

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ Г.В.КАРПЕНКА

*на правах рукопису*

**ЗИБОВ  
ВОЛОДИМИР МИКОЛАЙОВИЧ**



**МЕТОДИ КОМПЕНСАЦІЇ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ФУНКЦІЙ  
ВПЛИВУ ДІЮЧИХ ФАКТОРІВ У СЕЛЕКТИВНОМУ  
ВИХРОСТРУМОВОМУ КОНТРОЛІ**

спеціальність 05.11.05 -- прилади і методи вимірювання  
електричних і магнітних величин

**Автореферат**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

*Львів-1997*

621.317

ЛННБ України ім.В.Стефаника



00738108 (R)

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Фізико-механічному інституті імені Г.В.Карпенка Національної академії наук України.

Науковий керівник: професор, докт.техн.наук  
МІЗЮК Леонід Якович

Офіційні опоненти: провід.наук.співроб., докт.техн.наук  
НІЧОГА Віталій Олексійович  
доцент, канд. техн. наук  
Блажкевич Іван Ілліч

Провідна установа: Державний науково - дослідний інститут  
«СИСТЕМА»

Захист відбудеться « 26 » червне 1997 р.  
о 15 год. на засіданні спеціалізованої ради К. 04.01.03 при  
Фізико - механічному інституті НАН України (290601, Львів, вул.  
Наукова, 5)

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці інституту.

Автореферат розісланий « 26 » травне 1997 р.

**Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради  
ст.наук.співр., канд.техн.наук**

**В.Д.ПОГРЕБЕННИК**

AB-38.204

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ.

**АКТУАЛЬНІСТЬ ТЕМИ.** Стан об'єкту контролю (ОК) (наприклад, зразка матеріалу при вихрострумовому контролі), як правило, визначається декількома параметрами  $X = \{ X_i \} i=1..n$ . Такими параметрами  $X_i$  в згаданому випадку можуть бути питомі електропровідність матеріалу, плоско - паралельний зороз між датчиком та контрольованим зразком та ін. Для незалежних  $X_i$  їх прями вимірювання можливі лише селективними датчиками, кожний з яких реагує лише на один із параметрів. Однак при залежних  $X_i$  та неселективних датчиках їх вихідний сигнал визначається декількома параметрами  $X_i$ . Так постає задача селективного контролю цих параметрів. Ця задача ускладнюється, якщо параметри, необхідні для визначення стану ОК, можна визначити лише за даними вимірювань інших параметрів, тобто, коли мова йде про непрямі вимірювання. Такі технічні задачі селективного контролю параметрів досліджуваного об'єкту характерні для неруйнівного контролю, завданням якого є забезпечення високої якості виробів (наприклад, виявлення прихованих дефектів). Для контролю виробів з електропровідних матеріалів широке застосування одержав електромагнітний метод контролю (ЕМК), або метод вихрових струмів (МВС).

Систему вихрострумового контролю умовно можна зобразити у вигляді двох взаємозв'язаних частин: підсистеми "вихрострумовий перетворювач-об'єкт контролю" (ВСП-ОК), вихідний сигнал якої несе інформацію про різні параметри об'єкту контролю, та підсистеми перетворення сигналів (ППС), у якій виділяється інформація про ці параметри. Важливою особливістю такої системи є те, що при розв'язанні задач селективного контролю параметрів неможливо аналізувати цю систему відокремлено від конкретного об'єкту контролю, тобто необхідно розглядати ВСП і ОК як деякий пристрій, що формує сигнал відгуку. Серед багатьох параметрів, що визначають стан ОК, при розробці системи контролю враховуються лише ті, які впливають на вихідний сигнал першої підсистеми. Такі параметри розглядаються як діючі фактори (ДФ). Особливість МВС полягає в тому, що інформативні параметри вихідного сигналу підсистеми ВСП-ОК визначаються одночасно декількома ДФ і розглядаються як функції багатьох змінних. Ця багатофакторність МВС обумовлює як переваги, так і перешкоди в його реалізації. МВС дозволяє контролювати різні ДФ, але необхідним є застосування спеціальних заходів для реалізації їх селективного контролю, тому що при визначенні факторів контролю (ФК) інші розглядаються як фактори завади (ФЗ). Задача зменшення впливу ФЗ стає актуальною в усіх напрямках вихрострумового контролю. Так, мінімальні розміри дефектів (дефектоскопія), що реєструються приладом, в значній мірі залежать від таких ФЗ як варіації електричних і магнітних властивостей та геометрії ОК. Впливом тих же ФЗ визначається точність вимірювання геометричних характеристик (товщинометрія), або його електромагнітних характеристик (структуроскопія).

Багатофакторність ЕМК визначає і завдання засобів вихрострумового контролю: забезпечення селективного контролю ДФ.

Крім того, можливість зміни як числа, так і складу ДФ, визначає необхідність розробки селективних систем контролю, адаптивних до змін ДФ. При розробці таких систем важливим стає вибір загального для них критерію кількісної оцінки ефективності застосованих перетворень сигналу відгуку, який дозволить би співставляти різні системи контролю. Незважаючи на чисельні розробки, спрямовані на створення селективних пристроїв контролю, в літературі відсутній такий критерій, що утруднює співставлення ефективності різних ППС.

Сучасний розвиток технології виробництва та поява нових матеріалів (багатошарові структури, композитні матеріали та ін.) визначають застосування засобів контролю в умовах впливу кількох ДФ. В той же час відомі прилади, які розроблені на основі традиційних методів (амплітудний, фазовий, амплітудно-фазовий), орієнтовані в основному на двофакторні задачі. Такі методи стають малоефективними при дії багатьох факторів. Розв'язок багатofакторних задач контролю базується на створенні високоселективних систем контролю, що забезпечують роздільний контроль ДФ. Складність таких завдань визначає необхідність розробки і нових методів контролю.

### **МЕТА РОБОТИ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ.**

Мета роботи полягає в теоретичному та експериментальному дослідженні методів селективного контролю діючих факторів, які розширюють можливості апаратних засобів у розв'язанні багатofакторних задач ЕМК на основі зменшення додаткової похибки, обумовленої фактором завади. Її досягнення передбачає:

- аналіз відомих методів контролю, які дозволяють зменшити вплив факторів завади, та оцінку можливості їх використання як базових у розробці систем селективного контролю діючих факторів;
- визначення кількісної оцінки ефективності методу формування інформаційного сигналу для співставлення різних систем контролю;
- дослідження можливості застосування одночастотного сигналу відгуку в селективному контролі діючих факторів;
- встановлення та використання можливостей багаточастотного методу контролю в розробці систем ЕМК;
- проведення експериментального підтвердження теоретичних висновків та результатів моделювання.

### **НАУКОВА НОВИЗНА.**

- В дисертаційній роботі отримані нові результати:
- вперше досліджена функція впливу діючих факторів, як залежність нормованого приросту вносимої напруги від приросту факторів, і визначена її структура, що характеризує можливість селективного контролю діючих факторів при одночастотному сигналі відгуку;
  - досліджено компенсаційний метод формування інформаційного сигналу при багаточастотному зондуючому полі, який дозволяє формувати функцію компенсації близьку до функції впливу факторів завади в сигналі відгуку основної частоти;
  - розроблено новий метод селективного контролю діючих факторів при одночастотному сигналі відгуку на основі моделювання області існування функцій впливу цих факторів.

## **НА ЗАХИСТ ВІНОСЯТЬСЯ:**

- формування у вимірювальній частині системи ЕМК функцій впливу діючих факторів з нормованих приростів сигналу відгуку, що забезпечують можливість селективного контролю цих факторів;
- принципи побудови селективних систем контролю при багаточастотному полі зондування, яке використовується для створення функції компенсації при компенсаційному методі формування інформаційного сигналу на основі операторів множення і додавання функцій впливу діючих факторів;
- результати дослідження методу селективного контролю діючих факторів на основі моделювання в ППС області існування функцій впливу цих факторів;
- результати впровадження наукових висновків і рекомендацій, які знайшли свою реалізацію у впроваджених вихрострумових дефектоскопах типу ВД-ДФП.

## **ТЕОРЕТИЧНА ТА ПРАКТИЧНА ЦІННІСТЬ РОБОТИ** полягає:

в обґрунтуванні селективного контролю діючих факторів при одночастотному сигналі відгуку; оцінці можливостей компенсаційного методу при використанні багаточастотного поля зондування; розробці методу селективного контролю діючих факторів на основі моделювання в ППС області існування функцій впливу цих факторів: розробці програм розрахунку на ЕОМ коефіцієнту ефективності багаточастотного та амплітудно - фазового методів контролю та програми селективного контролю діючих факторів в двофакторній задачі контролю.

## **РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ.**

Дослідження дисертаційної роботи проводились при виконанні теми ФМІ НАН України РБ-22/128 "Розробка методів селективного вихрострумового контролю та створення високочутливих датчиків для дефектоскопії", а також в рамках госпдоговору з ВО "Південний машинобудівний завод" (м. Дніпропетровськ) "Розробка засобів контролю якості відформованих тонкостінних трубок із сталі ОХ18Н10Т"

**АПРОБАЦІЯ РОБОТИ.** Результати проведених досліджень доповідались на IV-ій галузевій науково-технічній конференції "Повышение надежности авиационной техники средствами неразрушающего контроля" м. Саратов, 1983 р; на IV-ій Всесоюзній міжвузівській конференції "Электромагнитные методы контроля качества материалов и изделий" м. Омськ, 1983 р; на науково-технічній конференції "Фізичні методи та засоби контролю матеріалів та виробів" м. Славське, 1996 р.

**ПУБЛІКАЦІ.** Основні результати досліджень викладені в 10-ти статтях та 2-х авторських свідоцтвах. Всього по темі дисертації опубліковано 21 робота.

Всі результати, що складають основний зміст дисертаційної роботи, отримані автором самостійно. В публікаціях, які написані у співавторстві, дисертанту належать:

в роботі (4) - математичне обґрунтування вибору частоти опорної

напруги в одноканальних пристроях двочастотного методу контролю; в роботі (8) - застосування методу найменших квадратів для визначення оптимальних значень інформативних параметрів сигналу допоміжної частоти;

в роботі (9) - математичні вирази для коефіцієнтів ефективності двочастотного та амплітудно-фазового методів контролю, розрахунок цих коефіцієнтів в задачі зменшення впливу плоско-паралельного зазору та питомої електропровідності;

в роботі (10) - введення коефіцієнта ефективності методу контролю, визначення селективності системи електромагнітного контролю, розрахунок функцій впливу плоско-паралельного зазору;

в роботі (11) - застосування методу моделей для роздільного контролю декількох факторів, математичне доведення представлення функції впливу рядом їх власних функцій та їх відхилень, обумовлених дією факторів завод.

**СТРУКТУРА І ОБ'ЄМ РОБОТИ.** Дисертаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, та висновків. Вона викладена на 178 сторінках (в тому числі 31 сторінка рисунків), включає список використаної літератури (123 найменування) та п'ять додатків на 51 сторінках.

### **ЗМІСТ РОБОТИ**

**У ВСТУПІ** обгрунтована актуальність досліджуваної задачі, сформульовані мета, напрямки дослідження, наукова новизна, практична цінність, положення, що виносяться на захист, коротко викладено зміст дисертації і додатків до неї.

**У ПЕРШОМУ РОЗДІЛІ** викладено результати аналізу відомих методів зменшення дії ФЗ для систем контролю з вихрострумовим перетворювачем (ВСП) трансформаторного типу. Її умовне розділення на дві підсистеми відображає два напрямки в реалізації роздільного контролю ДФ: 1) зменшення дії ФЗ в підсистемі ВСП-ОК і 2) формування вихідного сигналу ППС, обумовленого лише одним ФК, на основі перетворень сигналів, які відбуваються в цій підсистемі. Коротко викладено основні властивості способів зменшення дії ФЗ першого напрямку, які ґрунтуються на розробці спеціальних конструкцій ВСП та стабілізації значень ФЗ. В роботі досліджуються методи зменшення дії ФЗ другого напрямку. Тому "метод контролю" розглядається як метод формування на виході ППС напруги, яка залежить лише від ФК і визначається як інформаційний сигнал.

Розробка відомих методів контролю базується на аналізі годографів внесеної напруги, що створюється на основі інформативних параметрів сигналу відгуку. Це визначає важливу роль математичної моделі підсистеми ВСП-ОК в розробці засобів контролю. Основною вимогою, що ставиться до математичної моделі при роздільному контролі ДФ, є відображення дії всіх ДФ, що сприяє опису процесів формування сигналу відгуку та визначенню ролі кожного ДФ. В роботі коротко описані основні напрямки в побудові математичної моделі.

За способом зменшення дії ФЗ методи контролю в роботі об'єднані в наступні групи:

1. Методи, засновані на виборі режиму контролю ("пасивні" методи контролю).

2. Компенсаційні методи ("активні" методи контролю).

3. Методи роздільного контролю ДФ на основі розв'язку системи

рівнянь, що зв'язують інформативні параметри сигналу відгуку з ДФ. В роботі розглянуто основні особливості методів цих груп.

Можливості методів першої групи визначаються існуванням режиму контролю, що задається узагальненим параметром  $\beta$ , при якому вплив ФЗ на вибраний для контролю інформативний параметр сигналу відгуку є мінімальним (амплітудний, фазовий), або годографи ФК і ФЗ - ортогональні (амплітудно-фазовий метод). Однак значна нелінійність годографів внесеної напруги вже для двофакторних задач обмежує діапазон зміни ДФ, в якому виконуються ці умови. При збільшенні числа врахованих ДФ практично стає недоцільним використання цих методів. Другим недоліком методів цієї групи є використання лише одного інформативного параметра сигналу відгуку (амплітудний та фазовий), або в такому їх поєднанні, коли неможливо розглядати їх як два незалежних параметри (амплітудно-фазовий метод). В той же час ФК більш повно визначається в сигналі з більшим числом ступенів свободи (тобто в багатомірному сигналі).

Методи першої групи засновані на виборі режиму контролю, що задовільняє певним умовам. Ця особливість дозволяє розглядати їх як методи "пасивного" формування інформаційного сигналу, тому що можливість їх реалізації визначається виключно наявністю такого режиму, а аналіз годографів зводиться до його пошуку.

Методи другої групи засновані на компенсації частини сигналу відгуку, зумовленої ФЗ. До них відносяться модуляційний, імпульсний та багаточастотний (зокрема двочастотний) методи контролю. В роботі коротко описано основні властивості модуляційного та імпульсного методів. Важливе місце в даній групі займає двочастотний метод. Це визначається тим, що аналіз взаємодії гармонічних сигналів відгуку різних частот, що має місце в підсистемі ВСП-ОК, дозволяє виявити загальні властивості для методів цієї групи, тому що в їх основі лежить спектральний аналіз складних сигналів відгуку. Це дозволяє дати загальну оцінку можливостей цих методів та визначити умови їх застосування.

В двочастотному методі контролю основна частота напруги збудження визначається з умов даного завдання контролю, а допоміжна - для зменшення дії ФЗ. Реалізація методу не пов'язана з існуванням особливих режимів контролю, що характерно для методів першої групи, а вибір допоміжної частоти визначається типом чутливості до ФК та тах чутливості до ФЗ. В розробках двочастотного методу слід відзначити способи векторного додавання сигналів відгуку основної та допоміжної частот, при якому в інформаційному сигналі зберігається мірність сигналу відгуку основної частоти. Однак незважаючи на чисельні публікації по реалізації двочастотного методу (на рівні авторських свідоцтв), його теоретичне дослідження стосовно завдань роздільного контролю ДФ, глибоко не пророблене.

Загальним для компенсаційних методів є те, що вони засновані на використанні реальних, тобто нелінійних функціональних залежностей інформативних параметрів сигналу відгуку від ДФ, що формуються в підсистемі ВСП-ОК. Компенсація частини сигналу відгуку основної частоти, що здійснюється в ППС, дозволяє розглядати ці методи як "активні" методи формування інформаційного сигналу.

Розв'язок багатofакторних задач контролю "пасивними" методами утруднюється вже при трьох ДФ, тому для роздільного контролю більшого їх числа використовується розв'язання системи рівнянь (методи третьої групи), що описує залежності інформативних параметрів сигналу відгуку від ДФ. Для її побудови використовується багатомірний сигнал відгуку, на основі якого будується матриця чутливості  $S$  вихрострумowego перетворювача. Основною умовою реалізації багатofакторного контролю є умова  $\det S \neq 0$ . Однак при контролі складних об'єктів, структура і стан ДФ яких невідомі, визначення матриці  $S$  стає складним. В цьому випадку особливо важливим є виконання умови реалізації, тому що похибки вимірювань можуть призводити до її порушення. Запропонований контроль ДФ, заснований на розв'язанні системи рівнянь, має два припущення. Перше з них - це розгляд лише невеликих приростів ДФ, що приводить до розв'язання системи лінійних алгебраїчних рівнянь. Друге припущення це умова незмінності всіх електромагнітних характеристик матеріалу на всіх робочих режимах збудження, що використовуються для контролю. Ці припущення справедливі лише для вузького класу задач при контролі ізотропних однорідних неферомагнітних матеріалів.

Вдосконалення цього методу пов'язано з розвитком статистичного підходу, спрямованого, по суті, на побудову функціональних зв'язків інформативних параметрів сигналу відгуку з ДФ на основі поліноміальної моделі. Це визначає і складність в його реалізації, оскільки потрібно відібрати значну кількість зразків і провести складні багатofакторні вимірювання. В зв'язку з цим, розвиток статистичного методу визначається розробкою алгоритмів формування оптимальних багатомірних моделей підсистеми ВСП-ОК, методики відбору та експериментального дослідження зразків та комплексним розв'язанням проблеми автоматизації досліджень як на стадії експерименту, так і на стадії обробки його результатів.

Проведений аналіз відомих методів контролю показав, що їх розробка визначається формуванням та обробкою багатомірного сигналу відгуку, а завдання апаратних засобів полягає в його створенні і реалізації одного з розглянутих методів. До створення адаптивних систем контролю найближчим є останній метод, однак широкого застосування він не отримав у зв'язку з використанням лінійної моделі функціональних залежностей інформативних параметрів сигналу відгуку від ДФ. Спроба реалізації методу з врахуванням нелінійності цих залежностей на основі спеціалізованих ВСП не дала бажаних результатів в зв'язку із складністю їх реалізації. Таким чином проблема роздільного контролю ДФ не втратила своєї актуальності.

**У ДРУГОМУ РОЗДІЛІ** викладено результати аналізу можливостей одночастотного сигналу відгуку в селективному контролі ДФ. Особливість ЕМК полягає в тому, що одночасний вплив ДФ на інформативні параметри сигналу відгуку визначає багатofакторну функцію перетворення ДФ (залежність внесеної напруги  $U_{вн}$  від ДФ). При зміні лише одного ФК і постійному початковому значенні ФЗ залежність  $U_{вн}$  (ФК) дає його власну функцію перетворення, яка дозволяє за значеннями  $U_{вн}$  визначати значення ФК. Вплив ФЗ приводить до зміни власної функції ФК, тобто

появи додаткової похибки вимірювання. На цій підставі сформульовано завдання апаратних засобів для забезпечення селективного контролю ДФ, а саме: зменшення додаткової похибки контролю, зумовленої впливом ФЗ, шляхом відтворення на виході системи контролю власної функції перетворення ФК, яка змінюється в підсистемі ВСП-ОК внаслідок впливу ФЗ. Таке формулювання дозволяє конкретизувати і визначення селективності системи контролю як її здатність формувати встановлену власну функцію перетворення та зберігати її в умовах дії ФЗ. Забезпечення селективності системи контролю в рамках даного визначення базується в роботі на виконанні умови, що функція перетворення ДФ, яка формується в підсистемі ВСП - ОК, повинна мати певну структуру, а саме: вона може бути виражена сумою власних функцій перетворення ДФ та складових їх сукупної дії. В цьому випадку роздільний контроль зводиться до виділення необхідної складової функції перетворення ДФ, яке відбувається в ППС. В роботі доведено, що цю умову задовільняє залежність приросту внесеної напруги від приросту ДФ. На основі цих залежностей в аналіз систем контролю введено функції впливу ДФ, створені нормованими приростами внесеної напруги:

$$f(x_1, \dots, x_n) = \frac{U_{ВН}(X_{10} + x_1, \dots, X_{n0} + x_n) - U_{ВН}(X_{10}, \dots, X_{n0})}{U_{ВН}(X_{10}, \dots, X_{n0})}, \quad (1)$$

де  $U_{ВН}(X_{10}, \dots, X_{n0})$  - початкове значення внесеної напруги, яке відповідає значенням ДФ  $X_{10}, \dots, X_{n0}$  еталонного зразка. Показано, що для функції  $U_{ВН}(X_{10} + x_1, \dots, X_{n0} + x_n)$ , яка задовільняє умовам розкладу в ряд Тейлора, функція впливу трьох ДФ може бути виражена рядом

$$f(x_1, x_2, x_3) = \sum_{m=1}^3 \left\{ \varphi(x_m) + \sum_{i=1}^3 \left[ \frac{1}{2} \Delta x_i * \varphi(x_m) + \frac{1}{3} \sum_{\substack{k,l,m \\ k=1}}^3 \Delta x_k \left[ \Delta x_l * \varphi(x_m) \right] \right] \right\} \quad (2)$$

де  $\varphi(x_m)$  - власна функція m-го фактору, яка визначається за (1) при зміні тільки m-го фактору та постійному значенні інших ДФ,

$\Delta x_p = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{q} \frac{d^q}{dx_p^q} x^q$  - оператор диференціювання по p-ій змінній.

Функція впливу  $f(x_1, x_2, x_3)$  визначається сумою власних функцій впливу ДФ та відхиленнями цих функцій, зумовлених сукупною дією ДФ (друга та третя суми в (2)). На основі отриманих результатів стає можливим апроксимувати ортогональні компоненти функції впливу ДФ кінцевими рядами відповідних компонент власних функцій впливу ДФ із змінними коефіцієнтами

$$\text{Ref}(x_1, x_2, x_3) = \sum_{m=1}^3 \left\{ \varphi(x_m) + \sum_{i=1}^3 \left[ \frac{1}{2} [a(x_i, x_m) - 1] + \frac{1}{3!} \sum_{\substack{k,m,i \\ k=1}}^3 [d(x_k, x_i, x_m) - 1] * \right. \right. \\ \left. \left. * [d(x_i, x_m) - 1] \right] \text{Re} \varphi(x_m) \right\}$$

$$\operatorname{Im} f(x_1, x_2, x_3) = \sum_{m=1}^3 \left\{ \varphi(x_m) + \sum_{\substack{m=1 \\ i=1}}^3 \left[ \frac{1}{2} [a(x_i, x_m) - 1] + \frac{1}{3!} \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^3 [d(x_k, x_i, x_m) - 1] \right] \right\} \operatorname{Im} \varphi(x_m); \quad (3)$$

Такий розклад дає основу для моделювання функцій впливу ДФ по її ортогональних компонентах. Коефіцієнти в рядах (3) - функції пристовів ДФ.

Користуючись даним означенням селективності, в роботі визначено критерій для кількісної оцінки ефективності перетворення, що проводиться в ППС. Критерій базується на оцінці відхилення реальної власної функції впливу ФК від теоретичної. Ефективність перетворення оцінюється відношенням

$$\gamma(x_1, \dots, x_n) = \frac{F(x_{\text{ФК}})_P - F(x_{\text{ФК}})_T}{f(x_1, \dots, x_n) - F(x_{\text{ФК}})_T}, \quad (4)$$

де  $F(x_{\text{ФК}})_P$  - реальна, а  $F(x_{\text{ФК}})_T$  - теоретична власна функція впливу ФК на виході системи контролю, тобто нормованою похибкою, визначеною через співставлення рівня залишкового впливу ФЗ на виході системи контролю з його рівнем в сигналі відгуку.

**В ТРЕТЬОМУ РОЗДІЛІ** викладено результати аналізу компенсаційного методу на прикладі двочастотного методу контролю. Згідно (2) відновлення власної функції впливу ФК (r-й фактор) досягається додаванням функції компенсації  $L(x_1, x_2, x_3)$  до функції  $f(x_1, x_2, x_3)$ ,

$$\varphi(x_r) = f(x_1, x_2, x_3) - \left\{ \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq r}}^3 \varphi(x_j) + \sum_{k=1}^3 \left[ \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^3 \frac{1}{2} \Delta x_i * \varphi(x_k) + \frac{1}{3!} \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^3 \Delta x_k \left[ \Delta x_i * \varphi(x_m) \right] \right] \right\} = f(x_1, x_2, x_3) - L(x_1, x_2, x_3) \quad (5)$$

на основі якого принцип компенсації може використовуватись при розробці методів роздільного контролю ДФ. Розглянуті два оператори компенсаційного методу, засновані на множенні та додаванні функцій впливу ДФ. Показано, що оператор додавання функцій впливу ДФ менш складний в реалізації і може використовуватись як базовий в розробці систем контролю. На його основі досліджено двочастотний метод контролю з векторним додаванням сигналів відгуку основної та допоміжної частот. Розглянуті варіанти:

1. Статичного векторного додавання сигналів відгуку, попередньо перетворених у:

- a) напруги проміжної частоти;
- b) напруги однакового фазового кута.

2. Динамічного векторного додавання, заснованого на додаванні напруг різних частот.

Показано, що у випадку (6) зберігається мірність та взаємозалежність інформативних параметрів інформаційного сигналу, характерних для сигналу відгуку основної частоти.

Загальною умовою зменшення впливу ФЗ у розглянутих перетвореннях сигналів відгуку є наближення функції компенсації  $L(x_1, x_2, x_3)$  до функції впливу ФЗ в сигналі відгуку основної частоти. Для співставлення можливостей двочастотного методу з методами першої групи в роботі досліджено амплітудно-фазовий метод контролю та визначено умови зменшення впливу ФЗ, що характеризують можливості його застосування. За даними розв'язку задачі "виток над провідним неферромагнітним півпростором" проведено співставлення ефективності розглянутих методів контролю на прикладі зменшення впливу плоско-паралельного зазору. Для побудови функції компенсації використовувались функції впливу ФЗ на допоміжних частотах (допоміжні функції впливу). Вперше показано, що тільки перехід до  $n$ -мірного сигналу відгуку і формування на його основі функції компенсації дозволяє значно зменшити вплив ФЗ.

Проаналізовано двочастотний спосіб формування інформаційного сигналу за миттєвими значеннями суми напруг різних частот (динамічне векторне додавання). Визначено умови існування "особливих" точок, в яких досягається виключення впливу ФЗ. В загальному випадку, ці умови аналогічні умовам статичного векторного додавання. Однак динамічне векторне додавання має особливості, що визначаються дискретизацією сумарної напруги. Це-вплив часу строб-імпульсу, який виділяє "особливу" точку, та її зсув на часовій координаті, зумовлений порушенням умов її формування. Описана методика вибору допоміжної частоти контролю, заснована на отриманих умовах зменшення впливу ФЗ. В роботі проаналізовано деякі одноканальні двочастотні пристрої, які реалізують компенсаційний метод на основі статичного векторного додавання. Показано, що їх реалізація можлива з застосуванням перемножувача аналогових сигналів, на виході якого формується векторна сума сигналів відгуку основної та допоміжної частот, перетворених у напруги проміжної частоти  $\omega_n = (\omega_1 \pm \omega_2) / 2$ , де  $\omega_1$  та  $\omega_2$  - основна та допоміжна частоти. Таке перетворення стає можливим, якщо частота опорної напруги перемножувача дорівнює  $\omega_0 = (\omega_1 \mp \omega_2) / 2$ .

Критерієм вибору проміжної частоти є фазові умови зменшення впливу ФЗ. При розробці одноканальних пристроїв умови зменшення впливу ФЗ значно спрощуються, якщо фаза опорної напруги визначається фазами сигналів відгуку. В цьому випадку для виконання умов зменшення впливу ФЗ достатньою є рівність пристроїв амплітуд сигналів відгуку основної та допоміжної частот. В роботі показано, що розглянуте перетворення, покладене в основу формування інформаційного сигналу, може використовуватися і для компенсації остаточного небалансу ВСП. Проведений аналіз компенсаційного методу показав, що використання однієї допоміжної функції впливу ФЗ (двочастотне зондуєче поле), яка формується в підсистемі ВСП-ОК, недостатньо ефективне. Тільки перехід до багаточастотного сигналу відгуку та створення функції компенсації в ППС на основі багатьох допоміжних сигналів відгуку дозволяє підвищити ефективність зменшення впливу ФЗ. В цьому випадку роздільний контроль зводиться до апроксимації функції впливу ФЗ в основному режимі контролю функцією компенсації  $L(x_1, x_2, x_3)$ , що формується в ППС. Однак складність створення

n-мірного сигналу відгуку показує, що перспективним є розвиток компенсаційного методу на основі моделювання функції компенсації в ППС незалежно від підсистеми ВСП-ОК.

**В ЧЕТВЕРТОМУ РОЗДІЛІ** за результатами аналізу одночастотного сигналу відгуку, проведеного в другому розділі, досліджено метод моделей для реалізації селективного контролю ДФ. Стосовно завдань ЕМК цей метод полягає у створенні в ППС моделі функції  $f(x_1, x_2, x_3)$  і під час її співставлення з реальною функцією, яка формується в підсистемі ВСП-ОК, визначити її складові за відомими параметрами моделі. Дослідження методу проводились для двофакторної задачі. Для цього випадку

$$f(x_1, x_2) = \sum_{m=1}^2 \left\{ 1 + \sum_{i=1}^1 \frac{1}{2} \Delta x_i \right\} \varphi(x_m) = \sum_{m=1}^2 Q(x_i)_{i=m} \varphi(x_m) \quad (6)$$

Відомо, що при побудові математичної моделі, яка описує досліджуваний об'єкт, одна з груп задач полягає в тому, що досліджувана функція відгуку (тобто залежність вимірювальної величини від ДФ) співпадає з однією з заданих функцій - гіпотез. Побудова математичної моделі на основі експериментальних даних зводиться в цьому випадку до вибору такої функції - гіпотези, яка найкраще описує даній об'єкт досліджень. Стосовно проблеми ЕМК це означає, що існує сукупність функцій-гіпотез  $f(x_1, x_2)_m$ , які розглядаються як моделі функції  $f(x_1, x_2)$ . При цьому завданні визначення її складових формулюється так: із сукупності моделей значень  $f(x_1, x_2)_m$ , з відомими величинами складових, за критерієм

$$\Delta f = f(x_1, x_2) - f(x_1, x_2)_m \rightarrow 0 \quad (7)$$

визначити ту з них, яка відповідає значенню функції  $f(x_1, x_2)$ . Згідно (6) створення  $f(x_1, x_2)$  можна розглядати як результат дії оператора  $Q(x_i)_{i \neq m}$  на власні функції впливу ДФ. Вираз (6) дає загальний підхід моделювання в ППС функції впливу ДФ. Його застосування визначається моделюванням цього оператора. В роботі розглянуто реалізацію оператора  $Q(x_i)_{i \neq m}$  на основі моделювання в ППС області існування функції впливу ДФ (область Д). Її моделювання дає сукупність значень функцій-гіпотез  $f(x_1, x_2)_m$ , необхідних для застосування методу. Описано методику побудови в прямокутній системі координат області Д, яка задається матрицею ІМІ значень функцій впливу  $f(x_{1i}, x_{2j})$

$$ІМІ = |f(x_{1i}, x_{2j})| = \begin{vmatrix} f(x_{11}, x_{21}), f(x_{11}, x_{22}) \dots, f(x_{11}, x_{2n}) \\ \vdots \\ f(x_{1n}, x_{21}), f(x_{1n}, x_{22}) \dots, f(x_{1n}, x_{2n}) \end{vmatrix} \quad (8)$$

В цій матриці ІМІ стрічка визначається одним ДФ, наприклад,  $X_1$ , а стовпець - іншим. Кожен елемент матриці ІМІ визначений значеннями власних функцій  $\{\varphi(x_{1i}), \varphi(x_{2j})\}$ . Функція впливу ДФ - функція комплексної змінної і матриця ІМІ розділяється на дві аналогічні матриці  $|Re f(x_{1i}, x_{2j})|$  та  $|Im f(x_{1i}, x_{2j})|$ . Вираження області Д масивом точок  $|МІ|_{ij}$  визначає і механізм реалізації методу моделей, який полягає у визначенні елементу матриці ІМІ, що задовільняє умов (7), яка з врахуванням векторного вираження функції

впливу  $f(x_1, x_2)$ , має вигляд

$$|\Delta f| = \sqrt{\Delta \text{Re}^2 + \Delta \text{Im}^2} \rightarrow 0 \quad (9)$$

де  $|\Delta \text{Re}| = \text{Ref}(x_1, x_2) - \text{Ref}(x_1, x_2)_m$  та  
 $|\Delta \text{Im}| = \text{Imf}(x_1, x_2) - \text{Imf}(x_1, x_2)_m$ .

При формуванні матриці ІМІ за експериментальними даними реальний крок квантування функції  $f(x_1, x_2)$  визначається числом зразків, що не завжди дозволяє його реалізувати згідно заданого діапазону зміни ДФ. Запропоновано задавати крок квантування, виходячи з заданої похибки вимірювання ДФ, а його забезпечення базується на апроксимації досліджуваних функцій впливу ДФ за їх значеннями у вузлових точках, які визначаються реальними зразками.

В створенні математичної моделі досліджуваного об'єкту найбільш складними є задачі, в яких аналітичний вигляд функції відгуку невідомий. Їх розв'язок базується на припущенні, що функція відгуку в діапазоні зміни ДФ може бути апроксимована рядом відомих функцій. Апроксимація ортогональних компонент функції впливу ДФ рядом відповідних компонент їх власних функцій із змінними коефіцієнтами показує, що модель  $f(x_1, x_2)$  повинна формуватись за ортогональними компонентами в базисі власних функцій ДФ. При відомих власних функціях ДФ змінні коефіцієнти визначають функцію  $f(x_1, x_2)$ . Ця особливість обумовлює застосування методу моделей для створення функції компенсації при реалізації компенсаційного методу і, крім того, для аналізу таких підсистем ВСІІ-ОК, в яких принципово можливо визначити лише функції  $f(x_1, x_2)$ . Розглянуто моделювання функції впливу  $f(x_1, x_2)$  на основі задання області існування одного з коефіцієнтів апроксимуючого ряду у вигляді матриці, аналогічної матриці ІМІ. В роботі описано методику її побудови.

Моделювання в ППС області Д дозволяє для певного класу функцій  $f(x_1, x_2)$  виключити неоднозначність в перетворенні (6), що полягає у відповідності одному значенню функції  $f(x_1, x_2)$  як мінімум двох комбінацій  $\{\Phi(x_1, x_2)_i, \Phi(x_1, x_2)_j\}$  та  $\{\Phi(x_1, x_2)_{i+k}, \Phi(x_1, x_2)_{j+q}\}$ . Показано, що для функцій впливу ДФ, які перетинаються тільки в одній точці апаратними засобами виключається така неоднозначність вимірювання значень ДФ.

**В ПЕРШОМУ ДОДАТКУ** викладено доведення апроксимації функції впливу трьох ДФ рядом їх власних функцій.

**В ДРУГОМУ ДОДАТКУ** описано установку, на якій проводились експериментальні дослідження двочастотного методу контролю з використанням двочастотного дефектоскопу КЕДР. В дослідженнях використано двомірну візуалізацію результатів контролю з напівавтоною індикацією на базі фототелеграфу. Приведено дефектограми різних зразків з алюмінієвих сплавів.

**В ТРЕТЬОМУ ДОДАТКУ** описано структурну схему дефектоскопу ВД-ДФП, в якому реалізовано одночастотний, двочастотний методи та метод гармонік для контролю особливо тонкостінних трубок.

**В ЧЕТВЕРТОМУ ДОДАТКУ** приведено програми розрахунку на ЕОМ коефіцієнта ефективності  $\gamma$  (ДФ) та роздільного контролю

двох ДФ на основі методу моделей. Приведені відносні похибки вимірювання плоско - паралельного зазору та питомої електропровідності.

**В П'ЯТОМУ ДОДАТКУ** приведено акт впровадження дефектокопую ВД - ДФП.

## **ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ**

1. Вперше в аналізі систем контролю введено функцію впливу ДФ, як залежність нормованого приросту вносимої напруги від приростів ДФ, і показано, що ця функція виражається сумою власних функцій ДФ та відхиленнями цих функцій, обумовлених впливом факторів завад. Таке представлення є теоретичним обґрунтуванням можливості селективного контролю ДФ при одночастотному сигналі відгуку і використовується в аналізі різних методів контролю.

2. Визначено критерій оцінки ефективності перетворень сигналу відгуку в ППС, заснований на оцінці відхилення реальної власної функції ФК від теоретичної. Ефективність методу контролю оцінюється нормованою похибкою, визначеною через співставлення рівня залишкового впливу ФЗ на виході системи контролю з рівнем їх впливу в сигналі відгуку. Введення коефіцієнта ефективності методу контролю дозволило вперше порівняти різні методи контролю на основі математичного опису перетворень вихідних сигналів ВСП, що відбуваються в ППС згідно даного методу контролю.

3. Вперше проаналізовано два оператори компенсаційного методу, засновані на множенні та додаванні функцій впливу ДФ і показана перевага оператора додавання, на основі якого досліджено двочастотний метод контролю при статичному векторному додаванні сигналів відгуку. Використання функцій впливу ДФ в теоретичному аналізі цього методу дозволило визначити умови зменшення впливу ФЗ і розробити методику вибору допоміжної частоти, що є теоретичною основою в розробці та реалізації двочастотного методу і дозволяє оцінити його можливості в селективному контролі ДФ. На основі математичної моделі "виток над провідним неферромагнітним півпростором" з використанням коефіцієнта ефективності методу контролю вперше проведено співставлення двочастотного і амплітудно - фазового методів контролю при зменшенні впливу плоско - паралельного зазору. Проведений аналіз показав, що значне зменшення впливу ФЗ досягається лише формуванням функції компенсації з допоміжних сигналів відгуку при багаточастотному збуджуючому сигналі. Це визначило моделювання в ППС необхідної функції компенсації як основний напрямок в селективному контролі ДФ.

4. Застосування функцій впливу ДФ вперше дозволило визначити умови існування "особливих" точок, в яких зменшено вплив ФЗ, при двочастотному методі контролю за миттєвими значеннями суми напруг різних частот (варіант динамічного векторного додавання напруг), що дало можливість фізично обґрунтувати появу таких точок в сигналі відгуку при імпульсному збуджуючому полі.

5. Використовуючи структуру функції впливу ДФ, вперше реалізовано метод моделей для селективного контролю ДФ на основі матричного представлення області існування функцій впливу ДФ.

6. При побудові матриці М, що описує область існування функцій впливу ДФ, запропоновано задавати крок квантування функції впливу ДФ, виходячи з заданої похибки вимірювання ДФ, а його забезпечення базується на апроксимації цих функцій за їх значеннями у вузлових точках.

7. Показано, що для функції впливу ДФ, які перетинаються тільки в одній точці, за допомогою апаратних засобів можливим є виключення неоднозначності вимірювання ДФ.

Основні результати дисертаційної роботи викладені в наступних публікаціях:

1. Зыбов В.Н. О подавлении влияния мешающего фактора при двухчастотном методе дефектоскопии / Отбор и передача информации: Респ. межвед. сб. научн.тр./АН УССР. Физ.-мех. ин-т.- 1984.- Вып.69.-С.49-55.

2. Зыбов В.Н. Режимы двухчастотного метода вихретокового контроля / Отбор и передача информации: Респ. межвед. сб. научн. тр./АН УССР. Физ.- мех. ин-т.-1984.- Вып.70.- С.83-89.

3. Зыбов В.Н. Выбор частоты и фазы коммутационного множителя для одноканального устройства при двухчастотном методе контроля / Отбор и передача информации: Респ. межвед. сб. научн. тр./АН УССР. Физ.-мех. ин-т.- 1985.-Вып.71.-С.75-81.

4. Зыбов В.Н., Мизюк Л.Я., Тетерко А.Я. Принцип построения одноканальных устройств обработки сигналов при двухчастотном вихретоковом контроле / Отбор и передача информации: Респ. межвед. сб. научн. тр./АН УССР. Физ.- мех. ин-т.-1985.- Вып.71.- С.84-89.

5. Зыбов В.Н. Компенсация начального напряжения в одноканальном устройстве для двухчастотного метода токовихревого контроля / Отбор и передача информации: Респ. межвед. сб. научн. тр./АН УССР Физ.- мех. ин-т.- 1986.- Вып.74.- С.67-73

6. А.с. N 1434357(СССР) G 01 N 27/90 Способ вихретокового многопараметрового контроля изделий / Зыбов В.Н.- Опубл. 30.10.88.-Б.И. N40.

7. А.с. N 1446551(СССР)G 01 N 27/90 Устройство для двухчастотного вихретокового контроля / Зыбов В.Н.- Опубл. 23.12.88 -Б.И. N47.

8. Зыбов В.Н., Мизюк Л.Я. Оптимизация выбора параметров напряжения вспомогательной частоты при двухчастотном методе контроля / Отбор и обработка информации: Респ. межвед. сб. научн. тр. /АН УССР. Физ.-мех. ин-т.- 1988.- Вып.1(77).- С.55-65.

9. Зыбов В.Н., Мизюк Л.Я. Определение возможностей подавления мешающего параметра при много - и одночастотном амплитудно-фазовом методах / Отбор и обработка информации: Респ. межвед. сб./АН УССР.- Физ.-мех. ин-т.- 1989.- Вып.4(80).- С.48-61.

10. Зыбов В.Н., Мизюк Л.Я. Принципы селекции при вихре-

токовом контроле / Физико-химическая механика материалов.- 1994.- Вып.2.- С.42-54.

11. Зыбов В.Н., Мизюк Л.Я., Назарчук З.Т. Подавление влияния мешающих факторов в задачах неразрушающего контроля на основе моделирования компенсирующих функций / Физико-химическая механика материалов.- 1995.- Вып.4.- С.90-97.

12. Зыбов В.Н. Особенности векторного суммирования сигналов при двухчастотном методе контроля / Фізичні методи та засоби контролю матеріалів та виробів / Матеріали доповідей науково-технічної конференції, 5-10 березня 1996 року, м. Славське Львівської обл.- 1996.- С.38.

Зыбов В.Н. Методы компенсации и моделирования функций влияния воздействующих факторов в селективном вихретоковом контроле.

Диссертация (рукопись) на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.05 - приборы и методы измерений электрических и магнитных величин, Физико-механический институт им. Г.В. Карпенко НАН Украины, Львов, 1997.

Представлено теоретическое и экспериментальное исследование проблемы раздельного измерения нескольких воздействующих факторов в задачах вихретокового контроля. Показана принципиальная возможность раздельного измерения нескольких влияющих факторов на основе функциональных зависимостей приращений вносимого напряжения от приращений воздействующих факторов. Дано обоснование компенсационного метода контроля воздействующих факторов. Показано, что структура функции влияния воздействующих факторов обеспечивает возможность применения метода моделей для решения этой проблемы. На основе этого метода рассмотрена двухфакторная задача и разработана программа контроля двух воздействующих факторов на базе ЭВМ.

Zybov V.N. The methods of compensation and modelling of the influence finctions of acting factors in selective eddy current control.

Dissertation (manuscript) for obtaining scientific degree of candidate of sciences (engineering) on the speciality 05.11.05 - apparatuses and measuring methods of electric and magnetic quantities, Physical and Mechanical institute of National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv, 1996.

The theoretical and experimental research of problem of a few acting factors separate measurement in the tasks of eddy current control is presented. The principled possibility of a few influence factors separate measurement on the base of the functional dependence of carried in voltage differentials from acting factors differentials is shown. The basis of compensation method of acting factors control is grounded. It is shown, that the stmixture of influence functions of acting factors guaranties the possibility of application of model method to solve this problem. On the base of this method two factors task was considered and the program of two acting factor control for computer was worked out.

Ключові слова: неруйнівний контроль, діючий фактор, функція впливу діючих факторів, власна функція впливу діючого фактору, фактор завади, фактор контролю, метод контролю, область існування функцій впливу діючих факторів.

Підп. до друку 20.05.97. Формат 60X84/16. Папір офс. Друк  
офс. Ум. друк. арк. 0,93. Тираж 100.  
Віддруковано ПП «Станіл».



**AV 38.204**