

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"

Тюпа Ігор Васильович

УДК 620.179.14

**КОНТАКТНИЙ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИЙ МЕТОД
ТА ПЕРЕТВОРЮВАЧ ДЛЯ КОНТРОЛЮ
ПАРАМЕТРІВ ТРУБЧАТИХ ВИРОБІВ**

спеціальність 05.11.13 – прилади і методи контролю
та визначення складу речовин

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Харків – 2002

Дисертацією є рукопис.

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

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Себко Вадим Пантелійович,
Національний технічний університет "ХПІ",
завідувач кафедри приладів та методів
неруйнівного контролю.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, доцент
Гурин Анатолій Григорович,
Національний технічний університет "ХПІ",
завідувач кафедри електроізоляційної і
кабельної техніки.

доктор технічних наук, професор
Гальченко Володимир Яковлевич,
Луганський державний медичний університет,
завідувач кафедри медичної кібернетики, біофізики
і медичної апаратури.

Провідна установа: Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут", кафедра приладів і систем
неруйнівного контролю, Міністерство
освіти і науки України, м. Київ.

Захист відбудеться: 14.11.2002 р. о 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 "4" листопада 2002 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Горкунов Б.М.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Розвиток сучасного виробництва нерозривно зв'язано з створенням і удосконаленням методів і засобів неруйнівного контролю різних об'єктів енергетичного і машинобудівного виробництва. Підвищення якості і надійності машинобудівної продукції можливо за умови безупинного удосконалювання технології виробництва і 100% контролю якості виробів. Контроль якості продукції в машинобудуванні характеризується достатньою складністю і дорожнечою, тому задача введення масового контролю параметрів виробів без істотного підвищення їхньої собівартості є актуальною і своєчасною. Значне місце серед асортименту машинобудівної продукції займають циліндричні провідні вироби (прутки, осі, труби, дроти і т.д.). Основними характеристиками, що несуть інформацію про стан кристалічної структури досліджуваних об'єктів, є відносна магнітна проникність m_r і питома електрична провідність s . З цих величин можна судити про хімічний склад матеріалу, про ступінь його чистоти, про склад вуглецю і кремнію в конструкційних і електротехнічних сталях, температуру, механічні напруження та інш.

Особливе місце серед великої кількості методів і засобів контролю електропровідних виробів займають вихорострумові методи і пристрої. В існуючій літературі описана велика кількість електромагнітних методів і реалізуючих їхніх перетворювачів для безконтактного контролю електромагнітних параметрів циліндричних провідних виробів. Однак, в основному при контролі труб і інших циліндричних виробів безконтактними методами в подовжнім магнітному полі перетворювачі й об'єкти дослідження повинні мати достатні довжини, для того, щоб забезпечити однорідність за довжиною магнітного полюси і, мабуть, саме головне, істотно зменшити вплив розмагнічу вального фактора, що розмагнічує, на результати контролю. Тому, для того, щоб позбутися від зазначених недоліків безконтактного контролю феромагнітних труб необхідно відшукувати нові способи і прийоми контролю таких виробів у рамках електромагнітного методу. Для цього дуже зручним вимірювальним інструментом може бути використаний контактний електромагнітний перетворювач, у якого виріб з подовжнім струмом уже є самим перетворювачем. До дійсного моменту не були розроблені досить ефективні методи і пристрої для контролю магнітних, електричних і геометричних параметрів циліндричних труб різноманітного асортименту. Проте, потреби промисловості настійно вимагали широкого розвитку методів і засобів контролю трубчастих виробів у нафтогазовидобувній промисловості, у комунальних міських господарствах, на електричних станціях і теплоцентралях, на транспорті і на інших підприємствах.

Дисертаційна робота присвячена важливій темі – створенню контактного електромагнітного методу і реалізуючих його пристроїв для спільного контролю магнітних і електричних параметрів циліндричних трубчастих виробів, електромагнітне поле в яких створюється шляхом пропускання вздовж осі трубчатого виробу змінного електричного струму і вимірювання його амплітуди, фази, а також падіння напруги на виробі.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертація виконувалася відповідно до проекту, що пройшов по конкурс Міністерства освіти і науки України (шифр 48/16), Наказ Міністерства освіти і науки України № 37 від 13.02.1997 р.; шифр цієї теми в Харківському державному політехнічному університеті

М 5202 (Наказ ХГПУ № 377 – II від 17.04.1997 г).

В даний час робота проводиться згідно з держбюджетною темою М 5205, включеними в тематичні плани Міністерства освіти і науки України, наказ ХДПУ №3-II від 4.01.2000 р.

Мета і задачі дослідження – розробка контактної електромагнітного методу і реалізуючих його пристроїв для спільного контролю відносної магнітної проникності і питомої електричної провідності трубчастих виробів. Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити наступні задачі:

- одержати співвідношення, що описують розподіл напруженості електричного і магнітного полів у трубчастому зразку з перемінним струмом, що протікає по ньому;
- ввести спеціальні нормовані параметри – нормований опір R_H і нормовану індуктивність L_H ;
- одержати універсальні функції перетворення, що зв'язують параметри трубчатого виробу із сигналами контактної електромагнітного перетворювача;
- розробити контактний метод і алгоритм вимірювальних і розрахункових операцій по визначенню відносної магнітної проникності m_r і питомої електричної провідності s феромагнітних труб;
- створити електричні схеми установок для двохпараметрового контролю трубчастих виробів, заснованої на використанні розробленого контактної електромагнітного перетворювача;
- на розглянутих установках отримати експериментальні результати по визначенню магнітних і електричних параметрів феромагнітних трубчастих виробів;
- запропонувати методику розрахунків очікуваних значень компонентів сигналів контактної електромагнітного перетворювача і визначити межі контролю електричних і магнітних величин;
- одержати співвідношення для розрахунків похибок спільних вимірів відносної магнітної проникності і питомої електричної провідності трубчастих виробів;
- побудувати залежності чутливості перетворювача, відносних похибок двохпараметрових вимірів m_r і s від узагальненого параметра;
- розробити функціональну схему автоматизованої системи контролю електромагнітних параметрів феромагнітних трубчастих виробів.

Об'єкт дослідження – це процес проникнення зонду чого електромагнітного полю в феромагнітний трубчастий провідний виріб, яке створюється шляхом пропускання вздовж довжини трубчатого виробу змінного електричного току, і одержання сигналів контактної електромагнітного перетворювача, які містять інформацію о електромагнітних параметрах виробу.

Предмет дослідження – метод і реалізуючи його пристрої для сумісного визначення відносної магнітної проникності і питомої електричної провідності феромагнітних трубчастих і суцільних виробів.

Методи дослідження засновані на рівняннях Максвелла, Беселя, законі Ома, електродинаміці суцільних середовищ, теорії електромагнітного полючи, функцій комплексних чисел, інтегрального числення й апараті спеціальних функцій, що використовувалися для розробки теоретичних основ контактної електромагнітного перетворювача для контролю відносної магнітної проникності й електропровідності трубчастих виробів; теорія степеневих рядів і диференціального числення реалізувалися при визначенні співвідношень, що описують роботу контактної електромагнітного перетворювача, а також для оцінки апаратних і методичних похибок, викликаних точнісними характеристиками вимірювальних приладів і

нелінійністю функцій перетворення; теорія електричних ланцюгів застосовувалася при створенні схем включення контактного електромагнітного перетворювача.

Наукова новизна одержаних результатів роботи полягає в тому, що:

- отримані співвідношення, що описують розподіл електромагнітного поля в трубчастому виробі з змінним повздовжнім струмом, що протікає по ньому;
- визначені універсальні функції перетворення, які зв'язують параметри виробу із сигналами контактного електромагнітного перетворювача;
- розроблено електромагнітний контактний метод і алгоритм вимірювальних і розрахункових операцій з метою сумісного контролю магнітних і електричних параметрів виробу;
- розроблені електричні схеми установок для сумісного контролю відносної магнітної проникності і питомої електричної провідності труб, заснованих на використанні контактного електромагнітного перетворювачів;
- на розглянутих установках отримані результати вимірів магнітних і електричних параметрів феромагнітних трубчатих виробів;
- запропонована методика розрахунків очікуваних значень компонентів сигналів контактного електромагнітного перетворювача;
- отримані співвідношення для оцінки похибок спільного виміру m_r і s трубчатих виробів;
- на основі аналізу похибок і чутливості перетворювача до параметрів трубчатого виробу визначені раціональні за цими характеристиками режими роботи перетворювача;
- розроблена функціональна схема автоматизованої установки для контролю електромагнітних параметрів трубчатих виробів різноманітного асортименту.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що: знайдені співвідношення, що описують універсальні функції перетворення, алгоритми розрахункових і вимірювальних операцій, методи і методики розрахунків перетворювача й оцінок чутливості і похибок двохпараметрового контролю дозволяють проектувати установки на основі контактного електромагнітного перетворювача для контролю магнітних і електричних параметрів трубчатих виробів, визначити метрологічні характеристики цих установок (частотний діапазон, межі вимірів вимірюваних величин і відповідні їм діапазони змін параметрів виробів), підібрати вимірювальні прилади, установити раціональні по похибкам і чутливостям режими роботи перетворювача з циліндричним трубчатим виробом.

Результати дисертаційної роботи, а саме, отримані співвідношення, що описують розподіл електромагнітного поля в перетині трубчастого провідника зі струмом, розроблені методики проведення вимірювальних і розрахункових операцій по визначенню відносної магнітної проникності і питомої електричної провідності трубчатих зразків, вимірювальні установки що реалізують дані методи, у тому числі автоматизовані, відкривають широкі можливості спрощення процедури контролю електромагнітних параметрів виробів і зв'язаних з ними інших фізико-механічних характеристик (міцність, твердість, температура та інш.).

Розробки даної дисертаційної роботи були впроваджені в Національному науковому центрі "Харківський фізико-технічний інститут", в Харківському державному центрі стандартизації, метрології і сертифікації, та в учбовому процесі кафедри "Прилади та методи неруйнівного контролю" Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" в курсах "Магнітні методи неруйнівного контролю", "Електромагнітні методи неруйнівного контролю", "Надійність, контроль та діагностика".

Особистий внесок здобувача полягає в наступному:

- отримані універсальні функції перетворення контактного електромагнітного перетворювача для контролю параметрів трубчатих виробів;
- на основі одержаних функцій розроблено метод контролю магнітних і електричних параметрів феромагнітних трубчатих виробів різного асортименту;
- розроблена електрична схема включення контактної електромагнітної перетворювача для двохпараметрового контролю, отримані співвідношення для оцінки похибок і чутливостей перетворювача;
- одержані основні співвідношення для розрахунку очікуваних вихідних електричних сигналів контактної електромагнітної перетворювача, що дозволяють визначити межі зміни електричних і магнітних величин, а також вибрати вимірювальну апаратуру для реалізації двохпараметрового контролю параметрів труби в широкому діапазоні їх параметрів.

Апробація результатів дисертації.

Основні результати роботи доповідалися на:

- III Міжнародної науково-технічної конференції "Метрологическое обеспечение в области электрических, магнитных и радиоизмерений" (Метрологія в електроніці 2001), м. Харків, 2000 р.
- Міжнародна науково-практична конференція "Наука и социальные проблемы общества: человек, техника, технология, окружающая среда" (MicroCAD-2001), м. Харків, 2001 р.

Публікації: основні результати дисертації опубліковані в 9 наукових працях, у тому числі 4 статті в наукових журналах, 3 статті в збірнику наукових праць і 2 у матеріалах міжнародних науково-технічних конференціях.

Структура й обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків та семи додатків. Повний обсяг дисертації складає 166 сторінок: 16 ілюстрацій на 16 стор.; 4 таблиці на 4 стор.; 7 додатків на 46 стор.; 126 найменувань використаних літературних джерел на 12 стор.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступній частині обґрунтована актуальність теми дисертації, показано зв'язок роботи з науковими держбюджетними темами, включеними в координаційний план Міністерства освіти і науки України, сформульовані мета й основні задачі теоретичних і експериментальних досліджень, наукова новизна і практична цінність отриманих результатів. Приведено дані про впровадження результатів роботи, особистий внесок автора і публікації. Показано, що методи і пристрої контролю трубчатих виробів недостатньо розвинені.

У першому розділі розглянуті існуючі методи і пристрої для контролю фізико-механічних параметрів матеріалів і виробів.

Велика увага приділена існуючим методам і засобам контролю електромагнітних параметрів електропровідних виробів. Розглянуто основні типи електромагнітних перетворювачів і особливості електромагнітного контролю суцільних і трубчастих струмопровідних зразків у зовнішніх електромагнітних полях, створюваних різними типами електромагнітних перетворювачів.

Відзначено достоїнства електромагнітних методів і засобів для спільного контролю подовжньої магнітної проникності і поперечної питомої електричної провідності суцільних виробів і зразків у повздовжніх змінних магнітних полях. Встановлено недоліки таких методів і пристроїв, які мають ускладнення конструкцій перетворювача і його схем включення. У зв'язку з цими недоліками безконтактних

перетворювачів з повздовжнім полем намічений пошук шляхів і перетворювача іншого типу, вільних від зазначених недоліків.

В другому розділі розглянута теорія роботи контактного електромагнітного перетворювача для спільного контролю поперечної відносної магнітної проникності m_r і повздовжньої питомої електричної провідності s трубчатих виробів. На рис. 1. показано прямолінійний трубчатий провідник у циліндричній системі координат (r, j, z) довжиною l , зовнішнім радіусом a , з товщиною стінки d , по якому протікає змінний струм I з циклічною частотою ω . Зондуючий виріб струм протікає уздовж осі трубчастого виробу і збігається по напрямку з координатою z . Зондувальний струм створює електромагнітне поле, одне зі складових якого – магнітне поле з напруженістю H_j усередині провідного виробу (у стінці труби), і поле з напруженістю $H_{jвн}$ - зовні труби. Напруженість електромагнітного поля у внутрішній порожнині труби будемо вважати рівним нулю. З двома складовими полями H_j і $H_{jвн}$ зв'язані внутрішня L_i і зовнішня L_e індуктивності провідника зі струмом. Зовнішня індуктивність є постійним параметром, що залежить тільки від геометричних розмірів провідного виробу. Внутрішня індуктивність залежить не тільки від геометричних розмірів зразка, але залежить і від магнітних властивостей матеріалу виробу, а також і від частоти зондуючого виріб змінного струму.

У розглянутому випадку, з ростом частоти змінного в часі струму, електромагнітне поле в стінці трубчастого виробу концентрується поблизу поверхні, а тим самим змінюється площа ефективного перерізу провідника, що у свою чергу приводить до зменшення внутрішнього магнітного потоку Φ_i і відповідно внутрішній індуктивності L_i . Разом з тим, з ростом частоти зростає активний опір трубчастого виробу R через зменшення зони провідності. Опір R і внутрішня індуктивність L_i тісно зв'язані з параметрами провідного виробу, а саме, з відносною магнітною проникністю m_r , питомою електричною провідністю s , радіусом виробу a , і його довжиною l . Таким чином, при необхідності визначення електричних і магнітних параметрів виробу можна скласти систему рівнянь, що легко пов'язують вимірювані параметри виробу, а саме, активний опір R і реактивний опір ωL з електричними і магнітними параметрами виробу: відносною магнітною проникністю m_r і питомою електричною провідністю s

$$\begin{cases} R = f_1(m_r, s, \sigma) \\ L_i = f_2(m_r, s) \end{cases}$$

(1)

Для рішення даної задачі треба було знайти рішення рівнянь Максвелла для трубчастого провідника з змінним електричним струмом, що протікає по ньому. Відомо, що комплексний опір провідника зі струмом визначається виразом

$$Z = -i\omega L_e + \frac{l}{2\pi a} \frac{E_z(a)}{H_\varphi(a)}$$

(2)

де ω – кругова частота струму, L_e – зовнішня частина індуктивності трубчастого виробу, E_z і H_φ напруженості електричного і магнітного поля в зразку. Комплексний опір трубчастого виробу можна подати у виді

$$Z = R_i - i\omega(L_e + L_i)$$

(3)

де R і Li – опір і внутрішня індуктивність, що залежить від частоти. Були введені спеціальні параметри – нормований опір R_H і нормовану індуктивність L_H , і одержано вирази, що однозначно зв'язують активний опір R і індуктивність трубчастого виробу L з відносною магнітною проникністю m_r і питомою електричною провідністю s матеріалу труби, причому

$$L_H = \frac{4}{x} \frac{AA_1 + BB_1}{A_1^2 + B_1^2} M_1$$

(4)

$$R_H = x \left(1 - \frac{d}{2a} \right) \frac{d}{a} \frac{AB_1 - BA_1}{A_1^2 + B_1^2}$$

(5)

$$A = \text{ber}x\text{hei}'x\left(1 - \frac{d}{a}\right) + \text{beixher}'x\left(1 - \frac{d}{a}\right) - \text{heixber}'x\left(1 - \frac{d}{a}\right) - \text{herxbei}'x\left(1 - \frac{d}{a}\right)$$

(6)

$$B = \text{beixhei}'x\left(1 - \frac{d}{a}\right) - \text{berxher}'x\left(1 - \frac{d}{a}\right) - \text{heixbei}'x\left(1 - \frac{d}{a}\right) + \text{herxber}'x\left(1 - \frac{d}{a}\right)$$

(7)

$$A_1 = \text{ber}'x\text{hei}'x\left(1 - \frac{d}{a}\right) + \text{bei}'x\text{her}'x\left(1 - \frac{d}{a}\right) - \text{hei}'x\text{ber}'x\left(1 - \frac{d}{a}\right) - \text{her}'x\text{bei}'x\left(1 - \frac{d}{a}\right)$$

(8)

$$B_1 = \text{bei}'x\text{hei}'x\left(1 - \frac{d}{a}\right) - \text{ber}'x\text{her}'x\left(1 - \frac{d}{a}\right) - \text{hei}'x\text{bei}'x\left(1 - \frac{d}{a}\right) + \text{her}'x\text{ber}'x\left(1 - \frac{d}{a}\right)$$

(9)

$$M_1 = \frac{\frac{d}{a} \sqrt{1 - d/2a}}{\frac{d}{a} \left(-2 + \frac{d}{a} - 6 \frac{d^2}{a^2} + \frac{3d^3}{2a^3} \right) - 2 \left(1 - \frac{d}{a} \right) \ln \left(1 - \frac{d}{a} \right)}$$

(10)

де d - товщина стінки труби, x – узагальнений параметр, $x = a \sqrt{\mu_0 \mu_r \sigma \omega}$; коефіцієнти A, A_1, B, B_1 виражені через *ber*-, *bei*-, *her*-, *hei*- функції Кельвіна, коефіцієнт M_1 зв'язаний з геометричними параметрами виробу. Знак "штрих" позначає похідну відповідної функції за аргументом x . Величини R_H і L_H пронормовані на опір R_0 і індуктивність L_0 по постійному струмі. На рис. 2 представлені графічні залежності нормованого опору $R_H(a)$ і нормованої індуктивності $L_H(b)$ від узагальненого параметра x . З графіків a, b видно, що характер поведінки нормованих параметрів R_H і L_H істотно залежить від співвідношення d/a , тобто відносини товщини стінки труби d до зовнішнього радіуса труби a . Цифрами 1 – 5 позначені

на графіках криві нормованих параметрів, побудовані відповідно для відносин товщини стінки труби до радіуса самої труби рівні $d/a = 1; 0,5; 0,3; 0,2; 0,1$.

Використовуючи розкладання функцій Бесселя в ряд Тейлора, вважаючи, що $d/a < 1$ (низькі частоти) були отримані формули для нормованих параметрів R_H і L_H для виробів з $d/a \leq 0,5$, тобто

$$L_H = \frac{L}{\mu_r L_0} = \frac{1 + \frac{1}{252} \left(\frac{d}{a}\right)^4 x^4}{1 + \frac{1}{90} \left(\frac{d}{a}\right)^4 x^4},$$

(11)

$$R_H = \frac{R}{R_0} = \frac{1 + \frac{1}{60} \left(1 + 2 \frac{(d/a)/(1-d/a) + \ln(1-d/a)}{((d/a)/(1-d/a))^2}\right) \left(\frac{d}{a}\right)^4 x^4}{1 + \frac{1}{90} \left(\frac{d}{a}\right)^4 x^4},$$

(12)

Рис. 2 – Графіки залежностей нормованого опору $R_H(a)$ і нормованої індуктивності L_H . (б).

Використовуючи розкладання функцій Бесселя для умов $d/a \leq 1$ і $\frac{d}{\delta} > \frac{d/a}{4(1-d/a)}$ (високі частоти) були отримані формули для визначення нормованих параметрів R_H і L_H за формулами у вигляді

$$R_H = \frac{R}{R_0} = \frac{M_2 x \left(1 + \frac{1-d/a}{4a} \sqrt{2} \frac{1-d/a}{x}\right)}{2\sqrt{2} \left(1 + \frac{3\sqrt{2}}{8} \frac{d/a}{(1-d/a)x}\right)}$$

(13)

$$L_H = \frac{2\sqrt{2}}{x} M_1$$

(14)

$$M_2 = 2 \frac{d}{a} \left(1 - \frac{d}{2a}\right)$$

де

У цьому ж розділі розглянуті диференціальні S_R і S_L чутливості контактного електромагнітного перетворювача КЕМП до узагальненого параметра x . Чутливості S_R і S_L знайдені шляхом диференціювання функцій $R_H = f(x)$ і $L_H = f(x)$ за x у кожній їх точці. Показано, що з зменшенням величини d/a , зона найбільшої чутливості нормованих функцій перетворення S_{RH} і S_{LH} зміщується в зону більших x , інакше в зону високих частот f зондуючого електромагнітного поля.

Описана методика визначення питомої електричної провідності та відносної магнітної проникності на основі використання КЕМП. Суть таких вимірів полягає в тому, що уздовж циліндричного провідного виробу при фіксованій частоті f пропускають струм I , вимірюють на кінцях виробу падіння напруги U_{Π} і фазовий кут φ між I і U_{Π} . Далі визначають опір виробу при частоті f по формулі

$$R = \frac{U_{\Pi}}{I} \cos \varphi$$

(15)

Потім знаходять нормоване значення цього опору

$$R_n = R/R_0,$$

(16)

де R_0 - опір виробу постійному струму, тобто при $f = 0$.

Після цього, виходячи з залежності R_n від узагальненого параметра x для заданого d/a , знаходять x , тобто

$$x = a \sqrt{2\pi \mu_0 \mu_r \sigma f}$$

(17)

де μ_0 - магнітна постійна, a - радіус виробу.

Маючи x і встановлені залежності питомої нормованої внутрішньої індуктивності L_n виробу від x визначають величину L_n . З іншого боку, формула для L_n має вид

$$L_n = \frac{L_i}{\mu_r L_0}$$

(18)

де L_i і L_0 - внутрішні індуктивності виробу при частотах $f \neq 0$ і $f = 0$,

$$L_0 = \frac{\mu_0 l d}{16\pi a} \frac{\left(-2 + 7\frac{d}{a} - 6\left(\frac{d}{a}\right)^2 + \frac{3}{2}\left(\frac{d}{a}\right)^3 \right) - 2\left(1 - \frac{d}{a}\right)^4 \ln\left(1 - \frac{d}{a}\right)}{\left(\frac{d}{a}\right)^2 \left(1 - \frac{d}{2a}\right)^2}$$

(19)

$$L_i = L - L_e,$$

(20)

де L - сумарна індуктивність, обумовлена магнітними потоками; L_e - індуктивність, зв'язаний із зовнішнім магнітним потоком. Величину L_e розраховують з відомої формули

$$L_e = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{a} - 1 + \frac{4a}{\pi l} - \frac{a^2}{2l^2} \right)$$

(21)

Сумарну індуктивність L визначають із виразу

$$L = U_n \sin \varphi / (2\pi I f)$$

(22)

Завдяки співвідношенням (18) - (22) визначають m_r з співвідношення

$$\mu_r = \frac{8\pi \left[\frac{U_n \sin \varphi}{2\pi f I} - \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{a} - 1 + \frac{4a}{\pi l} - \frac{a^2}{2l^2} \right) \right]}{\mu_0 L_n l}$$

(23)

Величину σ визначають з урахуванням (17), виходячи з формули

$$\sigma = x^2 / (2\pi a^2 \mu_0 \mu_r f)$$

(24)

У третьому розділі розглянута методика розрахунку очікуваних значень сигналів КЕМП, включеного в різні схеми установок. Суть цієї методики полягає в тому, що за заданим магнітним (m_r), електричним (s), геометричним (a і l) параметрам виробу і значенню струму I при фіксованих частотах цього струму, знаходять значення x , а потім, використовуючи універсальні функції перетворення $R_{iH} = f(x)$ і $L_{iH} = f(x)$, за знайденим параметром x визначають величини R_{iH} і L_{iH} . А далі враховуючи R_0 і L_0 і

заданим значенням m_r знаходять $R_i = R_{iH} R_0$ і $L_i = L_{iH} \mu_r L_0$. Додавши до L_i розраховане значення L_e , одержують повну індуктивність L . Вирішивши систему рівнянь, визначають падіння напруги U_{Π} і кут φ , тобто очікувані компоненти електричних сигналів установки на основі КЕМП. Запропоновано установки на основі КЕМП за схемою вольтметра, амперметра, фазометра і за мостовою схемою (рис. 3 а, б).

Рис. 3 – Схеми вимірювальних установок (ВАФ (а) і мостова (б)).

Установка містить у собі генератор Γ синусоїдальних сигналів, осцилограф O , досліджуваний об'єкт РП і одночасно робочий контактний електромагнітний перетворювач (на мостовій схемі R_1 і L_1). У схемі використовується амперметр перемінного струму A , два вольтметри V_1 і V_2 , і фазометр Φ . Осцилограф O призначений для контролю форми намагнічувального струму, амперметр A служить для контролю величини намагнічуючого струму, що протікає повздовж досліджуваного зразка до частот 1500 Гц. Для цієї же мети у схемі використовується вольтметр V_1 , що вимірює падіння напруги на зразковому опорі R_1 при частотах струму вище 1500 Гц. Вольтметр V_2 призначений для виміру значення падіння напруги на зразку. Частотомір Ψ використовується для контролю частоти намагнічувального струму а фазометр Φ , який призначений для виміру фазового кута зсуву між струмом і падінням напруги на об'єкті, для чого використовується представлена на схемі котушка взаємодуктивності КВ. Остання являє собою повітряний трансформатор. Напруга на вторинній обмотці котушки взаємодуктивності КВ є

опорним для фазометра Φ .

Приведено результати контролю параметрів трубчастих виробів, для різних типорозмірів і трубчастих виробів з різних марок сталей.

Розглянуто методику оцінки похибок виміру параметрів m_T і s циліндричного виробу контактним перетворювачем. Отримано співвідношення для розрахунків відносних похибок g_{m_T} і g_s виміру m_T і s виробу для обох схем. Знайдено раціональні за похибками і чутливістю межі роботи КЕМП.

У четвертому розділі отримано основні співвідношення, які описують роботу автоматизованої установки на основі контактної електромагнітної перетворювача для контролю параметрів трубчастих виробів на основі наближених функцій нормованих параметрів R_H і L_H

На основі однокристалльної ЕОМ розроблена функціональна схема автоматизованого пристрою з використанням схеми вольтметра, амперметра, фазометра. Проведено дослідження автоматизованої установки і визначено, що результати контролю електромагнітних параметрів трубчастих зразків за допомогою автоматизованої установки і результати контролю відносної магнітної проникності і питомої електричної провідності тих же зразків контрольними методами розходяться не більше ніж на 2-4%.

Установка, крім вимірів m_T і s , може визначати раціональний режим роботи КЕМП, обчислювати відносні похибки вимірів m_T і s , а також робити обробку багаторазових вимірів m_T і s .

ВИСНОВКИ

Таким чином, у даній роботі вирішені важливі для практики багатопараметрового контролю задачі, що полягають в створенні контактної електромагнітної методу і реалізуючих його пристроїв для спільного визначення магнітної проникності і питомої електричної провідності суцільних циліндричних виробів і залежних від цих параметрів інших фізико-механічних величин. Коротко підсумуємо основні результати даної роботи.

1. На основі рівнянь Максвелла і закону Ома розглянута теорія роботи контактної електромагнітної перетворювача. Отримано точні співвідношення для повного електричного опору, активного електричного опору й індуктивності циліндричного провідника з подовжнім струмом.
2. Уведено для різних товщин стінок труби спеціальні нормовані параметри R_H і L_H , тобто електричний опір циліндричного виробу при будь-якій частоті зміни струму, нормований на опір виробу при нульовій частоті, і внутрішня індуктивність виробу на будь-якій частоті струму, віднесена до індуктивності на нульовій частоті виробу до його магнітної проникності. Отримано наближені формули для нормованих параметрів R_H і L_H як для малих, так і великих величин узагальненого параметра x . Показано, що за допомогою отриманих наближених формул для $d/a \leq 0,5$ можна розраховувати нормовані параметри R_H і L_H у всьому діапазоні зміни узагальненого параметра x .
3. Побудовано для різних товщин стінок розрахункові універсальні функції перетворення у виді графіків і таблиць, що зв'язують нормовані значення електричного опору і внутрішньої індуктивності виробу від узагальненого параметра x , що включає в себе радіус, відносну магнітну проникність, питому електричну провідність матеріалу виробу і частоту.

4. Отримано універсальні залежності диференціальної резистивної і індуктивної чутливості перетворювача від узагальненого параметра x при різних товщинах стінок, побудовані графічні залежності цих параметрів, що дозволяє вибрати оптимальні режими роботи перетворювача.
5. Розроблено контактний електромагнітний метод сумісного контролю магнітної проникності і подовжньої питомої електричної провідності матеріалу циліндричної виробів, що дозволяє контролювати різні вироби (довгі, короткі, які мають і на мають доступ до своїх кінців або поверхні).
6. Розроблено схеми включення контактного електромагнітного перетворювача для контролю двох параметрів виробів, тобто схеми з використанням вольтметра, амперметра і фазометра і моста змінного струму. Приведено результати експериментів на конкретних зразках з визначенням магнітних і електричних параметрів.
7. Показано, що похибки визначення m_f і s в схемі моста складають 2% і 3% відповідно, що істотно нижче, ніж у схемі з використанням амперметра, вольтметра, фазометру.
8. Створено методику розрахунків очікуваних значень контактного електромагнітного перетворювача. Ця методика полягає в тому, що за заданим значенням магнітної проникності, електропровідності і розмірам виробу, значенням постійного струму і фіксованих частот знаходять для різних зразків, що істотно відрізняються своїми параметрами, величини падінь напруг і їхніх фаз. Завдяки цьому устанавлюються межі зміни параметрів виробу і відповідних їм сигналів перетворювача, знаходять чутливості перетворювача і визначають сприятливі за похибками вимірів режими роботи контактного перетворювача.
9. Розроблено методику розрахунку похибок спільного виміру магнітної проникності і питомої електричної провідності контактним електромагнітним методом. Отримано співвідношення для оцінки чисельних значень зазначених похибок вимірів.
10. Розроблено функціональну схему автоматизованої системи, що реалізує електромагнітний контактний метод. Система може спільно і роздільно визначати магнітні й електричні параметри виробу, як готові, так і в процесі їхнього виготовлення. Останнє особливо важливо при відпрацьовуванні технології виробництва матеріалів і виробів. Система також здійснює автоматичне розбраковування матеріалів виробів за їх марками і проводить розрахунки похибок виміру двох параметрів.
11. До достоїнств розробленого контактного методу варто віднести можливість одночасного контролю двох параметрів виробу; вимір поперечної магнітної проникності і подовжньої питомої електричної провідності, що дозволяє в сполученні з безконтактними методами і засобами контролю з'ясувати анізотропію зазначених параметрів усередині виробу; спрощення вимірювальних операцій при визначенні двох параметрів виробів; а також істотне спрощення схеми реалізації електромагнітного двопараметрового методу контролю, оскільки виріб зі струмом у ньому в даному випадку є одночасно і самим перетворювачем.

Список опублікованих праць за темою дисертації:

1. Себко В.П., Тюпа И.В. К теории работы контактного электромагнитного преобразователя для контроля параметров трубчатых изделий // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ, 1999. - Вып. 24. - С. 109-113.

Автором розроблена теорія роботи контактного електромагнітного перетворювача для контролю відносної магнітної проникності і питомої електричної провідності і введені спеціальні універсальні функції перетворення.

2. Тюпа И.В. К расчету ожидаемых значений сигналов контактного двухпараметрового электромагнитного преобразователя // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ, 1999. - Вып. 37. - С. 44-46.

Автором запропонована методика розрахунку очікуваних сигналів контактного електромагнітного перетворювача з метою створення установки для контролю параметрів трубчастих виробів.

3. Себко В.П., Тюпа И.В. Контактный метод определения электромагнитных параметров трубчатых изделий // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ, 2000. - Вып. 92. - С. 84-86.

Автором запропоновані наближені універсальні функції перетворення контактного електромагнітного перетворювача.

4. Себко В.П., Тюпа И.В. Анализ погрешностей контактного электромагнитного преобразователя для контроля трубчатых изделий // Український метрологічний журнал. – 2000. - Вип. 3. – С. 17-19.

Особисто проведений аналіз похибок контактного електромагнітного перетворювача для контролю параметрів трубчастих виробів і отримані вираження для розрахунку цих погрешностей.

5. Себко В.П, Тюпа И.В. Электромагнитный метод совместного контроля параметров трубчатых изделий. Метрологічне забезпечення в галузі електричних, магнітних та радіовимірювань (Метрологія в електроніці - 2000): Зб. наук. пр. – Харків: ХДНДІМ, 2000. – Т.1. - С. 86 – 88.

Автором запропонована схема включення контактного електромагнітного перетворювача для контролю відносної магнітної проникності і питомої електричної провідності труб з використанням вольтметра, амперметра і фазометра й отримані результати експериментальних досліджень.

6. Себко В.П, Тюпа И.В. Контактный электромагнитный метод и реализующая его установка для контроля параметров трубчатых изделий // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2000. - №4. - С. 113-118.

Автором проведений аналіз чутливості контактного електромагнітного перетворювача і запропонована методика проведення вимірювальних і розрахункових операцій з погляду оптимального по чутливості режиму роботи контактного електромагнітного перетворювача.

7. Себко В.П, Тюпа И.В. Двухпараметровый электромагнитный метод контроля магнитной проницаемости и электропроводности трубчатых изделий // Український метрологічний журнал. – - 2001. - Вип. 2. – С. 12-14.

Особисто автором уведені модифіковані універсальні функції перетворення контактного електромагнітного перетворювача з нормуванням на опір і індуктивність трубчастого виробу по постійному струмі.

8. Себко В.П, Тюпа И.В. Установка для контроля параметров ферромагнитных трубчатых изделий на основе контактного электромагнитного преобразователя.

Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье: Сб. наук. пр. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2001. - Вып. 5. - С. 162-165.

Автором запропонована мостова схема включення контактного електромагнітного перетворювача і отримані результати експериментальних досліджень.

9. Себко В.П, Тюпа И.В. Автоматизация контактного метода определения электромагнитных параметров трубчатых изделий // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. - 2001, № 2. - С. 104-106.

Особисто запропонований алгоритм вимірювальних і розрахункових операцій і

розроблена автоматизована установка для контролю електромагнітних параметрів трубчастих виробів.

АНОТАЦІЇ

Тюпа Ігор Васильович. Контактний електромагнітний метод і перетворювач для контролю параметрів трубчастих 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, 2002.

Дисертація присвячена створенню контактних електромагнітних методів і реалізуючих пристроїв для сумісного визначення магнітної проникності і питомої електричної провідності циліндричних виробів. Розроблено метод одночасного контролю електромагнітних параметрів і схеми включення перетворювача. Створено методіку розрахунків очікуваних значень сигналів перетворювача. Розроблено функціональну схему автоматизованої системи, що реалізує електромагнітний контактний метод.

Основні результати роботи знайшли практичне застосування у ННЦ

"Харківський фізико-технічний інститут", Харківський центр стандартизації, метрології та сертифікації та в учбовому процесі НТУ "ХПІ".

Ключові слова: контактний електромагнітний перетворювач, чутливість універсальних функцій перетворення, магнітна проникність, питома електрична провідність, похибки.

Тюпа Игорь Васильевич. Контактный электромагнитный метод и преобразователь для контроля параметров трубчатых изделий. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 – приборы и методы контроля и определения состава веществ. – Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", Харьков, 2002.

Диссертация посвящена созданию контактного электромагнитного метода и реализующих его устройств для совместного определения магнитной проницаемости и удельной электрической проводимости сплошных цилиндрических изделий..

В работе рассмотрена теория работы контактного электромагнитного преобразователя.

Получены точные и приближенные выражения для определения нормированных значений активного электрического сопротивления и внутренней удельной индуктивности трубчатого проводника с продольным током. Найден универсальные зависимости дифференциальных резистивной и индуктивной чувствительности КЭМП к обобщенному параметру, и, следовательно, и к электромагнитным параметрам.

Разработан контактный электромагнитный метод одновременного контроля поперечной магнитной проницаемости и продольной удельной электрической проводимости материала трубчатых изделий.

Разработаны схемы включения контактного преобразователя для контроля двух параметров изделий. Это схемы установок с использованием вольтметра, амперметра, фазометра и схема моста переменного тока. Основными достоинствами этих схем являются простота контактного преобразователя, который по сути состоит из самого изделия с током и контактных тоководов (одна пара токовых и другая пара потенциальных). Отсюда простота схемных реализаций. Приведены результаты экспериментального определения магнитных и электрических параметров на установках, собранных по двум указанным схемам.

Создана методика расчетов ожидаемых значений сигналов КЭМП, т.е. падений

напряжений на образце, токов через него и сдвигов по фазе между током и падением напряжения.

Разработана методика расчета погрешностей совместного измерения поперечной магнитной проницаемости и продольной удельной электрической проводимости контактным методом. Получены соотношения для оценки численных значений указанных погрешностей двухпараметровых измерений. Показано, что в рациональном диапазоне изменения x , относительные погрешности измерения магнитной проницаемости и электропроводности не превышают 2% и 3% соответственно.

Разработана функциональная схема автоматизированной установки, реализующей электромагнитный контактный метод. Установка может совместно и раздельно определять магнитные и электрические параметры изделия, как готовые, так и в процессе их изготовления. Последнее особенно важно при отработке технологии производства материалов и изделий.

Основные результаты работы нашли практическое применение на ННЦ "Харьковский физико-технический институт", Харьковский центр стандартизации, метрологии и сертификации и в учебном процессе Национального технического университета "Харьковский политехнический институт".

Ключевые слова: контактный электромагнитный преобразователь, чувствительность универсальных функций преобразования, магнитная проницаемость, удельная электрическая проводимость, погрешности.

Тyupa Igor Vasilevich. A contact electromagnetic method and transformer for control of tubes. - Manuscript.

Thesis on competition of a scientific degree of the candidate of engineering science on a speciality 05.11.13 – devices and methods of control and definition of a composition of materials. – National technical university "Kharkov polytechnical institute", Kharkov, 2002.

The thesis is devoted to making of contact electromagnetic methods and devices for share definition of a magnetic permeability and specific electrical conductance of cylindrical samples. The method of simultaneous control of electromagnetic parameters and schemas of incorporation of the transformer is designed. The procedure of calculations of anticipated values of cues of the transducer is observed. The functional diagram of the automatic system of electromagnetic contact control is designed.

The main results of work have found practical application on National Scientific centre "Kharkov physical-technique institute", Kharkov centre of standards, metrology and certification, National technical university "Kharkiv polytechnical institute".

Key words: contact electromagnetic transducer, sensitivity of universal functions of transforming, magnetic permeability, specific electrical conductance, errors.