

**СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ**

Тітова Наталія Володимирівна

УДК 620.179.14

**ЗАСОБИ КОНТРОЛЮ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПАРАМЕТРІВ
ЦИЛІНДРИЧНИХ ВИРОБІВ НА ОСНОВІ ДИФЕРЕНЦІЙНОГО
КОНТАКТНОГО МЕТОДУ**

Спеціальність 05.11.13 – Прилади і методи контролю
та визначення складу речовин

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Луганськ – 2010

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Національному технічному університеті „Харківський політехнічний інститут” Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Сучков Григорій Михайлович,
Національний технічний університет „Харківський
політехнічний інститут”, м. Харків, професор кафедри приладів
і методів неруйнівного контролю

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Стенцель Йосип Іванович,
Технологічний інститут Східноукраїнського
національного університету ім. В.Даля,
завідувач кафедри „Автоматизація технологічних
процесів”

доктор технічних наук, професор
Білокур Іван Павлович,
Національний авіаційний університет, м. Київ, професор
кафедри машинознавства

Захист відбудеться „04” березня 2010 р. о 13⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 29.051.07 у Східноукраїнському національному університеті імені Володимира Даля за адресою: 91034, м. Луганськ, кв. Молодіжний, 20А.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля за адресою: 91034, м. Луганськ, кв. Молодіжний, 20А.

Автореферат розісланий „27” січня 2010 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Шевченко О.І.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність. Суттєву частину в загальному об'ємі неруйнівного контролю займає електромагнітний метод. Він використовується для дефектоскопії, товщинометрії та визначення фізико-механічних характеристик електропровідних матеріалів. Важливим, але найменш розвиненим є напрямок з визначення електромагнітних характеристик стрижнів для сучасних високотехнологічних виробництв промисловості України. Магнітна проникність і електропровідність визначають можливості використання матеріалів за призначенням. Але вони є структурно чутливими і взаємозалежними. У цьому випадку важливим напрямком досліджень можливостей засобів контролю є багатопараметричні методи. Відомі праці в основному, побудовані на використанні вихрострумів котушок, що приводить до значних складнощів при реалізації в засобах неруйнівного контролю. На результати контролю впливають електромагнітні завади, температура вихрострумів перетворювачів, їх геометричні розміри та інше. Складнощі в реалізації породжують додаткові впливи, обумовлені цими ж додатковими пристроями засобів контролю.

Якщо безконтактні методи та перетворювачі для виміру магнітної проникності та активного опору матеріалу стрижней можуть реалізовуватися у достатньо протяжних магнітних полях, та при цьому, вплив фактора що розмагнічує повністю не виключається, він вносить значну похибку у вимірювання, але для вимірювання на практиці контактних електромагнітних методів та засобів контролю немає необхідності застосовувати довгі джерела магнітного поля.

Крім того, часто виникає потреба проводити вимірювання у виробничих умовах без демонтажу механізму. У цьому випадку немає можливості охопити стрижень котушкою. В той же час контактний спосіб дає можливість виміряти електричні та магнітні параметри стрижня безпосередньо в механізмі. Також вимірювання проводяться для оцінювання стану структури металу та його ресурсу роботи, а саме для визначення роботоздатності всього механізму.

Контактні диференційні електромагнітні методи і перетворювачі дозволяють одночасно визначати магнітну проникність і електропровідність стрижневих матеріалів. При цьому виключається вплив на результати неруйнівного контролю характеристик котушок, що суттєво підвищує можливості приладів.

Значні потенційні переваги контактної диференційної електромагнітної контролю, з одного боку, недостатня чутливість, точність, недостатня теоретична обґрунтованість, з іншого, привели до появи важливої для промисловості наукової задачі. Її суть полягає в створенні засобів для контролю електромагнітних параметрів стрижнів на основі диференційного контактної методу, які забезпечать одночасне визначення питомої електропровідності і відносної магнітної проникності феромагнітних матеріалів.

Отже, розв'язання задачі створення нового різновиду приладів для ефективного контактної вихрострумів контролю є актуальним і своєчасним.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконалась в межах держбюджетної теми, яка затверджена наказом

Міністерства освіти і науки України № 233 від 5.11.2002 р. Тема М 5206 „Створення теорії багатопараметричного визначення фізико-механічних характеристик металів та способів їх реалізації” – використані диференційні контактні методи комплексного визначення електромагнітних параметрів електропровідних матеріалів, а також експериментальні результати, якими доведено високу ефективність використання вихрострумowego контактного диференційного методу для одночасного визначення відносної магнітної проникності та питомої електропровідності стрижнів круглого перетину, в яких здобувач брала безпосередньо участь як відповідальний виконавець.

Мета і задачі дослідження. Мета роботи – на базі узагальнення досвіду використання вихрострумowego контролю фізико-механічних характеристик матеріалів розробити високоефективні методи і засоби для одночасного контактного диференційного визначення відносної магнітної проникності μ_r і питомої електричної провідності σ стрижнів.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити такі **задачі**:

- проаналізувати сучасний стан методів та засобів неруйнівного контролю електромагнітних параметрів матеріалів виробів циліндричної форми, у тому числі контактних методів;
- розробити математичну модель електромагнітного поля в стрижні при його збудженні контактним методом на основі аналогії з електромагнітними процесами при їх індукуванні прохідною котушкою;
- розробити та модифікувати методи і засоби вихрострумowego неруйнівного контролю відносної магнітної проникності μ_r і питомої електричної провідності σ стрижнів круглого перетину контактним методом;
- дослідити метрологічні характеристики приладів контролю феромагнітних електропровідних стрижнів контактним методом;
- виконати теоретичні та експериментальні дослідження засобів контролю електромагнітних параметрів, побудованих на основі диференційних методів;
- обґрунтувати методи побудови диференційних контактних електромагнітних приладів з перетворювачами КЕМП.

Об’єктом дослідження є процес взаємодії електромагнітного поля з металевим стрижнем, який формує комплексний відгук, що несе дані про відносну магнітну проникність та питомий електричний опір матеріалу об’єкту контролю.

Предметом досліджень є диференційні контактні електромагнітні засоби для одночасного контролю відносної магнітної проникності та питомого електричного опору електропровідних стрижнів круглого перетину.

Методи дослідження засновані на теорії електромагнітного поля, електродинаміки суцільних середовищ, апараті спеціальних функцій, що використовувалися при теоретичному обґрунтуванні диференційного методу контролю, на теорії електричних кіл та функціях комплексної змінної, а також на

теорії реологічних перетворень, що застосовувалися при створенні математичних моделей і розрахунку похибок двопараметричного контролю.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що:

1. Вперше на основі аналізу електромагнітного поля в стрижні при його збудженні котушкою зі струмом з використанням перетворень методом нульового градієнту, розроблено методи розрахунку контактних диференціальних вихрострумівих перетворювачів, що дало можливість покращити їх метрологічні характеристики.
2. Розроблено диференціальні контактні методи комплексного визначення електромагнітних параметрів електропровідних матеріалів – метод постійного струму, змішаний метод (постійного та змінного струму), метод змінного струму, а також диференціальні методи, що дало можливість підвищити точність контролю.
3. Експериментально доведено високу ефективність використання вихрострумівого контактного диференціального методу для одночасного контролю відносної магнітної проникності і питомої електричної провідності стрижнів круглого перетину.

Достовірність та обґрунтованість положень, отриманих у роботі наукових результатів зумовлена виконанням теоретичних досліджень, а також підтверджується збіжністю результатів математичного та фізичного моделювання і результатами метрологічних досліджень.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що отримані співвідношення, алгоритми, розроблені методики розрахунку електромагнітних параметрів КЕМП і похибок двопараметричних вимірювань дозволили проектувати установки (у тому числі й автоматизовані) на основі КЕМП для одночасного контролю відносної магнітної проникності та питомої електричної провідності електропровідних циліндричних виробів. Розроблені алгоритми роботи та схема мікропроцесорного засобу контролю. Результати роботи впроваджено на ЗАТ ПП «Азовкабель», у навчальному процесі на кафедрі «Прилади і методи неруйнівного контролю» НТУ «ХПІ» у лекційних курсах «Фізичні основи неруйнівного контролю», «Електромагнітні методи неруйнівного контролю», «Датчики автоматизованих систем неруйнівного контролю».

Особистий внесок здобувача. Усі основні результати дисертаційної роботи отримані автором особисто. Серед них – запропоновані диференціальні методи та засоби контролю електромагнітних параметрів електропровідних матеріалів; використана теорія реологічних перетворень для математичного описання електромагнітних процесів, метод нульового градієнта для аналітичного розв'язку нелінійних задач електромагнітних перетворень; одержані математичні моделі перетворень у досліджуваній електромагнітній системі; проведені дослідження похибок багатопараметричних вимірювань диференціальними контактними перетворювачами, розглянуто дві модифікації диференціального контактного електромагнітного методу і перетворювач для неруйнівного контролю магнітної проникності та питомої електричної провідності циліндричного провідного

виробу. Введені універсальні функції перетворення. Зроблено аналіз чутливості компонентів сигналу контактного електромагнітного перетворювача до зміни магнітної проникності μ , і питомої електричної провідності σ циліндричних провідних виробів на основі методики розрахунку очікуваних значень сигналів перетворювача.

Апробація результатів роботи. Основні результати роботи доповідалися та опробовувалися на:

- інформаційному Міжнародному семінарі-виставці «Современные технологии и приборы неразрушающего контроля и технической диагностики», - Харків. – 2004;
- XII Міжнародній науково-технічній конференції «Інформаційні технології, наука, техніка, здоров'я і освіта», - Харків. – 2004;
- Міжнародній науково-технічній конференції «Силова електроніка і енергоефективність», - Алушта, Крим. – 2004;
- XII Всеукраїнська науково-практична конференція «Технологія – 2008», - Северодонецьк. – 2008;
- IV науково-практична конференція «Донбас – 2020: Наука і техніка – виробництву», - Донецьк. – 2008;
- IV міжнародна науково-практична конференція «Наукові дослідження – теорія та експеримент 2008», - Полтава – 2008.

Публікації. По темі дисертації опубліковано 13 наукових праць, з них 8 статей у фахових виданнях, рекомендованих ВАК України і 5 тез в матеріалах міжнародних науково-технічних конференцій.

Обсяг та структура дисертації. Дисертаційна робота складається з вступу, п'яти розділів, основних висновків, списку використаних джерел та додатку. Основний зміст викладено на 110 сторінках друкованого тексту, містить 54 рисунка, 7 таблиць, 33 сторінки додатків. Список використаних джерел складається з 109 найменувань. Загальний обсяг – 182 с.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми досліджень і необхідність розробки нових методів та засобів контролю електромагнітних параметрів електропровідних виробів циліндричної форми. Показано зв'язок роботи з науковими темами та планами. Сформульовано мету та задачі дослідження. Визначено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, їх апробації та впровадження.

Використано накопичений в даному напрямку науки і техніки світовий досвід, в який зробили свій внесок багато вітчизняних шкіл під керівництвом Троїцького В.А., Мирошникова В.В., Карпаша О.М., Маєвського С.М. та науковці: Ключев В.В., Герасимов В.Г., Дорофеев А.Л., Себко В.П., Dr. Foerster, і багато інших.

У першому розділі виконано аналіз стану досліджень і розробок з визначення фізико-механічних властивостей матеріалів і виробів в області

вихрострумове контролю. Найбільшу увагу приділено напрямку комплексного визначення електромагнітних характеристик стрижнів, труб, заготовок високотехнологічного призначення. На базі огляду науково-технічних і патентних джерел, аналізу і узагальнень досліджень, що проводяться в галузі вихрострумових приладів, установок і пристроїв, визначено основні невирішені задачі і обґрунтовано напрям досліджень.

Другий розділ присвячено математичному моделюванню засобів контролю електромагнітних параметрів електропровідних матеріалів вихрострумовим методом. В основу математичного описання електромагнітних процесів покладено рівняння Фур'є в наступній формі:

$$\Delta \bar{H} = -\bar{J}_{CT} \quad (1)$$

де \bar{J}_{CT} - вектор щільності сторонніх вихорових струмів; \bar{H} - вектор НМП; ∇^2 - Лапласіан, який характеризує розподіл НМП в об'єкті контролю за осями x , y і z .

Показано, що для циліндричного виробу, який має радіус r , розподіл напруженості магнітного поля (НМП) можна описати наступним рівнянням

$$H(r, t) = H_0 \operatorname{erf}(0,282(r/\delta)) \quad (2)$$

При умові, що час $t=2\pi/\omega$, а $\mu_a \sigma = 2/\omega\delta^2$, де δ - глибина проникнення електромагнітного поля, маємо $H(r, t) = H_0 \operatorname{erf}(0,282(r/\delta))$. У результаті вперше отримано рівняння для електрорушійної сили, яка індукується у циліндричному виробі в такій формі

$$E = H_{OK} \left(1 - \operatorname{erf}(0,282(r/\delta)) \right) \quad (3)$$

де H_{OK} - початкова НМП; r_0 - радіус циліндричного стрижня; $\omega=2\pi f$ - кутова частота; f - частота змінного струму; w_n - кількість витків живлячої котушки; s - поперечний перетин стрижня.

Вперше показано, що електромагнітні процеси, які протікають у вихрострумовому перетворювачі, супроводжуються перетвореннями електромагнітної енергії (ЕМЕ). Якщо в деякій області електромагнітного поля котушки існує неоднорідне фізичне тіло, то неоднорідність розподілення потенціалу переносу $\varphi(\vec{r}, \theta)$ ЕМЕ приводить до відхилення від стану рівноваги магнітного поля і є причиною виникнення потоків переносу. У цій області має місце рух ЕМЕ, який характеризується полем швидкостей $v(\vec{r}, \theta)$, де \vec{r} - вектор направленості руху переносу; θ - час переносу. Джерела або стоки потенціалу переносу γ характеризуються об'ємною НМП $H(\vec{r}, \theta)$. В диференціальній формі умова зберігання електромагнітного потенціалу для даного об'єму V має наступну форму

$$\operatorname{div} \vec{v} = \gamma \quad (4)$$

Якщо в розглядуваному об'ємі має місце електромагнітне перетворення, яке є наслідком взаємодії двох електромагнітних матеріалів, то, позначивши $H(\vec{r}, \theta) = \varphi(r, \theta)$ - напруженість електромагнітного поля, $v_i(\vec{r}, \theta)$ - швидкість зміни

електромагнітного поля і $\gamma(\vec{r}, t)$ - інтенсивність притоку енергії електромагнітного поля в одиницю об'єму за одиницю часу t , рівняння переносу приймає наступну форму

(5)

Рівняння (4) практично доповнює основне рівняння зміни НМП (1). Таким чином можна вважати, що вони є адекватними. Їх відмінність полягає в тому, що рівняння (5) враховує такі важливі фактори, як втрати (стік) ЕМЕ, що є надзвичайно важливим при дослідженні вихрострумів перетворювачів. Якщо рух циліндричного виробу в електромагнітному полі незначний у порівнянні зі зміною електромагнітного поля, тобто швидкість $\vec{v}(\vec{r}, \theta) \rightarrow 0$, то одержуємо нелінійну математичну модель переносу ЕМЕ у такій формі

(6)

де $\tau_K = L_{OK} / R_{OK}$ - стала часу перехідного процесу; де $k^2 = j\omega\mu_a\sigma$ - є комплексним узагальнюючим параметром, який характеризує електромагнітні властивості електропровідного матеріалу.

Вперше розроблено фізичну модель електромагнітних перетворень, яку можна подати у формі реологічних перетворень, як показано на рис. 1, а. При появі в котушці струму $i(t)$ почне змінюватися НМП вздовж радіуса котушки за деяким законом, показаним графічно на рис. 1, б, так як процес є інерційним. Якщо електромагнітне поле досягне поверхні стрижня, то НМП почне розповсюджуватися в ньому теж вздовж радіуса до деякого максимального значення. Так як стрижень має індуктивність, то перенесення електромагнітного поля буде інерційним, як показано на рис. 1, в. На границі розділу індуктивність котушки передаватиметься стрижню. При цьому можна умовно виділити границю між точками „а” і „б” (виділену жирною лінією на рис. 1, г). У цій області проходить зміна НМП, яка може бути описана інтегральною імпульсною δ -функцією Дірака. У цьому випадку приймається, що похідні функції зліва та справа рівні нулю згідно з методом нульового градієнта. Згідно з цим методом нелінійне рівняння (6) розпадається на наступну систему рівнянь:

(7)

(8)

Рис. 1. Фізичні моделі перетворень у вихрострумовому перетворювачі

Використовуючи одержану систему лінійних рівнянь для розподілу НМП від котушки до циліндричного виробу, одержані математичні моделі в аналітичній формі:

- залежність ЕРС від зміни електромагнітних параметрів μ_{aC} і σ_C електропровідного круглого матеріалу

(9)

- залежність ЕРС від зміни узагальнюючого параметра β

(10)

- залежність ЕРС від зміни сталої часу T_C для одновиткового ВСП

(11)

де B - стала;

- залежність ЕРС від зміни електричних опорів ВСП

(12)

де Z_C, R_C - повний та активний опір циліндричного виробу.

Рівняння (9) – (12) використані для побудови та дослідження ВСП. Розроблені методики визначення електромагнітних параметрів циліндричних виробів абсолютним і диференціальними методами.

У третьому розділі, виходячи з математичних моделей перетворень, які мають місце у ВСП, запропоновані шляхи побудови засобів контролю таких параметрів: за конструктивним виконанням; за принципом вимірювання; за методом вимірювання; за принципом обробки вимірювальної інформації.

Вперше на основі теорії реологічних перетворень теоретично та експериментально досліджуються такі вихрострумові методи контролю магнітної проникності і питомої електричної провідності: метод змінного струму, метод постійного струму та змішаний метод. Принцип роботи методів змінного струму пояснюється рис. 2.

Рис. 2. Принципова схема для вимірювання електромагнітних параметрів на змінному струмі.

Формули для визначення:

абсолютної магнітної проникності

;

питомої електричної провідності:

де f - частота змінного струму; U_C - спад напруги на активній ділянці виробу; I - сила змінного струму; l, r_C - довжина активної ділянки та радіус виробу відповідно; φ - кут зсуву між напругою та струмом.

Геометричні розміри вимірюються штриховими мірами, частота - частотоміром $p f$, спад напруги – мілівольтметром $p V$, сила струму - амперметром $p A$, зсув фази – фазометром $p \varphi$ (G - генератор).

Схема визначення електромагнітних параметрів змішаним методом показана на рис. 3.

Принцип роботи вимірювальної установки полягає в тому, що спочатку перемикач $П1$ відмикає генератор G , а перемикач $П2$ ставлять у положення 1, що підмикає подвійний міст. З допомогою останнього з достатньо високою точністю вимірюють активний опір стрижня на довжині l між хомутами a і b . Далі схему вимірювання перемикають на генератор змінного струму G , перемикач $П2$ ставлять у положення 2 і вимірюють повний опір стрижня при деякій кутовій частоті ω .

Рис. 3. Принципова схема для вимірювання електромагнітних параметрів змішаним методом

Формули для визначення:
питомої електричної провідності;
абсолютної магнітної проникності;
узагальнюючого параметра.

Вперше запропонована класифікація контактних електромагнітних перетворювачів (КЕМП). Приведені результати теоретичних та експериментальних досліджень алгоритмічного диференційного вихрострумowego засобу контролю; прямого диференційного вихрострумowego засобу контролю; нульового диференційний вихрострумовой засіб контролю і мостових вихрострумowych засобів контролю.

На рис. 4 показана мостова зрівноважуюча вимірювальна схема включення КЕМП, яка містить контрольований зразок (виріб) з електричним активним опором R і внутрішньою індуктивністю L , регулюючий активний опір R_0 та регулюючу індуктивність L_0 , активний опір R_{L0} якої є відомим, опори моста R_2 і R_3 , генератор G синусоїдальних сигналів, частотомір pf , компенсуючу ємність C_K та джерело постійного струму ДПС.

Рис. 4 Принципова схема для вимірювання електромагнітних параметрів нульовим диференційним методом

Для зрівноважування моста використовуються регулюючі опори R_2 і R_3 . Компенсуюча ємність C_K служить для компенсації зовнішньої індуктивності L_E зразка зі струмом. Причому L_E визначається за формулою

Якщо прийняти, що для зрівноваженого стану $R_3 = R$, а $R_4 = R_0$, а також позначити, що $\delta_0 = \sqrt{1 + (\omega_p L_0 / R_0)^2}$, то одержуємо рівняння для похибки вимірювання нульовим методом, коли схема знаходиться в резонансному режимі роботи $U_\delta = U_0 \delta_0 \Delta R / (R + \delta_0^2 R_0)$, де $\Delta R = R - R_0$.

Вимірювальна незрівноважувальна мостова схема вихрострумowego засобу контролю приведена на рис. 5. Схема має зразковий ВСП, опір R_δ - у діагоналі мостової схеми та мілівольтметр mV для вимірювання напруги в діагоналі моста.

Принцип роботи незрівноваженої вимірювальної схеми полягає в тому, що з допомогою мілівольтметра mV вимірюють напругу в діагоналі моста, яка є пропорційною зміні електромагнітних параметрів контрольованого виробу.

Рис. 5. Диференційна незрівноважуюча схема вихрострумowego засобу контролю

При живленні схеми рис. 5 напругою змінного струму від генератора G маємо

де U_B - вимірювана напруга на діагоналі мостової схеми; $\bar{Z} = Z_0 \operatorname{tg}(\omega L / R)$,
 $Z_0 = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$ - повний опір контрольованого виробу; $\bar{Z}_C = Z_{C0} \operatorname{tg}(\omega L_C / R_C)$,
 $Z_{C0} = \sqrt{R_C^2 + (\omega L_C)^2}$ - повний опір стандартного зразка.

Приріст індуктивності контрольованого виробу $\Delta L = 8(U_B / U_0)[L_C + (U_B / \omega U_0)]$, а приріст активного опору при живленні вимірювальної схеми напругою постійного струму дорівнюватиме $\Delta R = 2R_C(U_B / U_0)(3 + (R_C / R_\partial))$. Залежність ΔU_n , $\Delta \varphi$, від $\Delta \mu_r$, $\sigma = \operatorname{const}$ приведена на рис. 6, а залежність ΔU_n , $\Delta \varphi$, від σ , $\Delta \mu_r = \operatorname{const}$ на рис. 7.

Рис.6. Залежність ΔU_n , $\Delta \varphi$, від $\Delta \mu_r$,
при $\sigma = \operatorname{const}$

Рис. 7. Залежність ΔU_n , $\Delta \varphi$, від σ ,
при $\Delta \mu_r = \operatorname{const}$

У четвертому розділі розглянуті питання практичної реалізації контактних електромагнітних перетворювачів (КЕМП).

Значна увага приділена теоретичному та експериментальному дослідженню похибок вимірювання, та принципам побудови КЕМП для контролю таких параметрів, як крупнотонажних вантажів, тиску в трубопроводах, механічних крутячих моментів, залізобетонних конструкцій тощо. Приведено математичне описання статичних характеристик КЕМП за питомим електричним опором: та абсолютною магнітною проникністю:.

У п'ятому розділі приведені результати експериментальних досліджень КЕМП, які працюють на змінному та постійному струмі, заснованих на мостових електричних схемах.

Залежність вихідної напруги КЕМП від зміни питомої електричної провідності та абсолютної магнітної проникності показані відповідно на рис. 8 і 9, а залежності відхилення кута зсуву фази між напругою і струмом від зміни узагальнюючого параметра $\Delta \beta$ (при сталому значенні параметра $\xi = l / \Pi$, де l - довжина виробу; Π - його периметр) і $\Delta \xi$ - відповідно на рис. 10 і 11. Теоретичні та експериментальні залежності $\delta \mu_a / \mu_{ac} = f(\delta \beta)$ при $\sigma = \operatorname{const}$ і $\delta \sigma / \sigma_0 = f(\delta \beta)$ при $\mu_a = \operatorname{const}$ приведені відповідно на рис. 12 і 13.

Рис. 8. Залежність $\Delta U_B = f(\Delta\sigma)$
при $\beta = const$

Рис. 9. Залежність $\Delta U_B = f(\Delta\beta)$
при $\sigma = const$

Рис. 10. Залежність $\varphi = f(\Delta\beta)$
при $\xi = 50$

Рис. 11. Залежність $\varphi = f(\xi)$
при $\beta = 60$

Рис. 12. Залежність $\delta\mu_a / \mu_{ac} = f(\delta\beta)$
при $\sigma = const$:
1 – експериментальна;
2 – теоретична.

Рис. 13. Залежність $\delta\sigma / \sigma_0 = f(\delta\beta)$
при $\mu_a = const$:
1 – експериментальна;
2 – теоретична.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі наведено теоретичне узагальнення науково-практичної задачі і її нове розв'язання, що полягає в створенні основ сучасних приладів на базі вихрострумового методу визначення електромагнітних характеристик високотехнологічних матеріалів. На базі узагальнення технологічних і технічних характеристик розвинуто концепції створення методів і приладів для комплексного контролю питомої електричної провідності та абсолютної магнітної проникності. Теоретично і експериментально досліджено роботу вихрострумових приладів різного призначення на основі контактних методів контролю. Встановлено особливості визначення електромагнітних характеристик різними контактними методами. Узагальнено результати теоретичних і експериментальних досліджень, на основі яких запропоновано методи оцінки механічних параметрів, зокрема: механічних напружень, крутячих моментів, теплових впливів тощо.

Основні наукові та прикладні результати роботи полягають у наступному:

1. Виконано аналітичні дослідження методів і засобів контролю відносної магнітної проникності і питомої електричної провідності стрижнів. В аналітичній формі, за рахунок використання теорії переносу імпульсу електромагнітної енергії і теорії реологічних перетворень, одержано вирази для опису електромагнітних процесів в електропровідних стрижнях. Отримано статичні та динамічні моделі вихрострумівих перетворювачів шляхом аналітичного розв'язку нелінійного диференціального рівняння переносу імпульсу напруженості магнітного поля і використання методу нульового градієнта.

2. Розроблено та модифіковано методи вихрострумівого неруйнівного контролю відносної магнітної проникності і питомої електричної провідності стрижнів круглого перетину. Вперше розроблено метод визначення електромагнітних параметрів стрижнів, який заснований на сумісному використанні статичної характеристики та кривої перехідного процесу при живленні вимірювальної електричної схеми постійним струмом. Показано, що стала часу перехідного процесу може бути визначена аналітично при використанні змішаного методу, що дозволяє з достатньо високою точністю визначати абсолютну магнітну проникність за величиною активного опору контрольованого виробу та його сталої часу.

3. Результати досліджень метрологічних можливостей методів і характеристики запропонованих приладів контролю феромагнітних електропровідних стрижнів показують, що є можливість підвищити чутливість та знизити похибку за рахунок використання диференційного методу вимірювання питомої електричної провідності та магнітної проникності.

Приведені теоретичні та експериментальні дослідження похибок вимірювання абсолютної магнітної проникності та питомої електричної провідності запропонованих засобів контролю. Показано, що зміна узагальнюючого параметра на $\pm 10\%$ приводить до зміни кута зсуву фаз на $0,02$ рад.

4. Теоретичні дослідження засобів контролю електромагнітних параметрів, побудованих на основі диференційних методів, дозволили розробити метод визначення відносних приростів питомої електричної провідності та абсолютної магнітної проникності з врахуванням зовнішнього електромагнітного поля розсіювання; та обґрунтувати визначення електромагнітних параметрів виробів алгоритмічно-диференційним методом, прямим диференційним методом, та нульовим диференційним методом.

5. Отримано аналітичні вирази для практичних розрахунків відносної магнітної проникності та відносної питомої електричної провідності, а також приведені стохастичні математичні моделі для розрахунку зміни активного опору та індуктивності контрольованого виробу. Показано, що для такого засобу контролю залежність зміни напруги від зміни узагальнюючого параметра на $\pm 30\%$ є практично лінійною. Це дозволяє практично вдвічі підвищити чутливість перетворення і точність вимірювання.

6. Аналітично обґрунтовано зрівноважуючий засіб неруйнівного

контролю, а також алгоритм визначення питомої електричної провідності та абсолютної магнітної проникності. Розроблено засіб контролю електромагнітних параметрів контрольованого виробу, а також математичне описання незрівноваженого мостового методу вимірювання і формули для визначення активного опору та індуктивності контрольованого виробу.

7. Розвинуто принципи побудови диференційних контактних електромагнітних приладів з перетворювачами КЕМП. Модифіковано вихрострумний перетворювач визначення електромагнітних параметрів електропровідних виробів, який заснований на змішаному методі побудови таких перетворювачів. Розроблено процедуру визначення питомої електричної провідності та абсолютної магнітної проникності таким перетворювачем. Запропонована схема диференційної вимірювальної установки для контролю електропровідних виробів контактним способом.

8. Розроблено методики розрахунку параметрів контактних вимірювальних перетворювачів, а також оцінки їх метрологічних характеристик.

9. Експериментальні дослідження показали, що похибка вимірювання питомої провідності не перевищує 0,2%, а відносної магнітної проникності – 0,9%.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Себко В. П. Влияние магнитной проницаемости и удельной электрической проводимости на вихревые сигналы контактного электромагнитного преобразователя / В. П. Себко, С. Г. Львов, Н. В. Титова // Вісник Національного технічного університету „Харківський політехнічний інститут” – Харків НТУ „ХПІ” – 2004. – №22. – С. 71–74.

2. Себко В. П. Контактный двухпараметровый электромагнитный метод и преобразователь в дифференциальном варианте / В. П. Себко, Н. В. Титова // Вісник Національного технічного університету „Харківський політехнічний інститут” – Харків НТУ „ХПІ” – 2004. – №5. – С. 67–76.

3. Себко В. П. Определение погрешностей многопараметровых измерений контактными электромагнитными преобразователями / В. П. Себко, Н. В. Титова, А. В. Епихин // Вісник Національного технічного університету „Харківський політехнічний інститут” – Харків НТУ „ХПІ” – 2004. – №42. – С. 110–117.

4. Себко В. П. Оценка погрешностей определения электромагнитных параметров контактными преобразователями / В. П. Себко, Н. В. Титова // Вісник Національного технічного університету „Харківський політехнічний інститут” – Харків НТУ „ХПІ” – 2005. – №42. – С. 34–42.

5. Себко В. П. Дифференциальный контактный метод определения магнитного и электрического параметров цилиндрического изделия / В. П. Себко, Н. В. Титова, Н. И. Подлесный // Технічна електродинаміка. – 2004. – ч.1 – С. 49–52.

6. Себко В. П. Модификации двухпараметрового контроля электромагнитного метода / В. П. Себко, Н. В. Титова // Електротехніка і електродинаміка. – 2004. – №1. – С. 83–86.

7. Себко В. П. Контактный двухпараметровый электромагнитный метод контроля цилиндрических проводящих изделий / В. П. Себко, Н. В. Титова // Інформаційні технології, наука, техніка, здоров'я і освіта: XII Міжнародна НТК. 2004. – С.397.

8. Себко В. П. Точностные характеристики контактного электромагнитного преобразователя / В. П. Себко, Н. В. Титова // Информационные материалы 5-го юбилейного международного семинара-выставки „Современные технологии и приборы неразрушающего контроля и технической диагностики”. – Харьков. – 2004. – С.3–7.

9. Себко В. П. К расчету параметров контактного электромагнитного преобразователя / В. П. Себко, Н. В. Титова // Вестник Национального технического университета "Харьковский политехнический институт" – Харьков, НТУ "ХПИ" – 2004. – №43. – С. 179 – 181.

10. Тітова Н. В. Основні теорії вихорострумів методів контролю електромагнітних параметрів / Н. В. Тітова // Збірник тез доповідей XI Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Технологія-2008» з міжнародною участю – Сєверодонецьк – 2008. – С.153.

11. Тітова Н. В. Фізичні моделі перетворень при електромагнітному контролі параметрів круглих електропровідних виробів / Н. В. Тітова // Донбас-2020: наука і техніка виробництва: Матеріали IV науково-практичної конференції. м. Донецьк, 27-28 травня 2008 р. – Донецьк – 2008. – С. 187–191.

12. Тітова Н. В. Контроль електромагнітних параметрів електропровідних виробів методів постійного струму / Н. В. Тітова // «Наукові дослідження – теорія та експеримент 2008»: Матеріали четвертої міжнародної науково-практичної конференції, м. Полтава, 19-21 травня 2008 р. – Полтава – 2008. – Т.8 – С.74–76.

13. Тітова Н. В. Математичні моделі вихорострумів перетворювачів / Н. В. Тітова, Г. М. Сучков // Вісник Національного технічного університету „Харківський політехнічний інститут” – Харків НТУ „ХПИ” – 2008. – №48. – С. 43 – 48.

АНОТАЦІЯ

Тітова Н.В. Засоби контролю електромагнітних параметрів циліндричних виробів на основі диференційного контактного методу. – 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”, Луганськ – 2010.

Дисертацію присвячено дослідженню проблемних питань, пов'язаних з удосконаленням вихорострумів методів та розробкою на їх основі нових електромагнітних засобів контролю питомої електричної провідності та абсолютної магнітної проникності електропровідних виробів циліндричної форми. У роботі представлено порівняльний аналіз відомих методів та засобів

контролю електромагнітних параметрів електропровідних виробів, вказується на їх переваги та недоліки, обґрунтована доцільність використання вихрострумів засобів для контролю питомої електричної провідності та абсолютної магнітної проникності виробів, наприклад, металевих прутків, стрижнів. Досліджено об'єкт контролю та розроблені математичні моделі процесів вимірювання електромагнітних параметрів циліндричних виробів.

Математичні моделі перетворень, які мають місце в первинних вимірювальних перетворювачах, одержані на основі теорії електромагнітного поля, теорій реологічних перетворень і метода нульового градієнта для аналітичного розв'язку нелінійних диференціальних рівнянь. На основі цих моделей розроблені диференційні методи визначення електромагнітних параметрів електропровідних виробів на змінному струмі, постійному струмі та змішаний метод. Отримані аналітичні залежності для запропонованих диференційних засобів контролю, а також запропоновані алгоритми розрахунку питомої електричної провідності та абсолютної магнітної проникності виробів, які мають круглу форму.

Розроблені експериментальні зразки засобів контролю електромагнітних параметрів циліндричних виробів на основі диференційного контактного методу, який реалізує абсолютний, відносний, нульовий і мостові принципи вимірювання та отримано залежності для оцінювання основних статичних метрологічних характеристик. Проведено метрологічні дослідження експериментальних зразків і визначені похибки вимірювання. На основі розрахованих похибок першого і другого роду оцінено вірогідність контролю диференційними контактними методами.

Ключові слова: питома електрична провідність, абсолютна магнітна проникність, електромагнітне поле, вихрострумівий метод, засіб контролю, математична модель, контактний диференційний метод, метрологічні характеристики, невизначеність вимірювання, вірогідність контролю.

АННОТАЦІЯ

Титова Н.В. Средства контроля электромагнитных параметров цилиндрических изделий на основе дифференциального контактного метода. – 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”, Луганск – 2010.

Диссертация посвящена исследованию проблемных вопросов, связанных с усовершенствованием вихретоковых методов и разработке на их основе новых электромагнитных средств контроля удельной электрической проводимости и абсолютной магнитной проницаемости электропроводящих изделий цилиндрической формы. В работе представлен сравнительный анализ известных методов и средств контроля электромагнитных параметров электропроводящих изделий, показаны их достоинства и недостатки, обоснована целесообразность

использования вихретоковых средств для контроля удельной электрической проводимости и абсолютной магнитной проницаемости электропроводящих изделий, например, металлических прутков, стержней, которые претерпевают тепловые или механические нагрузки. Исследован объект контроля и разработаны математические модели процессов измерения электромагнитных параметров цилиндрических изделий.

Используя теорию электромагнитного поля Максвелла и Гельмгольца, а также теорию реологических превращений, впервые получено нелинейное дифференциальное уравнение преобразований, происходящих в цилиндрическом изделии при действии на него электромагнитного поля, которое решено в аналитической форме методом нулевого градиента. На основании полученных математических моделей предложены новые вихретоковые методы измерения электромагнитных параметров изделий цилиндрической формы, среди которых метод переменного тока, метод постоянного тока, смешанный метод, а также дифференциальные методы. Предложены и разработаны контактные дифференциальные методы и средства контроля удельной электрической проводимости и абсолютной магнитной проницаемости электропроводных материалов. Получены аналитические зависимости для предложенных дифференциальных средств контроля, а также приведены алгоритмы расчета удельной электрической проводимости и абсолютной магнитной проницаемости изделий с круглым сечением.

Аналитически обоснован уравнивающий неразрушающий метод контроля, а также алгоритм определения удельной электрической проводимости и абсолютной магнитной проницаемости обеспечивают разработку средств контроля электромагнитных параметров изделий.

Разработаны экспериментальные образцы средств контроля электромагнитных параметров цилиндрических изделий на основе дифференциального контактного метода, которые реализуют абсолютный, относительный, нулевой и мостовые принципы измерений и получены зависимости для оценки основных статических метрологических характеристик. Проведены метрологические исследования экспериментальных образцов и определены их погрешности измерений. Показано, что достоверность измерений не хуже 0,90-0,93.

Проведены метрологические исследования экспериментальных образцов и определены погрешности измерений. На основании рассчитанных погрешностей первого и второго рода выполнена оценка достоверности контроля дифференциальными контактными методами. Описаны примеры возможного применения дифференциальных контактных средств контроля, например, для контроля больших избыточных давлений в трубопроводах и емкостях, большегрузных тяжестей, крутящих моментов валов и другие.

Ключевые слова: удельная электрическая проводимость, абсолютная магнитная проницаемость, электромагнитное поле, вихретоковый метод, средство контроля, математическая модель, контактный дифференциальный метод, метрологические характеристики, неопределенность измерения, достоверность контроля.

ABSTRACT**Titova N. V. Means for controlling over Electromagnetic Parameters of Cylinder Devices wares on the Basis of Differential Contact Method. – Manuscript.**

Thesis for PhD degree in Engineering on the speciality 05.11.13. Devices and controlling methods and determination of substance composition. Lugansk – 2010.

Thesis considers the issue of research of whirelcurrent methods and development on their basis new electromagnetic means of control of electric permittivity and absolute magnetic permeability of electric conductive devices of cylinder form. The comparative analysis of the known methods and means of control of electromagnetic parameters of electric conductive devices are presented in The Thesis, Their advantages and drawbacks are showed, The expediens of usage whirelcurrent devices for controlling over electric permittivity and absolute magnetic permeability of electric conductive devices, for example, metallic twigs, bars which suffer thermal and mechanical loading.

Using the Maxwell and Gelmgoldt theory of electromagnetic field and the theory of reological transformations, it was first received nonlinear differential equalization of transformations which take place in cylinder device influenced by electromagnetic field, which is solved in analytical form by the method of zeroing gradient. On the basis of received mathematical models new whirelcurrent methods of measuring of electromagnet parameters of devices of cylinder form were suggested, among which is the method of alternating current, direct current, mixed current and differential methods. Analytical dependences for suggested differential means of control are received, algorithms of calculation of these parameters are given.

Experimental standards of means of control of electromagnetic parameters of cylinder devices are developed on the basis of differential contact method, which realize absolute, relative, zeroing and bridge principles of measuring and dependences for estimation of the main static characteristics are received. Metrology researches of experimental standards are made and errors changes are determined. On the basis of the expected errors of the first and second order the estimation of authenticity

Keywords: electric permittivity, absolute magnetic permeability, electromagnetic field, whirelcurrent method, means of control, mathematical model, contact differential method, metrological characteristics, measuring vagueness, control authenticity.