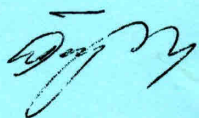


620.179.14  
Т 37

Івано-Франківський національний  
технічний університет нафти і газу

ТЕТЕРКО Анатолій Якович



УДК 620.179.14 (043)

Т 37

РОЗРОБКА МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ  
СЕЛЕКТИВНОЇ ВИХРОСТРУМОВОЇ ДЕФЕКТОСКОПІЇ

п.п.м.

Спеціальність 05.11.13 – Прилади і методи контролю  
та визначення складу речовин

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Івано-Франківськ – 2002



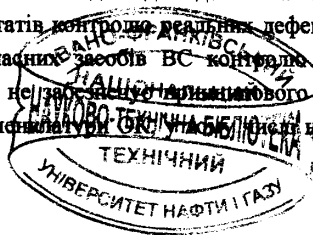
## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Стратегічним напрямком організації та управління сучасним виробництвом є забезпечення створення продукції високої якості, що встановлюється міжнародними та державними стандартами на етапах її розробки, проектування та виготовлення. Важливою складовою комплексних систем управління якістю є застосування методів і засобів неруйнівного контролю (НК) матеріалів і сировини, контролю деталей на всіх етапах виробництва, а також контролю й технічної діагностики (ТД) стану деталей та елементів конструкцій під час їх експлуатації.

Для ефективного застосування засобів неруйнівного контролю, що часто мають відповідати вимогам 100% контролю в реальному часі, в різних методах НК проводиться інтенсивна розробка задач автоматизації обробки інформації на базі подальшого розвитку теорії методів і дослідження взаємозв'язку між параметрами об'єктів контролю (ОК) та інформативними параметрами зондуючого поля.

Методи та засоби вихрострумової (ВС) дефектоскопії спрямовані на розв'язання широкого кола задач виявлення дефектів типу тріщин, неоднорідностей структури матеріалу, вимірювання структурочутливих параметрів матеріалу, параметрів дефектів та розмірних параметрів ОК й ін. Особливо ефективне використання засоби ВС дефектоскопії знайшли в авіаційній техніці під час виконання регламентних і ремонтних робіт, машинобудуванні, у трубному виробництві, в енергетиці, зокрема, для дефектоскопії труб парогенераторів тощо. У ряді випадків засоби ВС контролю можуть частково чи повністю замінити більш трудомісткі методи НК або дублювати їх у системах комплексного контролю відповідальних об'єктів.

Принциповою особливістю вихрострумового методу є його багатопараметровість. Відгук вихрострумового первинного перетворювача (ВСПП) залежить від множини електрофізичних, розмірних параметрів ОК і параметрів локальних дефектів типу тріщин, включень у структурі ОК, вплив яких є *нелінійним і взаємозалежним*. Проте, в теорії ВС контролю актуальною, але мало розробленою залишається проблема створення ефективних методів нелінійного багатовимірного аналізу та обробки багатопараметрових сигналів ВСПП з метою селективного контролю заданих параметрів ОК при одночасній зміні двох, трьох і більшого числа факторів – параметрів ОК. Ці фактори суттєво впливають на формування відгуку ВСПП і обумовлюють рівень завад у задачах контролю та похибку методу в задачах вимірювань, а саме: дефектометрії, товщинометрії та структурометрії. При цьому недостатньо досліджено та розроблено клас задач, що розглядає взаємодію ВСПП із ОК, які містять дефекти типу тріщин, розшарувань, включень і т.п. Аналіз також свідчить про неповноту існуючої фізичної і відповідної до неї математичної моделі, яка не пояснює суттєву розбіжність результатів контролю реальних дефектів типу тріщин для різних ОК. Як наслідок, більшість сучасних засобів ВС контролю спрямована лише на розв'язок двопараметрових задач, що не дозволяє розширювати сферу застосування контролю й розширення номінальних



as884

тури  
обки

методів контролю нових структур об'єктів. Так, ВС товщиноміри покриттів, які широко використовують в інженерній практиці, забезпечують заглушення впливу тільки одного із заводських параметрів, зокрема, зазора між ВСПП та ОК. Притому зміна питомої електричної провідності (ПЕП) основного матеріалу від номінального значення, що має місце навіть у межах однієї партії деталей, обумовлює наявність значної методичної похибки. Остання для тонкошарового покриття може становити десятки відсотків. У той же час сучасні задачі комплексних науково-технічних досліджень і розробок з інженерії поверхонь вимагають застосувань високочотних засобів НК, похибка яких не перевищувала б десятих долей відсотка та менше.

Через зазначені причини залишається невирішеним ряд проблемних задач селективної ВС дефектоскопії. До них відносяться, зокрема, задачі виявлення дефектів та структуроскопії зварних з'єднань; задачі дефектометрії, або визначення основних параметрів наявних дефектів (приміром, глибини тріщин, що утворюються в процесі втоми та корозії); задачі контролю структурного стану та розвитку локальних структурних змін у приповерхневих шарах матеріалу ОК, у тому числі при зародженні дефектів типу тріщин; задачі контролю розшарувань, адгезії та структурного стану покриття, підвищення точності вимірювань товщини покриття і оболонок та ін. В цілому ці задачі формуються як багатопараметрові, а число параметрів ОК, що можуть змінюватися одночасно, часто становить до трьох-п'яти. Їх розв'язок пов'язаний з рядом принципових труднощів, які становлять актуальну проблематику селективної ВС дефектоскопії. Розробка селективних, з малою похибкою методів ВС контролю множини параметрів ОК, що змінюються одночасно, забезпечує створення нового покоління засобів ВС дефектоскопії для задач дефектометрії, структуроскопії та вимірювань розмірних параметрів ОК і рішення на їх основі актуальних задач ТД у матеріалознавстві та техніці (авіакосмічна галузь, енергетика, транспорт, тощо).

*Зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами.* Робота виконувалась у ФМІ НАН України в рамках науково-технічної проблеми "Неруйнівний контроль і технічна діагностика" НАН України за Розпорядженнями Президії НАН України на виконання урядових програм по темах НДР: 1) "Разработка электромагнитных методов неразрушающего контроля параметров дефектов, напряженного состояния, размеров изделий и качества сварных соединений ферромагнитных материалов, НИР «Вихрь-77»" (№ гос. регистр. 80022398); 2) "Разработка многопараметрового метода электромагнитного контроля изделий и сварных соединений" (№ гос. регистр. 01.85.0005536); 3) "Разработка методов и программных средств математического моделирования вихретоковых первичных преобразователей и электронных устройств систем электромагнитного контроля" (№ гос. регистрации 01.86.0043080); 4) "Розробка адаптивних методів автоматизованого електромагнітного контролю протяжних циліндричних об'єктів на основі математичного моделювання електромагнітних полів і електронних пристроїв" (№ держ. реєстр. 0194U009838/1); 5) "Розробка методики селективного вихрострумового контролю та створення високочутливих датчиків дефектоскопії" (№ держ. реєстр. 0194U009838); 6) "Дос-

лідження взаємодії електромагнітних та ультразвукових хвиль із макродефектами шаруватого матеріалу для створення нових методик та засобів багатопараметрового неруйнівного контролю" (№ держ. реєстр. 0197U013067); 7) "Розробка теорії та експериментальних засобів моделювання електромагнітного поля дефектів матеріалів і створення автоматизованої апаратури для його виявлення" (№ держ. реєстр. 0100U004864) і ряду інших тем НДР та ДКР. По темах НДР за номерами 1-5 автор був науковим керівником та безпосереднім виконавцем робіт, по темах 6, 7 – відповідальним виконавцем розділів робіт щодо розробки методів і засобів ВС контролю.

*Мета і задачі дослідження.* Мета роботи полягала в тому, щоб виробити єдиний підхід до вирішення науково-технічної проблеми багатопараметрового ВС контролю й вимірювань параметрів ОК і на його основі розробити методи побудови нелінійної моделі системи ВСПП-ОК при заданій похибці адекватності моделі і методи обробки за цими моделями багатовимірного відгуку ВСПП стосовно задач створення засобів селективної багатопараметрової ВС дефектоскопії заданих параметрів ОК і підвищення їх точності за умов одночасної зміни двох, трьох і більшого числа параметрів ОК, а також розробити і впровадити засоби селективної дефектоскопії для вирішення актуальних задач НК і ТД зварних швів і основного матеріалу оболонок великогабаритних конструкцій та окремих виробів.

*Об'єкт дослідження* – явище нелінійного та взаємозалежного впливу множини параметрів ОК, який являє собою кусково-однорідну шарувату структуру та структуру з поздовжніми дефектами типу тріщин і розшарувань, на формування відгуку ВСПП.

*Предмет дослідження* – методи і засоби аналізу та відбору первинної інформації в задачах ВС дефектоскопії, математичні моделі відгуку ВСПП при взаємодії зі структурами ОК, що містять дефекти типу тріщин, методи та засоби локальної та глобальної обробки багатовимірного відгуку ВСПП при селективному контролі та вимірюваннях.

*Методи дослідження.* Теоретичні розробки базуються на розв'язках прямих задач, щодо встановлення характеру взаємодії ВСПП із кусково-однорідними структурами, та методах розв'язку двовимірних задач дифракції електромагнітних хвиль на структурах з дефектами типу тріщин; обчислювальних методах розв'язку систем лінійних та нелінійних алгебраїчних рівнянь щодо побудови на основі розв'язків прямих задач чи даних експерименту нелінійних моделей багатопараметрової системи ВСПП-ОК і обробки багатовимірного відгуку ВСПП засобами селективної ВС дефектоскопії; методах відбору та обробки первинної інформації теорії електромагнітного контролю, математичного та фізичного моделювання в задачах підвищення точності вимірювань інформативних параметрів ВСПП і засобів селективного контролю.

Для досягнення вказаної мети були поставлені такі основні завдання:

1. Комплексне вирішення науково-технічної проблеми селективної ВС дефектоскопії на основі створення нелінійної багатопараметрової (НЛБ) моделі системи ВСПП-ОК, підвищення точності методів відбору і перетворення первинної інформації та розробки методів формування й обробки багатовимірних сигналів щодо побудови засобів селективної багатопараметрової дефектоскопії.

2. Узагальнення та розвиток моделі формування аномального поля (АП) в задачах дефектоскопії ОК із поздовжнім дефектом типу тріщини, розшарування та ін. й розробка продуктивної щодо обчислень розрахункової моделі для досліджень аномального поля поздовжніх дефектів у задачах виявлення дефектів та дефектометрії.

3. Узагальнення та розвиток моделі формування відгуку ВСПП, який взаємодіє з ОК, що вміщує дефект, і принципів відбору первинної інформації ВСПП дефектоскопії.

4. Розробка методів побудови НЛБ моделі відгуку системи ВСПП-ОК, при заданні похибки адекватності моделі, на основі використання результатів обчислень розв'язків відповідних до заданої структури ОК прямих задач чи/та експериментальними даними, які задано таблицею.

5. Розробка методів обробки багатовимірного відгуку ВСПП у задачах селективної дефектоскопії заданих параметрів ОК на основі побудови нелінійних моделей функції перетворення (ФП) системи ВСПП-ОК.

6. Розробка та удосконалення методів попередньої обробки відгуку ВСПП щодо задач підвищення точності засобів селективного ВС контролю та вимірювань.

7. Розвиток підходів щодо побудови нового покоління засобів селективного багатопараметрового ВС контролю й вимірювань; розробка приладів і систем селективної дефектоскопії зварних швів і основного матеріалу великогабаритних конструкцій, особливо-тонкостінних трубчатих заготовок, деталей та оболонок стосовно актуальних задач НК і ТД в авіації та машинобудуванні.

**Наукова новизна одержаних результатів.** На основі виконаних теоретичних і експериментальних досліджень вперше розроблено єдиний підхід до вирішення науково-технічної проблеми багатопараметрової ВС дефектоскопії та створення методів і засобів селективного ВС контролю й вимірювань заданих параметрів ОК із множини параметрів, котрі впливають на формування відгуку в системі ВСПП-ОК, шляхом обробки багатовимірного відгуку ВСПП за нелійними, високої розмірності моделями системи ВСПП-ОК, що побудовані як наближення функцій багатьох змінних розв'язків відповідних до даної системи прямих задач та експериментальних даних, заданих таблицею.

В рамках розробки цієї концепції одержано такі нові наукові результати.

1. Розроблено як базові методи побудови адитивного типу НЛБ моделей відгуку системи ВСПП-ОК двох класів, а саме: зі сталими та змінними коефіцієнтами і заданою малою похибкою адекватності моделі як *апроксимацію багатовимірними, а також й одновимірними поліномами* заданих таблицею результатів обчислень розв'язків відповідної прямої задачі та/чи експериментальних даних і застосуванням методів декомпозиції задачі побудови моделі.

2. Розроблено методи обробки багатовимірного відгуку системи ВСПП-ОК на основі побудови за єдиним підходом, що запропонований, із заданою похибкою адекватності моделі прямої функції перетворення підсистеми (ПФП) як множини НЛБ моделей інформативних параметрів чи/та моделі зворотної функції перетворення (ЗФП) системи, а також складеної моделі.

3. Запропоновано нову фізичну модель формування АП дефектів типу тріщин, до якої введено неоднорідну область зони пластично деформованого (ЗПД) металу в околі тріщин, а також два типи розрахункових моделей ОК з поздовжнім дефектом в  $E$  – поляризованому ЕМП. Дано загальний розв'язок задач для таких моделей, з яких запропоновано ефективну розрахункову модель формування АП підповерхневого поздовжнього дефекту довільної форми в перерізі як суперпозицію полів *елементарних циліндричних включень* з довільним значенням ПЕП, для поля якого у вільному півпросторі вперше у ВС дефектоскопії дано ефективний щодо продуктивності обчислень розв'язок у строгій постановці. На основі принципу взаємності результати щодо  $E$ -поляризованого первинного ЕМП для системи ВСПП-ОК узагальнено щодо іншої структури первинного ЕМП, зокрема, аксіального, що принципово розвиває підхід до постановки задач ВС дефектоскопії.

4. Розвинуто модель формування відгуку ВСПП, що взаємодіє зі структурами, які містять дефекти типу тріщин, та вироблено нові підходи до відбору первинної інформації ВСПП дефектоскопії на основі застосування *принципу взаємності* та енергетичного критерію і врахування встановлених особливостей утворення результуючого ЕМП; *розкрито механізм* формування у відгуку ВСПП "особливих" точок при імпульсному та багаточастотному збудженні ВСПП.

5. Розвинуто методи попередньої обробки інформації у засобах селективного ВС контролю та вимірювань на основі запропонованих *векторних, частотних та дискретних* перетворень сигналу ВСПП при врахуванні загальних особливостей методів ВС дефектоскопії, які забезпечують підвищення точності вимірювань інформативних параметрів відгуку ВСПП відповідно до вимог побудови високоточних засобів селективних ВС вимірювань.

6. Сформульовано особливості побудови засобів селективної ВС дефектоскопії та підвищення точності вимірювань на основі розробленої концепції рішення проблематики багатопараметрового контролю і розвитку двох класів багатовимірних систем, а саме: за методом *НЛБ моделей великої розмірності* та методом *нелінійної фільтрації*.

**Практичне значення одержаних результатів.** Розроблені методи побудови різного класу НЛБ моделей відгуку ВСПП та багатовимірної системи ВСПП-ОК забезпечують ефективне дослідження за єдиною методологією задач багатопараметрового аналізу та розробку методів і засобів селективної багатопараметрової дефектоскопії за умов одночасної зміни двох, трьох і більшого числа параметрів ОК.

– Реалізація засобів селективного ВС контролю й вимірювань заданих параметрів ОК на основі запропонованих методів дозволяє принципово зменшити похибки, обумовлені варіацією множини параметрів ОК. Так, похибка оцінки параметрів оболонки (трипараметрова задача) може бути зменшена до десятків долей відсотка. Запропонований підхід забезпечує *створення сучасного покоління приладів і систем* з новими можливостями та високими метрологічними характеристиками для вирішення актуальних задач НК і ТД.

– Розроблені методи побудови моделі функції перетворення системи ВСПП-ОК (прямої та зворотної) при заданій похибці адекватності моделі та застосування нової фізичної моделі формування АП дефектів типу тріщини забезпечують вирішення проблемних питань метрологічної атестації засобів ВС вимірювань і контролю параметрів ОК.

– Нова фізична модель формування АП дефекту типу тріщини та розрахункова модель АП поздовжнього дефекту довільної форми в перерезі як *суперпозиція елементарних циліндричних включень* з довільним значенням ПЕП дозволяє проводити моделювання в реальному часі задач дефектоскопії та дефектометрії, розкриває причини значної розбіжності результатів контролю дефектів типу тріщин на реальних ОК і перспективна для задач реконструкції структури ОК з дефектами в обернених задачах.

– Розроблено методи формування, відбору, локальної та глобальної обробки первинної інформації щодо задач селективного ВС контролю і вимірювань та ряд засобів (приладів і систем) загального й спеціального призначення для дефектоскопії та структуроскопії елементів відповідальних конструкцій та матеріалів. Розроблені засоби відрізняються високою чутливістю та селективністю. Це дозволило вперше методами ВС контролю розв'язати задачі виробничого автоматизованого (двовимірні скануючі системи) та ручного контролю щодо виявлення дефектів типу непровар, оксидних плівок і особливо контролю зони термічного впливу (ЗТВ) в околі зварних швів великогабаритних конструкцій на основі алюмінієвих сплавів, які виконано електропроменевим та електродуговим зварюванням; дефектоскопії основного матеріалу чи/та контролю дефектів зварки особливотонкостінних труб малого діаметру на основі нержавіючих сталей; контролю проміжку та корозії між шарами у нерозбірних вузлах, а також великогабаритних та ін. конструкціях. Створені засоби контролю впроваджено на підприємствах машинобудівного комплексу України (ДП "Південний машинобудівний завод ", ДП "Завод ім. Малишева") та Росії ( НПО "Энергия"), організаціях і підприємствах авіаційної промисловості та ін. Ряд матеріалів про впровадження (акти, протоколи) наведено в додатках А роботи. Розроблені засоби на замовлення підприємств випущено малими партіями Дослідним заводом та Дослідним виробництвом ФМІ НАНУ.

*Особистий внесок здобувача.* Нові наукові результати, що викладені в дисертації та авторефераті, належать особисто автору. В роботах, опублікованих у співавторстві, автором дисертації належать: [9–12] – спільна розробка постановки задачі, обчислювального експерименту та узагальнення результатів; [13–19, 29–33] – обґрунтування й розробка математичної моделі та методу її побудови, розробка плану обчислювального експерименту, аналіз і узагальнення результатів; [20–25, 27, 28, 34, 35, 39] – постановка задач, обґрунтування й розробка методів відбору вимірювальної інформації, висновки; [26, 40–44] – розробка методів формування та перетворення відгуку ВСПП і основних технічних рішень. Розробка приладів і систем, роботи по їх дослідно-промисловій перевірці та впровадженню виконано під науково-технічним керівництвом та за безпосередньою участю автора.



**Апробація результатів дисертації.** Основні наукові результати та положення роботи було представлено та обговорювалось на міжнародних, всесоюзних, республіканських, галузевих та регіональних науково-технічних конференціях і школах-семінарах, у тому числі: IX, X, XII Всесоюзній конференції "Неразрушающие физические методы и средства контроля" (м.Мінськ, 1981 р.; м.Львів, 1984 р.; м.Свердловськ, 1990 р.); X Міжнародній конференції "Nondestructive Testing" (м.Москва, 1984 р.); Республіканських семінарах "Автоматизація методів неруйнівного контролю" (м.Київ, Львів, 1980–95 р.р.); галузевих науково-технічних конференціях "Неразрушающий контроль в машиностроении" (м.Москва, 1981–89 р.р.); VI міжвузівській науково-технічній конференції країн СНД "Современные методы и средства электромагнитного контроля и их применение в промышленности" (Беларусь, м.Могильов, 1995р.); Другій Українській конференції з автоматичного керування "Автоматика-95" (м.Львів, 1995 р.); Міжнародному симпозиумі "Welding 96" – Welding in power industry, (Югославія, м.Белград, 1996 р.); I, II та III Українській науково-технічній конференції НКТД-94, НКТД-97 та НКТД-2000 "Неруйнівний контроль і технічна діагностика" (м.Дніпропетровськ, 1994,1997,2000 р.р.); Міжнародних семінарах-виставках "Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики" (м.Київ–Ялта, 1998,1999,2001р.р.); науково-технічних конференціях "Фізичні методи та засоби контролю матеріалів та виробів" (м.Київ–Львів, 1996–1999, 2001р.р.); Першій міжнародній науково-технічній конференції "Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях" (м.Київ–Славьско, 2001 р.).

**Публікації.** За темою дисертації опубліковано понад 150 робіт, у тому числі 50 авторських свідоцтв. Основні наукові результати і положення дисертаційної роботи викладено в 44 публікаціях, які наведено в авторефераті, в тому числі 33 статті в наукових журналах і збірниках наукових праць, 4 авторських свідоцтва, 1 патент та 6 публікацій у збірниках матеріалів і тез конференцій.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертаційна робота складається зі вступу, семи розділів, висновків, списку використаної літератури та додатків. Робота викладена на 372 сторінках і містить 238 сторінок основного тексту, рисунки – на 43 с., таблиці – на 26 с., додатки – на 32 с. та список літератури – 320 найменувань.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність теми дисертації, сформульовані мета та завдання роботи, що забезпечують розв'язання науково-технічної проблеми селективної багатопараметрової ВС дефектоскопії, наукова новизна, практична цінність та відображені основні результати роботи.

У першому розділі за літературними джерелами зроблений аналіз стану теорії та практики вихрострумових методів щодо проблематики селективного багатопараметрового контролю заданих параметрів ОК. Теорія та принципи селективного ВС кон-

тролю досліджуються в роботах В.Г. Герасимова, О.Л. Дорофєєва, В.Е. Дрейзіна, М.М. Зацепіна, В.В. Ключєва, І.П. Ковашевича, В.Ф. Мужичького, А.І. Нікітіна, В.Г. Пустиннікова, В.А. Сандовського, В.В. Сухорукова, В.П. Себка, В.С. Фастрицького, Ю.К. Федосєнка, В.С. Хандєцького, В.Г. Шатєрнікова, Ю.М. Шкарлєта, М.А. Яцуна, R. Baker, C.V. Dodd, F. Forster, H. Libby, H. Sabbagh, Udpa та ін.

Принциповим підходом щодо підвищення точності, універсалізації та розширення сфери використання методів і засобів ВС контролю є розробка засад багатопараметрового контролю, щоб забезпечити роздільне вимірювання множини параметрів ОК. Створення ефективних засобів селективного контролю ґрунтується на результатах досліджень у таких двох напрямках: 1) вивчення впливу вектора  $x = (x_1, \dots, x_n)^T$  параметрів ОК на інформативні параметри відгуку ВСПП на основі розв'язків відповідних прямих задач про взаємодію ЕМП зі структурою ОК і розробка загальних методів виділення інформації щодо заданого параметра  $x_k$  шляхом лінійних перетворень відгуку ВСПП при одночасній заміні одного, двох параметрів, що утворюють заваду; 2) розробка методів розв'язування обернених задач з урахуванням взаємозалежного та нелінійного впливу складових вектора  $x = (x_1, \dots, x_n)^T$  параметрів ОК на формування відгуку ВСПП.

Мета другого напрямку полягає безпосередньо у розв'язанні проблематики багатопараметрового контролю і становить суть сучасного етапу розробки теорії ВС контролю. Відповідно тенденція розвитку засобів селективного контролю полягає у створенні багаточастотних та багатозондових систем, що забезпечують збільшення інформації про вплив параметрів системи ВСПП-ОК, і розробці ефективних алгоритмів обробки багатовимірної відгуку ВСПП, складові якого є функціями множини параметрів системи ВСПП-ОК.

Для успішного рішення проблематики селективного багатопараметрового контролю необхідно розв'язання комплексу задач, які забезпечують, по-перше, побудову адекватної моделі багатовимірної сигналу конкретної системи ВСПП-ОК, що задається, і, по-друге, підвищення точності вимірювань складових багатовимірної відгуку ВСПП та глибини заглишення в них дії завадових параметрів. Притому важливою щодо реалізації засобів селективного контролю часто є умова забезпечення обробки сигналу в реальному часі.

Питанням багатопараметрового електромагнітного контролю присвячено ряд окремих робіт. Розв'язку задач багатопараметрового ВС контролю в основному і безпосередньо присвячені роботи Ю. К. Федосєнка. В них зворотна задача розв'язується на основі системи нелінійних рівнянь, що побудовані шляхом спрощення постановки та редукції розв'язків відповідних прямих задач. Притому похибка моделі системи виявляється значною, що не задовольняє вимогам створення високоточних засобів вимірювань. Безпосереднє використання розв'язків прямих задач при побудові розв'язків обернених задач застосовують і в інших методах НК (зокрема – надвисокочастотному). Проте реалізація таких алгоритмів вимагає значних затрат машинного часу. Особливо це стосується класу задач дефектоскопії, відомі розв'язки яких є достатньо громіздкими і потребують розробки оригінальних програмних засобів. Тому для структури ОК з дефектами залишається актуальною задача

розробки розрахункової математичної моделі, ефективної щодо продуктивності обчислень під час моделювання та достовірної щодо дослідження аномальних полів дефектів типу тріщин. Аналіз останнього свідчить про значну розбіжність результатів ВС контролю реальних тріщин на різних ОК з результатами обчислень АП за існуючою математичною моделлю в задачах ВС дефектоскопії, яка не враховує суттєву неоднорідність матеріалу в околі тріщини.

На основі аналізу стану проблеми визначено концепцію селективного багато-параметрового контролю та вимірювань, в основу якої покладається побудова НЛБ моделі відгуку ВСПП шляхом наближення функцій багатьох змінних, що подані розв'язками відповідних прямих задач на етапі моделювання та/чи даних фізичного експерименту на етапі розробки засобів контролю. Притому задається похибка адекватності моделі, яка в задачах вимірювань може бути достатньо малою.

У другому розділі на основі запропонованих моделей формування АП поздовжніх дефектів довільної форми в перерізі приведено розв'язки задач, що є базовими для реалізації розрахункових моделей щодо визначення АП дефектів. Запропоновано два типи моделей, а саме: 1) багат шарова кусково-однорідна циліндрична структура *довільної форми в перерізі* як модель ОК з поздовжнім дефектом в *E*-поляризованому первинному ЕМП, що узагальнює багат шарову модель ОК з круговими циліндрами, та 2) апроксимація АП поздовжнього дефекту довільної форми в перерізі суперпозицією полів елементарних циліндричних включень в області дефекту при *E*-поляризованому ЕМП.

Причому введено нову фізичну модель формування АП дефектів типу тріщин, яка адекватно відображає ті фактори, що визначають АП. Модель вводить у кусково-однорідну структуру ОК з дефектом типу тріщини *неоднорідну область* зони пластичних деформацій (ЗПД) в околі тріщини (включення), електрофізичні параметри якої (ПЕП, магнітна проникність) змінюються неперервно від основного матеріалу до деяких значень, властивих пластично деформованому матеріалу, а розміри залежать від властивостей матеріалу, схеми дії та характеру напруженого стану під час утворення тріщини.

Модель, що включає ЗПД, вводить нові значущі фактори, які впливають на формування АП та рівень відгуку ВСПП дефектоскопії, і вперше обґрунтовує *принципову неможливість тарировки за єдиним взірцем* ВС засобів в задачах дефектометрії, зокрема при вимірюванні глибини поверхневих тріщин на різних ОК. У багатьох випадках ЗПД вносить основний, а часом вирішальний внесок у формування АП, що далі використано в розробках.

В цілому модель з неоднорідною областю ЗПД металу ефективно може бути реалізована за суперпозицією елементарними циліндричними включеннями. Для цього в роботі у строгій постановці дано повний розв'язок задачі дифракції *E*-поляризованої плоскої хвилі на циліндричному включенні з довільним значенням ПЕП, розташованому в електропровідному півпросторі.

На рис. 1 відображено модель апроксимації АП дефекту типу тріщини суперпозицією полів елементарних циліндричних включень. Тут хвильові числа свобідного та електропро-

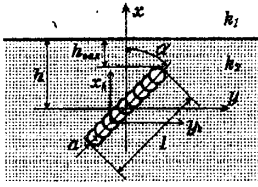


Рис.1 До апроксимації АП поздовжнього дефекту елементарними циліндричними вклученнями

відного півпростору –  $k_1 = 0, k_2 \neq 0$ , довжина тріщини –  $l$ , глибина її залягання –  $h$ , область ЗДП –  $\Omega$ ; локальні координати вклучення –  $(x_k, y_k)$ , хвильове число якого в області  $\Omega$  –  $k_3(x_k, y_k)$ . Векторний потенціал АП дефекту  $A_g$  є сумою векторних потенціалів елементарних вклучень  $A_e$  з ваговим коефіцієнтом  $\omega_k$ :

$$A_g(x, y, l, h, \alpha) = \sum_k \omega_k \cdot A_e(x_k, y_k; k_{3k}); \quad (x_k, y_k) \in \Omega. \quad (1)$$

Вектори напруженості АП визначають з рівнянь ЕМП за векторним потенціалом, який для віддуку  $E$ -поляризованого ЕМП введено формулою

$$H = (\sigma + i\omega\epsilon) \cdot \text{rot } A, \quad (2)$$

де  $\sigma, \epsilon$  – ПЕП і діелектрична проникність середовища.

Розв'язок для векторного потенціалу циліндричного вклучення радіуса  $a$  на глибині  $h$  в електропровідному півпросторі дано у строгій постановці на основі розв'язку задачі для тришарової структури ( $m = 3$ ), яка являє собою два кругові некоаксіальні циліндри. Розв'язок для електропровідного півпростору одержано прямуванням радіуса циліндра  $R_0$ , який вміщує вклучення радіуса  $a$ , до безмежності  $R_0 \rightarrow \infty$  (при  $h = \text{const}$ ). Розв'язок побудовано за методом розділення змінних. На поверхні електропровідного півпростору за умов, що струми провідності в електропровідному середовищі значно перевищують струми зміщення, векторний потенціал складової АП у відношенні до векторного потенціалу нормального поля має такий вид:

$$A'_{2a}(y; h) = (C_* - 1) - e^{-k_2 h} \cdot C_* \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \gamma_n \cdot p_n \cdot K_n(k_2 r) \cdot \cos n\varphi,$$

$$C_* = \left( 1 + e^{-k_2 h} \cdot \sum_k \gamma_k \cdot p_k \cdot K_k(k_2 h) \right)^{-1}; \quad \gamma_n = \begin{cases} 1; & n, k = 0; \\ 2; & n, k = 1, 2, 3, \dots \end{cases} \quad (3)$$

де  $K_n(\cdot)$  – модифікована функція Бесселя другого роду;  $(r, \varphi)$  – циліндричні координати поверхні півпростору.

Коефіцієнти  $p_n$  у формулі (3) характеризують вплив параметрів вклучення і для електропровідного вклучення, що важливо для моделювання області ЗДП, мають вид:

$$p_n = \frac{k_3 \cdot I_n(k_2 a) \cdot I'_n(k_3 a) - k_2 \cdot I'_n(k_2 a) \cdot I_n(k_3 a)}{k_3 \cdot K_n(k_2 a) \cdot I'_n(k_3 a) - k_2 \cdot K'_n(k_2 a) \cdot I_n(k_3 a)} \quad (4)$$

при  $k_2 = \sqrt{i\omega\sigma_2\mu_0}$ ,  $k_3 = \sqrt{i\omega\sigma_3\mu_0}$ ;  $\sigma_2 \neq 0$ ,  $\sigma_3 \neq 0$ .

Розв'язок для вільного простору за методом розділення змінних є неефективним. Тому його побудовано за іншим підходом, на основі формули Релея загального розв'язку хвильового рівняння. Притому при відомому розв'язку на поверхні електропровідного півпростору за формулою (3) розв'язок для векторного потенціалу АП включення у вільному півпросторі одержано у такому виді:

$$A'_{1a}(y, x; h) = \frac{1}{2\pi} \int F[A'_{2a}(y; h)] \cdot e^{i(x-h)\sqrt{k_1^2 - u}} \cdot e^{iuy} \cdot du, \quad (x > h), \quad (5)$$

де  $F[A'_{2a}(y; h)]$  – пряме перетворення Фур'є.

Змінні  $x, y$  характеризують розподіл ЕМП у площині  $xOy$  і мають розмірність довжини ( $L$ ). Відповідно змінна  $u$  характеризує просторову частоту. Підхід, що реалізований, принципово спростив розв'язок і приводить до аналізу АП за просторовими частотами.

Розв'язок для  $m$ -шарової моделі з границями довільної форми з врахуванням умов, що накладаються на вектори поля для напруженості  $E_{jz}$  ЕМП в кожному з середовищ, розшукується у виді:

$$E_{jz}(\rho, \varphi) = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} J_0 \left( k_j \sqrt{\rho^2 + \rho_0^2 - 2\rho\rho_0 \cdot \cos(\varphi - \xi)} \right) \cdot C_{j1}(\xi) \cdot d\xi + \frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} H_0^{(2)} \left( k_j \sqrt{\rho^2 + \rho_0^2 - 2\rho\rho_0 \cdot \cos(\varphi - \xi)} \right) \cdot C_{j2}(\xi) \cdot d\xi, \quad (6)$$

$$j = 1, \dots, m; \quad \text{при } j = 1, \quad C_{11}(\xi) = 0; \quad \text{при } j = m, \quad C_{m2}(\xi) = 0.$$

Розв'язок системи інтегральних рівнянь, які одержано із умов щодо векторів поля на границях  $a_j(\psi)$ ,  $j = 1, \dots, m$ , досліджено в наближеній постановці за двома методами побудови відповідної системи алгебраїчних рівнянь, а саме: квадратурними формулами та операторним методом. Останній розвинуто в роботах щодо задач електророзвідки. Показано, що наближені розв'язки можуть бути зведені до одного і того ж виду. Притому за операторним методом побудова розв'язку, а також система рівнянь суттєво спрощуються, що важливо для прикладних інженерних розрахунків. За операторним методом побудовано загальний розв'язок для трипараметрової структури ОК щодо АП дефекту типу тріщини або розшарування, які зображено сплюснутим еліптичним циліндром, та АП дефекту типу тріщини чи розрізу в тонкостінній трубі.

У третьому розділі досліджено АП циліндричного включення при  $\sigma_3 = 0$  і  $\sigma_3 \neq 0$  та АП дефектів типу довільно орієнтованої тріщини за розв'язками, що одержані у строгій постановці, та наближеними розв'язками, а також питання відбору первинної інформації з урахуванням принципу взаємності щодо лінійної системи ВСПП-ОК.

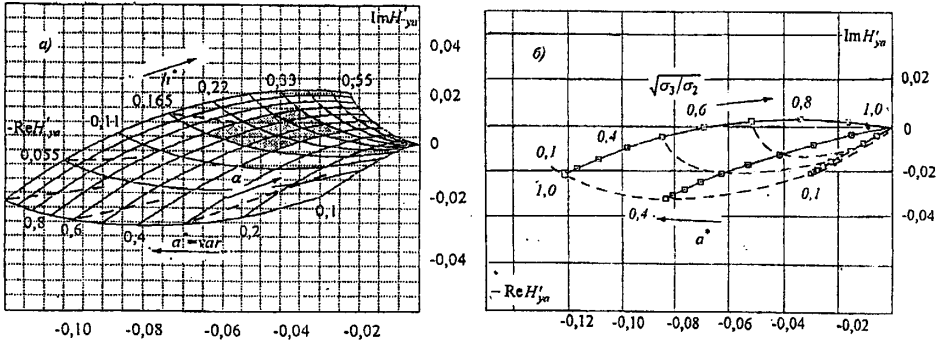


Рис.2 Годографи магнітної напруженості аномального поля циліндричного включення в епіцентрній точці на поверхні електропровідного півпростору від параметрів включення: а) залежність  $H_{ya}(a^*, h^*)$  при  $\sigma_3 = 0$ ; б) залежність  $H_{ya}(a^*, \sigma_3 / \sigma_2)$  при  $\sigma_3 > 0, h^* = a^*$

На рис. 2а подано залежності АП циліндричного включення в епіцентрній точці на поверхні півпростору, коли ПЕП  $\sigma_3 = 0$  (порожнина  $r = a$ ) –  $H'_{ya}(a^*, h^*, \alpha; \sigma_3 = 0)$ , а на рис. 2б залежності АП приповерхневого електропровідного включення  $H'_{ya}(a^*, \sigma_3 / \sigma_2; h = a)$ . Останнє моделює неоднорідну область ЗПД металу в околі тріщини еквівалентним циліндричним включенням із  $\sigma_3 = const$ . Пунктиром на рис. 2а зображено напрямок впливу зазора  $\alpha = \text{var}$  відповідно до формули (5). Значення параметрів подано на рисунках. Зміну ПЕП включення записано як відношення  $\beta_3 / \beta_2 = \sqrt{\sigma_3 / \sigma_2}$ . Очевидно, що при  $\sigma_3 = \sigma_2$  АП відсутнє ( $H'_{ya} = 0$ ). Звичайно зміни ПЕП в області ЗПД становлять до 50% ( $\sqrt{\sigma_3 / \sigma_2} = 0,7$ ). Зауважимо, що магнітна проникність в ЗПД феромагнітних металів може змінюватись у кілька разів. Так як розміри ЗПД на 2 ... 3 порядки перевищують розкриття тріщини, з аналізу наведених залежностей випливає, що ЗПД в околі тріщини може формувати основну складову АП. Притому, як відмічалось, неможливо калібрувати засоби ВС дефектометрії (приміром, глибини поверхневої тріщини) за єдиним для всіх випадків взірцем. Проте також очевидно, що для заданих умов утворення тріщини (матеріал, схема навантаження та ін.) може бути прийнятий взірець з еквівалентною шириною розрізу, який імітує тріщину, або введено відповідну поправку за результатами експериментальних досліджень. Таким чином, є перспективним дослідження з питань зародження тріщин в механіці руйнування методами та засобами ВС дефектометрії.

Апроксимація АП циліндричного включення полем елементарних включень ( $\sigma_3 = 0$ ) за формулою (1) показує, що похибка наближення при  $a^* < 0,4$  для приповерхневого включення ( $h = a$ ) не перевищує 7%, а для підповерхневого включення при  $\gamma = h/a > 2$  не перевищує 1%. У той же час похибка наближеного розв'язку методом інтегральних рівнянь для АП циліндричного включення становить до 20...30%. За розв'язком методом інтегральних рівнянь у строгій постановці досліджено окремі просторові залежності АП тонкого включення типу криволінійної тріщини від глибини залягання, кривизни  $\varepsilon$  та кута нахилу тріщини  $\varphi$  до поверхні. Такі ж залежності досліджено за моделлю суперпозиції. Досліджено також вплив відшарування та адгезії покриття. Всі ці дослідження показують на можливість побудови за вибором режимів контролю взаємооднозначної залежності просторових та/чи локальних складових вектора інформаційних параметрів АП від вектора параметрів тріщини  $x = (l, h, \varepsilon, \varphi, a)^T$ , що необхідно для розв'язку оберненої задачі оцінки параметрів дефекту. Притому щодо розглянутих розв'язків принциповими є зазначені вище висновки, що враховують суттєвий вплив ЗПД металу на формування АП.

В результаті порівняння досліджених розв'язків за ефективністю (продуктивність обчислень, складність програмних засобів) для задач моделювання запропоновано модель апроксимації АП довільного за формою дефекту суперпозицією полів елементарних циліндричних включень.

За постановкою задач, що розглянуті ( $E_z$ -поляризація), АП утворюється струмами, які протікають уздовж границі дефекту. Проте на основі принципу взаємності, що є справедливим для системи ВСПП-ОК як лінійної системи, одержані результати поширюються щодо іншої структури первинного ЕМП цієї ж системи. Останнє реалізується шляхом переміни функцій джерела, що утворює первинне ЕМП  $E_n$ , та вимірювача  $E_e$  і описується відомим загальним співвідношенням між струмами та полями

$$\int_{V_n} (j_n E_e) dV = \int_{V_e} (j_e E_n) dV. \quad (7)$$

Притому для будь-якої складної структури обмоток ВСПП внесений взаємний опір відносно "входу-виходу" системи ВСПП-ОК відповідно до принципу взаємності є однаковим  $z_{en} = z_{ne}$ . Відповідно, однаковою є й просторова структура відгуку ВСПП при скануванні над ОК з дефектом, зокрема, за основним співвідношенням *сигнал/завада*, що також наведено за експериментальними діаграмами відгуків ВСПП, які формують різної поляризації первинне ЕМП. Розглянуто конкретну структуру ВСПП, який збуджує в області дефекту  $E$ -поляризоване поле деякою видовженою системою обмоток, а вимірювання здійснюється круговою обмоткою малих розмірів (індуктивний зонд). При зворотному збудженні обмотка-зонд формує аксіальне поле з круговою  $E_\varphi$ -поляризацією. Останнє призводить формально до постановки тривимірної задачі для ОК з поздовжнім дефектом. Проте в межах системи ВСПП-ОК просторова структура відгуку залишається однаковою для обох типів поляризації первинного ЕМП ( $E_z$  та  $E_\varphi$ ).

Таким чином, з врахуванням принципу взаємності можна більш ефективно розв'язувати прямі задачі для заданої системи ВСПП-ОК, а також суттєво змінюються модельні уявлення щодо формування та відбору первинної інформації при розробці структур ВСПП в задачах ВС контролю та вимірювань. З цієї точки зору, а також з урахуванням енергетичного критерію щодо побудови широкодіапазонних (за частотою первинного ЕМП) вимірювальних зондів з малою кількістю витків розглянуто особливості побудови нових структур ВСПП для задач багатопараметрового контролю та вимірювань. Зокрема, запропоновано нові підходи до побудови ВСПП для вимірювань анізотропії ПЕП та параметричних ВСПП з диференційними трансформаторами струму, що спрощують задачі конструктивної та технологічної реалізації ВСПП.

У четвертому розділі дано результати розробки методів побудови НЛБ моделі відгуку ВСПП, який взаємодіє з ОК заданої структури. Як визначено вище, проблема побудови НЛБ моделі системи ВСПП-ОК є центральною щодо подальшого розв'язання задач селективного ВС контролю та підвищення точності контролю в цілому. НЛБ модель повинна відтворювати специфічні властивості системи ВСПП-ОК, якими є нелінійний та взаємозалежний вплив множини параметрів системи на формування відгуку ВСПП.

Враховуючи широкі можливості використання чи отримання відповідних розв'язків прямих задач в теорії методів ВС контролю задачу побудови НЛБ моделі відгуку системи ВСПП-ОК поставлено як задачу наближення функції багатьох змінних. Притому розрізняються два етапи розробки методів і засобів селективного контролю, а саме: 1) математичне моделювання з використанням розв'язків прямих задач, що ставить за мету попереднє дослідження та розробку НЛБ моделі системи ВСПП-ОК, методів відбору і обробки інформації; 2) розробка методів та засобів формування багатовимірної відгуку ВСПП і побудова НЛБ моделі функції перетворення системи ВСПП-ОК із заданою похибкою адекватності із залученням даних фізичного чи/та натурального експерименту.

Етапи відрізняються, по-перше, тим, як у кожному випадку може бути вирішено проблему ефективності НЛБ моделі відгуку, і, по-друге, якщо при використанні розв'язків прямих задач ми не обмежені можливостями варіації множини параметрів ОК, то при постановці експерименту задача створення комплектів зрізів ОК із заданою комбінацією значень параметрів ОК може бути проблематичною. За похибку адекватності НЛБ моделі відгуку ВСПП, що побудована за даними розв'язків прямих задач, природно прийнято похибку наближення. Так як сама математична модель є неточною, то остаточно модель НЛБ відгуку системи ВСПП-ОК будується за експериментальними даними, а її похибка адекватності задається, виходячи із наперед заданої похибки оцінки параметрів ОК.

Для побудови НЛБ моделі відгуку системи ВСПП-ОК прийнято найбільш загальний підхід – наближення функцій багатьох змінних багатовимірними алгебраїчними поліномами. Визначено загальну структуру параметрів, що описують систему селективного ВС контролю й вимірювань, в якій виділено вектор невідомих параметрів ОК  $x = (x_1, \dots, x_n)^T$  у просторі  $R^n$  і вектор інформаційних параметрів  $y = (y_1, \dots, y_m)^T$ ,  $m \geq n$  у просторі  $R^m$ ,



елементами якого є нормовані дійсні значення інформаційних параметрів відгуку системи ВСПП-ОК. До складу системи вводиться багатовимірний НЛБ модель ФП системи ВСПП-ОК із заданою похибкою адекватності, складові якої є елементами з множини НЛБ моделей відгуку ВСПП. Розв'язок оберненої задачі  $x_\delta = A^{-1} \cdot y_\delta$  в системі здійснюється за методами, які подано в розділі 5. Для будь-якої складової вектора інформаційних параметрів її НЛБ модель зображено у виді

$$y^* = y^*(x; Q) = Q^T \cdot g(x_1, \dots, x_n), \quad (8)$$

де  $Q = (b_0, b_1, b_2, \dots, b_k)^T$  – вектор невідомих коефіцієнтів моделі;  $g(x_1, \dots, x_n) = (g_1(x_1, \dots, x_n), \dots, g_k(x_1, \dots, x_n))^T$  – вектор відомих функцій параметрів.

Складові  $g_i(x)$ ,  $i = 1, \dots, k$  вектора  $g(x_1, \dots, x_k)$  задаються відповідно до складових багатовимірного полінома, і, таким чином, включають складові вектора параметрів ОК різного степеня та їх змішані добутки взаємного впливу  $(x_1, x_1^2, x_1^3, \dots, x_n, x_n^2, x_n^3, \dots, x_1 \cdot x_2, \dots, x_1 \cdot x_n, \dots, x_1 \cdot x_2 \cdot x_3, \dots)$ . Притому число членів моделі для повного полінома степеня  $k$  дорівнює  $C_n^{n+k} = (n+k)!/n!k!$  і може становити від десятків до ста і більше, коли кількість параметрів зростає до 4, 5.

Вектор невідомих коефіцієнтів  $Q$  визначається за відомими підходами шляхом апроксимації по  $M$  точках в області зміни вектора параметрів ОК із системи алгебраїчних рівнянь, лінійної щодо цих коефіцієнтів

$$y^* = X \cdot Q, \quad y^* = (y_1, \dots, y_m)^T, \quad (9)$$

де  $X$  – матриця незалежних змінних – параметрів НЛБ моделі.

Міру похибки НЛБ моделі визначено за середнім квадратичним критерієм:

$$\rho(y, y^*) = \left\{ \sum_{i=1}^M (y_i - y_i^*)^2 \right\}^{1/2}, \quad i = 1, \dots, M, \quad (10)$$

де  $y_i$  – значення інформаційного параметра в  $M$  точках області моделювання за даними обчислень чи фізичного експерименту;  $y_i^*$  – відповідне значення інформаційного параметра за НЛБ моделлю.

Вектор  $Q$  невідомих коефіцієнтів визначається із системи нормальних рівнянь

$$Q = (X^T \cdot X)^{-1} \cdot X^T \cdot y = M^{-1} \cdot X^T \cdot y \quad (11)$$

Зауважимо, що відповідно до розмірності матриці  $(X^T \cdot X)$ , або ж вектора  $Q$  позначено розмірність НЛБ моделі  $N = k$ . Для зменшення похибки адекватності збільшується розмірність моделі. Однак зі збільшенням степеня чи/та кількості параметрів ОК погіршується обумовленість матриці  $(X^T \cdot X)$ , і задача обчислень при побудові НЛБ моделі ускладнюється. В роботі запропоновано два методи, які для побудови загальної НЛБ

моделі оперують моделями меншої розмірності. Це метод декомпозиції загальної моделі та метод побудови НЛБ моделі відгуку ВСПП із залежними від параметра коефіцієнтами.

За методом декомпозиції задачу побудови НЛБ моделі відгуку ВСПП розбито на дві часткові задачі, а саме: 1) задачу побудови нелінійних однопараметрових моделей відгуку ВСПП  $y^*(x_{0j})$ ,  $x_{j0} = (x_j - x_{nj})$ ,  $j = 1, \dots, n$ , де  $x_{nj}$  – основний чи номінальний рівень параметра  $x_j = \text{var}$ , при сталих значеннях усіх інших параметрів, що дорівнюють заданому номінальному значенню  $x_k = x_{nk} = \text{const}$ ,  $k \neq j$ ,  $k = 1, \dots, n$  та 2) задачу побудови НЛБ моделі щодо складових відгуку, обумовлених взаємним впливом параметрів ОК.

Однопараметрові НЛБ моделі  $y^*(x_{0j})$  відгуку ВСПП будують за відомими методами наближення функцій однієї змінної і їх можна виділити як відомі. Притому вихідні рівняння для визначення невідомих коефіцієнтів записано аналогічно до формули (11)

$$\underline{y}^* = \underline{X} \underline{Q}, \quad (12)$$

де індекс (:) означає складові, з урахуванням "відомих" однопараметрових моделей.

Декомпозиція задачі побудови НЛБ моделі відгуку ВСПП дозволяє залучити апарат наближення функцій однієї змінної та, зокрема, подати однопараметрові складові НЛБ моделі  $y^*(x_{0j})$ , окрім одновимірного полінома, іншим класом функцій. В цілому такий підхід дозволяє залучати до багатовимірного аналізу відомі результати одновимірного аналізу.

Метод побудови НЛБ моделі відгуку ВСПП із залежними від параметра коефіцієнтами, що запропонований, дозволяє на основі множини моделей  $\{y^*(x_1, \dots, x_{n-1}; Q)\}$  для  $(n-1)$ -вимірного вектора параметрів  $x = (x_1, \dots, x_{n-1})^T$  при  $x_{nk} = \text{const}$ ,  $k = 1, \dots, S_n$  ( $S_n$  – кількість рівнів параметра  $x_n$ ) побудувати модель  $y^*(x_1, \dots, x_{n-1}; A(x_n))$  для  $n$ -вимірного вектора параметрів ОК. Притому задача побудови моделі для  $n$ -вимірного вектора ОК  $x = (x_1, \dots, x_n)^T$  зводиться до задачі побудови функціональних залежностей коефіцієнтів  $a_i(x_n)$ ,  $i = 0, 1, \dots, N_{n-1}$  за множиною пар значень  $\{a_{ink}, x_{nk}\}$ ,  $k = 0, 1, \dots, S_n$  і відповідно побудови вектора  $A(x_n)$  коефіцієнтів НЛБ моделі:

$$y^*(x_1, \dots, x_{n-1}; A(x_n)) = \sum_{i=0}^{N_{n-1}} a_i(x_n) \cdot g_i(x_1, \dots, x_{n-1}) \quad (13)$$

Модель відгуку ВСПП зі змінними коефіцієнтами трансформується до моделі зі сталими коефіцієнтами і навпаки. Побудова НЛБ моделі зі змінними коефіцієнтами може бути ефективною при збільшенні розмірності вектора параметрів ОК. Навіть для трипараметрової задачі ВС контролю з підвищенням вимог до точності моделі число членів моделі зростає до 30–60.

Методику побудови НЛБ моделей розглянуто з використанням відомих розв'язків прямої задачі контролю плоскошарових структур, а саме: 1) оболонки з вектором

параметрів ОК  $x_{об} = (T, \alpha, \beta)^T$ , де  $T = t/R$  – відносна товщина оболонки,  $\alpha = h/R$  – відносне значення зазора,  $\beta = R(\omega \sigma \mu_0)^{1/2}$  та 2) товщини покриття  $T_{\Pi} = t_{\Pi} / R$  при одночасній зміні зазора  $\alpha$  та ПЕП основи  $\sigma_2$ , відповідно  $x_{\Pi} = (T_{\Pi}, \alpha, \beta_2)^T$ . Показано, що похибка адекватності НЛБ моделі може не перевищувати десятих долей відсотка і менше.

У п'ятому розділі запропоновано моделі функції перетворення (ФП) системи ВСПП-ОК двох класів, а саме:

– модель ПФП системи у базисі параметрів ОК, яку зображено системою нелінійних рівнянь  $y_{\nu} = y_{\nu}^*(x; Q)$ ,  $\nu = 1, \dots, n$ ;

– модель ЗФП системи у базисі інформаційних параметрів відгуку ВСПП, що безпосередньо ставить у відповідність заданому параметру ОК його функцію від інформаційних параметрів відгуку ВСПП  $x_i = w_i^T \cdot g(y)$ ,  $i = 1, \dots, n$ ;

• а також введено складену модель ФП системи на основі загальної моделі системи зі змінними коефіцієнтами та композицією часткових моделей ПФП чи/та ЗФП системи.

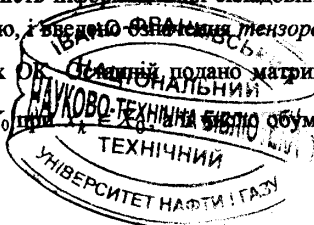
Складена модель системи ВСПП-ОК в цілому (включаючи кусково-однорідні структури ОК) може бути записана у такому загальному виді:

$$\hat{f}(v) = \begin{cases} i^*(\bar{v}) = w_i^T \cdot g(\bar{v}), & \bar{v} = (v_1, \dots, v_k)^T, \quad i = 1, \dots, k; \\ j^*(v) = w_j^T(\bar{v}) \cdot g(v'), & v' = (v_{k+1}, \dots, v_n)^T, \quad j = (k+1), \dots, n; \\ v = (v_1, \dots, v_k, \dots, v_n)^T. \end{cases} \quad (14)$$

Моделі побудовано за єдиним підходом, як наближення функції багатьох змінних, методами, що запропоновані. Модель ФП системи із заданою похибкою адекватності приймається за номінальну модель ФП системи, і на її основі реалізується подальша обробка відгуку ВСПП.

Задачі селективного ВС контролю за постановкою відповідають умовам коректності за Тихоновим А.М., так що за їх наближений розв'язок приймається вектор параметрів ОК  $x_{\delta} = A^{-1} \cdot y_{\delta}$ . При цьому зі зменшенням похибки вхідних даних  $\rho(y_{\delta}, y) < \delta \rightarrow 0$  вектор  $x_{\delta}$  прямує до точного значення  $x_{\delta} \rightarrow x_T$ . Таким чином, щоб одержати задану похибку оцінки вектора параметрів ОК, ставляться умови забезпечення відповідно меншої похибки адекватності моделі ПФП системи, що приймається за номінальну, та узгодження похибки вимірювань вектора  $y = (y_1, \dots, y_n)^T$  інформаційних параметрів відгуку ВСПП (вхідні дані).

Показано, що узагальненою умовою розділення впливу параметрів ОК у відгуку ВСПП є лінійна незалежність інформаційних складових відгуку за чутливістю по параметрах ОК в області контролю, і введено визначення тензора другого рангу чутливості системи ВСПП-ОК по параметрах ОК. Ставлять подано матрицею  $\|\partial y_i / \partial x_j\|_{x_k}$ ,  $i, j = 1, \dots, n$  для ПФП системи в області  $X_0$  при  $x_k \in X_0$  обмеженості в  $X_0$  може бути критерієм



ефективності моделі ПФП. Для забезпечення наперед заданого рівня зміни чутливості системи по параметрах ОК запропоновано нелінійну трансформацію ФП системи шляхом зміни еквівалентного радіуса ВСПП при  $\beta = const$ .

Досліджено похибку адекватності моделі ПФП і ЗФП системи ВСПП-ОК в залежності від розмірності моделі та області моделювання, а також похибку оцінки вектора параметрів ОК в результаті обробки за цими моделями відгуку ВСПП. Як тестові прийнято розв'язки двох прямих задач, одержаних у строгій постановці, а саме: 1) аномальне поле кругового циліндричного включення в електропровідному півпросторі в  $E$ -поляризованому первинному полі та 2) поле кругового витка зі струмом над плоскошаруватою структурою. Встановлено, що приведена похибка адекватності моделей зменшується від 10 + 15% для лінійної моделі до сотих часток відсотка для моделей ФП системи, що зображені повним кубом, і зменшенням області моделювання. В цілому задана похибка адекватності моделі ПФП передбачає ~~за~~ комплексний підхід, який включає декомпозицію вихідної задачі побудови моделі, локалізацію моделі та адаптацію щодо її розмірності, адаптацію по окремих параметрах (зокрема, узагальненому параметру  $\beta$ ), використання моделей ФП різного класу в складеній моделі ФП системи ВСПП-ОК. Притому включення до моделі ПФП системи членів зі складовими вектора параметрів ОК до третього степеня суттєво впливає на точність моделі. Фізично це означає, що в моделі враховується зміна чутливості по параметрах ОК в області означення моделі. Слід відзначити, що порівняння моделей ФП адитивного та мультиплікативного (експоненціальна) типу не виявило суттєвих переваг останнього за похибкою адекватності. Реалізація комплексного підходу обумовлює багато-вид структур моделей ФП системи і відповідно алгоритмів обробки відгуку ВСПП.

Досліджено похибку оцінки вектора параметрів ОК для таких задач: 1) вимірювання радіуса циліндричного включення та глибини його залягання в задачі дефектометрії; 2) вимірювання питомої електричної провідності та зазора (або діелектричного покриття); 3) вимірювання параметрів оболонки (трипараметрова задача). Функції впливу по параметрах ОК в цих задачах характеризуються подібними закономірностями, а одержані результати доповнюють загальні висновки. Встановлено, що похибка оцінки вектора параметрів ОК  $x = (a^*, h^*)^T$ ,  $x = (\beta, \alpha)^T$ ,  $x = (\beta, \alpha, T)^T$ , які досліджувались, відповідає похибці вхідних даних і може бути зменшена до десятків часток відсотка, а сам розв'язок є стійким до малих змін вхідних даних.

Таким чином, задана похибка оцінки вектора параметрів ОК в результаті обробки відгуку ВСПП за моделлю ФП системи забезпечується за умов, що сформульовані вище, а саме: 1) модель ФП системи ВСПП-ОК, яку прийнято за номінальну, має відповідно меншу похибку адекватності; 2) похибка вхідних даних, вектора інформаційних параметрів відгуку ВСПП, сумірна з похибкою оцінки вектора параметрів ОК.

У шостому розділі викладено результати розробки методів формування інформаційних параметрів на основі векторних перетворень первинного сигналу при

одночастотному, багаточастотному та імпульсному збудженні ВСПП. Методи забезпечують підвищення чутливості фазових вимірювачів параметрів ОК, підвищення точності та швидкодії компонентних вимірювачів, а також формування багатовимірного відгуку при імпульсному та багаточастотному збудженні ВСПП з дискретним відбором первинної інформації за миттєвим значенням  $u(t_k)$  відгуку ВСПП. Притому в останньому вперше розкривається механізм формування "особливих" точок імпульсного відгуку ВСПП. Розробку методів спрямовано на підвищення точності вимірювань складових багатовимірного вектора інформаційних параметрів відповідно до вимог забезпечення заданої похибки системи селективних вимірювань.

Дано узагальнення фазового методу ВС контолко та запропоновано спосіб підвищення його чутливості в 5 ... 10 разів при вимірюванні таких параметрів, як ПЕП, товщина оболонки, товщина покриття при одночасному заглишенні впливу зазора. Для глибокого заглишення впливу зазора введено лінеаризацію функції впливу зазора шляхом параметричної оптимізації ВСПП. Змінно-частотний варіант цього методу та варіант контролю на фіксованих робочих частотах дозволяє апаратурними засобами ефективно реалізовувати можливості декомпозиції задачі багатопараметрового ВС контролю на основі виділення часткової задачі вимірювань ПЕП чи/та зазора.

Для підвищення точності вимірювань квадратурних складових (КС) амплітудно-фазомодульованого відгуку ВСПП при багаточастотному контролі та модуляційній ВС дефектоскопії запропоновано їх зображення через амплітуди векторних сумо-різницевих перетворень вимірюваного та опорного сигналів. Запропоновано ряд нових перетворень КС вимірюваного сигналу за точними формулами та з корекцією похибки, реалізація яких орієнтована на обчислювальні засоби. Їх застосування забезпечує обробку сигналу в реальному часі щодо засобів дефектометрії, а також є більш ефективним у високочастотних та багаточастотних засобах формування інформативних складових відгуку ВСПП.

На основі аналізу відгуку ВСПП при двочастотному та багаточастотному збудженні розкрито механізм формування особливих точок щодо дискретного відбору первинної інформації за миттєвими значеннями. Показано, що в моменти часу, котрі визначаються різницею фаз і співвідношенням рівнів складових впливу для деякого параметра ОК на частотах спектра, формується множина, так званих, "вузлових" точок, в яких відбувається заглишення, чи часткова компенсація впливу по окремих параметрах. Притому, що будь-які з особливих точок можна сформувати у заданий момент часу шляхом зміни різниці початкових фаз та співвідношення амплітуд частотних складових первинного багаточастотного чи імпульсного поля. Проте глибина компенсації впливу параметрів у "вузлових" точках принципово обмежена через нелінійність функцій впливу параметрів та числом складових частотного спектра первинного поля. Це обумовлює розмитість "вузлової" точки при імпульсному збудженні, яке спостерігається й експериментально, та обмеження щодо точності засобів імпульсного ВС контролю як лінійних систем. Підвищення точності засобів ВС вимірювань ставить задачі обробки результатів

вимірювань інформаційних параметрів відгуку ВСПП за миттєвими значеннями з врахуванням нелінійного та взаємозалежного впливу параметрів ОК.

Так як миттєве значення відгуку ВСПП формується за частотами спектра та в різні моменти часу утворює різні співвідношення щодо вкладу окремих параметрів ОК, методу відбору інформації за миттєвими значеннями властиві достатньо широкі інформаційні можливості. Вектор інформаційних параметрів може бути сформований за множиною дискретних виборок  $\{u(t_k)\}$  протягом періоду нижньої частоти чи періоду імпульсів збудження.

Таким чином, врахування єдиного механізму формування відгуку ВСПП при імпульсному та багаточастотному збудженні дозволяє обґрунтувати підходи до вибору способу збудження первинного ЕМП та відбору первинної інформації в частотній чи часовій області при розробці засобів контролю, керуючись критеріями конкретної задачі.

В сьомому розділі сформульовано основні положення побудови засобів селективних ВС вимірювань і контролю на основі розробленого в роботі підходу, а також викладено основні результати розвитку методів та ВСПП щодо задачі відбору та попередньої обробки відгуку в багаточастотних системах; розробки та впровадження приладів і систем селективної ВС дефектоскопії для контролю зварних швів та багатошарових структур великогабаритних конструкцій, окремих деталей і виробів.

Визначено два класи методів обробки багатовимірною відгуку ВСПП, а саме: 1) за методом моделей, що виконується за моделлю ПФП і 2) за методом нелінійної фільтрації, що виконується за моделлю ЗФП системи ВСПП-ОК. Для побудови ФП, що приймається як номінальна ФП системи ВСПП-ОК, обов'язковим є виконання умови взаємної однозначності відображення вектора параметрів ОК  $x \in X_0 \subset R^n$  ( $X_0$  – компакт) та вектора інформаційних параметрів  $y \in Y_0 \subset R^m$ ,  $m = n$  і умова відповідності точності вхідних даних  $\rho(y_\delta, y)$  результатів вимірювань вектора інформаційних параметрів заданій точності оцінки  $\rho(x_\delta, x) \leq \delta$  вектора параметрів ОК.

Запропоновано методи, що підвищують точність попереднього перетворення відгуку ВСПП: метод подвійного перетворення частоти зі стабільною проміжною частотою; метод одноканального перетворення двочастотного відгуку; метод цифрового формування заданої міри різниці фаз за умов дев'яти частоти при змінно-частотних вимірюваннях ПЕП. На основі останнього розроблено ряд нових технічних рішень щодо побудови ВС вимірювачів ПЕП вперше виключно за цифровою обробкою, які забезпечують підвищення точності вимірювань та швидкодії.

Для формування багатовимірною відгуку при збудженні на одній робочій частоті запропоновано нові методи формування інформативних складових в результатуючому ЕМП та нові структури ВСПП, які базуються на врахуванні енергетичного критерію та принципу взаємності. До структур ВСПП запропоновано введення зовнішньої обмотки (ЗО), що охоплює осердя і однозначно діє як екран, нормальне поле на виході якої може бути зведено до "нуля" за рахунок орієнтації та симетричного виконання обмоток. Зокрема, на ВСПП з

броньовим осердям розміщено ЗО. Особливістю такого ВСПП є те, що зі збільшенням параметра  $\beta$  е.р.с. на ЗО прямує до нуля. Запропоновано нові структури ВСПП параметричного типу з підключенням через диференційні трансформатори струму. Зазначені ВСПП формують лінійно-незалежні складові відгуку на різних обмотках для задач комплексних вимірювань.

Для формування множини інформативних параметрів в одночастотному ЕМП введено підмагнічування феромагнітної структури ОК постійним полем різного рівня так що:

$$u_{\text{ВСПП}}(x; H_k) = (y(x, H_1), \dots, y(x, H_k))^T, \\ H_k = H_{k0} \pm \delta, \quad H_{k0} = \text{const}, \quad k = 1, 2, \dots; \quad \delta < \varepsilon. \quad (15)$$

Для формування селективного відгуку ВСПП в полі дефектів типу тріщин, що утворюються в ОК на основі нержавіючих сталей з нестабільним аустенітом, запропоновано спеціальний режим збудження ВСПП. При цьому в АП з'являються складові вищих гармонік за рахунок утворення феромагнітної фази в околі дефекту  $D \rightarrow \alpha Fe$ . Таким чином, при наявності дефектів типу тріщин формується відгук на вищих гармоніках, що є взаємодозначним

$$\forall D(D \rightarrow \alpha Fe) \exists ! u(n\omega) (\omega_{\text{opt}}, H_{\text{opt}}). \quad (16)$$

Метод реалізовано для дефектоскопії тонкостінних трубчатих деталей. Він яскраво свідчить про роль ЗПД в формуванні АП тріщини, що в даному випадку є визначальною.

На основі створених засобів (ВСПП, методи глобальної обробки та ін.) вирішено задачі селективних вимірювань глибини поверхневих тріщин при одночасній зміні зазора та неоднорідності матеріалу і вимірювань параметрів оболонок з похибками до десятих долей відсотка. Для вимірювань за умов невизначеності ПЕП матеріалу оболонки, що практично має місце через відсутність необхідних за точністю засобів атестації взірців за ПЕП, запропоновано модель на основі ЗФП, що не залежить від зміни ПЕП в діапазоні, визначеному технічними умовами:

$$T^*(\text{Re}, \text{Im}; h^+, \omega_1) = \left\{ \begin{array}{l} a_i^T(h^+) \cdot g_1(\text{Re}, \text{Im}; \omega_1); \\ h^* (\text{Re}, \text{Im}; \omega_2) = b_j^T \cdot g_2(\text{Re}, \text{Im}; \omega_2) \end{array} \right\}^* \quad (17)$$

де  $h^+$  – "відоме" значення зазора, визначене при частоті  $\omega_2 \gg \omega_1$ .

Експериментальні результати селективних вимірювань підтверджують результати та висновки теоретичних досліджень щодо умов їх реалізації.

Розроблено комплекс засобів (прилади та автоматизовані системи з двовимірним відображенням структури АП) селективної ВС дефектоскопії та вимірювань спрямованих на вирішення актуальних задач НК відповідальних виробів машинобудування та авіації. Створені засоби відрізняються високою селективністю та роздільною здатністю і впроваджені для задач НК і ТД, які вирішено вперше, а саме: виявлення непровару в корені швів, виконаних електронно-променевим зварюванням (автомат. системи ВИХРЬ-ФТ, ВИХРЬ-АС); контроль малих змін ПЕП в зоні термічного впливу (прилад ЗОНА, сист. ВИХРЬ-ФТ,

ВИХРЬ-АС); виявлення оксидних плівок, пор в швах, виконаних електродуговим зварюванням (прилади типу ПОЛЁТ, ДУЭТ); контроль дефектів зварювання тонкостінних трубних заготовок малого діаметру (прилад ВД-ОСТТ); контроль тріщин, царпок, надривів в тонкостінних трубчатих деталях (прилад ВД-ДФП); контроль тріщин під герметиком (прилад типу ПОЛЁТ); вимірювання проміжку між оболонками (прилади ЗОНД, ВИЗА) та ін. Притому створено ряд модифікацій приладів, призначених для окремих задач НК, та їх модернізація, з метою підвищення надійності при експлуатації в автономному режимі.

## ВИСНОВКИ

В дисертації на основі теоретичних і експериментальних досліджень дано *узагальнення і нове вирішення науково-технічної проблеми* багатопараметрового ВС контролю, що виявляється в селективному відборі інформації щодо заданих параметрів ОК із множини параметрів, що нелінійно та взаємозалежно впливають на формування відгуку ВСПП, яке ґрунтується на тому, що розроблено методи обробки багатовимірною відгуку ВСПП за нелінійними, великої розмірності моделями функції перетворення підсистеми ВСПП-ОК, побудованими за єдиним підходом, в основу якого покладено створення як вихідної нелінійної багатопараметрової моделі відгуку первинного перетворювача із заданою похибкою адекватності шляхом наближення функції багатьох змінних заданої таблицею за результатами обчислень та/чи експериментальними даними, які *забезпечують створення* засобів селективної ВС дефектоскопії одного, двох, трьох і більшого числа параметрів ОК при їх одночасній зміні та розробку нового покоління приладів з високими метрологічними характеристиками для вирішення актуальних задач НК і ТД.

В рамках розробки цього підходу одержано такі основні результати.

1. Визначено структуру узагальненої моделі системи ОК-ВСПП-ІВК селективного контролю та/чи вимірювань, яка відрізняється тим, що до її складу *введено нелінійну модель*, звичайно *високої розмірності*, ФП системи та комплекс спеціалізованих системних програмних засобів математичної обробки результатів вимірювань, що реалізує, зокрема, зворотнє відображення  $x_\delta = A^{-1} \cdot y_\delta$ . Задача знаходження вектора  $x$  параметрів ОК, яке реалізує система, за постановкою задовольняє умовам коректності за Тихоновим А.М., так що похибка оцінки параметрів ОК прямує до "точного" значення ( $x_\delta \rightarrow x_T$ ), якщо за результатами вимірювань  $y_\delta$  прямує до "точного" значення  $\rho(y_T, y_\delta) \leq \delta \rightarrow 0$ .

2. Запропоновано НЛБ модель відгуку ВСПП як наближення функції багатьох змінних вектора  $x = (x_1, \dots, x_n)^T$  параметрів ОК. Модель відрізняється високою розмірністю (число членів становить  $N = 10..60$  і більше), що залежить від числа параметрів і заданої похибки адекватності моделі. Розроблено методи побудови НЛБ моделі в заданій області  $X \subset R^n$  зміни параметрів ОК, а саме:



– загальний метод побудови НЛБ моделі шляхом наближення багатовимірними алгебраїчними поліномами функцій  $n$  змінних, що задана таблицею на основі результатів обчислень розв'язків прямих задач чи/та даних фізичного та натурного експерименту;

– метод декомпозиції задачі побудови НЛБ моделі, що включає побудову  $n$  однопараметрових моделей відгуку ВСПП по параметрах  $x_k$ ,  $k = 1, \dots, n$  та моделі складової, яка обумовлена взаємним впливом параметрів ОК;

– метод побудови НЛБ моделі з залежними від параметрів ОК коефіцієнтами, що зводиться до побудови моделі для  $n$  змінних на основі моделей для  $(n-1)$  змінних.

Методи декомпозиції задачі побудови НЛБ моделі відгуку ВСПП та побудови НЛБ моделі зі змінними коефіцієнтами дозволяють зменшити розмірність матриці  $X$  параметрів ОК, та залучити апарат наближення функції однієї змінної. Це забезпечує побудову НЛБ моделей високої розмірності, похибка яких не перевищує десятих долей відсотка та менше.

3. Розроблено методи обробки багатовимірного відгуку ВСПП на основі моделей ФП підсистеми ВСПП-ОК двох класів, що побудовані за єдиним підходом методами наближення функції багатьох змінних для НЛБ моделі відгуку ВСПП:

– моделі підсистеми у базисі параметрів ОК, яку зображено системою нелінійних рівнянь і являє собою модель прямої ФП;

– нелінійної моделі підсистеми у базисі інформативних параметрів відгуку ВСПП, яка являє собою модель зворотної ФП;

◇ а також складеної моделі із залежними від параметрів ОК коефіцієнтами.

Запропоновано методи нелінійної трансформації моделі, декомпозиції та адаптації, що забезпечують побудову моделей підсистеми ВСПП-ОК із заданою похибкою адекватності. На прикладі задач, прийнятих як тестові, показано що похибка оцінки вектора параметрів ОК за результатами обробки багатовимірного відгуку ВСПП відповідає, як відмічено вище, похибці вимірювань його складових і може становити десяті долі відсотка та менше.

4. Для досліджень задач контролю дефектів типу тріщини запропоновано нову фізичну модель формування АП, в яку введено неоднорідну область ЗПД матеріалу в околі тріщини. Електрофізичні параметри в ЗПД залежать від матеріалу, виду та характеру дії деформацій під час утворення тріщини, а її розміри на 2-3 порядки перевищувати ширину (розкриття) тріщини. Модель обґрунтовує значну розбіжність результатів ВС контролю реальних тріщин на реальних ОК. Розроблено нові *розрахункові моделі*, які в задачах ВС дефектоскопії вводяться вперше, а саме:

– модель поздовжнього дефекту в електропровідному півпросторі, АП якого апроксимоване суперпозицією полів елементарних циліндричних включень по області дефекту при  $E$ -поляризованому первинному ЕМП;

– модель ОК з поздовжнім дефектом, що зображена багатопшаровою циліндричною структурою з границями довільної форми в  $E$ -поляризованому ЕМП, яка узагальнює модель багатопшарової кругової циліндричної структури ОК на структури з дефектами.

Показано на основі принципу взаємності щодо лінійної системи "випромінювач-об'єкт контролю-приймач", що результати, одержані при  $E$ -поляризованому первинному ЕМП, поширюються щодо іншої структури первинного ЕМП, створеного цією ж системою, приміром, – аксіального. Це узагальнення принципово розвиває підхід до постановки задач ВС дефектоскопії, зокрема, тривимірна задача може бути сформульована як двовимірна.

5. В рамках розробки розрахункової моделі побудовано загальні розв'язки задач щодо АП кругового циліндричного включення в електропровідному півпросторі та багаточислової циліндричної структури з границями довільної форми. У строгій постановці дано ефективний розв'язок задачі для поля кругового циліндричного включення, зануреного в електропровідному півпросторі при однорідному первинному ЕМП в залежності від радіуса  $a$ , глибини залягання  $h$ , та відстані  $(\rho, \varphi)$  включення до точки спостереження у свобідному півпросторі (зазора). Розв'язок в цілому відрізняється компактністю, не потребує спеціальних програмних засобів і забезпечує обчислення в реальному часі.

Запропоновано за порівнянням результатів обчислень АП поздовжніх дефектів як базову в задачах моделювання розрахункову модель, що являє собою суперпозицію полів елементарних циліндричних включень із довільним значенням ПЕП. Похибка за рівнем АП для підповерхневого кругового циліндричного включення в порівнянні зі строгим розв'язком не перевищує (1-3%) і зменшується при зростанні глибини залягання включення.

6. Вироблено нові підходи щодо формування та відбору первинної інформації, які базуються на застосуванні принципу взаємності та енергетичного критерію при побудові ВСПП. Показано еквівалентність просторової структури відгуку в околі дефекту при прямому та інверсному включенні ВСПП, яке характеризується, зокрема, зміною структури первинного ЕМП. Вироблений підхід розвиває принципи побудови структур ВСПП, а також постановку задач ВС дефектоскопії в цілому.

7. Розроблено нові методи формування інформативних параметрів відгуку ВСПП  $y = (y_1, \dots, y_n)^T$  на основі векторних перетворень первинного сигналу, а саме: узагальнений фазовий метод підвищення чутливості контролю ПЕП, товщини оболонок і покриття; амплітудний метод відображення квадратурних складових відгуку ВСПП; метод формування особливих точок при багаточастотному та імпульсному збудженні ВСПП із відбором інформації за миттєвим значенням  $y(t_k)$  відгуку.

Узагальнений фазовий метод забезпечує підвищення чутливості у 5-10 разів порівняно з відомими. Дано точні формули та корекцію похибки у відомих формулах для КС на основі суморізнених перетворень вимірюваного та опорного сигналів, що забезпечує обробку сигналу в реальному часі в скануючих засобах ВС дефектоскопії та дефектометрії та підвищення точності вимірювань, зокрема, у високочастотних системах ВС контролю. На основі НЛБ моделі рокрыто механізм утворення особливих точок по параметрах ОК у відгуку ВСПП при імпульсному збудженні та умови їх формування при багаточастотному збудженні. Показано, що глибина компенсації впливу параметра у "вузловій" точці обмежена принципово. Врахування єдиного механізму відображення формування відгуку

ВСПП в часовій або частотній області при багаточастотному та імпульсному збудженні дозволяє обґрунтувати підходи щодо вибору способу збудження ВСПП, відбору та обробки багатовимірної сигналу ВСПП.

8. Сформульовано основні положення щодо розробки приладів та систем багатопараметрового селективного ВС контролю й вимірювань на основі методів глобальної обробки сигналу ВСПП за багатовимірними нелінійними, високої розмірності, моделями ФП системи ВСПП-ОК, а також розроблених нових підходів й методів формування багатовимірної відгуку ВСПП, підвищення точності методів векторного, частотного та дискретного перетворення первинної інформації. Розроблені методи *забезпечують створення нового покоління засобів селективного ВС контролю та вимірювань.*

9. Розроблено ряд приладів та їх модифікацій спеціального і загального призначення для дефектоскопії, структуроскопії та контролю розмірних параметрів, що працюють автономно, а також у складі систем під управлінням ЕОМ і відрізняються високою чутливістю та селективністю. Розроблені засоби широко впроваджено у виробництво, зокрема, для забезпечення таких актуальних задач НК і ТД: контролю дефектів і ширини зони термічного впливу зварних швів на основі термозмцнених алюмінієвих сплавів великогабаритних конструкцій; контролю дефектів основного матеріалу та зварних швів особливотонкостінних трубчатих виробів і трубних заготовок на основі нержавіючих сталей; контролю проміжку між оболонками в нерозбірних конструкціях та великогабаритних конструкціях під зборку; контролю тріщин і корозійного пошкодження під оболонкою в нерозбірних великогабаритних конструкціях й під шаром герметика та ін.

10. Результати розробки методів селективного контролю рекомендуються як апарат аналізу та синтезу щодо створення приладів і систем ВС багатопараметрового селективного контролю й вимірювань в задачах дефектометрії, структуроскопії та вимірювань розмірних параметрів ОК з новими можливостями та високими метрологічними характеристиками, спрямованих на вирішення актуальних науково-технічних задач інженерії поверхонь, НК і ТД матеріалів, виробів та елементів конструкцій в енергетиці, авіакосмічній галузі, машинобудуванні та ін., а також узагальнення теорії методів ВС контролю з єдиних позицій селективного контролю множини параметрів ОК, що змінюються одночасно. Новизна й ефективність підходу та методів, що розроблені, забезпечує пріоритет у створенні нового покоління засобів і технологій ВС контролю й вимірювань.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ АВТОРОМ ПРАЦЬ, В ЯКИХ ВИКЛАДЕНО ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Тетерко А.Я. Створення нелінійної моделі відгуку первинного перетворювача для задач селективного електромагнітного контролю // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 1996. – №6. – С.93-103.

2. Тетерко А.Я. Методи і задачі електромагнітної дефектометрії та контролю структури матеріалів і виробів // Фізико-хімічна механіка матеріалів. –1998. – № 6.–С.85-92.
3. Тетерко А.Я. Електромагнітне поле циліндричного включення в електропровідному півпросторі // Відбір і обробка інформації. – 1998. – Вип.12 (88). – С.12-17.
4. Тетерко А.Я. Модель многослойной цилиндрической структуры сложной формы сечения в задачах вихретоковой дефектоскопии // Техническая диагностика и неразрушающий контроль.–1994. –№ 3-4.–С. 49-62.
5. Тетерко А.Я. Довгохвильове наближення поздовжнього дефекту в задачах вихрострумової дефектоскопії // Збірник наукових праць Інституту проблем моделювання в енергетиці. – Київ:ІПМЕ.–1998. – Вип. 6. –С.61-68.
6. Тетерко А.Я. Обобщенный фазовый метод увеличения чувствительности селективного вихретокового контроля // Техн. диагност. и неразр. контроль. – 1997. – № 2. – С. 9-19.
7. Тетерко А.Я. Розвиток вихрострумового модуляційного методу стосовно задач дефектометрії та селективного контролю // Техн. диагн. и неразр. контр.–1998. – № 4. –С.3-11.
8. Тетерко А.Я. Модель формування особливих точок у відгуку первинного вихрострумового перетворювача //Методи та прилади контролю якості.–1999.–№4.–С.7-11.
9. Дифракция  $H_z$ -поляризованных электромагнитных волн на цилиндре с металлическим покрытием. В.В. Панасюк, М.П. Саврук , З.Т. Назарчук, А.Я. Тетерко // Доклады АН СССР.– 1989.– т. 307, № 1.–С.84-87.
10. Назарчук З.Т., Тетерко А.Я., Овсянников О.И. Рассеяние электромагнитного поля включением в проводящем полупространстве. // Отбор и обработка информации.– 1989. – Вип.4(80).–С.26-30.
11. Кулько В.Ф., Тетерко А.Я., Нерубенко С.Г. Электромагнитное поле, наведенное включением, находящимся в проводящем полупространстве // Отбор и обработка информации. –1991. – Вип. 6(82).– С. 60-66.
12. Кулько В.Ф., Тетерко А.Я. Розрахунок електромагнітного поля при вихрострумовому контролі адгезії покриття // Фіз.-хім. механ. матеріалів. – 1994. – № 2.– С.34-41.
13. Тетерко А.Я., Пахолук Т.З. Методика моделювання і аналіз багатопараметрової моделі сигналу електромагнітних систем неруйнівного контролю // Фізико-хімічна механіка матеріалів.–1996.–№5.–С.77-81.
14. Тетерко А.Я., Гутник В.І. Модель електромагнітного поля дефекту типу поздовжньої тріщини // Відбір і обробка інформації.–1999.–Вип.13 (89).–С.16-20.
15. Тетерко А.Я., Гутник В.І. Нелінійна адаптивна модель щодо задач вихрострумової дефектометрії // Методи та прилади контролю якості.–2000.–№5.–С.15-21.
16. Тетерко А.Я., Гутник В.І. Модель системи первинний перетворювач – об'єкт контролю в обернених задачах вихрострумової дефектоскопії // Відбір і обробка інформації.–2000.– Вип 14(90).–С.31-36.
17. Тетерко А.Я., Гутник В.І. Модель первинного перетворювача щодо розробки засобів багатопараметрового вихрострумового контролю // Збірник наукових праць Інституту проблем моделювання в енергетиці.–Київ: ІПМЕ.–2000.–Вип.10.–С.68-75.

18. Тетерко А.Я., Гутник В.І. Нелінійна модель відгуку вихрострумowego первинного перетворювача для задач підвищення точності селективних вимірювань параметрів оболонок // Відбір і обробка інформації.–2002.– Вип.16(92)– С.18-24.

19. Гутник В.І., Тетерко А.Я. Модель просторової структури відгуку первинного перетворювача щодо задач вихрострумової дефектоскопії // Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів і виробів.–Київ-Львів:ФМІ.–2001.–Вип.6.–С.101-105.

20. Гордиенко В.И., Рыбачук В.Г., Тетерко А.Я. О выборе информативных параметров при измерении коэффициента анизотропии удельной электрической проводимости // Диагностика и прогнозирование разрушения сварных конструкций. – 1987. – № 4. – С. 50-54.

21. Гордиенко В.И., Рыбачук В.Г., Тетерко А.Я. Влияние зазора на точность фазовых вихретоковых измерителей удельной электрической проводимости // Техническая электродинамика.– 1988.– № 5.– С. 96-101.

22. Тетерко А.Я., Учанин В.Н. Вихретоковая дефектоскопия сварных швов с применением полутонной индикации. // Диагностика и прогнозирование разрушения сварных конструкций. –1988.– № 6.–С.69-72.

23. V. Panasjuk, A. Teterko. Elektromagneta kontrola metala sava i zone uticaja toplote // Proc. Internat. Symp. "Welding 96", Welding in Power Industry. – Beograd.–1996. – P. 167-169.

24. Применение вихретоковых приборов для выявления оксидных плен в сварных швах изделий из алюминиевых сплавов. А.Я. Тетерко, В.Н. Учанин, В.М. Рыбаков, Л.Н. Емельянова // Техн. диагностика и неразрушающий контроль. –1989.– № 2. – С. 66-68.

25. Бобало С.Н., Погрибной В.А., Тетерко А.Я. Методы моделирования обработки рядов в реальном времени // Электронное моделирование. –1989.–Том 11, №5.–С.77-81.

26. Зыбов В.Н., Мизюк Л.Я., Тетерко А.Я., Принцип построения одноканальных устройств обработки сигналов при двухчастотном вихретоковом контроле // Отбор и передача информации. – 1985. –Вип.71.– С. 84-89.

27. Тетерко А.Я., Гутник В.І. Особливості формування відгуку вихрострумowego первинного перетворювача дефектоскопії // Третя Українська наук.-техн. конфер. НКТД–2000 "Неруйнівний контроль та технічна діагностика".–Дніпропетровськ.–2000.–С.110-113.

28. Годовник О.Л., Михайлова Е.Д., Тетерко А.Я. Модель сигнала проходного преобразователя с движущимся неоднородным объектом и анализ её погрешностей // Отбор и обработка информации.— Вип.5(81)– С.25-33.

29. Саврук М.П., Тетерко А.Я., Назарчук З.Т. Дифракция электромагнитных волн на тонкостенных криволинейных включениях в слоистой среде // Теоретическая электротехника.–1978.–Вип.24.–С.88-96.

30. Саврук М.П., Тетерко А.Я., Назарчук З.Т. Плоская задача дифракции электромагнитных волн на тонкостенных криволинейных включениях в слоистом цилиндре // Теоретическая электротехника.–1979.–Вип.27.–С.108-116.

31. Саврук М.П., Назарчук З.Т., Тетерко А.Я. Дифракция электромагнитного поля на криволинейном идеально проводящем экране (Е-поляризация) // Теоретическая электротехника.–1980.–Вип.28.–С.60-65.

32. Учанин В.Н., Колодий Б.И., Тетерко А.Я. Применение метода интегральных уравнений для определения электромагнитного поля протяжённой трещины в электропроводном полупространстве // Методы и приборы автоматического неразрушающего контроля. Электромагнитные методы. Сб. научн. трудов Рижского политехнического института.—Рига:РПИ.—1979.—Вып.3.—С.87-93.

33. Панасюк В.В., Колодий Б.И., Орловский А.А., Тетерко А.Я. Определение квазистатических источников электромагнитного поля, эквивалентных малым эллипсоидальным включениям в полупространстве // Отбор и передача информации.—1977.—Вып.51.—С.52-56.

34. Панасюк В.В., Тетерко А.Я., Учанин В.Н., Ковчик С.Е., Андрейкив А.Е., Зазуляк В.А. Определение глубины кольцевой трещины электромагнитным методом // Физ.-хим. механика материалов.—1977.—том 13.—№6.—С.80-84.

35. Тетерко А.Я., Ткачев В.И., Витвицкий В.И., Федорчак Б.И. О контроле усталостного ресурса изделий электромагнитным способом // Физ.-хим. механика материалов.—1981.—том 17.—№1.—С.93-95.

36. Тетерко А.Я. Метод моделей построения систем селективного контроля // Материалы международного семинара-выставки "Современные методы и средства неразрушающего контроля и диагностики".—Киев:АТМУ.—2000.—С.68-69.

37. Тетерко А.Я. Роль учёта характера взаимодействия в системе первичный преобразователь—объект контроля задач вихретоковой дефектоскопии // Материалы международного семинара-выставки "Современные методы и средства неразрушающего контроля и диагностики".—Киев:АТМУ.—2000.—С.69-70.

38. Тетерко А.Я. Создание высокоточных средств неразрушающего вихретокового контроля нового поколения // Материалы Первой промышленной международной научно-технической конференции "Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях".—Киев: УИЦНТТ.—2001.—С.159.

39. Тетерко А.Я., Гутник В.И. Селективный вихретоковый контроль параметров оболочки методом моделей // Материалы междунар. семинара-выставки "Современные методы и средства неразрушающего контроля и диагностики".—Киев:АТМУ.—2000.—С.71-72.

40. Устройство для вихретокового контроля: А.с. 1308886 СССР, МКИ G01N27/90/ А.Я. Тетерко, В.Н. Зыбов, В.Н. Учанин, Р.В. Проць, О.Л. Годовник (СССР).—№4013405/25-28; Заявлено 28.01.86; Опубл. 07.05.87, Бюл.№17.—3с.

41. Устройство для вихретокового контроля: А.с. 1322136 СССР, МКИ G01N27/90/ А.Я. Тетерко, В.Н. Зыбов, В.Н. Учанин, Р.В. Проць, В.П. Бодунов (СССР).—№4046620/25-28; Заявлено 13.04.86; Опубл. 07.07.87, Бюл.№25.—3с.

42. Устройство для двухчастотной вихретоковой дефектоскопии металлических изделий: А.с. 1413514 СССР, МКИ G 01 N 27/90/ В.Н. Зыбов, А.Я. Тетерко, Л.Я. Мизюк, В.Н. Учанин (СССР).—№4189661/25-28; Заявлено 03.02.87; Опубл. 30.07.88, Бюл.№28.—4с.

43. Способ измерения удельного сопротивления и устройство для его осуществления: А.с. 1260877 СССР, МКИ G 01 R 31/00/ Б.М. Березюк, А.Я. Тетерко (СССР).—№3835637/24-21; Заявлено 02.01.85; Опубл. 30.09.86, Бюл.№36.—7с.

44. Verfahren und Einrichtung zur Kontrolle von Pulverdraht : Pat. DE 24 08 309 C3, G 01 N 27/76 / Panasjuk V.V., Makarov G.N., Teterko A.Y., Kartovsky I.V.(SU).–1979.–12 s.

Тетерко А.Я. Розробка методів і засобів селективної вихрострумової дефектоскопії. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу речовин. – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. Івано-Франківськ, 2002.

Дисертацію присвячено питанням селективного вихрострумowego (ВС) контролю та вимірювань заданих параметрів об'єкта контролю (ОК) із множини параметрів, що впливають на формування відгуку вихрострумowego первинного перетворювача (ВСПП). В дисертації вироблено єдиний підхід щодо рішення науково-технічної проблеми багатопараметрової ВС дефектоскопії. На основі створення багатовимірних нелінійних, звичайно великої розмірності, моделей функції перетворення (ФП) системи ВСПП-ОК із заданою малою похибкою адекватності розроблено методи побудови моделі ФП як наближення функції багатьох змінних, поданої таблицею за даними обчислень прямих задач чи/та за експериментальними даними. Запропоновано нову, більш точну фізичну модель формування електромагнітного поля дефектів типу тріщин та наближену розрахункову модель поля поздовжніх дефектів. Розроблено нові методи відбору та перетворення первинної інформації, що забезпечують необхідну точність обробки відгуку ВСПП за моделлю ФП системи. Все це забезпечує створення нового покоління засобів селективного багатопараметрового ВС контролю та вимірювань з високими метрологічними характеристиками. Розроблено ряд спеціалізованих засобів селективного неруйнівного контролю розмірних параметрів, структуроскопії та дефектоскопії, зокрема, зварних швів і основного матеріалу конструкцій та окремих виробів, які впроваджено на підприємствах машинобудування.

Ключові слова: неруйнівний контроль, система вихрострумовой дефектоскопії, обробка багатовимірною відгуку, нелінійна модель системи вихрострумowego контролю, селективний багатопараметровий вихрострумовой контроль.

Тетерко А.Я. Разработка методов и средств селективной вихретоковой дефектоскопии. – Рукопись.

Дисертація на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 05.11.13 – приборы и методы контроля и определения состава веществ. – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. Івано-Франківськ, 2002.

Дисертація посвящена актуальным вопросам селективного вихретокового (ВТ) контроля заданных параметров контролируемого объекта (ОК) из множества параметров, которые влияют на формирование отклика вихретокового преобразователя (ВПП). В диссертации на основе теоретических и экспериментальных исследований выработан единый подход

к решению научно-технической проблемы многопараметрового ВТ контроля. Разработаны методы обработки многомерного вектора информативных параметров отклика ВТП  $y = (y_1, \dots, y_m)^T$  в пространстве  $R^m$  на основе нелинейных, обычно высокого порядка, моделей функции преобразования (ФП) подсистемы ВТП-ОК, построенных с заданной погрешностью адекватности. На выходе системы ВТП-ОК-ИВК формируется вектор оценки контролируемых составляющих параметров ОК. Так как задача определения вектора параметров ОК  $x = (x_1, \dots, x_n)^T$ ,  $x \in R^n$ ,  $n \leq m$  в соответствии с преобразованием  $Ax = y$ , которое реализует подсистема ВТП-ОК, согласно постановке удовлетворяет понятию корректности по Тихонову, то эта оценка стремится к точному значению, если по результатам измерений вектор  $y_\delta$  стремится к точному значению  $\rho(y_T, y_\delta) \leq \delta \rightarrow 0$ .

Определены два класса моделей ФП системы ВТП-ОК, а именно: 1) модель системы в базисе составляющих вектора параметров ОК, представленная системой нелинейных уравнений  $Ax = y$  и являющаяся, по сути, моделью прямой ФП; 2) модель системы в базисе составляющих вектора информативных параметров отклика ВТП, являющаяся моделью обратной ФП. Введена также составная модель. Разработан единый подход к разработке моделей ФП системы ВТП-ОК на основе методов построения нелинейных многопараметровых (НЛМ) моделей информативных параметров отклика ВТП. При этом с увеличением числа влияющих параметров ОК и уменьшением погрешности адекватности НЛМ модели отклика ВТП её размерность может сильно возрасти (число членов модели аддитивного типа составляет  $N = 10 \dots 60$  и более). Предложены методы построения НЛМ моделей отклика ВТП большой размерности как приближение функции  $n$  переменных многомерными и одномерными полиномами с заданной погрешностью адекватности (до десятых долей процента и менее). Функция  $n$  переменных задаётся таблично на основании результатов решения прямых задач и/или на основании экспериментальных результатов. Использование решений прямых задач существенно повышает эффективность исследований и позволяет решать основные вопросы разработки системы селективного контроля на этапе моделирования. При этом погрешность решения прямой задачи не имеет принципиального значения, и принимается как "точное". Модель ФП реальной системы с заданной погрешностью адекватности строится далее на основании результатов физического и натурального экспериментов.

Для моделирования в задачах дефектометрии предложена новая, более корректная физическая модель формирования аномального поля (АП) дефектов типа трещин, в которую введена неоднородная по электрофизическим параметрам зона пластически деформированного (ЗПД) металла в окрестности трещины и которая на 2-3 порядка может превышать ширину трещины. Как показывают результаты вычислений, область ЗПД может вносить преобладающий вклад в формирование АП, что определяется зависимостью электрофизических параметров от вида и характера деформаций. При этом модель обосновывает значительные расхождения результатов контроля параметров трещин в



реальных элементах конструкций. Разработаны два типа расчётных моделей АП дефектов: 1) модель продольного дефекта в электропроводном полупространстве, АП которого аппроксимировано суперпозицией элементарных цилиндрических включений, расположенных по объёму дефекта, при  $E$ -поляризованном первичном ЭМП; 2) модель ОК с продольным дефектом, представленная цилиндрической структурой с границами произвольной формы, в  $E$ -поляризованном ЭМП, обобщающая модель многослойной круговой цилиндрической структуры на задачи ВС дефектоскопии. Построены общие решения задач для этих моделей. Для поля цилиндрического кругового включения в свободном полупространстве (над ОК) в зависимости его от радиуса включения, глубины залегания и расстояния до точки наблюдения (зазора) новым подходом дано в строгой постановке решение, обеспечивающее моделирование в реальном времени. На основании сравнения результатов рекомендована как расчётная модель с аппроксимацией полем элементарных цилиндрических включений. Показано на основании принципа взаимности для линейной системы ВТ дефектоскопии, что результаты, полученные для  $E$ -поляризованного ЭМП, справедливы и для поля другой структуры, в частности, – аксиального.

На примере задач для кругового цилиндрического включения и оболочки в поле витка с током, принятых как тестовые, а также экспериментальных данных показано, что погрешность оценки вектора параметров ОК по результатам обработки многомерного отклика ВТП соответствует, как сформулировано выше, погрешности измерений его составляющих и может не превышать десятых долей процента и менее. Для снижения погрешности адекватности модели ФП подсистемы ВТП-ОК при её построении предложены методы трансформации, декомпозиции и адаптации модели. Для повышения точности измерений информативных параметров предложены: 1) новые подходы формирования и отбора информации в задачах дефектоскопии и ВТ контроля в целом с учётом принципа взаимности и энергетического критерия при построении новых структур ВТП, а также 2) новые методы векторного, частотного и дискретного преобразования первичной информации.

На основе предложенных методов глобальной обработки многомерного отклика ВТП с применением нелинейных, высокой размерности, моделей ФП системы ВТП-ОК сформулированы основные положения построения средств селективного многопараметрового ВТ контроля и измерений. Разработанные методы отбора, первичного преобразования и обработки многомерного отклика ВТП обеспечивают создание нового поколения средств селективной ВТ дефектоскопии с высокими метрологическими характеристиками. Для дефектоскопии сварных швов и основного материала крупногабаритных конструкций, многослойных неразборных конструкций, сварных швов тонкостенных трубных заготовок и трубчатых изделий и т.п. разработан ряд специализированных средств и систем ВТ контроля и измерений, отличающихся высокой чувствительностью и селективностью. Созданные средства контроля внедрены на предприятиях авиационной отрасли и машиностроения.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, система вихретокового контроля, нелинейная модель системы вихретокового контроля, обработка многомерного сигнала, селективный многопараметровый вихретоковый контроль.

Teterko A.Y . Development of methods and means of the eddy current multiparameter selectable testing. – Manuscript.

The thesis for a doctor's degree achievement in speciality 05.11.13 – devices and methods of control and determination of substances composition. Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas. Ivano-Frankivsk, 2002.

The thesis is devoted to the problem of the selectable measurement of the object parameters by Eddy Current (EC) method. The unified procedure to resolve the problem of selectable multiparameter EC nondestructive testing is developed. The new more accurate physical model of electromagnetic field forming of defect such as a crack and the new approximate calculation model one are proposed. In the new model a near-crack structure heterogenous zone of a plasticitely deformed metal has been introduced. Methods for construction of multidimension nonlinear model of the EC system transfer function, that has a small adequacy error of this model, are developed. New methods of extraction and processing of sensor information and processing methods for multidimension signals from the EC system are also developed. All these methods ensure creation of precision EC systems for multiparameter selectable testing. Series of new special EC devices and systems are developed. These means have been applied in aerospace manufacturing technology.

Key words: eddy current system, multidimension signal processing, multiparameter selectable eddy current testing , nondestructive testing, nonlinear eddy current testing sistem model.

