

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

**Мохаммад Махмуд Мохаммад Дарвіш**

УДК 620.179.14

**БАГАТОПАРАМЕТРОВИЙ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИЙ МЕТОД  
ТА ПЕРЕТВОРЮВАЧ, ЗАСНОВАНИЙ НА КОМП'ЮТЕРНИХ  
УНІВЕРСАЛЬНИХ ФУНКЦІЯХ ПЕРЕТВОРЕННЯ**

**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, м. Харків

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор,  
Себко Вадим Пантелійович,  
Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, завідувач кафедри приладів та методів неруйнівного контролю.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
Піротті Євген Леонідович,  
Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, професор кафедри комп’ютерної математики і математичного моделювання;

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

Провідна установа: Харківський національний університет радіоелектроніки, кафедра метрології та вимірювальної техніки, Міністерства освіти і науки України, м. Харків.

Захист відбудеться “ 13 ” \_\_ 11 \_\_ 2003 р. о 14 год. 30 хв. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.09 у Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут” за адресою:

61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”

Автореферат розісланий “ 11 ” \_\_ 10 \_\_ 2003 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

Горкунов Б.М.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** На даний період достатньо детально розроблені методи і засоби визначення магнітних параметрів і характеристик виробів і зразків в постійних магнітних полях. Для цієї мети в основному використовувались шихтовані зразки, набрані з тонких пластин або в вигляді стрічкового навива. Крім того, дослідження матеріалів і зразків в постійних полях обмежувалася ненадійністю комутаційних приладів, що забезпечують зміну напрямку намагнічуючого струму. Використання зондуючих виріб змінних магнітних полів дозволяє здійснювати надійний контроль. Основними достоїнствами електромагнітного контролю виробів і зразків в змінних магнітних полях є те, що, по-перше можливо контролювати не тільки магнітні параметри, але і електричні величини (електропровідність, втрати потужності в матеріалі), а також температуру, механічну напругу, твердість, міцність, наявність домінуючих домішок та ін. Однак складність використання електромагнітного контролю суцільних виробів і зразків в змінному магнітному полі полягає передусім у тому, що магнітне поле згасає в зразку, причому неоднорідність напруженості поля в середині зразка в істотній мірі встановлює неоднорідність магнітної індукції. В такому випадку магнітні параметри і характеристики (напруженість поля, індукція, магнітна проникність і втрати потужності та ін.) виявляються невизначеними, оскільки в кожному шарі виробу будуть свої магнітні параметри. В даному випадку виникає важлива для практики задача – знайти такі умови і правила зміни частоти поля і розмірів суцільного зразка, при яких можливо здійснити електромагнітний контроль в змінному магнітному полі з максимальною точністю.

Таким чином, спільне визначення магнітних і електричних параметрів виробів і зразків в змінному магнітному полі представляє великий практичний інтерес і є актуальною і вчасною задачею. В цьому плані надто важливим моментом є вибір електромагнітного перетворювача, здійснюючого багатопараметровий контроль. Останній доцільно реалізувати за допомогою параметричного електромагнітного перетворювача ПЕМП, що має просту конструкцію (всього лише одна обмотка, яка здійснює функцію намагнічування зразка і виміри), та можливість підключення перетворювача до цифрових прецизійних мостів змінного струму, які за останній час отримали істотний розвиток.

В дисертаційній роботі розглянуті електромагнітні методи і прилади для безконтактного спільного контролю відносної магнітної проникності  $\mu_r$ , питомої електричної провідності  $\sigma$  і втрат потужності (повних  $P$  і питомих  $P_{\text{пит}}$ ) в циліндричних суцільних виробах (трубах, прутках, дротах і ін.) на основі використання ПЕМП.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Матеріали дисертації виконувалися в відповідності з проектами, що пройшли конкурс Міністерства освіти і науки України, теми М5204 і М5205, наказ НТУ “ХПІ” № 3 від 4.01. 2000 р. (терміни обох тем 2000 – 2002 р.р.). В нинішній час робота проводиться в відповідності з держбюджетною темою М5206. Термін 2003–2005 р.р.

**Мета і задачі дослідження.** Це створення комп'ютерних універсальних функцій перетворення, на основі яких розроблені електромагнітні методи і засоби для спільного контролю

величин  $\mu_r$ ,  $\sigma$ ,  $P$  та  $P_{уд}$  в циліндричних суцільних і трубчастих виробих на основі використання ПЕМП з однорідним магнітним полем.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити наступні задачі:

- визначити універсальні комп'ютерні функції перетворення, що зв'язують параметри циліндричних суцільних і трубчастих виробів з узагальненими компонентами сигналів перетворювача;
- створити дві модифікації електромагнітного методу, які реалізовані на основі ПЕМП для спільного контролю магнітного і електричного параметрів виробів;
- розробити методику розрахунку очікуваних значень компонентів сигналів ПЕМП (тобто вирішити пряму задачу);
- розв'язати зворотню задачу визначення умовно вимірюваних електромагнітних параметрів циліндричних виробів;
- оцінити похибки визначення умовно вимірюваних параметрів виробів;
- визначити критерій практично повного промагнічування циліндричного токопровідного виробу;
- розробити електромагнітний метод спільного контролю  $\mu_r$ ,  $\sigma$ ,  $P$  та  $P_{пит}$  в циліндричних виробих;
- на базі ПЕМП створити установку для спільного контролю електромагнітних величин і втрат потужності в виробих і зразках (отримати результати експериментальних багатопараметрових досліджень);
- з'ясувати вплив магнітної проникності і електропровідності на втрати потужності в виробі;
- розробити методику визначення похибок багатопараметрових вимірів величин  $\mu_r$ ,  $\sigma$ ,  $P$  та  $P_{уд}$  в циліндричних виробих;
- розглянути чутливість ПЕМП до параметрів виробу;
- розробити алгоритм і на основі його створити функціональну схему автоматизованої установки для багатопараметрового контролю циліндричних виробів на базі ПЕМП.

**Об'єкт дослідження** – це процес дифузії повздовжнього зондуючого електромагнітного поля в феромагнітний і немагнітний циліндричні трубчасті і суцільні зразки та визначення впливу таких зразків на багатопараметрові компоненти сигналу ПЕМП, причому такі компоненти породжують проблему одночасного безконтактного контролю багатьох параметрів циліндричного виробу.

**Предмет дослідження** – створення електромагнітного методу і його установки, що реалізує одночасний контроль  $\mu_r$ ,  $\sigma$ ,  $P$  та  $P_{пит}$  в циліндричних суцільних і трубчастих виробих на основі ПЕМП.

Методи дослідження засновані на використанні рівнянь Максвелла, Бесселя, дифузії магнітного поля в таке провідне середовище, закону Ома, електродинаміки суцільних середовищ, теорії електромагнітного поля, інтегрального числення – все це використовувалося для створення теоретичних основ прохідного ПЕМП з циліндричним суцільним і трубчастим виробами; теорії рядів Тейлора, диференціального числення, теорії похибок, що реалізувалися

при визначенні співвідношень, які описують роботу ПЕМП, а також для оцінки відносних похибок спільного виміру величин  $\mu_r$ ,  $\sigma$ ,  $P$  та  $P_{\text{пит}}$  і електричних кіл, що застосовувалася при розгляді схем включення ПЕМП. Достовірність отриманих результатів і висновків, зроблених в роботі, підтверджуються даними експериментів, проведених на конкретних зразках виробів.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає в тому, що

- визначені універсальні комп'ютерні функції перетворення, які зв'язують параметри циліндричних виробів з узагальненими компонентами сигналів ПЕМП;
- розроблені дві модифікації електромагнітного методу, який реалізовано на ПЕМП для спільного контролю магнітного, електричного параметрів виробів;
- створена методика розрахунку очікуваних значень компонентів сигналів ПЕМП на основі вирішення прямої задачі;
- вирішена зворотня задача визначення умовно вимірюваних електромагнітних параметрів циліндричних виробів;
- оцінені похибки визначення умовно вимірюваних параметрів виробів;
- встановлено критерій практично повного промагнічування циліндричного провідного виробу;
- розроблено електромагнітний метод спільного визначення величин  $\mu_r$ ,  $\sigma$ ,  $P$  та  $P_{\text{пит}}$  в циліндричних виробках;
- на основі ПЕМП створена вимірювальна установка для спільного контролю електромагнітних величин і втрат потужності в виробках і зразках;
- отримано результати багатопараметрових досліджень;
- з'ясовано вплив параметрів  $\mu_r$  і  $\sigma$  на втрати потужності в виробі;
- розроблена методика розрахунку похибок багатопараметрових вимірів величин  $\mu_r$ ,  $\sigma$ ,  $P$  та  $P_{\text{пит}}$  в циліндричних провідних виробках;
- розглянута диференціальна чутливість ПЕМП до параметрів виробів;
- розроблено алгоритм і функціональну схему автоматизованої установки для багатопараметрового контролю циліндричних виробів на базі використання ПЕМП.

**Практичне значення отриманих результатів роботи** полягає в тому, що створені універсальні комп'ютерні функції перетворення і на їх основі дві модифікації електромагнітного методу для одночасного контролю магнітного, електричного параметрів і втрат потужності в циліндричному виробі, методика розрахунку очікуваних значень компонентів сигналів ПЕМП – все це в повній мірі дозволяє проектувати і конструювати установи на основі використання ПЕМП для спільного контролю параметрів  $\mu_r$ ,  $\sigma$ ,  $P$  та  $P_{\text{пит}}$  в циліндричних виробках, виконаних з різноманітних матеріалів, визначити межі зміни параметрів виробів і сигналів ПЕМП, оцінити похибки багатопараметрових вимірів, чутливість ПЕМП до параметрів виробу, встановити раціональні за похибками режими роботи ПЕМП, з'ясувати частотний діапазон, підібрати вимірювальну апаратуру.

Результати даної роботи були використані в навчальному процесі спеціальності 7.090903 “Прилади і системи неруйнівного контролю”.

**Особистий вклад здобувача** полягає в тому, що:

- отримані універсальні функції перетворення, що зв'язують параметри циліндричних суцільних і трубчастих металевих виробів з узагальненими комплексними електричними сигналами первинного перетворювача;
- розроблені дві модифікації безконтактного електромагнітного методу з використанням дросельного датчика для спільного контролю магнітних і електричних параметрів виробу;
- визначено критерій практично повного промагнічування циліндричного виробу і створена методика розрахунку очікуваних значень компонентів електричних сигналів параметричного перетворювача;
- запропоновано метод спільного контролю магнітної проникності, питомої електричної провідності, повних і питомих втрат потужності в циліндричних виробках;
- розроблена методика визначення похибок багатопараметрових вимірів і з'ясовано вплив магнітної проникності і електропровідності на втрати потужності в циліндричних виробках;
- розроблений алгоритм і створена модель установки для багатопараметрового контролю циліндричних виробів на базі параметричного і трансформаторного електромагнітних перетворювачів.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати роботи доповідалися на:

- Міжнародній науково-технічній конференції “Силова електроніка і енергоефективність”, Алушта, Крим, 2000 р.
- Міжнародній науково-технічній конференції “Проблеми автоматизованого електропривода, теорія і практика”, Алушта, Крим, 2001 р.
- На щорічних науково-технічних конференціях Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” (м. Харків, 2000 – 2002 рр.).

**Публікації:** основні положення і результати дисертаційної роботи опубліковані в 6 друкованих наукових працях, з них 4 статті в наукових журналах і 2 матеріали в збірках наукових праць Міжнародних науково-технічних конференцій.

**Структура й обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається з уведення, чотирьох розділів, висновків та додатків. Повний обсяг дисертації складає 209 сторінок: 38 ілюстрацій на 25 стор.; 11 таблиць на 8 стор.; 4 додатка на 21 стор.; 110 найменувань використаних літературних джерел на 10 стор.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

**У вступі** показана актуальність теми дисертації, відмічено складність питання контролю суцільних феромагнітних зразків і виробів в змінних магнітних полях із-за згасання магнітного поля всередині об'єкту дослідження. Сказано, що метод і установка для вимірювання магнітних характеристик в постійних магнітних полях використовувалась в основному для шихтованих зразків, або у виді стрічкового навиву. Встановлено, що треба знайти такі умови, щоб можна було здійснювати неруйнівний контроль в змінних магнітних полях тому, що такий контроль має цілий ряд достоїнств: це надійність і можливість контролювати відразу декілька параметрів виробу. Пропонується для цих цілей використовувати ПЕМП, тому що

він простий за своєю конструкторською і може включатися в високоточні мостові схеми. Також показаний зв'язок матеріалу роботи з держбюджетними темами, мета, об'єкт і предмет дослідження, основні задачі і новизна дисертації, її практичне значення, методи і теоретичні положення, які використовувалися у роботі, особистий внесок автора дисертації, її апробація, публікації, структура і об'єм дисертації.

**В першому розділі** розглянуто методи і установки для контролю статичних магнітних характеристик на постійному струмі. Показано достоїнство магнітних іспитів в такому полі, які забезпечують повне промагнічування об'єкту і можна легко визначити в середині виробу магнітні характеристики. Однак, такі іспити мають і недоліки, які полягають в ненадійності комутаційних пристроїв для зміни полярності намагнічуваного струму, а також нема можливості вимірювати одразу декілька параметрів виробу. При контролі зразка в змінному полі вказані недоліки полягають в тому, що змінне поле в суцільному зразку згасає, і тому становиться складно визначити в середині об'єкту магнітну індукцію, напруженість магнітного поля та інші параметри виробу. Однак на основі розглянутих вихорострумівих методів і пристроїв, а саме за допомогою ПЕМП показано можливість при спеціальних умовах здійснювати багатопараметровий контроль.

**Другий розділ** присвячений визначенню комп'ютерних універсальних функцій перетворення ПЕМП з трубчастим і суцільним циліндричним виробом.

На основі рішення рівнянь Максвелла і закону Ома було введено комплексні нормовані параметри перетворювача. Це амплітуда  $K$  і його фазовий кут  $\varphi$ , які мають вид

$$K = \sqrt{\frac{A^2 + B^2 + \frac{y}{\mu_r \sqrt{2}} [A(A_1 - B_1 + (A_1 + B_1))] + y^2 / 4\mu_r^2 (A_1^2 + B_1^2)}{C^2 + D^2 + \frac{y}{\mu_r \sqrt{2}} [C(C_1 + D_1)] + y^2 / 4\mu_r^2 (C_1^2 + D_1^2)}}; \quad (1)$$

$$\operatorname{tg}\varphi = -\frac{A(C + D) + \frac{y}{\mu_r \sqrt{2}} (AC_1 + BD_1 - CB_1 + DA_1) + \frac{y^2}{4\mu_r^2} [D_1(A_1 + B_1) + C_1(A_1 - B_1)]}{B(C + D) + \frac{y}{\mu_r \sqrt{2}} (BC_1 - AD_1 + CA_1 + DB_1) + \frac{y^2}{4\mu_r^2} [D_1(B_1 - A_1) + C_1(A_1 + B_1)]}, \quad (2)$$

де параметри  $A$ ;  $B$ ;  $C$ ;  $D$ ;  $A_1$ ;  $B_1$ ;  $C_1$ ;  $D_1$  виражені через функції Келькіна з узагальненими параметрами  $x$  і  $y$

$$x = a\sqrt{2\pi\mu_0\mu_r\sigma f}; \quad (3) \quad y = b\sqrt{2\pi\mu_0\mu_r\sigma f}, \quad (4)$$

$a$  і  $b$  – зовнішній і внутрішній радіуси трубчастого виробу;  $\mu_0$  – магнітна константа;  $f$  – частота змінени магнітного поля.

Зовнішній вид електромагнітного перетворювача представлено на рис. 1.

1 – виріб; 2 – діелектричний каркас; 3 – вимірювальна обмотка; 4 – намагнічувальна

обмотка;  $5$  – ізоляційний шар;  
 $l_{\text{п}}$  – довжина перетворювача;  $l$  –  
довжина виробу;  $a_{\text{п}}$  – радіус  
вимірювальної обмотки;  $a_{\text{н}}$  –  
радіус намагнічувальної об-  
мотки

Рис. 1. Прохідний електромагнітний перетворювач  
с циліндричним трубчастим виробом

Всі розміри елементів перетворювача дано на цьому рисунку. Для застосування ПЕМП у практиці контролю використовується одна намагнічувальна обмотка. Для феромагнітних виробів з  $\mu_{\text{r}} \gg 50$  формули (1) і (2) спрощуються, тому що члени з величинами  $y / (\mu_{\text{r}} \sqrt{2})$  та  $y^2 / (4\mu_{\text{r}}^2)$  становляться дуже малими. Величину  $y$  можна представити, як

$$y = x(1 - [d/a]), \quad (5)$$

де  $d$  – товщина стінки труби:  $d = a - b$ .

Параметр  $K$  характеризує питомий магнітний потік  $\Phi_{23}$  пронормований на потік  $\Phi_0$  ПЕМП без виробу. При цьому

$$K = \frac{\Phi_{23}}{\Phi_0 \eta \mu_{\text{r}}}, \quad (6)$$

де  $\Phi_{23}$  – це сумарний потік, який геометрично складається з потоку у стінці і во внутрішній пустоті труби;  $\eta$  – коефіцієнт заповнення

$$\eta = \frac{a^2}{a_{\text{п}}^2}, \quad (7)$$

Використовуючи довідкову літературу з функцій Кельвіна побудуємо за допомогою комп'ютерної техніки на основі виразів (1), (2) і (5) універсальні функції перетворення ПЕМП, які показані на рис. 2 і 3 (перша модифікація функцій перетворення). Ці функції були визначені для феромагнітних зразків і у виді масивів точок. Такі ж універсальні комп'ютерні функції перетворення були визначені для немагнітних трубчастих виробів. Функції перетворення (див. рис. 2 і 3) дають можливість встановити процедуру сумісного контролю  $\mu_{\text{r}}$  і  $\sigma$  для феромагнітних труб. Для цього замірявши фазу  $\varphi$  з кривої  $\varphi = f(x)$  знаходять  $x$  для звісного  $d/a$ , а по  $x$  визначають



на основі  $K = f(x)$  у випадку того ж  $d/a$  знаходять параметр  $K$ . Після цього, вимірявши потоки  $\Phi_{23}$  і  $\Phi_0$ , з урахуванням (6) і (7) величини  $\mu_r$  і  $\sigma$  знаходять з виразів

$$\mu_r = \frac{\Phi_{23}}{\Phi_0 \eta K}. \quad (8)$$

$$\sigma = \frac{x^2}{2\pi\mu_0\mu_r a^2 f}. \quad (9)$$

Для того, щоб величина  $\sigma$  не залежала від параметра  $\mu_r$ , після підстановки (8) у (9) маємо співвідношення

$$\sigma = \frac{x^2 \Phi_0 K}{2\pi \Phi_{23} a^2}. \quad (10)$$

Однак при сумісному визначенні параметрів  $\mu_r$  і  $\sigma$  виробу навіть при контролі однієї величини  $\mu_r$  (чи  $\sigma$ ) треба використовувати обидві універсальні функції перетворення (див. рис. 2 і 3).

Якщо ввести інший параметр, формула для якого має вид

$$N_x = Kx^2, \quad (11)$$

і побудувати інші універсальні функції перетворення, а саме  $K = f(\varphi)$  і  $N_x = f(\varphi)$ , тоді можна буде визначити кожний параметр з своєї кривій. На рис. 4 і 5 наведені залежності  $K$  і  $N_x$  від фазового кута  $\varphi$ . Дійсно зробивши вимір кута  $\varphi$  із кривою  $K = f(\varphi)$  знайдемо для звісного  $d/a$  параметр  $K$ , а по ньому – величину  $\mu_r$  на основі формули (8) (після виміру  $\Phi_{23}$ ,  $\Phi_0$ ).

Електричний параметр  $\sigma$  визначають залежністю параметра  $N_x$  від  $\varphi$  з формули

$$\sigma = \frac{N_x \Phi_0}{2\pi\mu_0 \Phi_{23} a^2 f}. \quad (12)$$

Далі розглядається часний випадок контролю суцільного циліндричного стержня, який розміщується всередині ПЕМП. Функції перетворення для такого виробу представлені на рис. 4 і 5 при відношенні  $d/a = 1$ . При визначенні параметрів  $\mu_r$  і  $\sigma$  в формули (8), (10) і (12) треба замість потоку  $\Phi_{23}$  підставляти потік  $\Phi_2$ , який

пересікає переріз циліндричного суцільного виробу.

З метою реалізації розглянутих вище електромагнітних методів використовувалися декілька установок для двохпараметрового контролю. Перша з них – схема з використанням вольтметра, амперметра, фазометра ВАФ (див. рис. 6).

Мостова схема показана на рис. 7. Схема ВАФ включає в себе: генератор синусоїдальних сигналів, частотомір Ч, амперметр А, ПЕМП зі зразком З, який складається з індуктивності  $L_1$  і опору  $R_1$ , зразковий опір  $R_0$ , вольтметрів  $B_1, B_2$  і фазометра Ф. Мостова схема МС (див. рис. 7) має генератор Г, частотомір Ч, такий же ПЕМП зі зразком З,  $R_{екв} = R_1$  і  $L_{екв} = L_1$  еквівалентні опір і індуктивність обмотки ПЕМП,  $R_p$  і  $L_p$  – змінні опір і індуктивність, які при значенні для досягнення рівноваги моста,  $R_1$  і  $R_2$  – елементи моста,  $R_0$  – опір, який обмежує струм в колі гальванометра. Вимірювання  $\mu_r$  і  $\sigma$  в схемі ВАФ здійснюється шляхом визначення спочатку  $R_1$  і  $L_1$  за допомогою формул

$$R_1 = \frac{U_{\Pi}}{I} \cos \varphi_I; \quad (13)$$

$$L_1 = \frac{1}{2\pi f} \frac{U_{\Pi}}{I} \sin \varphi_I, \quad (14)$$

де  $U_{\Pi}$  – вимірювальна напруга на обмотці ПЕМП зі зразком;  $I$  – струм в обмотці;  $\varphi_I$  – фазовий кут між  $U_{\Pi}$  і  $I$  (вимірюваний фазометром).

Після цього нормований магнітний потік  $\Phi_{2н}$  і його фазовий кут  $\varphi$  знаходять з формул

$$\Phi_{2н} = \frac{\Phi_2}{\Phi_0} = \frac{1}{2\pi L} \sqrt{\left(\frac{U_{\Pi}}{I} \sin \varphi_I - 2\pi f (1 - \eta)\right)^2 + \left(\frac{U_{\Pi}}{I} \cos \varphi_I - R\right)^2}; \quad (15)$$

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{\frac{U_{\text{п}}}{I} \cos \varphi_1 - R}{\frac{U_{\text{п}}}{I} \sin \varphi_1 - \omega L(1 - \eta)}. \quad (16)$$

де  $R$  і  $L$  – опір і індуктивність ПЕМП без зразка;  $\omega$  – кругова частота.

Аналогічні вирази для визначення потоку  $\Phi_2$  і його фази  $\varphi$  знаходяться при використанні мостової схеми МС. Тільки з урахуванням формул (13) і (14) у вирази (15) та (16) треба ввести величини  $R_1$  і  $L_1$ , які вимірюються мостом (див. рис. 7). Після того, як знайшли параметри  $\Phi_2$ ,  $\Phi_0$  і  $\varphi$  далі використовують схеми ВАФ або МС за допомогою наведеного вище алгоритму визначають параметри  $\mu_{\text{r}}$  та  $\sigma$  (див. (8) – (10), (12)).

Потім запропонована методика розрахунків очікуваних компонентів сигналів ПЕМП. Це пряма задача, яка формулюється так: за заданими параметрами зразка, тобто  $x$ ,  $a$ ,  $\mu_{\text{r}}$ ,  $\sigma$ , довжиною його, а також заданими параметрами ПЕМП треба знайти очікувані значення компонентів сигналів ПЕМП, тобто  $U_{\text{п}}$ ,  $I$ ,  $\varphi_1$ , а значить і  $\Phi_2$ ,  $\Phi_0$ ,  $\varphi$ . Ця методика дає змогу визначити межі зміни компонентів сигналів ПЕМП відповідно до зміни параметрів виробу, вибрати частотний діапазон і знайти вимірювальну апаратуру. Далі в розраховані значення компонентів сигналів вводяться апаратурні похибки, і, нарешті, з урахуванням цього знаходять умовно вимірювальні компоненти сигналів, котрі дають змогу розв'язати зворотню задачу, тобто, використовуючи наведений вище алгоритм, знайти умовні вимірювальні величини  $\mu_{\text{r} \text{ уи}}$  й  $\sigma_{\text{уи}}$ . Розв'язання зворотньої задачі дозволяє знайти похибки в визначенні  $\mu_{\text{r} \text{ уи}}$  і  $\sigma_{\text{уи}}$  (обумовлені апаратурними похибками), а також знайти раціональний режим роботи ПЕМП. На окремих прикладах використання зразка одержані результати розв'язання прямої і зворотньої задач. Показано, що для підвищення точності і чутливості ПЕМП треба застосувати компенсацію частини індуктивного опору  $2\pi fL(1 - \eta)$  опором  $1/\omega C_{\text{к}}$ , де  $C_{\text{к}}$  – компенсаційна ємність, яка включена послідовно з обмоткою ( $R_1$  і  $L_1$ ) ПЕМП в схемах рис. 6 та 7. Результати розв'язання прямої і зворотньої задач встановлюють, що в раціональному діапазоні  $x \geq 1$  при наявності компенсації відносна похибка  $\gamma_{\mu_{\text{r}}}$  вимірювання величини  $\mu_{\text{r}}$  не перевищує 1,6 %, а відносна похибка  $\gamma_{\sigma}$  в діапазоні  $1,7 \leq x \leq 4$  не більш 2 %.

**Третій розділ** присвячений розгляду безконтактного сумісного контролю електромагнітних параметрів і втрат потужності у металевому циліндричному виробі за допомогою ПЕМП. Оскільки втрати потужності необхідно знаходити як в слабких і сильних магнітних полях, на початку розділу було визначено умову повного промагнічування виробу.

При роботі на всіх ділянках кривої намагнічування формулою (8) буде визначатися відносна диференційна магнітна проникність  $\mu_{\text{гд}}$ .

При користуванні компенсацією ефектів повітряного зазору в схемі ВАФ маємо просту формулу для повних втрат потужності:

$$P = I_{\text{эф}}^2 \sqrt{\left( \frac{U_{\text{пк}}}{I_{\text{эф}}} \sin \varphi_{1\text{к}}} \right)^2 + \left( \frac{U_{\text{пк}}}{I_{\text{эф}}} \cos \varphi_{1\text{к}} - R \right)^2} \sin \varphi. \quad (17)$$

де  $U_{\text{пк}}$  – падіння напруги на з'єднанні обмотки ПЕМП і компенсуючої ємності  $C_{\text{к}}$ ;  $\varphi_{\text{Ік}}$  – фазовий кут зсуву між  $U_{\text{пк}}$  і  $I$ .

Величину  $\varphi$  в цьому разі знаходять з виразу

$$\varphi = \arctg \left[ \left( \frac{U_{\text{пк}}}{I_{\text{эф}}} \cos \varphi_{\text{Ік}} - R \right) / \frac{U_{\text{пк}}}{I_{\text{эф}}} \sin \varphi_{\text{Ік}} \right]. \quad (18)$$

При використанні компенсації в схемі МС величини  $P$  і  $\text{tg} \varphi$  визначають, як

$$P = I_{\text{эф}}^2 \sqrt{(\omega L_1)^2 + (R_1 - R)^2} \sin \varphi_2; \quad (19) \quad \text{tg} \varphi = \frac{R_1 - R}{\omega L_1}. \quad (20)$$

Питомі втрати можна знайти як

$$P_{\text{уд}} = \frac{P}{\gamma V}, \quad (21)$$

де  $\gamma$  – питома вага матеріалу зразка;  $V$  – його об'єм.

Далі в розділі наведені результати очікуваних значень параметрів  $\mu_{\text{гд}}$ ,  $\sigma$  і  $P$  в різних зразках (магнітних, слабоферромагнітних і немагнітних). Одержано в схемі двохкоординатного потенціометра Р56-2 експериментальні результати визначення відносної диференційної проникності  $\mu_{\text{гд}}$ ,  $\sigma$ ,  $P$  і  $P_{\text{уд}}$  в різних зразках і полях.

Рис. 8 ілюструє схему включення ПЕМП в установку двохкоординатного моста Р56-2, який має два входи  $X_1$  (сюди подається напруга  $U_{\text{п}}$ ) і  $X_2$  – струмовий вхід. Достоїнство потенціометра полягає в тому, що він вимірює тільки основні гармоніки амплитуд  $U_{\text{п}}$ ,  $I$  і  $\varphi_1$ , при цьому в основу роботи потенціометра покладений компенсаційний метод вимірювання цих електричних величин на змінному

струмі. Формули для втрат потужності (повні і питомі) одержано і в наближеннях низьких частот  $x \leq 1,5$ , що відповідає вимогам практично повного промагнічування зразка. При цьому

$$P = \frac{1}{4} H_0^2 \ell_0 \pi^3 f^2 \mu_0^2 a^4 \mu_{\text{гд}}^2 \sigma; \quad (22) \quad P_{\text{уд}} = \frac{1}{4\gamma} H_0^2 \pi^2 f^2 \mu_0^2 \mu_{\text{гд}}^2 a^2 \sigma. \quad (23)$$

З формул (22) і (23) видно, що диференційна магнітна проникність  $\mu_{\text{гд}}$  вносить у втрати потужності більш істотний внесок, ніж питома електрична провідність  $\sigma$ , тому що  $\mu_{\text{гд}}$  змінюється як  $\mu_{\text{г}}$ , а  $\sigma$  по лінійному закону.

**В четвертому розділі** розглядаються способи і прийоми покращення метрологічних характеристик установок, які працюють на основі ПЕМП.

Спочатку створена методика і одержано вирази для аналізу і розрахунків відносних похибок  $\gamma_\mu$ ,  $\gamma_\sigma$  і  $\gamma_p$  визначення величин  $\mu_r$ ,  $\sigma$  і  $P$  у виробі.

З урахуванням (8) – (10) при довірчій ймовірності 0,95 маємо формули

$$\gamma_\mu = 1,1\sqrt{\gamma_{\Phi_{2n}}^2 + 4\gamma_{a_{пн}}^2 + 4\gamma_a^2 + (C_\mu\gamma_Z)^2}; \quad (24)$$

$$\gamma_\sigma = 1,1\sqrt{\gamma_{\Phi_{2n}}^2 + 4\gamma_{a_{пн}}^2 + \gamma_\omega^2 + (C_\sigma\gamma_Z)^2}, \quad (25)$$

де  $\gamma_{\Phi_{2n}}$ ;  $\gamma_{a_{пн}}$ ;  $\gamma_a$ ;  $\gamma_Z$ ;  $\gamma_\omega$  – відносні похибки параметрів  $\Phi_{2n}$ ,  $a_{пн}$ ,  $a$ ,  $\omega$  і  $Z = \text{tg } \varphi$ ; коефіцієнти впливу  $C_\mu$  та  $C_\sigma$  визначаються похідними функцій  $K$  і  $x$  по  $\varphi$ .

Похибка  $\gamma_{\Phi_{2n}}$  і  $\gamma_Z$  знаходяться при використанні виразів (15) та (16).

Відносна похибка  $\gamma_p$  розрахунку втрат потужності при довірчій ймовірності 0,95 має вид

$$\gamma_p = 1,1\sqrt{(2\gamma_I)^2 + (B_\omega\gamma_\omega)^2 + (B_R\gamma_R)^2 + (B_L\gamma_L)^2 + (B_{R_1}\gamma_{R_1})^2 + (B_{L_1}\gamma_{L_1})^2 + (B_{A_1}\gamma_{A_1})^2} \quad (26)$$

де  $\gamma_I$ ,  $\gamma_\omega$ ,  $\gamma_R$ ,  $\gamma_L$ ,  $\gamma_{R_1}$ ,  $\gamma_{L_1}$  і  $\gamma_{A_1}$  – відносні похибки величин, вказаних індексами при похибках; величина  $A_1 = 1 - \eta$ ; коефіцієнти впливу  $B_\omega$ ,  $B_R$ ,  $B_L$ ,  $B_{R_1}$ ,  $B_{L_1}$  і  $B_{A_1}$  визначаються похідними відповідних виразів за їх аргументами.

Результати розрахунків відносних похибок  $\gamma_\mu$ ,  $\gamma_\sigma$  і  $\gamma_p$  показують, що раціональні з точки зору досягнення малих похибок вимірювання величин  $\mu_r$ ,  $\sigma$  і  $P$ , режими роботи ПЕМП спостерігаються при  $0,5 \leq x \leq 1,5$ . При цьому характерні значення похибок  $\gamma_\mu$ ,  $\gamma_\sigma$  і  $\gamma_p$  не перевищують 0,8 %, 2,5 % і 3 %, відповідно.

Раціональний діапазон при контролі  $\mu_r$  і  $\sigma$  наближається до діапазону, знайденому при визначенні умовно вимірних  $\mu_{r_{уи}}$  і  $\sigma_{уи}$ .

Встановлено, що вказані раціональні значення  $x$  відповідають порівняно високим значенням чутливості ПЕМП до параметрів виробу.

Далі в цьому розділі запропонована функціональна схема автоматизованої установки для безконтактного контролю параметрів  $\mu_r$ ,  $\sigma$  і  $P$  в циліндричному виробі. Установка дозволяє за розробленим алгоритмом визначати вказані параметри виробу, провести оцінку похибок вимірювання і чутливість ПЕМП, встановити раціональні режими роботи ПЕМП, проводити обробку результатів багаторазових вимірювань.

## ВИСНОВКИ

Таким чином, на підставі універсальних комп'ютерних функцій перетворення, що зв'язують нормовані сигнали ПЕМП з узагальненими параметрами виробу, створено методи і засоби для спільного контролю магнітних, електричних параметрів і втрат потужності (повних і питомих) в циліндричних провідних виробках (суцільних і трубчастих).

Коротко зупинимся на основних результатах роботи.

1. З допомогою розроблених програм і розрахунків на ЕОМ були визначені універсальні комп'ютерні функції перетворення, що зв'язують компоненти нормованих сигналів ПЕМП з узагальненими параметрами виробу.

2. На основі універсальних функцій перетворення створено дві модифікації електромагнітного методу і ПЕМП для спільного контролю величин  $\mu_r$ ,  $\sigma$ ,  $P$  і  $P_{\text{пит}}$ , розроблено схеми двох установок, одна з яких з використанням вольтметра, амперметра, фазометра, а інша – мостова схема на змінному струмі, для підвищення точності вимірів  $\mu_r$ ,  $\sigma$  і  $P$  розглянуто пристрій компенсації частини індуктивного опору обмотки ємнісним опором.

3. Створена методика розрахунку очікуваних значень компонентів сигналів ПЕМП, включеного в розглянуті схеми. Така методика дозволяє встановити межі змін сигналів ПЕМП, відповідно діапазону параметрів виробів, підібрати вимірювальні прилади, знайти необхідний частотний діапазон.

4. Вирішена зворотня задача, яка полягає в тому, що по розрахунковим компонентам сигналів ПЕМП і шляхом введення в ці ж сигнали значень апаратурних похибок знаходять умовно виміряні величини  $\mu_{r\text{уи}}$  і  $\sigma_{\text{уи}}$  виробу.

5. Встановлено критерій практично повного промагнічування циліндричного провідного виробу. На основі отриманого співвідношення для методичної похибки, зумовленої неоднорідністю магнітного поля і нелінійністю кривої магнітної індукції, а також за умови того, що ця методична похибка не перевищувала допустиму, знайдені вирази для визначення критичних значень радіусу виробу і частоти поля. Розроблена методика перебудови динамічних магнітних параметрів і характеристик зразків в квазістатичні параметри і характеристики, що дозволяє внести поправки в магнітну проникність, повні і питомі втрати потужності в виробі.

6. Отримано співвідношення і створений метод безконтактного визначення диференційної магнітної проникності, електропровідності, повних і питомих втрат потужності в виробі. Проведені розрахунки очікуваних значень питомих втрат, що виникають в різноманітних зразках розмішених в слабких і сильних магнітних полях, в середині ПЕМП.

7. На основі використання двох-координатного потенціометра Р56-2 розроблена установка з ПЕМП, що дозволяє визначати на основній гармоніці магнітні потоки, потокозцеплення, струми, напруги і напруженість поля, а потім визначити магнітну проникність, електропровідність і втрати потужності в виробі. Отримано результати контролю означених параметрів виробів, які підтверджуються даними контрольних методів.

8. Отримані формули для визначення повних і питомих втрат потужності в наближенні низьких частот, щоб виконати критерії практично повного промагнічування зразка, показано що диференційна магнітна проникність виявляє більш сильний вплив на повні і питомі втрати потужності в зразках у порівнянні з впливом на втрати питомої електричної проникності.

9. Проведено аналіз похибок вимірювання відносної магнітної проникності, питомої електричної провідності, повних і питомих втрат потужності в циліндричних виробках. Показано, що в раціональному за похибками режимі роботи ПЕМП, тобто при  $0,5 \leq x \leq 1,5$  похибки вимірів величин  $\mu_r$ ,  $\sigma$  і  $P$  не перевищують 0,8%, 2,5% і 3%, відповідно. Встановлено також, що і чутливість ПЕМП в означеному діапазоні є високою.

10. Розроблено функціональну схему автоматизованої установки для спільного контролю магнітного, електричного параметрів циліндричного виробу і втрат потужності на основі використання ПЕМП. Установка дозволяє за розробленим алгоритмом визначати вказані параметри, оцінювати похибки вимірів, визначати раціональні режими роботи ПЕМП, проводити обробку багатократних вимірів.

### Список опублікованих праць за темою дисертації:

1. Себко В.П., Любчик Л.М., Мохаммад Махмуд Мохаммад Дарвиш, Багмет О.Л. Параметрический вихретоковый преобразователь для контроля потерь мощности в проводящих изделиях. – Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Вып. 106. – Харьков: ХГПУ, 2000. – С. 3–7.

Автором отримані співвідношення, що поєднують електричні, магнітні і геометричні параметри виробу з втратами потужності.

2. Себко В.П., Мохаммад Махмуд Мохаммад Дарвиш. К теории работы параметрического электромагнитного преобразователя для контроля электромагнитных параметров и потерь мощности в цилиндрическом изделии. – Вестник национального технического университета “Харьковский политехнический институт”. – Харьков: “НТУ “ХПИ”, № 5, 2001. – С. 151–156.

Автором запропоновано метод безконтактного визначення електромагнітних параметрів циліндричних виробів на базі параметричного електромагнітного перетворювача.

3. Себко В.П., Мохаммад Махмуд Мохаммад Дарвиш. Погрешности определения электромагнитных параметров и потерь мощности в сплошном цилиндрическом изделии. – Техническая электродинамика. – Тематичний випуск. – Ч. 1. – Київ, 2001. – С. 99–104.

Автором отримано співвідношення для оцінки похибок багатопараметрового контролю з допомогою параметричного перетворювача.

4. Себко В.П., Горкунов Б.М., Мохаммад Махмуд Мохаммад Дарвиш. Автоматизированная установка для бесконтактного контроля параметров изделия. – Вестник национального технического университета “Харьковский политехнический институт”. Тематический выпуск т. 4. – Харьков: “НТУ “ХПИ”, № 9, 2002. – С. 123–128.

Автором запропоновано алгоритм та функціональна схема автоматизованого приладу для багатопараметрового контролю циліндричних виробів.

5. Себко В.П., Мохаммад Махмуд Мохаммад Дарвиш, Александров Е.Е. Вихретоковый метод определения электромагнитных параметров и потерь мощности в цилиндрических изделиях. – Техническая электродинамика. – Тематичний випуск. – Ч. 1. – Київ, 2000. – С. 67–70.

Автором проведені експериментальні дослідження з визначення електромагнітних параметрів та втрат потужності в циліндричних виробках.

6. Себко В.П., Мохаммад Махмуд Мохаммад Дарвиш. Расчет ожидаемых сигналов параметрического электромагнитного преобразователя с проводящим изделием. – Вестник национального технического университета “Харьковский политехнический институт”. – Вып. 10. – Харьков: “НТУ “ХПИ”, 2001. – С. 407–409.

Автором проведені розрахунки з визначення основних компонент очікуваних електричних сигналів вихорострумowego перетворювача з циліндричним виробом.

## АНОТАЦІЇ

Мохаммад Махмуд Мохаммад Дарвиш. Багатопараметровий електромагнітний метод та перетворювач, заснований на комп'ютерних універсальних функціях перетворення. – 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 створенню електромагнітного методу і приладу для безконтактного спільного контролю відносної магнітної проникності, питомої електричної провідності і втрат потужності (повних і питомих) в циліндричних суцільних виробках (трубах, прутках) на основі використання параметричного електромагнітного перетворювача.

В роботі розроблена методика та проведені розрахунки очікуваних значень компонентів сигналу параметричного перетворювача і визначена чутливість перетворювача в широкому частотному діапазоні. Проведена оцінка похибок контролю інформативних параметрів циліндричних виробів і визначено раціональний режим роботи параметричного перетворювача з точки зору досягнення високої точності та чутливості. Результати даної роботи використані в навчальному процесі НТУ “ХПІ”.

Ключові слова: параметричний електромагнітний перетворювач; контроль магнітної проникності, електропровідності циліндричних виробів; універсальні функції перетворення.

Мохаммад Махмуд Мохаммад Дарвиш. Многопараметровый электромагнитный метод и преобразователь, основанный на компьютерных универсальных функциях преобразования. – Рукопись.

Диссертация на соискание научной 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 электромагнитного метода и прибора для бесконтактного одновременного контроля относительной магнитной проницаемости, удельной электрической проводимости и потерь мощности (полных и удельных) в цилиндрических сплошных изделиях (трубах и прутках) на основе использования параметрического электромагнитного преобразователя. Установлен критерий практически полного промагничивания



цилиндрического проводящего проводника. На основе полученного соотношения для методической погрешности, обусловленной неоднородностью магнитного поля и нелинейностью кривой магнитной индукции, а также условие того, что эта методическая погрешность не превышала допустимую, найдены выражения для определения критических значений радиуса изделия и частоты поля. Разработана методика перестройки динамических магнитных параметров и характеристик образцов в квазистатические параметра и характеристики магнитной индукции и кривой намагничивания, которые дают возможность внести поправки в магнитную проницаемость, полные и удельные потери мощности в изделии.

Получены соотношения и создан метод бесконтактного определения дифференциальной магнитной проницаемости, электропроводности, полных и удельных потерь мощности в изделии. Проведены расчеты ожидаемых значений удельных потерь, возникающих в различных образцах помещенных в слабые и сильные магнитные поля, создаваемые ПЭМП.

Полученные формулы для определения полных и удельных потерь мощности в приближении низких частот, т.е. таких чтобы выполнить критерии практически полного промагничивания образца, показывают что дифференциальная магнитная проницаемость оказывает более сильное влияние на полные и удельные потери мощности в образцах по сравнению с воздействием на потери удельной электрической проводимости.

Проведен анализ погрешности измерения относительной магнитной проницаемости, удельной электрической проводимости, полных и удельных потерь мощности в цилиндрических изделиях. Показано, что в рациональном по погрешностям режиме работы ПЭМП, т.е. при обобщенном параметре  $0,5 \leq x \leq 1,5$  погрешности измерения магнитного, электрического параметров и потерь мощности не превышают 0,8 %, 2,5 % и 3 %, соответственно. Установлено также что и чувствительность ПЭМП в указанном диапазоне является высокой. Разработана функциональная схема автоматизированной установки для совместного контроля магнитного, электрического параметров цилиндрического изделия и потерь мощности на основе использования ПЭМП. Установка позволяет по разработанному алгоритму определять указанные параметры, оценивать погрешности измерений, определять рациональные режимы работы ПЭМП, проводить обработку многократных измерений.

В работе разработана методика и выполнены расчеты ожидаемых значений компонентов сигнала параметрического преобразователя и определена чувствительность преобразователя в широком частотном диапазоне. Проведена оценка погрешностей контроля информативных параметров цилиндрических изделий и определены рациональные режимы работы параметрического преобразователя с точки зрения достижения высокой точности и чувствительности. Результаты данной работы использованы в учебном процессе НТУ “ХПИ”.

Ключевые слова: параметрический электромагнитный преобразователь; контроль магнитной проницаемости, электропроводности цилиндрических изделий; универсальные функции преобразования.

Mohammad Mahmoud Mohammad Darwish. Many parameters electromagnetic method and converter, based on computer universal functions by transformed. – a Manuscript.

Thesis on claim teaching degrees of candidate of technical sciences on professions 05.11.13 – instruments and methods of checking and determination of composition materials. – a National technical university "Kharkov polytechnical institute", Kharkov, 2003.

Thesis is denoted making an electromagnetic method and instrument for noncontact simultaneous checking relative magnetic permeability, specific electrical conductivity and losses of power (full and specific) in cylindrical utter products (pipes and twig) on the base of using a parametric electromagnetic converter.

In work designed strategy and executed calculations of expected values of components of signal of parametric converter and determined sensitivity of converter in the broad frequency range. Conducted evaluation of inaccuracy of checking the informative parameters of cylindrical products and determined rational states of working parametric converter from standpoints of achievement of pinpoint accuracy and sensitivity. Results of given work are used in the scholastic process NTU "KPI".

Key words: parametric electromagnetic converter; checking magnetic permeability, conduction of cylindrical products; universal floats.

Відповідальний за випуск д.т.н., проф. Себко В.П.

Підписано до друку                    р. Формат 145×215.  
Формат паперу 60×90/16. Папір Могра. Друк – ризографія.  
Обсяг 0,9 авт. арк. 1,6. Тираж 100 прим. Зам. №                    .

---

**Видавничий центр НТУ “ХП”, 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21**

Свідоцтво про реєстрацію ДК №196 від 10.07.2000.

---

---

