модифікація використовує залежність питомої нормованої ерс і її фазового кута перетворювача від узагальненого параметра. Друга модифікація заснована на отриманих у роботі залежності питомої нормованої ерс спеціального нормованого параметра перетворювача від фазового кута.

2. Запропоновано методику розрахунків очікуваних значень компонентів сигналів двох- і трьохпараметрового перетворювача, що дозволяє визначити межі зміни параметрів виробу, а також вибрати вимірювальну апаратуру.

3. Розглянуто дві модифікації диференціального двохпараметрового контролю електромагнітних величин, що відповідають двом модифікаціям абсолютного вихрострумового

методу. Отримано співвідношення в лінійному наближенні, що описують роботу диференціального електромагнітного перетворювача при використанні двох модифікацій. Розроблено два типи установок, що працюють у диференціальному та абсолютному варіантах.

4. Отримано співвідношення для розрахунку методичних похибок, обумовлених відхиленням лінійного наближення універсальних функцій перетворення в робочій точці від реальних значень цих функцій.

5. Розроблений двохчастотний електромагнітний метод контролю циліндричних металевих виробів, який полягає в тому, що на високій частоті визначають абсолютне значення радіуса виробу, а на низькій частоті – магнітну проникність і електропровідність.

6. Розроблено диференціальний трьохпараметровий двохчастотний вихрострумний метод і трансформаторний перетворювач для спільного контролю магнітних, електричних параметрів і радіуса циліндричного металевих виробів. Розглянуто теорію роботи такого перетворювача в лінійному наближенні та отримані співвідношення для визначення відносних збільшень радіуса, магнітної проникності і питомій електропровідності циліндричного досліджуваного виробу в порівнянні з тими ж параметрами стандартного зразка. Виходячи зі знайдених у диференціальному варіанті змін параметрів, визначаються абсолютні значення трьох параметрів виробу.

7. На конкретному компенсаційному перетворювачі зі стандартним зразком і на розроблених установках із трансформаторним перетворювачем знайдені прості співвідношення для визначення відносних змін радіуса, магнітної проникності і електропровідності виробу за результатами ерс і їхніх фаз у перетворювачі, що працює на двох частотах магнітного поля.

8. Приведено приклади практичного використання розроблених у дисертації методів, перетворювачів і установок для визначення механічних напруг, деформацій і їхніх граничних значень, для контролю тиску газу і рідини в трубах, ваги вантажів, зусиль і моментів, що скручують вал, та інші.

Список опублікованих праць за темою дисертації:

1. Себко В.П., Ду Хіан Янг. Дифференциальный двухпараметровый электромагнитный преобразователь // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ. – 1999. – Вып. 24. – С. 78–84.

Автором запропоновано двохпараметровий метод контролю магнітної проникності та питомої електропровідності у диференціальному варіанті.

2. Ду Хіан Янг. Дифференциальный трансформаторный электромагнитный преобразователь для контроля магнитных и электрических параметров изделий // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ. – 1999. – Вып. 37. – С. 61–63.

Автором розглянута робота трансформаторного диференціального перетворювача в лінійному наближенні визначення електромагнітних параметрів виробу.

3. Себко В.П., Горкунов Б.М., Ду Хиан Янг. Электромагнитный многопараметровый преобразователь в дифференциальном варианте // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ. – 2000. – Вып. 113. – С. 341–343.

Автор запропонував використання диференціального електромагнітного перетворювача для контролю трьох параметрів циліндричних виробів.

4. Себко В.П., Горкунов Б.М., Ду Хиан Янг. К расчету ожидаемых значений компонентов сигналов многопараметрового электромагнитного преобразователя // Вестник Национального технического университета “ХПИ”. – Харьков: НТУ “ХПИ”. – 2002. – № 9, т. 4. – С. 115–118.

Автор провів основні розрахунки компонентів сигналу трьохпараметрового електромагнітного трансформаторного перетворювача з циліндричним провідним виробом.

5. Себко В.П., Горкунов Б.М., Ду Хиан Янг. Погрешности трехпараметровых измерений электромагнитным преобразователем // Вестник Восточно-Украинского национального университета – Луганск: ВУНУ – 2002. – № 8. – С. 217–223.

Автор запропонував ввести універсальні функції перетворення, що пов'язують електричні параметри перетворювача з електромагнітними та геометричними параметрами зразка.

6. Себко В.П., Ду Хиан Янг. Дифференциальный многопараметровый трансформаторный электромагнитный преобразователь // Технічна електроніка: Тематичний випуск. – Ч.2. – 1999. – С. 43–46.

Автор провів експериментальні дослідження багатопараметрового електромагнітного перетворювача в широкому частотному діапазоні зондуючого поля.

7. Себко В.П., Ду Хиан Янг. Дифференциальный многопараметровый контроль цилиндрических изделий // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ. – 1999. – Вып. 61. – С. 343–344.

Автор розглянув двох частотний електромагнітний перетворювач для контролю магнітних електричних та геометричних параметрів виробу.

8. Горкунов Б.М., Сомхиева О.С., Ду Хиан Янг. Дифференциальный электромагнитный преобразователь с цилиндрическим проводящим изделием // Збірник наукових праць II Міжнародної науково-технічної конференції “Метрологія та вимірювальна техніка (Метрологія 99)”. – Харків: ХДНДІМ. – 1999. – Т.1. – С. 220–223.

Автором запропоновано для підвищення розрізняльної здатності пристрій з використанням трансформаторного перетворювача.

АНОТАЦІЇ

Ду Хіан Янг. Багатопараметрові різницеві електромагнітні методи і пристрої для контролю матеріалів і виробів. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу речовин. – Національний технічний університет „Харківський політехнічний інститут”, Харків, 2003.

Дисертація присвячена вирішенню задач створення абсолютних і диференціальних електромагнітних методів в пристрої для спільного безконтактного контролю відносної магнітної проникності, питомої електричної провідності і радіуса циліндричних струмопровідних виробів на основі трансформаторного електромагнітного методу спільного контролю відносної магнітної проникності і питомої електричної провідності виробу з урахуванням впливу одного параметра на інший і без такого урахування. Дано теоретичне обґрунтування двох- і трьохпараметрового диференціального електромагнітного методу і трансформаторного перетворювача для спільного контролю магнітних, електричних та геометричних параметрів циліндричного виробу. Створено методику розрахунку методичних похибок спільного контролю магнітних, електричних і геометричних параметрів виробу для одно- і двох- частотного диференціального перетворювача, причому ці методичні похибки обумовлені лінійним наближенням функцій перетворення.

Ключові слова: кабель, ізоляція, часткова ємність, тангенс кута діелектричних втрат, сукупні вимірювання, генератор випадкових чисел, функція розподілу

Ду Хіан Янг. Многопараметровые разностные электромагнитные методы и устройства для контроля материалов и изделий. – Рукопись.

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 – приборы и методы контроля и определения состава веществ. – Национальный технический университет „Харьковский политехнический институт”, Харьков, 2003.

Диссертация посвящена созданию абсолютных и дифференциальных электромагнитных методов и устройств для совместного бесконтактного контроля относительной магнитной проницаемости, удельной электрической проводимости и радиуса цилиндрических токопроводящих изделий на основе трансформаторного электромагнитного преобразователя.

Рассчитаны относительные погрешности совместных двух- и трехпараметровых измерений. Показано, что рациональные режимы работы преобразователя при контроле электромагнитных величин наступают в диапазоне изменения обобщенного параметра от 1 до 3. Радиус изделия находят при достижении высоких частот зондирующего поля. Установлено, что численные значения относительных погрешностей определения радиуса, магнитной проницаемости и удельной электрической проводимости составляют 0,64 %, 1 % и 2 %, соответственно.

Рассмотрены две модификации дифференциального двухпараметрового контроля электромагнитных величин, соответствующих двум модификациям абсолютного вихретокового метода. Получены соотношения в линейном приближении, описывающие работу дифференциального электромагнитного преобразователя при использовании двух модификаций. Описаны два типа установок, работающих в дифференциальном и абсолютном вариантах.

Получены соотношения для расчета методических погрешностей, обусловленных отклонением линейного приближения универсальных функций преобразования в рабочей точке от реальных значений этих функций.

Разработан двухчастотный электромагнитный метод контроля цилиндрических проводящих изделий, который состоит в том, что на высокой частоте определяют абсолютное значение радиуса изделия, а на низкой частоте – магнитную проницаемость и электропроводность. Найдены уточненные соотношения для определения радиуса изделия.

Разработан дифференциальный трехпараметровый двухчастотный вихретоковый метод и трансформаторный преобразователь для совместного контроля магнитных, электрических параметров и радиуса цилиндрического проводящего изделия. Рассмотрена теория работы такого преобразователя в линейном приближении и получены соотношения для определения относительных приращений радиуса, магнитной проницаемости и удельной электрической проводимости цилиндрического исследуемого изделия по сравнению с теми же параметрами стандартного образца. Исходя из найденных в дифференциальном варианте относительных приращений, определяются и абсолютные значения трех параметров изделия.

Приведены примеры практического использования разработанных в диссертации методов, преобразователей и установок для определения механических напряжений, деформаций и их предельных значений, для контроля давлений газа и жидкости в трубах, веса грузов, усилий и скручивающих вал моментов; для надежной разбраковки цилиндрических изделий по трем параметрам (магнитным, электрическим и радиусам) изделий; для выяснения воздействия механических и термических обработок на величину магнитной проницаемости слабоферромагнитных сталей, применяемых в конструкциях магнитных систем крупных физических установок, энергетического оборудования, в приборостроении и др.

В работе разработано две модификации двухпараметрового электромагнитного метода совместного контроля относительной магнитной проницаемости и удельной электрической проводимости изделия с учётом влияния одного параметра на другой и без такого учёта. Приведено теоретическое обоснование двух- и трёхпараметрового дифференциального электромагнитного метода и трансформаторного преобразователя для совместного контроля магнитных, электрических и геометрических параметров цилиндрических изделий. Создана методика расчёта методических погрешностей совместного контроля магнитных, электрических и геометрических параметров изделия для одно- и двухчастотного дифференциального преобразователя, причём эти методические погрешности обусловлены линейными приближениями функций преобразования.

Ключевые слова: дифференциальные многопараметровые методы контроля; удельная электрическая проводимость; относительная магнитная проницаемость; методические погрешности контроля.

Du Hian Iang. Manyparameter difference electromagnetic methods and devices for monitoring materials and articles. - Manuscript.

Thesis on competition of a scientific degree of the candidate of engineering science on a speciality 05.11.13 - gears both techniques and definitions of a composition of substances. - National engineering university „Kharkov polytechnical institute”, Kharkov, 2003.

The thesis is devoted to making of terrain clearance and differential electromagnetic methods and devices for share noncontact monitoring of a relative magnetic permeability, specific electrical conductance and radius of cylindrical current-conducting articles on the basis of the transformer electromagnetic transformer.

In operation two modifications twoparameter of an electromagnetic method of share monitoring of a relative magnetic permeability and specific electrical conductance of an article designed in view of influence of one parameter on another and without such registration. The theoretical justification two and threeparameter of a differential electromagnetic method and transformer for share monitoring of magnetic, electrical and geometrical parameters of cylindrical articles is reduced. The procedure of calculation of methodical errors of share monitoring of magnetic, electrical and geometrical parameters of an article for one and double-frequency differential transformer is generated, and these methodical errors are stipulated by linear approximations of functions of transformation.

Keywords: differential manyparameter techniques; a specific electrical conductance; a relative magnetic permeability; methodical errors of monitoring.