ХАРКІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ГАЛЬЧЕНКО ВОЛОДИМИР ЯКОВИЧ

УДК 620.179.1

МЕТОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ ТА РЕЖИМІВ РОБОТИ ВИХОРОСТРУМОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ДЕФЕКТОСКОПІВ

05.11.13 - прилади і методи контролю

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків - 1997

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Східноукраїнському державному університеті Міністерства освіти України

Науковий консультант — Заслужений діяч науки та техніки України, доктор технічних наук, професор Яковенко Валерій Володимирович, Східноукраїнський державний університет, завідуючий кафедрою приладобудування та електротехніки

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор Фінкельштейн Володимир Борисович, Харківська державна академія міського господарства, професор кафедри електротехніки;

доктор технічних наук, доцент Хандецький Володимир Сергійович, Дніпропетровський державний університет, професор кафедри електронно-обчислювальних машин;

доктор технічних наук, старший науковий співробітник Большаков Володимир Борисович, Харківське ДНВО "Метрологія", начальник відділу

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

Захист відбудеться "25" 12 1997р. о 14 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 02.09.11 у Харківському державному політехнічному університеті (310002, м. Харків-2, вул. Фрунзе, 21)

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського державного політехнічного університету.

Автореферат розісланий "22" 11 1997р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради — Горкунов Б.М.

ЛННБ України ім.В.Стефаника
00737631 (R)

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність і ступінь дослідженності тематики роботи. Підвищенню якості продукції, зростанню її надійності та довговічності приділяється велика увага в усіх промислово розвинутих країнах світу. Сучасний рівень виробництва з безупинно зростаючим обсягом номенклатури виробів характеризується істотно зростаючими вимогами до застосування надійних та високопродуктивних методів і засобів, здатних забезбечити 100% контроль їхньої якості. Вибірковий контроль вихідного металу, заготівок, напівфабрикатів та готових виробів відповідального призначення не гарантує їх високої якості, особливо при серійному та масовому виготовленні. Методи неруйнівного контролю використовуються для перевірки материалів та виробів до моменту їх введення до експлуатації, що запобігає застосуванню дефектних деталей в конструкціях. Крім того, використання методів неруйнівного контролю в технологічних процесах, в прийомно-здаточних випробуваннях, при експлуатації та ремонті є одним з найбільш ефективних засобів підвищення якості продукції, виключення непродуктивних витрат при обробленні заготівок та напівфабрикатів. Правильне застосування методів та засобів неруйнівного контролю дозволяє виключити потенційну можливість руйнування виробів, маючих критичні або суттєві внутрішні дефекти. В особливої ступені це відноситься до тих виробів, експлуатація котрих зв'язана з проблемами безпеки людей, з можливістю виникнення катастроф з необоротними екологічними наслідками і т.п.

В теперішній час широко використовуються акустичні, капілярні, магнітні, електричні, радіаційні, оптичні та інші методи неруйнівного контролю. Особливе місце серед них належить вихорострумовому методу. Завдяки своїм перевагам над перетворювачами, застосовуючими інші фізичні принципи здобуття інформації, вихорострумові перетворювачи (ВСП) відповідають суворим вимогам контролю об'єктів з дефектами в умовах забруднення середовища, наявності електромагнітних полів, підвищених температур, вібрацій, інтенсивних випромінювань зварної дуги і інших деяких заважаючих факторів.

Великий вплив на розвиток вихорострумового методу та засобів контролю об'єктів з дефектами надали роботи відомих вчених Герасимова В.Г., Клюєва В.В., Дорофеєва О.Л., Зацепіна Н.Н., Соболєва В.С., Шатернікова В.Є., Шкарлета Ю.М., Сухорукова В.В., Біди П.І., Forster F., Dodd C.V. та інших дослідників. Аналіз робіт показав, що основна увага дослідників приділялась розробці теоретичних моделей для конкретних випадків контролю об'єктів. Більшість задач проектування засобів вихорострумового контролю виробів з дефектами обмежених розмірів розв'язується, використовуючи в якості базових результати досліджень, здійснених або по

наближеним методикам розрахунків, або для двовимірних ідеалізацій інформаційного електромагнітного поля (ІЕМП). Єдиного методологічного підходу рішення широкого кола задач електромагнітної дефектоскопії у випадку тримірних ІЕМП не існує. Закономірності, знайдені в результаті вирішення двовимірних задач дефектоскопії, виявилися необхідними та корисними для побудови основ теорії виявлення дефектів, розробки методів їх пошуку. Але цих моделей недостатньо для створення теорії як основи оптимального проектування апаратури вихрострумового контролю виробів з дефектами обмежених розмірів, яка має високу розрізнювальну здатність. У зв'язку з ускладненням задач електромагнітної дефектоскопії виникає потреба аналізу нових класів математичних моделей, які більш повно відображають реальні умови вихрострумового контролю виробів.

Деяка обмеженість застосовуємих математичних моделей не дозволила також належним чином виявити кількісні зв'язки між геометричними та електромагнітними характеристиками об'єкта контролю з дефектом і даними спостережень на виході ВСП. Положення в цієї галузі ще більш погіршується через відсутність достатнього об'єму експериментальних даних, одержаних дослідниками.

Сучасна теорія вихрострумового контролю об'єктів з дефектами обмежених розмірів базується в основному на емпіричних закономірностях, одержаних експеріментальним шляхом Бідою П.І. біля 20-ти років тому. Ці дослідження проводились для виробів з дефектами з ідеалізованими властивостями та не ураховували ряд суттєвих факторів, серед яких форма дефекту, його орієнтація в просторі, особливості геометрії об'єкта контролю, розташування об'єкта відносно ВСП та інших.

Отримані результати в цілому відображають загальні тенденції в електромагнітному контролі, але їх використання не наводить до реалізації найбільш сприятливих умов виявлення дефектів. Найвищу ефективність контролю мають забезпечити тільки технічні засоби в повній мірі враховуючі специфіку конкретного процесу контролю. Використання узагальнених методів досліджень виправдано на етапі розробки математичних моделей, але не ефективно на етапі проектування контрольно-вимірювальної апаратури, де орієнтація на узагальнені дефекти, розташовані на гіпотетичних об'єктах контролю, не приводить до оптимальних результатів. Здається, що основні резерви суттєвого покращення технічних та метрологічних характеристик ВСП містяться не стільки в способах обробки вихідних сигналів та удосконаленні вимірювальних трактів приладів, скільки у самих конструкціях ВСП та принципах їх побудови.

К теперішньому часу практично без уваги залишилась проблема проектування ВСП, володіючих зондуючими ІЕМП з визначеними властивостями. А разом з тим

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність і ступінь дослідженності тематики роботи. Підвищенню якості продукції, зростанню її надійності та довговічності приділяється велика увага в усіх промислово розвинутих країнах світу. Сучасний рівень виробництва з безупинно зростаючим обсягом номенклатури виробів характеризується істотно зростаючими вимогами до застосування надійних та високопродуктивних методів і засобів, здатних забезбечити 100% контроль їхньої якості. Вибірковий контроль вихідного металу, заготівок, напівфабрикатів та готових виробів відповідального призначення не гарантує їх високої якості, особливо при серійному та масовому виготовленні. Методи неруйнівного контролю використовуються для перевірки материалів та виробів до моменту їх введення до експлуатації, що запобігає застосуванню дефектних деталей в конструкціях. Крім того, використання методів неруйнівного контролю в технологічних процесах, в прийомно-здаточних випробуваннях, при експлуатації та ремонті є одним з найбільш ефективних засобів підвищення якості продукції, виключення непродуктивних витрат при обробленні заготівок та напівфабрикатів. Правильне застосування методів та засобів неруйнівного контролю дозволяє виключити потенційну можливість руйнування виробів, маючих критичні або суттєві внутрішні дефекти. В особливої ступені це відноситься до тих виробів, експлуатація котрих зв'язана з проблемами безпеки людей, з можливістю виникнення катастроф з необоротними екологічними наслідками і т.п.

В теперішній час широко використовуються акустичні, капілярні, магнітні, електричні, радіаційні, оптичні та інші методи неруйнівного контролю. Особливе місце серед них належить вихорострумовому методу. Завдяки своїм перевагам над перетворювачами, застосовуючими інші фізичні принципи здобуття інформації, вихорострумові перетворювачи (ВСП) відповідають суворим вимогам контролю об'єктів з дефектами в умовах забруднення середовища, наявності електромагнітних полів, підвищених температур, вібрацій, інтенсивних випромінювань зварної дуги і інших деяких заважаючих факторів.

Великий вплив на розвиток вихорострумового методу та засобів контролю об'єктів з дефектами надали роботи відомих вчених Герасимова В.Г., Клюєва В.В., Дорофеєва О.Л., Зацепіна Н.Н., Соболєва В.С., Шатернікова В.Є., Шкарлета Ю.М., Сухорукова В.В., Біди П.І., Forster F., Dodd C.V. та інших дослідників. Аналіз робіт показав, що основна увага дослідників приділялась розробці теоретичних моделей для конкретних випадків контролю об'єктів. Більшість задач проектування засобів вихорострумового контролю виробів з дефектами обмежених розмірів розв'язується, використовуючи в якості базових результати досліджень, здійснених або по

наближеним методикам розрахунків, або для двовимірних ідеалізацій інформаційного електромагнітного поля (ІЕМП). Єдиного методологічного підходу рішення широкого кола задач електромагнітної дефектоскопії у випадку тримірних ІЕМП не існує. Закономірності, знайдені в результаті вирішення двовимірних задач дефектоскопії, виявилися необхідними та корисними для побудови основ теорії виявлення дефектів, розробки методів їх пошуку. Але цих моделей недостатньо для створення теорії як основи оптимального проектування апаратури вихрострумового контролю виробів з дефектами обмежених розмірів, яка має високу розрізнювальну здатність. У зв'язку з ускладненням задач електромагнітної дефектоскопії виникає потреба аналізу нових класів математичних моделей, які більш повно відображають реальні умови вихрострумового контролю виробів.

Деяка обмеженість застосовуємих математичних моделей не дозволила також належним чином виявити кількісні зв'язки між геометричними та електромагнітними характеристиками об'єкта контролю з дефектом і даними спостережень на виході ВСП. Положення в цієї галузі ще більш погіршується через відсутність достатнього об'єму експериментальних даних, одержаних дослідниками.

Сучасна теорія вихрострумового контролю об'єктів з дефектами обмежених розмірів базується в основному на емпіричних закономірностях, одержаних експеріментальним шляхом Бідою П.І. біля 20-ти років тому. Ці дослідження проводились для виробів з дефектами з ідеалізованими властивостями та не ураховували ряд суттєвих факторів, серед яких форма дефекту, його орієнтація в просторі, особливості геометрії об'єкта контролю, розташування об'єкта відносно ВСП та інших.

Отримані результати в цілому відображають загальні тенденції в електромагнітному контролі, але їх використання не наводить до реалізації найбільш сприятливих умов виявлення дефектів. Найвищу ефективність контролю мають забезпечити тільки технічні засоби в повній мірі враховуючі специфіку конкретного процесу контролю. Використання узагальнених методів досліджень виправдано на етапі розробки математичних моделей, але не ефективно на етапі проектування контрольно-вимірювальної апаратури, де орієнтація на узагальнені дефекти, розташовані на гіпотетичних об'єктах контролю, не приводить до оптимальних результатів. Здається, що основні резерви суттєвого покращення технічних та метрологічних характеристик ВСП містяться не стільки в способах обробки вихідних сигналів та удосконаленні вимірювальних трактів приладів, скільки у самих конструкціях ВСП та принципах їх побудови.

К теперішньому часу практично без уваги залишилась проблема проектування ВСП, володіючих зондуючими ІЕМП з визначенними властивостями. А разом з тим

цілеспрямована зміна зондуючих властивостей генеруємого ІЕМП приводить до підвищення селективності та чутливості виявлення дефектів в об'єктах, підвищенню завадозахищеності та, отже, реалізації сприятливих умов виявлення дефектів. Отримання інформаційного сигналу високої чутливості, завадозахищеності та розрізнювальної здатності безпосередньо із ВСП дефектоскопа є першочерговою задачею та в разі її незадовільного вирішення положення не виправити наступною вторинною електронною обробкою сигналу, які би схемотехнічні рішення та сучасна елементна база не застосовувались.

Відсутність ефективної теоретичної бази обумовила відсутність спеціалізованих методик проектування ВСП для виявлення дефектів. В практиці проектування ВСП для дефектоскопів в основному використовуються добре зарекомендовані методики розробки ВСП, які орієнтовані на контроль розмірів об'єктів, що не відображає повною мірою реальних потреб.

В зв'язку з вищезгаданим створення теорії електромагнітного контролю об'єктів з дефектами обмежених розмірів уявляє актуальну наукову проблему, рішення якої має велике значення для промисловості.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертація виконувалась в рамках ''Координаційного плану розробки та впровадження першої черги автоматизованого стенду комплексних випробувань об'єкта (АСКВО)'' та ''Плана-графіка розробки та впровадження першої черги АСКВО'', затверджених керівником ХКБМ ім.Морозова від 06.11.81р., які складені відповідно постанові РМ СРСР № 990 від 08.10.81р. та постанові Держплана і ДКНТ СРСР № 221/245 від 06.11.81р., а також в рамках ''Комплексної програми науково-технічного прогресу країн-членів РЕВ'' пріоритетний напрямок ''Комплексна автоматизація'' відповідно постанові ДКНТ СРСР № 668 від 27.11.89р., напрямку ДКНТ ''Технологія, машини та виробництва майбутнього''.

Мета та задачі дослідження. Метою даної роботи є створення теорії виявлення дефектів обмежених розмірів в провідних об'єктах довільної форми як основи оптимального проектування вихрострумових перетворювачів та розробка на її базі ефективних засобів електромагнітного контролю з високими технічними характеристиками.

Досягнення сформульованої мети зв'язано з необхідністю вирішення наступних задач:

- розробки математичних моделей процесів контролю об'єктів з дефектами обмежених розмірів в рамках єдиного методологічного підходу рішення задач виявлення локальних неоднорідностей, дозволяючих охоплювати широке коло можливих типових випадків контролю;

- створення інформаційної моделі, яка містить в собі комплекс програм комп'ютерного моделювання процесів вихострумового контролю об'єктів;

- математичного моделювання різноманітних режимів електромагнітного контролю виробів для визначення впливу окремих факторів об'єкта з дефектом на вихідний сигнал ВСП, досліджень розрізнюючої здатності методів контролю, вибору оптимальних характеристик зондуючих ІЕМП та раціональних характерних розмірів ВСП;

- розробки методики проектування вихострумових перетворювачів прохідного та накладного типів з використанням побудованої інформаційної моделі;

- розробки теорії та програмних засобів параметричного синтезу ВСП з апріорно визначеними властивостями зондуючого поля, яка забезпечує покращені технічні та метрологічні характеристики дефектоскопів;

- розробки ефективних апаратних та програмних засобів вихострумового контролю для задоволення реальних потреб промисловості.

Наукова новизна. На основі запропонованих у дисертаційній роботі підходів, методів, моделей та алгоритмів вирішена важлива проблема створення теорії виявлення локальних неоднорідностей обмежених розмірів в об'єктах контролю, яка характеризується індиферентністю моделей до форми та розмірів об'єктів і дефектів, але ураховує їх вплив повною мірою.

Основні наукові результати виконаної роботи містяться в наступному:

- з точки зору використання єдиного методологічного підходу до задачі, який базується на застосуванні граничних інтегральних рівнянь (ГІР), запропонована класифікація розрахункових моделей по ознаці зв'язності аналізуємих областей, що дозволяє обмежитись для аналізу практично всіх можливих випадків контролю мінімальною кількістю математичних моделей;

- розроблено ряд математичних моделей процесів електромагнітного контролю, враховуючих специфіку умов його проведення, а саме наявність зосереджувачів та масок з провідних матеріалів, характер дефекту (поверхній, підповерхній) та особливості геометричної форми об'єкта контролю у розумінні зв'язності аналізуємих областей, значне переважання геометричних розмірів об'єкта над розмірами дефекту;

- в результаті апроксимації формальних нескінченновимірюваних ГІР одержани придатні до комп'ютерних розрахунків скінченновимірювані матричні рівняння, адекватно відображаючі процеси контролю об'єктів;

- розроблено алгоритми чисельного вирішення задач електромагнітного контролю об'єктів;

- розроблена методика оптимального проектування класичних накладних та прохідних ВСП, в основі якої передбачено ефективне використання комплексу програм комп'ютерного моделювання ВСП;

- в результаті чисельних експериментів визначена чутливість ВСП до ряду важливих параметрів, впливом яких раніше нехтували унаслідок суттєвих труднощів їх обліку;

- розроблена теорія синтезу ВСП з апріорно визначеною топографією зондуючого ІЕМП;

- запропоновано спосіб спрощення застосування на практиці багатопараметрового методу розділу інформації;

- розроблено алгоритми чисельного вирішення задач синтезу ІЕМП ВСП.

Практична цінність досліджень обгрунтована:

- розробкою комплексу програм комп'ютерного моделювання процесів вихострумового контролю;

- наданням рекомендацій щодо вибору основних характерних розмірів ВСП та режимів їх роботи, забезпечуючих максимальну чутливість до дефектів;

- розробкою структурних схем універсальних дефектоскопів та алгоритмів обробки вихідних сигналів ВСП, забезпечуючих відстройку від неконтрольованих параметрів об'єкта;

- наданням технічних вимог до точності виготовлення магнітних систем синтезованих ВСП, гарантуючих збіг властивостей реального ІЕМП з властивостями ідеального апріорно визначеного;

- розробкою електричних принципіальних схем основних функціональних вузлів універсальних дефектоскопів, які характеризуються можливістю цифрового керування від ЕОМ.

Реалізація наукових розроботок. Результати дисертаційної роботи реалізовани у ряді господарських договорів на проведення науково-дослідних робіт.

З використанням результатів дисертації та безпосередньою участю автора спільно з МП ''Техніка'' м.Луганська спроектовани та виготовлени удосконалені прохідні вихострумові дефектоскопи контролю якості зварних труб, що працюють по європейському стандарту SEP1925 та дозволяють провести сертифікацію контрольованої продукції відповідно з його вимогами. Взірці дефектоскопів впроваджено у виробництво на Оскольському електрометалургійному комбінаті (Росія) для контролю труб діаметром 27-89 мм з товщиною стінки до 3,5 мм, а також Антрацитівському заводі збірних теплиць, де використовуються для перевірки якості шва труб діаметром 25-60 мм з товщиною стінки до 3,5 мм. Дефектоскоп успішно витримав лабораторні випробування на Таганрогському металургійному комбінаті

(Росія) при контролі електрозварних та мірних труб пічної зварки. В теперешній час проводяться роботи по впровадженню дефектоскопів контролю якості феромагнітних прутків на виробничих ділянках холдінгової компанії "Луганськтепловоз", а також дефектоскопів контролю якості зварних труб на підприємстві АТЗТ "Луганський трубний завод". Результати роботи застосовуються в учбовому процесі в Східноукраїнському державному університеті при підготовці інженерів-приладобудівників та інженерів-системотехніків.

Характеристика методів досліджень. Для рішення комплексу питань, складаючих зміст поставленої проблеми, застосовано широкий спектр сучасних методів теоретичних досліджень. Теоретичні дослідження процесів вихорострумового контролю об'єктів базуються на фундаментальних рівняннях теорії електромагнітного поля в інтегрально-векторному вигляді. Вирішення некоректно поставлених задач синтезу ІЕМП ВСП виконуються з застосуванням машино-орієнтованого методу повної ортогоналізації (SVD), ураховуючого похибки початкових даних та визначаючого стійке рішення задачі. При обробці даних, отриманих в результаті чисельних експериментів, використовуються методи регресіоного та факторного аналізу. Розробка програмних комплексів здійснювалась із застосуванням об'єктно-орієнтованого методу. Вірогідність висновків підтверджується великою кількістю чисельних експериментів, збігом результатів розрахунків з даними інших дослідників, отриманих експериментальним або аналітичним шляхом.

Наукові результати, що виносяться на захист:

1. Теоретичні положення неруйнівного електромагнітного контролю об'єктів довільної форми з дефектами обмежених розмірів:

- математичні моделі процесів контролю, враховуючі багатозв'язність аналізуємої області, викликану підповерхнім характером дефектів, наявністю зосереджувача ІЕМП або маски, формою самого об'єкта контролю, а також ураховуючих значне переважання розмірів об'єкта над розмірами дефекту (іноді досягаюче кількох порядків);

- розрахункові матричні рівняння, отримані в результаті апроксимації нескінченновимірюваних інтегральних представлень ІЕМП в зоні контролю;

- чисельні алгоритми розрахунку вихідного сигналу ВСП, ураховуючі тримірний характер ІЕМП;

- методика проектування оптимальних ВСП, яка основана на використанні розробленої інформаційної моделі процесів контролю;

- теорія синтезу ВСП з апріорно визначеною топографією зондуючого ІЕМП, яка забезпечує високі технічні характеристики;

- чисельні алгоритми синтезу ІЕМП ВСП бажаної конфігурації;

- метод спрощення використання в практиці контролю багатопараметрового способу розділу інформації, одержаної з ВСП у процесі вимірювань.

2. Результати практичної реалізації наукових досліджень в галузі електромагнітного контролю об'єктів:

- інформаційна модель процесів контролю у вигляді програмного комплексу комп'ютерного моделювання режимів роботи ВСП в складі дефектоскопа;

- комплекс програм вирішення зворотних задач синтезу ІЕМП з бажаними зондуючими властивостями;

- реалізація апаратно-програмного забезпечення універсальних дефектоскопів на базі мікропроцесорної техніки.

Апробація роботи. Основні положення дисертаційної роботи докладені та обговорені на наступних конференціях і семінарах: зональний семінар "Методи та засоби вимірювання механічних параметрів в системах контролю та керування", Пенза, 1987 р.; семінар по теорії машин та механізмів АН СРСР (Каунаська філія) "Вимірювання переміщень у динамічному режимі", Каунас, 1987р.; VII Всесоюзна науково-технічна конференція "Проблеми магнітних вимірювань та магнітовимірювальної апаратури", Ленінград, 1989р.; Міжнародна науково-технічна конференція "Молоді вчені в вирішенні комплексної програми науково-технічного прогресу країн - членів РЕВ", Київ, 1989р.; 2-а Всесоюзна конференція по ТОЕ, Вінниця, 1991р.; Всесоюзна науково-технічна конференція по інформаційно-вимірювальним системам, Санкт-Петербург, 1991р.; III-я міжнародна науково-технічна конференція "Контроль та керування в технічних системах", Вінниця, 1995р.; VI-а міжвузовська науково-технічна конференція країн СНД "Сучасні методи та засоби електромагнітного контролю та їх застосування в промисловості", Могильов, 1995р.; V-а міжвузовська науково-технічна конференція "Проблеми розвитку локомотивобудування", Луганськ - Алушта, 1995р.; Міжнародна науково-практична конференція "Автоматизація проектування та виготовлення виробів в машинобудуванні", Луганськ, 1996р.; 8-й Міжнародний сімпозіум по нелінійним електромагнітним системам ISEM, Брауншвейг (Німеччина), 1997р.; науково-технічні конференції Східноукраїнського державного університету 1985-1997рр.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 20 наукових робіт, серед яких одноособова монографія.

Структура та об'єм дисертації. Робота складається із вступу, шости глав, загальних висновків, переліку використаної літератури (240 найменувань) та трьох додатків. Загальний обсяг роботи складає 290 сторінок, які містять 201 сторінку машинописного тексту, 102 рисунки та 7 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обгрунтована актуальність теми дисертації, сформульовани її мета та вирішувані задачі, подана анотація основних результатів, інформація про апробацію і впровадження роботи.

У першій главі розглядени характерні особливості проблеми проектування ВСП приладів для виявлення дефектів обмежених розмірів в об'єктах довільної форми. Показано, що сучасний підхід вирішення проблеми полягає в розробленні ефективних гнучких інформаційно-вимірювальних систем виявлення дефектів (ІВСВД), застосування яких дозволяє використовувати необмежені можливості електронно-обчислювальної техніки в керуванні, чисельної обробки результатів вимірювань, моделюванні процесів контролю з метою визначення оптимальних режимів роботи ВСП, рівня небажаних змін вихідних сигналів ВСП, обумовлених властивостями об'єкта з дефектом та умовами проведення контролю. Узагальнена структурна схема ІВСВД наведена на рис.1.

Рис. 1 - Узагальнена структурна схема ІВСВД

Розглядени теоретичні аспекти формулювання проблеми, здійснена постановка задачі. В рамках пропонуємого єдиного методологічного підходу розв'язання широкого кола задач подана класифікація розрахункових моделей ВСП, враховуючих тримірний характер розподілу електромагнітного поля. Визначена необхідність розробки інформаційних моделей процесів вихорострумового контролю, які є

інформаційним трактуванням фізико-математичних моделей, та їх широкого застосування в теорії та практиці неруйнівного контролю. У відповідності з питаннями теоретичного розв'язування проблеми були проведени огляд і аналіз відомих на даний час розрахункових моделей та програмних засобів, виявлена їх деяка обмеженість та недостатня адекватність у ряді випадків контролю реальних об'єктів, подана аналітична оцінка їх можливостей та вдосконалення. На підставі розгляду сучасного стану в галузі досліджень електромагнітного неруйнівного контролю визначени напрямки теоретичних та есперимантальних вишукуваній.

У **другій главі** розглядаються питання теоретичних основ вихорострумового контролю провідних об'єктів довільної форми з дефектами обмежених розмірів. Універсальність теоретичних положень забезпечується застосуванням для побудови обмеженої кількості розрахункових моделей єдиного математичного апарату, який грунтується на інтегральних представленнях тримірних квазістаціонарних інформаційних електромагнітних полів (ІЕМП) при їх взаємодії з об'єктами контролю. З метою забезпечення універсальності відносно форми об'єкта та дефекту пропонується використання при побудові моделей фундаментальних функцій Гріна для тримірних провідного та непровідного середовищ. Формалізм інтегральних рівнянь дозволяє не звертати уваги на особливості геометрії об'єкта контролю, що забезпечує можливість використання для розв'язування крайових задач теорії поля електронно-обчислювальної техніки.

Головною метою побудови математичних моделей процесів контролю є отримання інформації про характер вихідного сигналу ВСП, залежного від форми та геометричних властивостей об'єкта контролю, форми, розмірів та місцезнаходження дефекту на поверхні або всередині об'єкта, його зорієнтованості стосовно ВСП, електротехнічних характеристик матеріалу об'єкта та інших факторів.

В першу чергу характер сигналу ВСП залежить від розподілу ІЕМП навколо дефекту. В цій праці запропоновано використання для визначення розподілу ІЕМП трьох видів математичних моделей, пристосованих для аналізу широкого кола задач електромагнітної дефектоскопії.

Базова математична модель придатна для однозв'язних областей з лінійними характеристиками та зформульована для одного векторного і одного скалярного впроваджених граничних джерел, забезпечуючих єдиність розв'язку задачі при мінімальній розмірності:

$$\begin{cases} \dfrac{\dot{\bar{i}}(Q)}{2} + \bar{n} \times \mathrm{rot} \oint\limits_S \dot{\bar{i}}(P) \cdot \dot{g}_H \, dS_P + \bar{n} \times \mathrm{grad} \oint\limits_S \dfrac{\dot{\sigma}(P)}{4\pi r_{QP}} dS_P = \bar{n} \times \dot{\bar{H}}_{cm}(Q); \\ \dfrac{\dot{\sigma}(Q)}{2} + \mu_r \bar{n} \cdot \mathrm{rot} \oint\limits_S \dot{\bar{i}}(P) \cdot \dot{g}_H \, dS_P + \bar{n} \cdot \mathrm{grad} \oint\limits_S \dfrac{\dot{\sigma}(P)}{4\pi r_{QP}} dS_P = \bar{n} \cdot \dot{\bar{H}}_{cm}(Q). \end{cases} \quad (1)$$

де $\dot{\bar{i}} = \bar{n} \times \dot{\bar{H}}$; $\dot{\sigma} = \bar{n} \cdot \dot{\bar{H}}$ - густовина впроваджених граничних джерел;

$\dot{\bar{H}}_{cm}(Q)$ - вектор напруженості ІЕМП в точках спостереження Q, що належать поверхні S, створений струмом збудження з попередньо заданим розподілом;

$$r = r_{QP} = \sqrt{(x_P - x_Q)^2 + (y_P - y_Q)^2 + (z_P - z_Q)^2}$$

r_{QP} - модуль відстані між точкою спостереження Q та точкою джерела P;

$\bar{n}$ - внутрішня нормаль до поверхні об'єкта контролю у точці спостереження;

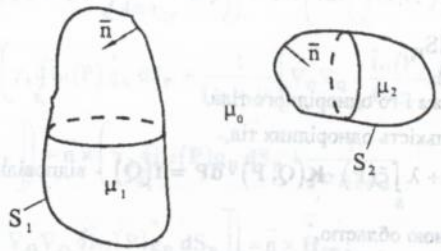
$$\dot{g}_H = \frac{e^{-jkr_{QP}}}{4\pi r_{QP}}$$

$\dot{g}_H$ - фундаментальна функція Гріна в тримірному нескінченному провідному просторі.

Формула (1) застосовується у випадках аналізу процесів контролю об'єктів, в яких дефект розташовано зовні на поверхні та ВСП не має в своєму складі зосереджувачів ІЕМП і екранів. В противному стані треба користуватися математичною моделлю для багатозв'язних областей, котра складається із системи рівнянь, отриманих для сукупності декількох замкнених меж розділу різних середовищ. У зв'язку з цим слід зазначити, що в узагальненому випадку математична модель приймає вигляд:

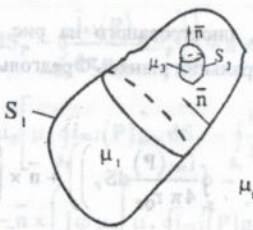
$$\frac{1}{\lambda_i} \cdot \xi(Q_i) + \sum_{l=1}^{m} \int_{S_l} \xi(P_l) \cdot K(Q_i, P_l) \cdot dP_l = \frac{1}{\lambda_i} \cdot f(Q_i); \quad (2)$$

$i = 1,2, \ldots, m.$



а) дефект на поверхні об'єкта, ВСП має в складі зосереджувачі ІЕМП або екрани

б) дефект всередині об'єкта, ВСП має в складі зосереджувачі ІЕМП або екрани



в) дефект всередині об'єкта, ВСП не має в складі зосереджувачів ІЕМП та екранів

S_1 - об'єкт контролю; S_2 - зосереджувач або екран;
S_3 - порожнина дефекту

Рис. 2 - Розрахункові моделі ВСП

де $S = \bigcup_{l=1}^{m} S_l$,

S_l - межа l-го однорідного тіла,

m - кількість однорідних тіл,

$\xi(Q) + \lambda \int_S \xi(P) \cdot K(Q,P) \cdot dP = f(Q)$ - відповідна формуліровка для задачі з однозв'язною областю,

K(Q,P) - ядро ІР Фредгольма 2-го роду.

В роботі на підставі узагальненої системи рівнянь (2) на прикладі подано механізм складання конкретних математичних моделей для багатозв'язних областей, визначени основні випадки розрахункових моделей, які найбільш часто зустрічаються в практиці неруйнівного контролю з використанням ВСП. Доречно зазначити, що розрахункові моделі ВСП, розташовані на рис. 2, майже в повному обсязі відображають сучасні потреби електромагнітної дефектоскопії.

Інтегральні представлення ІЕМП для багатозв'язних областей доводиться виконувати для впроваджених векторних граничних джерел :

$\bar{i}_m = \bar{n} \times \dot{\bar{H}}$ - густовина шару магнітного струму;

$\bar{i}_e = \bar{n} \times \dot{\bar{E}}$ - густовина шару електричного струму.

Для випадку контролю, ілюстрованого на рис. 2а, адекватна математична модель у вигляді системи інтегральних рівнянь Фредгольма 2-го роду :

$$\bar{i}_{m1} + \bar{n} \times \left(\mathrm{rot} \left(\oint_{S_1} \bar{i}_{m1}(P)\, \dot{g}_H \, dS_P - \oint_{S_1} \frac{\bar{i}_{m1}(P)}{4\pi r_{QP}} dS_P \right) \right) + \bar{n} \times \left(\mathrm{rot} \left(\oint_{S_2} \bar{i}_{m2}(P)\, \dot{g}_H \, dS_P - \right. \right.$$

$$\left. \left. - \oint_{S_2} \frac{\bar{i}_{m2}(P)}{4\pi r_{QP}} dS_P \right) \right) + \bar{n} \times \left(\gamma_1 \oint_{S_1} \bar{i}_{e1}(P)\, \dot{g}_H \, dS_P + \frac{1}{j\omega\mu_0\mu_1} \left[\nabla_Q \nabla_Q \oint_{S_1} \frac{\bar{i}_{e1}(P)}{4\pi r_{QP}} dS_P - \right. \right.$$

$$\left. \left. - \nabla_Q \nabla_Q \oint_{S_1} \bar{i}_{e1}(P)\, \dot{g}_H \, dS_P \right] \right) + \bar{n} \times \left(\gamma_2 \oint_{S_2} \bar{i}_{e2}(P)\, \dot{g}_H \, dS_P + \frac{1}{j\omega\mu_0\mu_2} \times \right.$$

$$\left. \times \left[\nabla_Q \nabla_Q \oint_{S_2} \frac{\bar{i}_{e2}(P)}{4\pi r_{QP}} dS_P - \nabla_Q \nabla_Q \oint_{S_2} \bar{i}_{e2}(P)\, \dot{g}_H \, dS_P \right] \right) = \bar{n} \times \dot{\bar{H}}_{cm}; \qquad (3\,а)$$

$$\bar{i}_{m2}+\bar{n}\times\left(\operatorname{rot}\left(\oint_{S_1}\bar{i}_{m1}(P)\dot{g}_H\,dS_P-\oint_{S_1}\frac{\bar{i}_{m1}(P)}{4\pi r_{QP}}dS_P\right)\right)+\bar{n}\times\left(\operatorname{rot}\left(\oint_{S_1}\bar{i}_{m2}(P)\dot{g}_H\,dS_P-\right.\right.$$

$$\left.\left.-\oint_{S_2}\frac{\bar{i}_{m2}(P)}{4\pi r_{QP}}dS_P\right)\right)+\bar{n}\times\left(\gamma_1\oint_{S_1}\bar{i}_{e1}(P)\dot{g}_H\,dS_P+\frac{1}{j\omega\mu_0\mu_1}\left[\nabla_Q\nabla_Q\oint_{S_1}\frac{\bar{i}_{e1}(P)}{4\pi r_{QP}}dS_P-\right.\right.$$

$$\left.\left.-\nabla_Q\nabla_Q\oint_{S_1}\bar{i}_{e1}(P)\dot{g}_H\,dS_P\right]\right)+\bar{n}\times\left(\gamma_2\oint_{S_2}\bar{i}_{e2}(P)\dot{g}_H\,dS_P+\frac{1}{j\omega\mu_0\mu_2}\right.$$

$$\left.\left[\nabla_Q\nabla_Q\oint_{S_2}\frac{\bar{i}_{e2}(P)}{4\pi r_{QP}}dS_P-\nabla_Q\nabla_Q\oint_{S_2}\bar{i}_{e2}(P)\dot{g}_H\,dS_P\right]\right)=\bar{n}\times\dot{\bar{H}}_{cm};\qquad(3б)$$

$$\bar{i}_{e1}+\bar{n}\times\left(\operatorname{rot}\left(\oint_{S_1}\bar{i}_{e1}(P)\dot{g}_H\,dS_P-\oint_{S_1}\frac{\bar{i}_{e1}(P)}{4\pi r_{QP}}dS_P\right)\right)+\bar{n}\times\left(\operatorname{rot}\left(\oint_{S_2}\bar{i}_{e2}(P)\dot{g}_H\,dS_P-\right.\right.$$

$$\left.\left.-\oint_{S_2}\frac{\bar{i}_{e2}(P)}{4\pi r_{QP}}dS_P\right)\right)-\bar{n}\times\left(j\omega\mu_0\left[\mu_1\oint_{S_1}\bar{i}_{m1}(P)\dot{g}_H\,dS_P-\oint_{S_1}\frac{\bar{i}_{m1}(P)}{4\pi r_{QP}}dS_P\right]+\right.$$

$$\left.+\frac{1}{\gamma_1}\nabla_Q\nabla_Q\oint_{S_1}\frac{\bar{i}_{m1}(P)}{4\pi r_{QP}}dS_P\right)-\bar{n}\left(j\omega\mu_0\left[\mu_2\oint_{S_2}\bar{i}_{m2}(P)\dot{g}_H\,dS_P-\oint_{S_2}\frac{\bar{i}_{m2}(P)}{4\pi r_{QP}}dS_P\right]+\right.$$

$$\left.+\frac{1}{\gamma_2}\nabla_Q\nabla_Q\oint_{S_2}\frac{\bar{i}_{m2}(P)}{4\pi r_{QP}}dS_P\right)=0;\qquad(3в)$$

$$\bar{i}_{e2}+\bar{n}\times\left(\operatorname{rot}\left(\oint_{S_1}\bar{i}_{e1}(P)\dot{g}_H\,dS_P-\oint_{S_1}\frac{\bar{i}_{e1}(P)}{4\pi r_{QP}}dS_P\right)\right)+\bar{n}\times\left(\operatorname{rot}\left(\oint_{S_2}\bar{i}_{e2}(P)\dot{g}_H\,dS_P-\right.\right.$$

$$\left.\left.\oint_{S_2}\frac{\bar{i}_{e2}(P)}{4\pi r_{QP}}dS_P\right)\right)-\bar{n}\times\left(j\omega\mu_0\left[\mu_1\oint_{S_1}\bar{i}_{m1}(P)\dot{g}_H\,dS_P-\oint_{S_1}\frac{\bar{i}_{m1}(P)}{4\pi r_{QP}}dS_P\right]+\right.$$

$$\left.+\frac{1}{\gamma_1}\nabla_Q\nabla_Q\oint_{S_1}\frac{\bar{i}_{m1}(P)}{4\pi r_{QP}}dS_P\right)-\bar{n}\times\left(j\omega\mu_0\left[\mu_2\oint_{S_2}\bar{i}_{m2}(P)\dot{g}_H\,dS_P-\oint_{S_2}\frac{\bar{i}_{m2}(P)}{4\pi r_{QP}}dS_P\right]+\right.$$

$$\left.+\frac{1}{\gamma_2}\nabla_Q\nabla_Q\oint_{S_2}\frac{\bar{i}_{m2}(P)}{4\pi r_{QP}}dS_P\right)=0;\qquad(3г)$$

де $\bar{i}_{e1}$, $\bar{i}_{m1}$ - впроваджені граничні джерела на об'єкті з контуром S1;

$\bar{i}_{e2}$, $\bar{i}_{m2}$ - впроваджені граничні джерела на об'єкті з контуром S2.

Значна відмінність в геометричних розмірах самого об'єкта та дефекту дещо ускладнює чисельне розв'язування задачі та збільшує похибки розрахунків. У зв'язку з цим в роботі здійснено удосконалення базової математичної моделі. В результаті відповідних аналітичних перетворень знайдена система рівнянь відносно від'ємних джерел для визначення розподілу ІЕМП дефекту в зоні контролю.

Після розв'язування інтегральних рівнянь будь-якої із поданих математичних моделей відносно граничних джерел ІЕМП обчислюється в довільної сукупності точек простору інтегруванням знайденого вирішення цих рівнянь. Електрорушійна сила (е.р.с.) вимірювальної котушки ВСП, розташованої поруч з дефектом, розраховується в узгодженні з виразом

$$\dot{e} = -j\omega w_u \dot{\Phi} \tag{4}$$

де w_u - кількість звоїв вимірювальної котушки ВСП,

$$\overline{\dot{\Phi}} = \oint_{S_k} \overline{\dot{B}}(P)\,dS_P = \oint_{S_k} \mu \overline{\dot{H}}(P)\,dS_P \tag{5}$$

де S_k - поверхня кола вимірювальної котушки,

μ - абсолютна магнітна проникність.

В цій главі також формальні нескінченновимірювані рівняння зведени до придатного для чисельних розрахунків матричного вигляду. Інтегральні рівняння редуціровани до системи лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР) способом розбиття поверхні об'єкта з дефектом на прямокутні елементи, у межах кожного з яких прийнята кусочно-стала апроксимація підінтегральної функції.

Еквівалентна СЛАР має слідуючий вигляд

$$\left[\dot{A}\right] \cdot \left[\dot{X}\right] = \left[\dot{F}\right], \tag{6}$$

де $\left[\dot{A}\right]$ - квадратна матриця коефіцієнтів, апроксімуючих ліву частину системи граничних інтегральних рівнянь (ГІР);

$\left[\dot{\mathbf{X}}\right]$ - вектор-стовпець, який містить в собі складові шуканих граничних джерел на усіх виділених поверхніх елементах;

$\left[\dot{\mathbf{F}}\right]$ - вектор-стовпець, характеризуючий праву частину системи ГІР та визначаючий складові поля струму збудження.

Вираз (5) зведено до кінцевої суми розбиттям поверхні котушки ВСП на обмежені елементи та припущення відносно постійної поведінки розподілу нормальної складової напруженості ІЕМП на кожному з виділених елементів.

$$\dot{\overline{\Phi}} = \sum_{i=1}^{n} \dot{\mathbf{B}}_i(\mathbf{P}) \cdot \mathbf{S}_i = \mu_0 \mu_r \sum_{i=1}^{n} \dot{\mathbf{H}}_i(\mathbf{P}) \cdot \mathbf{S}_i \qquad (7)$$

Третя глава подає дослідження щодо побудови інформаційної моделі процесів вихорострумового контролю виробів. Обгрунтована та визначена загальна структура програмного комплексу комп'ютерного моделювання, зображена на рис.3.

Застосування програмного комплексу при проектуванні ВСП або в складі ІВСВД дозволяє з єдиних позицій вести дослідження процесів контролю об'єктів, форма поверхні та властивості котрих достатньо різноманітні. Реалізацією комплексу програм передбачається поетапне розв'язування задачі, яке полягає на розподілі всієї задачі на логічно цілосні блоки, припускаючі одночасне послідовне або відокремлене їх виконання в поточному чи наступному часових інтервалах. В склад інформаційної моделі включени препроцесор, лічильний процесор та постпроцесор.

При аналізі задач контролю препроцесором підготовки початкових даних виконуються такі функції: опис геометрії та електрофізичних властивостей області, дискретизація області засобом генерування сітки граничних поверхніх елементів. Дискретизація області віповідає представленню реального об'єкта в вигляді дискретної моделі. Препроцесор використовує в своєї роботі блочну дискретизацію, яка фактично відповідає попередньому розбиттю об'єкта на макроелементи і їх наступної автоматичної дискретизації на розрахункові поверхні мікроелементи. Для автоматичного розбиття препроцесор застосовує додаткову інформацію о кількості смуг розбиття. Вихідна інформація генератора сітки містить кількість елементарних поверхніх елементів, складаючих в сукупності поверхність об'єкта контролю, координати кожної із вершин та центральної точки всіх елементів. Лічильний процесор виконує формування СЛАР згідно з формулою (6), визначає розподіл густовини впроваджених вторинних джерел, здійснює розрахунок ІЕМП та е.р.с.,

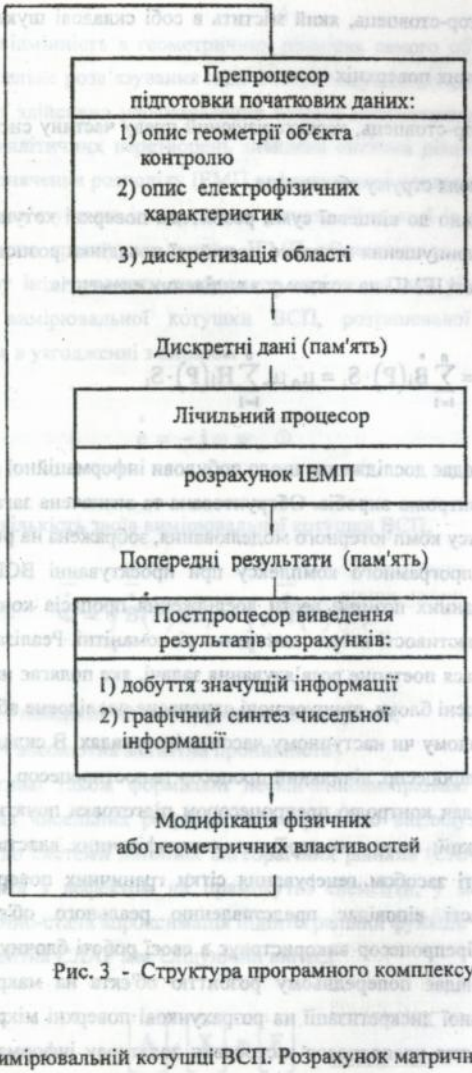


Рис. 3 - Структура програмного комплексу

індукуваної в вимірювальній котушці ВСП. Розрахунок матричних елементів зв'язано з розрахунком інтегралів по площі кожного прямокутного граничного елемента від комплекснозначної в загальному випадку функції. Слід зауважити, що час формування матриці коефіцієнтів СЛАР складає більшу частину повного часу розв'язування задачі. В главі наведени алгоритми формування матриць СЛАР, чисельного інтегрування фундаментальних функцій Гріна. Інтеграли по площі

прямокутних елементів зведени до подвійних, а потім в результаті застосування формули Гріна - до інтегралів вздовж кривої. Таким чином, інтегрування по площі елементів можна замінити інтегруванням вздовж замкнутого контура. Чисельне інтегрування виконується з допомогою адаптивних програм, застосовуючих квадратурну формулу Н'ютона-Котеса. Розв'язання СЛАР відносно граничних джерел здійснюється методом Гауса в результаті її факторизації. Вирішення СЛАР надалі уточнюється в результаті використання ітераційного процесу, що дозволяє проводити контроль похибки внутрішними засобами. Значної економії пам'яті при застосуванні процедури розв'язування СЛАР вдається досягнути у результаті використовування динамічного розміщення масивів. Основні функції постпроцесора у складі програмного комплексу містяться в видобутті корисної локальної інформації з значного чисельного потоку на виході лічильного процесора, а також синтезу цієї інформації таким чином, щоб її можна було інтерпретувати. Модуль постпроцесора надає користувачам такі сервісні можливості: візуалізацію тримірного об'єкта контролю на екрані монітора, масштабування зображення об'єкта, обертання зображення об'єкта в просторі, візуалізацію розбиття макроелементів на мікроелементи, зображення вектора напруженості ІЕМП в контрольних точках за допомогою стрілок індукції. В роботі ідентифіковани джерела похибок чисельного вирішення задачі, рекомендовани та апробовани способи регулювання обчислювальних похибок. Розроблени шляхи оптимізації алгоритмів, визначени важелі керування методом ГІР. Працездатність програмного комплексу підтверджена тестовими вирішеннями модельних задач, маючих аналітичне рішення. При обчислюванні розподілу напруженості ІЕМП в циліндричному провіднику, по якому тече змінний струм, похибка обчислень по модулю та фазі становить менш ніж 6%. Обчислювальна похибка має тенденцію к зменшенню, якщо апроксімація геометрії об'єкта здійснюється з більшою точністю. Повна перевірка всіх модулів комплексу забезпечувалась при визначенні е.р.с. прохідного ВСП, розташованного на тонкому стальному магнітопроводі. В порівнянні з аналітичним вирішенням задачі максимальна похибка чисельного розрахунку е.р.с. складала по модулю менш 0,01% та фазі - 0,015% в широкому діапазоні зміни частоти однорідного ІЕМП ($500 < f < 10^6$), в якому знаходився магнітопровод.

У **четвертій главі** викладени результати математичного моделювання режимів електромагнітного контролю об'єктів з дефектами обмежених розмірів. Використання розробленої інформаційної моделі дозволяє переглянути всілякі сполучення значень параметрів ВСП та визначити ті з них, які відповідають кращим проектним характеристикам.

Таким чином, відшукується раціональне вирішення як завгодно близьке по ряду критеріїв до оптимального по кожному з параметрів. Аналіз результатів математичного моделювання дає змогу вибирати оптимальну робочу частоту, конструкцію ВСП, вимірювальну схему та прийоми контролю, які забезпечують достатню чутливість приладу до перевіряємого параметра, а також повне або часткове знімання впливу неконтрольованих властивостей виробів. Такі дослідження мають проводитись для кожного конкретного об'єкта контролю, що гарантує облік впливу специфічних властивостей об'єкта та високу ефективність контролю. В результаті проведення великої кількості чисельних експерементів накопичен дослідницький матеріал стосовно чутливості класичних накладних та прохідних ВСП до ряду параметрів, серед яких форма та геометрія об'єкта контролю, розмір, форма і місцезнаходження дефекту, його орієнтація відносно ВСП, зазор між об'єктом та перетворювачем. Звернемо увагу на те, що застосування інформаційної моделі процесів контролю дає змогу ретельно розглянути складні випадки в практиці вихорострумової дефектоскопії, котрі викликають значні труднощі в разі використання класичних методів аналізу. Цей тип задач включає виявлення групи дефектів, розташованих на незначній відстані один від одного, контроль виробів з обліком дії крайового ефекту, кількісний аналіз впливу на сигнал ВСП биття об'єкта контролю та інших. Вивчення реакції сигналу ВСП, в тому числі амплітуди та його фази, на зміни означених вище факторів відбувалося для датчиків кругової та прямокутньої форми. В ряді випадків вдалося чисельними розрахунками підтвердити експериментальні закономірності, які відображають основні тенденції в електромагнітному контролі об'єктів накладними та прохідними ВСП і мають фундаментальне значення для основ теорії виявлення дефектів. В главі розроблена методика використання інформаційної моделі при проектуванні нових засобів контролю, що включає п'ять основних етапів. На першому етапі доводиться проводити аналіз об'єкта з метою визначення таких характерних місць на ньому, де пошук дефектів викликає найбільші труднощі. Далі у вибраному місці розташовують ''граничний'' дефект відповідної форми та граничних габаритних розмірів, який має визначити поріг чутливості прилада. На другому етапі виконується вибір оптимальної частоти зондування об'єкта. Задаваючись електрофізичними характеристиками об'єкта, а також конструктивними особливостями ВСП в першому наближенні, виконують чисельне моделювання процесу контролю, по результатам якого аналізують функціональну залежність модуля та фази сигналу від узагальненого параметра β, а також геометричних розмірів дефекту. Ці дії дозволяють визначити раціональний діапазон зміни узагальненого параметра β, забезпечуючий максимальну чутливість ВСП до дефекту. На наступному етапі в разі потреби, що в першу чергу

відноситься до накладних ВСП, виконується уточнення геометричних розмірів перетворювача. Так, наприклад, для вибору оптимального діаметра накладного ВСП виникає необхідність визначення залежності інформаційного сигналу (модуля та фази) від діаметра датчика при незмінних геометричних параметрах "граничного" дефекту. Четвертий етап характеризується проведенням досліджень по виявленню припустимих змін заважаючих факторів, які не вносять значних спотворень в результати контролю. На останньому етапі здійснюється тестування роботи ВСП на дефектах, які відрізняються розмірами, формою та місцем розташування від "граничного" дефекту. На цьому етапі можливо переконатися у правильності або помилковості прийнятих технічних вирішень. На рис. 4, 5 демонструються приклади функціональних залежностей відносного вихідного сигналу накладного ВСП, зведеного до е.р.с. холостого ходу перетворювача, для вибору оптимального діапазону узагальненого параметра β та оптимального діаметра відповідно.

Запропоновано використання для потреб неруйнівного електромагнітного контролю перетворювачів, застосовуючих елементи Хола в якості шукачів дефектів.

Відмінной властивістю такої ідеології побудови ВСП є постійна чутливість датчика в широкому спектрі частот від 0 до 100 кГц, в якому вектор результируючого ІЕМП найбільш критичний до зміни параметрів об'єкта контролю.

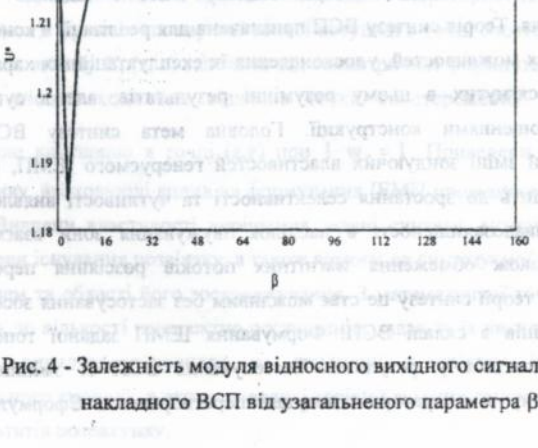


Рис. 4 - Залежність модуля відносного вихідного сигналу накладного ВСП від узагальненого параметра β

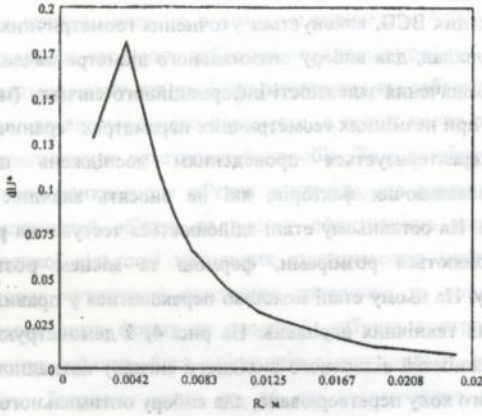


Рис. 5 - Залежність приросту модуля відносного вихідного сигналу накладного ВСП від діаметра перетворювача

Аналізується чутливість ВСП з елементами Хола до ряду параметрів об'єкта з дефектом. Звертається увага на високу розрізнювальну здатність методу контролю, обумовлену незначними габаритними розмірами елементів Хола (1,5х0,5х0,02 мм), їх високою чутливістю (0,15 В/Тл), широкі можливості в області орієнтації зондуючого елемента в складі ВСП з метою отримання максимальної чутливості прилада у цілому.

У **п'ятій главі** подана теорія синтезу ВСП с заданою конфігурацією зондуючого поля. Теорія синтезу ВСП призначена для реалізації в конструкціях ВСП нових технічних можливостей, удосконалення їх експлуатаційних характеристик або повторення досягнутих в цьому розумінні результатів, але в супроводженні з значними спрощеннями конструкції. Головна мета синтезу ВСП полягає в цілеспрямованій зміні зондуючих властивостей генеруємого ІЕМП, що в багатьох випадках наводить до зростання селективності та чутливості виявлення дефектів, покращення завадозахищеності в наслідок звужування зони взаємодії ІЕМП з об'єктом, а також обмеження магнітних потоків розсіяння перетворювача. З використанням теорії синтезу це стає можливим без застосування зосереджувачів та провідних екранів в складі ВСП. Формування ІЕМП заданої топографії в зоні контролю досягається у результаті застосування ВСП зі змінним розподілом густовини струму в генераторній котушці перетворювача. Сформульована задача

параметричного синтезу ВСП, яка полягає в визначенні струмів в сукупності тонких рівнорозподілених котушок, на які дискретизована розподілена генераторна котушка ВСП, з метою наближення синтезованого ІЕМП до заданого. Задачу можна дещо спростити, якщо шуканими при розв'зуванні вважати кількість звоїв **w** в кожній тонкій котушці та характер їх ввімкнення (суперечне або узгоджене) при умові єдності струму в них. На рис.6 зображени конструкції синтезованих ВСП.

З теоретичної точки зору проблема синтезу ВСП розглядається у вигляді

$$\left\| H_z(z, r) - H_z^c(z, r) \right\| \le \varepsilon > 0 \qquad (8)$$

де $H_z(z, r)$ - вимогаємий розподіл z-ї компоненти ІЕМП в зоні контролю;

$H_z^c(z, r)$ - проекція напруженості ІЕМП на напрямок Oz, отримана в результаті дії шуканим розподілом густовини струму;

ε - похибка синтезу.

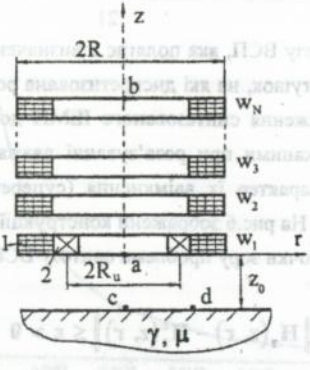
Для системи **N** тонких котушок довільного в узагальненому вигляді перерізу ІЕМП в заданій області контролю можливо визначити в узгодженні з виразом

$$H_z^c(z, r) = \sum_{i=1}^{N} K_i(z, r) \cdot \dot{I} \cdot w_i, \qquad (9)$$

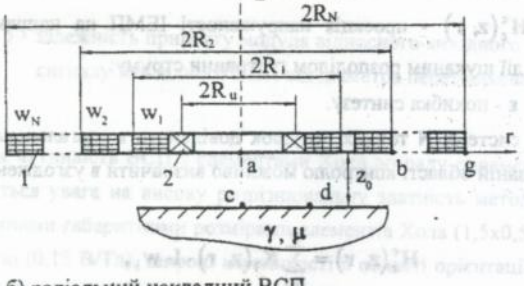
де $\dot{I}$ - струм в послідовно ввімкнених секціях генераторної котушки ВСП;

$K_i(z, r)$- функція впливу і-ої тонкої котушки в точці спостереження **Q (z, r)**.

Функція впливу $K_i(z, r)$ залежить від геометричної форми перерізу котушки, її розмірів та місцезнаходження відносно точки спостереження і визначає поле, збуджене і-ою котушкою в точці (z,r) при $\dot{I} \cdot w_i = 1$. Приведени можливі випадки функції впливу, враховуючі вплив на формування ІЕМП провідного матеріалу об'єкта контролю. Вивчени властивості вирішення задачі синтезу, визначени необхідні та достатні умови існування розв'язку, а також вимоги до синтезуємої функції розподілу поля, розмірам та області його зосереджування. З математичної точки зору рівняння (9) належить до кількості некоректно поставлених задач та їх чисельне розв'язування у багатьох випадках натрапляє на труднощі в зв'язку із нестабільністю обчислювального процесу, в якому невеликі варіації вхідних даних визначають значні зміни результатів розрахунку.



а) циліндричний накладний ВСП



б) радіальний накладний ВСП

в) циліндричний прохідний ВСП

1 - котушка збудження; 2- вимірювальна котушка

Рис. 6 - Конструкції синтезованих ВСП

Аналізувалась можливість використання при розв'язуванні проблеми методів сінгулярного розкладу (SVD) та регуляризації Тіхонова А.Н. Пропонується використання в якості математичної бази вирішення зворотної задачі метода SVD, забезпечуючого похибку синтезу ІЕМП достатньо простої топографії не вище 0,5% та враховуючого особливості комп'ютерного розв'язку некоректно поставлених задач. Розроблено програмний комплекс чисельного моделювання задач синтезу, на чисельних прикладах розглядено питання верифікації алгоритмів. В результаті чисельних експериментів визначени технічні вимоги до точності виготовлення магнітної системи перетворювачів, виявлена чутливість магнітної системи ВСП до зміни окремих геометричних параметрів. Запропоновани способи технічної реалізації синтезованих конструкцій ВСП, які дозволяють виготовити реальні ВСП з зондуючими ІЕМП мінімально відрізними від розрахункових. Проведено порівнювальний аналіз ВСП циліндричного та радіального типів. Зроблени висновки щодо переважного використовування з точки зору точності формування ІЕМП вимогаємої конфігурації ВСП циліндричного типу. На рис. 7, 8 ілюструються деякі приклади застосування розробленого програмного комплексу до синтезу зондуючих ІЕМП перетворювачів.

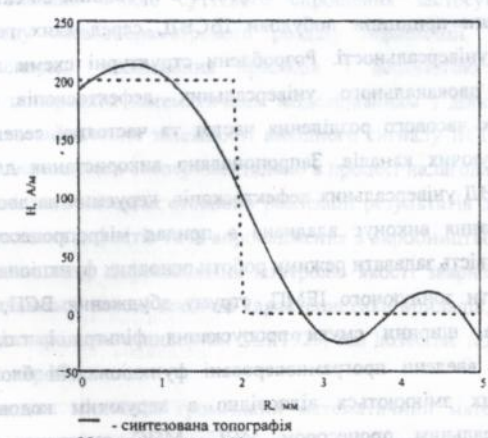


Рис. 7 - Синтез П-образного розподілу ІЕМП в зоні контролю об'єкта накладним циліндричним ВСП

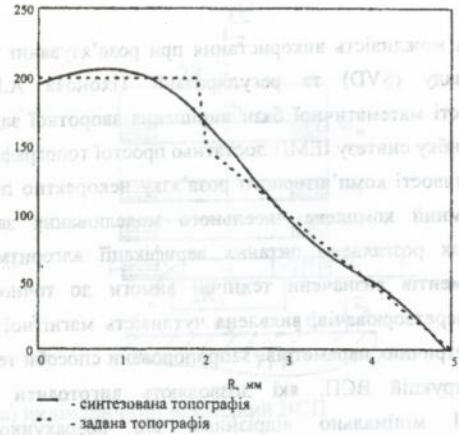


Рис. 8 - Синтез Л-образного розподілу ІЕМП з П-образним п'єдесталом в зоні контролю об'єкта накладним цилиндричним ВСП

Шоста глава присвячена питанням розробки апаратно-програмного забезпечення технічних засобів виявлення дефектів в провідних об'єктах довільної форми. Сформульовани принципи побудови ІВСВД, серед яких головне місце належить принципу універсальності. Розроблени структурні схеми двочастотних одноканального та двоканального універсальних дефектоскопів, працюючих відповідно в режимах часового розділення частот та частотної селекції сигналів паралельно функціонуючих каналів. Запропоновано використання для контролю об'єктів в складі ІВСВД універсальних дефектоскопів, керуємих на двох рівнях. На нижнему рівні керування виконує владнана в прилад мікропроцесорна система (МПС), яка має можливість задавати режими роботи основних функціональних вузлів системи (зміну частоти зондуючого ІЕМП, струму збудження ВСП, коефіцієнта передачі підсилювача, ширини смуги пропускання фільтра і т.п.). В склад спеціалізованої МПС введени програмнокеровані функціональні блоки, технічні характеристики котрих змінюються відповідно з керуючим кодовим словом, запровадженим центральним процесором МПС. МПС виконана на сучасній елементній базі мікропроцесорного комплекту К1810 та характеризується високою продуктивністю роботи в співпроцесорній конфігурації. Розроблени електричні принципіальні схеми складових ІВСВД, серед яких задаючий генератор гармонічних коливань з програмованою частотою, підсилювач потужності, програмовані джерела

постійної напруги, компенсатор з програмнокерованою фазою вихідного сигналу, підсилювач сигналу з програмнокерованим коефіцієнтом передачі, фазочутливі випрямлячі, програмнокерований фазообертач, система збору даних. Програмне забезпечення МПС містить в своєму складі наступні функціональні модулі: процедуру керування блоком контрольно-вимірювальної апаратури; процедуру обробки результатів вимірювань; процедуру взаємодії з керуючим об'єктом високого рівня. Використання в практиці вихоострумової дефектоскопії двочастотних приладів та відповідного програмного забезпечення обробки сигналу ВСП дозволяє відстроїтися при вимірюванні від впливу ряду заважаючих факторів (зазору, структурних змін матеріалу об'єкта контролю). На високому рівні роботою приладу керує потік інформації, здобутої в процесі функціонування інформаційної моделі процесів контролю. Застосування інформаційної моделі в практиці контролю забезпечує гнучкість, ефективність праці та швидкість адаптації до нових умов роботи з будь-якими об'єктами контролю.

В главі здійснено аналіз та відповідний вибір найбільш ефективних алгоритмів обробки двочастотних сигналів, серед яких використовуючий автоматичне регулювання підсилення вимірювального каналу, взаємної корекції сигналів, багатопараметрового контролю виробів з застосуванням лінійної та нелінійної функціональних залежностей.

Запропоновано спосіб суттєвого спрощення застосування для контролю виробів методу багатопараметрового розділу інформації, в якому трудомісткі виснажливі операції налагодження приладів з допомогою стандартних взірців замінюються попереднім математичним моделюванням з допомогою інформаційної моделі з метою визначення залежності вихідного сигналу ВСП від ряду параметрів, котра раніше знаходилась експериментально в процесі налагодження.

Глава містить матеріал стосовно реалізації результатів досліджень в реальних приладах виявлення дефектів та їх впровадження в виробництво.

Приведено опис дефектоскопів контролю якості зварного шва труб в потоці стану. Відзначаються високі технічні характеристики приладів, спроможність роботи відповідно міжнародним стандартам SEP1925, що дозволяє підприємствам провести сертифікацію виробів.

У **додатках** міститься громіздкий математичний матеріал, одержаний при аналітичних перетворюваннях вихідних формальних інтегральних рівнянь до розрахункового вигляду.

Підсумкові висновки та основні результати. В дисертаційній роботі на основі систематизації та узагальнення відомих теоретичних і прикладних результатів, а

також проведення нових досліджень викладено науково обгрунтоване рішення важливої проблеми створення теорії виявлення дефектів обмежених розмірів в провідних об'єктах довільної форми як основи оптимального проектування ВСП та розробки на її базі ефективних засобів електромагнітного контролю з високими технічними характеристиками.

Основні висновки та результати, здобуті в процесі досліджень, містяться у тому, що:

1. Запропоновано та теоретично обгрунтовано єдиний методологічний підхід вирішення широкого кола задач електромагнітної дефектоскопії об'єктів довільної форми з дефектами обмежених розмірів. В основі підходу закладено метод граничних інтегральних рівнянь, забезпечуючий універсальність математичних моделей процесів контролю складних об'єктів завдяки використанню фундаментальних функцій Гріна для тримірних областей.

2. Проаналізовани, розглядени та узагальнени відомі математичні моделі аналізу тримірних електромагнітних полів в провідних середовищах. В якості базової теоретико-розрахункової моделі обрани граничні ІР мінімальної розмірності для одного векторного та одного скалярного впроваджених фіктивних джерел, розподілених на поверхні об'єкта контролю. На основі базової математичної моделі запропонована удосконалена модель для багатозв'язних областей, яка ураховує наявність у складі ВСП зосереджувачів та екранів з провідних матеріалів, а також адаптована до умов вихорострумового контролю модель, записана відносно від'ємних фіктивних джерел.

3. В результаті аналітичного перетворення формального нескінченновимірюваного рішення задачі електромагнітного контролю до скінченновимірюваного вигляду отримани розрахункові матричні рівняння, придатні для комп'ютерного моделювання процесів взаємодії ІЕМП з об'єктом, а також ВСП з об'єктом.

4. З'ясовани особливості задачі розрахунку вихідного сигналу ВСП при контролі об'єктів з дефектами. Визначени шляхи підвищення ефективності та продуктивності алгоритмів, в основу яких закладені розроблені математичні моделі.

5. Обгрунтована та запропонована загальна структура програмного комплексу, призначеного для чисельного комп'ютерного моделювання процесів електромагнітного контролю провідних об'єктів складної геометричної конфігурації з дефектами обмежених розмірів. Розроблени ефективні алгоритми підготовки даних, автоматичного генерування сітковий структури, чисельного вираховування поверхніх інтегралів, формування та вирішення комплексозначних СЛАР великого порядку, візуалізації результатів обчислювання.

6. Розроблена інформаційна модель процесів електромагнітного контролю, яка є інформаційним тлумаченням фізико-математичної моделі. В основі моделі міститься єдиний методологічний підхід, що базується на формалізмі ІР, сформульованих на межі розділу середовищ та дозволяючих з єдиних позицій підходити до досліджень процесів контролю об'єктів, форма поверхні та властивості яких достатньо різноманітні.

7. Ідентифіковани джерела похибок чисельного розв'язування задачі, рекомендовани та апробовани способи регулювання обчислювальних похибок. Запропоновани шляхи оптимізації використовуємих алгоритмів, які відчиняють додатні резерви удосконалення розробленого комплексу програм. Працездатність програмного комплексу доведена тестовими вирішеннями модельних задач.

8. Для проектування високоефективних технічних засобів електромагнітного контролю запропоновано підхід, полягаючий в широкомасштабних дослідженнях приватних специфічних задач контролю на базі розроблених інформаційної моделі і методики її застосування, що дозволяє здійснити перехід від узагальнених закономірностей до конкретизованих вузькоспеціалізованих рішень по вибору оптимальних режимів роботи ВСП та їх конструктивних властивостей.

9. В результаті вирішення численних модельних задач досліджена чутливість накладних та прохідних ВСП до зміни геометричних розмірів дефектів, їхньої форми, орієнтації у просторі. У ряді випадків теоретично підтверджени результати експериментальних досліджень, які стали фундаментальними для основ теорії виявлення дефектів. В результаті моделювання теоретично розв'язано ряд задач, котрі раніше не розглядалися через непереборні математичні труднощі.

10. Розроблена методика проектування оптимальних класичних накладних та прохідних ВСП. Особлива увага приділена проектуванню накладних ВСП для виявлення дефектів, конструювання яких традиційно вважається найбільш складним.

11. Розроблени основи теорії синтезу ВСП з вимагаємою структурою зондуючого ІЕМП, дозволяючей покращити умови виявлення дефектів в об'єктах в результаті підвищення селективності та їх завадозахищеності. З'ясовани властивості рішення задачі синтезу, визначени необхідні та достатні умови існування розв'язку, а також вимоги до синтезуємих функцій розподілу поля, розмірам та області його зосереджування.

12. Розроблено програмний комплекс рішення задач синтезу ВСП на основі методу сінгулярного розкладу SVD, ураховуючого особливості комп'ютерного рішення некоректно поставлених задач. На численних прикладах розглядени питання верифікації алгоритмів, визначени технічні вимоги до точності виготовлення магнітної системи синтезуємих ВСП.

13. Запропоновани структурні схеми двочастотних одноканального та двоканального універсальних дефектоскопів, працюючих відповідно в режимах часового розділення частот та частотної селекції сигналів паралельно функціонуючих каналів, використання яких забезпечує ефективну відстройку від заважаючих вимірюванням факторів. Розроблени електричні принципіальні схеми основних функціональних вузлів приладів, спроможних змінювати режими своєї роботи при програмном керуванні від ЕОМ. Визначени алгоритми обробки вихідного сигналу ВСП, що забезпечують відстройку від неконтрольованих параметрів об'єкта.

14. Запропоновано спосіб суттєвого спрощення застосування для контролю виробів методу багатопараметрового розділу інформації. Трудомісткі операції налагодження приладів з допомогою стандартних взірців рекомендовано заміняти математичним моделюванням з застосуванням комплексу розроблених програм з метою визначення залежності вихідного сигналу ВСП від ряду параметрів.

15. Основні теоретичні та прикладні результати дисертаційної роботи були використани при проектуванні та розробці дефектоскопів, котрі впроваджени в виробництво на підприємствах України та Росії.

Положення дисертації відображені в публікаціях:

1. Гальченко В.Я. Информационные модели в теории и практике электромагнитной дефектоскопии.-Луганск: Изд-во ВУГУ, 1997.-262с.

2. Яковенко В.В., Гальченко В.Я., Шаповаленко Т.В. Аспекты теории электромагнитного контроля объектов с дефектами конечных размеров //Вісник Східноукраїнського державного університету.- 1996.-№1.-С.103-107.

3. Гальченко В.Я., Шаповаленко Т.В., Черепахин Г.А., Велигура А.В. Расчет трехмерных информационных электромагнитных полей вихретоковых измерительных преобразователей //Вестник Восточноукраинского государственного университета, серия Машиностроение.-1996.-отдельный выпуск.-С.20-22.

4. Яковенко В.В., Гальченко В.Я., Бондаренко В.Е. Синтез магнитных систем с дискретными источниками поля //Изв. вузов. Электромеханика. –1991. – № 8. – С.16.

5. Яковенко В.В., Гальченко В.Я., Донская Л.В. Синтез катушки в магнитной системе датчика линейных перемещений // Изв. вузов. Электромеханика.–1990.–№6.–С.75-78.

6. Яковенко В.В., Лойко А.В., Донская Л.В., Гальченко В.Я. Синхронный детектор для обработки выходных сигналов феррозондов с однополярным импульсным возбуждением //Приборы и техника эксперимента.-1989.-№6.-С.104-106.

7. Гальченко В.Я., Яковенко В.В., Шагров Г.И., Лойко А.В. Цифровой измеритель остаточной индукции //Приборы и техника эксперимента.-1992.-№1.-С.239.

8. Яковенко В.В., Гальченко В.Я., Лойко А.В. Миниатюрный датчик линейных перемещений // Приборостроение. - 1990. - № 5. - С.33-38.

Особистий внесок. Основні результати дисертації були одержани особисто автором. В публікаціях із співавторами [3,4,5,8] автору належить розробка математичних та розрахункових моделей, в [6,7] - розробка структурних та принципіальних електричних схем пристроїв, у [2] - постановка задачі, аналіз та узагальнення результатів досліджень, формулювання висновків.

АНОТАЦІЯ

Гальченко В.Я. Методи оптимізації параметрів та режимів роботи вихрострумових перетворювачів дефектоскопів. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.11.13 - прилади і методи контролю. - Харківський державний політехнічний університет, Харків, 1997.

Захищаються рукопис та 29 наукових праць, в яких міститься розв'язок проблеми розвитку теорії електромагнітної дефектоскопії провідних об'єктів довільної форми з дефектами обмежених геометричних розмірів шляхом вдосконалення методів розрахунку вихрострумових перетворювачів, визначення їх оптимальних характеристик та режимів роботи.

Запропоновано єдиний методологічний підхід рішення проблеми, математичні та інформаційні моделі процесів контролю, напрямки їх ефективного застосування в теорії та практиці електромагнітної дефектоскопії. Розроблено універсальні технічні засоби контролю об'єктів зі змінними режимами роботи, які задаються під керуванням від ЕОМ. Результати досліджень впроваджено в промисловісті.

Ключові слова: об'єкт контролю довільної форми, дефект, чисельне моделювання, тримірні електромагнітні поля, вихрострумовий перетворювач, інформаційна модель, оптимізація, компьютерне моделювання.

АННОТАЦИЯ

Гальченко В.Я. Методы оптимизации параметров и режимов работы вихретоковых преобразователей дефектоскопов. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.11.13 - приборы и методы контроля. - Харьковский государственный политехнический университет, Харьков, 1997.

Защищается рукопись и 29 научных работ, в которых содержится решение проблемы развития теории электромагнитной дефектоскопии проводящих объектов произвольной формы с дефектами ограниченных геометрических размеров путем совершенствования методов расчета вихретоковых преобразователей, определения их оптимальных характеристик и режимов работы.

Предложены единый методологический подход решения проблемы, математические и информационные модели процессов контроля, направления их эффективного применения в теории и практике электромагнитной дефектоскопии. Разработаны универсальные технические средства контроля объектов с перестраиваемыми под управлением ЭВМ режимами работы.

Результаты исследований внедрены в промышленности.

Ключевые слова: объект контроля произвольной формы, дефект, численное моделирование, трехмерные электромагнитные поля, вихретоковый преобразователь, информационная модель, оптимизация, компьютерное моделирование.

SUMMARY

Galchenko V. Ya. Optimization's methods of the parameters and work regimes of the defectoscope's eddy current transformers. - Manuscript.

Thesis for a doctor's degree by speciality 05.11.13 - Devices and Methods of the Control. - Kharkov State Polytechnical University, Kharkov, 1997.

Scientific manuscript and 29 scientific works are defended. They include the problem's solution of the non-destructive testing of arbitrary shape objects with defects of finite dimensions by means of development of the theory and calculation methods for definition of the optimal characteristics of eddy current devices. There proposed uniformity method of the problem's solution, mathematical and information models of the control processes, the directions of their application in the theory and practice of electromagnetic testing. PC-based information - measurement system for eddy current control of conduction objects was constructed. The information on effectiveness of devices introduction in the process of operation is given.

Key words: control's arbitrary shape object, defect, numerical modeling, three-dimensional electromagnetic fields, eddy current transformer, information model, optimization, computer modeling.

Підп. до друку "12" 11 1997р. Формат 60x90/16.
Друк. ар. 2,0. Тираж 100 прим. Зам. № 502
Ротапринт СУДУ, 348034, Луганськ, кв. Молодіжний, 20А

Підп. до друку "12" 11 1997р. Формат 60x90/16.
Друк. ар. 2,0. Тираж 100 прим. Зам. № 502
Ротапринт СУДУ, 348034, Луганськ, кв. Молодіжний, 20А

Ав 39029