

Київський політехнічний інститут

На правах рукопису

УДК 620.179:534.6

БАБАК ВІТАЛІЙ ПАВЛОВИЧ

**МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ РОЗРІЗНЮВАЛЬНОЇ  
ЗДАТНОСТІ УЛЬТРАЗВУКОВИХ СИСТЕМ  
НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ**

Спеціальність 05.11.13 — Прилади і методи контролю та захисту навколишнього середовища, речовин, матеріалів та виробів

А в т о р е ф е р а т  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Київ 1995

81.2 : 54.021

ЛНБ України ім.В.Стефаника



00376164 (R)

Національний технічний університет України  
"Київський політехнічний інститут"

На правах рукопису

УДК 620.179:534.6

**Бабак Віталій Павлович**

**МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ РОЗРІЗНЮВАЛЬНОЇ  
ЗДАТНОСТІ УЛЬТРАЗВУКОВИХ СИСТЕМ  
НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ**

70 2

Спеціальність 05.11.13 - Прилади і методи контролю та  
захисту навколишнього середовища,  
речовин, матеріалів та виробів

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Київ 1995

НВ 32.568

Дисертацією є рукопис  
Робота виконана в Київському політехнічному інституті

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор  
Маєвський С.М.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, с.н.с.  
Гельман Л.М.  
доктор технічних наук, професор  
Дмитриченко М.Ф.  
доктор технічних наук, професор  
Скрипник Ю.О.

Провідна установа: УкрНДІ технології машинобудування  
(м.Дніпропетровськ)

Захист відбудеться " 5 " 07 1995 р. о 15 годині на  
засіданні спеціалізованої вченої ради Д 01.02.14 при Національному  
технічному університеті України "Київський політехнічний інсти-  
тут" за адресою: 252056, м.Київ, пр. Перемоги 37, корп.1.

З дисертацією можна ознайомитись в науково-технічній  
бібліотеці Національного технічного університету України "Київсь-  
кий політехнічний інститут".

Автореферат розісланий " 27 " 05 1995 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради,  
д.т.н., проф.

В.О.Румбешта

ЛНБ ім. В. Стефана  
АН України

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Широке використання ультразвукових методів неруйнівного контролю (НК) в технічній діагностиці матеріалів та виробів вимагає подальшого розвитку методів та засобів ультразвукової інтроскопії з метою отримання візуальної інформації (як найбільш інформативної) про внутрішню структуру об'єктів контролю. Отримання якісних зображень неоднорідностей об'єктів контролю в основному визначається розрізнявальною здатністю засобів ультразвукового (УЗ) контролю. Для підвищення достовірності контролю сучасних зарубіжних та вітчизняних систем УЗ контролю також необхідний пошук нових шляхів покращення розрізнявальної здатності.

Відомо, що методи та засоби комп'ютерної томографії відкрили нові можливості УЗ контролю, в той же час вони вимагають потужних обчислювальних витрат, застосування спеціальних пристроїв сканування об'єктів та складних обчислювальних алгоритмів для отримання зображень і на сьогодні також потребують вирішення завдань підвищення розрізнявальної здатності. Виникають значні складнощі при необхідності зменшення числа напрямків сканування чи обмеженні кількості точок прозвучування об'єктів контролю, що вимагає розробки більш ефективних алгоритмів формування зображень неоднорідностей.

В теорії та практиці неруйнівного контролю відомі методи вільних коливань та засоби НК виробів на його основі. В той же час практично відсутній аналіз можливостей використання таких методів для визначення фізико-механічних характеристик матеріалів.

Мета роботи - розробка методів підвищення розрізняювальної здатності та способів покращання якості зображень систем ультразвукового неруйнівного контролю, а також можливостей визначення фізико-механічних характеристик матеріалів.

Для досягнення вказаної мети були поставлені та розв'язані такі основні завдання:

1. Створення моделей ультразвукових сигналів та систем з формуванням зображень, придатних для аналітичних досліджень.

2. Розробка шляхів підвищення точності ультразвукових засобів товщинометрії за рахунок використання довготривалих зондуючих сигналів - радіоімпульсів та амплітудно-фазового аналізу ехо-сигналів із урахуванням кумулятивного фазового накопичення;

3. Підвищення розрізняювальної здатності шляхом цифрової локально-інваріантної фільтрації, адекватної об'єкту контролю та аналітичного подовження спектру при цифровій обробці ехо-сигналів.

4. Покращення якості при формуванні В- та томографічних зображень на основі цифрової обробки ультразвукових сигналів з урахуванням частотних характеристик середовища об'єкта контролю.

5. Дослідження можливостей обмеження числа напрямків сканування і точок прозвучування об'єктів при формуванні зображень неоднорідностей в ультразвуковому неруйнівному контролі.

6. Розробка способів покращання метрологічних характеристик методу вільних коливань та застосування його для визначення фізико-механічних характеристик матеріалів.

Загальна методика досліджень. Всі проведені дослідження, математичний та функціонально-аналітичний аналіз фізичних, акустичних та динамічних явищ базуються на сучасному математичному апараті системного аналізу, теорії функцій та функціонального і спектрального аналізу, матричного обчислення, методах цифрової обробки дискретизованих сигналів. При розробці засобів ультразвукового контролю використовувалась сучасна елементна база електроніки та ПЕОМ.

Наукова новизна. В роботі отримані слідуючі наукові результати:

- розроблені математичні моделі ультразвукового вимірювального перетворення з використанням моделей ультразвукового поля в дисперсному та недисперсному середовищах, придатні для аналітичних досліджень;
- розроблені методи підвищення точності ультразвукових засобів товщинометрії за рахунок використання довготривалих зондуючих сигналів - радіоімпульсів та амплітудно-фазового аналізу ехо-сигналів із урахуванням кумулятивного фазового накопичення;
- розроблені способи підвищення розрізняювальної здатності за рахунок цифрової локально-інваріантної фільтрації, адекватної об'єкту контролю та аналітичного подовження спектра при цифровій обробці ехо-сигналів;
- визначена методика розрахунку необхідного числа напрямків прозвучування об'єкта контролю із використанням розробленої узагальненої моделі комп'ютерної томографії та алгоритму цифрової обробки сигналів;
- розроблений спосіб підвищення якості контролю полімерно-композиційних матеріалів на базі метода вільних коливань;
- розроблена методика ідентифікації параметрів твердості поверхневого шару деталей на основі метода вільних коливань та автоматизованого аналізу результатів випробувань навчачої вибірки.

Практична цінність роботи та її реалізація. На основі виконаних теоретичних, експериментальних досліджень та розробок вирішено важливе народно-господарське завдання підвищення якості контролю матеріалів та виробів за рахунок підвищення розрізняювальної здатності систем ультразвукового НК.

Використання нових наукових положень, досягнутих і обґрунтованих у дисертаційній роботі, дозволяє апаратурним та алгоритмічним шляхами без значних апаратурних ускладнень досягти підвищення розрізняювальної здатності систем ультразвукового НК і тим самим достовірності контролю.

За тематикою дисертації під керівництвом автора та при його безпосередній участі були виконані госпдоговірні науково-дослідні роботи (НДР) у відповідності до цільових комплексних програм ГКНТ з підприємствами галузей загального машинобудування та авіакосмічної, а також фундаментальні дослідження в рамках

держбюджетних НДР за програмами Академії Наук та Міністерства України. В результаті були розроблені, виготовлені та передані для дослідної експлуатації зразки УЗ дефектоскопів та систем з формуванням зображень неоднорідностей внутрішньої структури об'єктів контролю. В тому числі:

1. Розроблений та впроваджений в дослідницьку експлуатацію в науково-виробничому об'єднанні "Ротор" (м. Черкаси) новий УЗ дефектоскоп для контролю якості граніту та комплекс програм для цифрової обробки ультразвукових сигналів в дефектоскопії.

2. Розроблений та впроваджений в дослідницьку експлуатацію в СПКТБ інституту проблем матеріалознавства АН України (м.Київ) автоматизований УЗ дефектоскоп для контролю якості виробів з технічної кераміки з механічним покрововим скануванням об'єкта контролю та формуванням зображень неоднорідностей внутрішньої структури об'єктів контролю.

3. Розроблений та впроваджений в дослідницьку експлуатацію в УкрНДІ технології машинобудування (м. Дніпропетровськ) комплекс програм для цифрової обробки сигналів, який застосовується в конструкторському бюро "Південмаш" для обробки дефектоскопічної інформації.

4. Розроблений та впроваджений в дослідницьку експлуатацію в УкрНДІ авіаційної технології (м. Київ) новий дефектоскоп на основі методу вільних коливань для контролю якості виробів із полімерно-композиційних матеріалів. Використовується в операціях НК при підготовці до серійного випуску нового літака АН-70.

5. Розроблені принципи побудови систем для контролю виробів із полімерно-композиційних матеріалів на основі методу вільних коливань. Розроблені алгоритми та програми цифрової обробки сигналів для формування бібліотеки образів з метою ідентифікації та класифікації дефектів в процесі контролю - впроваджені в УкрНДІ авіаційної технології (м. Київ) і використовуються для контролю якості виробів із полімерно-композиційних матеріалів.

6. Розроблена та впроваджена в експлуатацію в транспортному виробничому підприємстві "Будавтотранс" (м.Київ) система автоматизованого неруйнівного контролю твердості поверхневого шару виробів із конструкційних сплавів.

7. Розроблений комплекс програм цифрової обробки дискретизованих сигналів, який на протязі двох років широко використовується в навчальному процесі вищими навчальними закладами

Україні (Житомирський інженерно-технологічний інститут, Дніпропетроцький державний університет, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут", Університет "Львівська політехніка", Черкаський інженерно-технологічний інститут та ін.)

Впровадження підтверджено відповідними актами, що наведені в додатку до дисертації.

Результати роботи також використовуються у Київському політехнічному інституті при підготовці інженерних кадрів по спеціальності 7.090902 "Фізичні методи та прилади інтроскопії" та спеціалізації "Прилади і методи неруйнівного контролю для технічної та медичної діагностики". Вийшли з друку монографія "Обробка сигналів при формуванні зображень об'єктів" та навчальні посібники "Основи побудови систем аналізу сигналів в неруйнівному контролі", "Структурно-логічні методи обробки інформації в дефектоскопії", "Сучасні методи та засоби неруйнівного контролю з використанням статистичної обробки сигналів", "Контрольно-измерительные системы для неразрушающего контроля" та "Автоматизированные системы неразрушающего контроля на базе микропроцессоров и микро-ЭВМ".

Апробація роботи. Основні положення та результати роботи доповідались та обговорювались на 24 міжнародних, всесоюзних, республіканських та регіональних науково-технічних симпозиумах, конференціях та семінарах, в тому числі:

- XI та XII Всесоюзних науково-технічних конференціях "Незрушающие физические методы и средства контроля" (м. Москва, 1987; м. Свердловськ, 1990);
- Республіканській науково-технічній конференції "Приборы и методы неразрушающего контроля" (м. Київ, 1989)
- IV міжнародній науково-технічній конференції "Проблеми комплексної автоматизації" (м. Київ, 1990);
- Республіканській науково-технічній конференції "Проблеми автоматизации контроля и диагностирования сложных технических систем" (м. Житомир, 1991);
- Всесоюзній науково-технічній конференції "Методы и средства измерения механических параметров в системах контроля и управления" (м. Пенза, 1992);

- науково-технічній конференції країн СНД "Измерительная техника в технологических процессах и конверсии производств" (м. Хмельницький, 1992);
- міжнародній науково-технічній конференції "Радиотехнические системы, средства измерений и новые информационные технологии" (м. Красноярськ, 1992);
- науково-технічній конференції "Фізичні методи та прилади НК для технічної та медичної діагностики" (м. Севастополь, 1993);
- Internationale Symposium, Technische Universität München (München, Bundesrepublik Deutschland, 1993);
- науково-технічній школі-семінарі "Автоматизация методов неразрушающего контроля" (м. Славське, 1994);
- міжнародній науково-технічній конференції "Новые информационные технологии" (м. Красноярськ, 1994);
- міжнародній конференції "Компьютерные технологии в промышленности" (м. Пісчане, 1994);
- міжнародній конференції "Проблемы и перспективы развития сертификации промышленной продукции" (м. Сколе, 1995);
- міжнародній конференції "Оснастка - 95", (м. Київ, 1995);
- науково-технічних конференціях Київського політехнічного інституту та наукових семінарах кафедри приладів та систем неруйнівного контролю КПІ в 1984-1995 рр.

Особистий внесок автора. Основні положення та результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. Роботи по експериментальному дослідженні та впровадженні розроблених засобів неруйнівного контролю та комплексів програм виконувались разом із співавторами, прізвища котрих наведені в переліку публікацій. Із робіт, що опубліковані в співавторстві, використовуються результати, отримані особисто пошукувачем.

Публікації. 60 наукових праць, в тому числі монографія, 5 навчальних посібників та 15 авторських свідоцтв на винаходи.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається із вступу, п'яти розділів, висновків, списку цитованої літератури та додатків і включає 285 сторінок основного тексту, 59 рисунків, список використаної літератури з 234 найменувань та 20 сторінок додатків.

У вступі обгрунтована актуальність теми, викладені дані про мету роботи та основні завдання, що дозволять вирішити проблему підвищення розрізняювальної здатності та покращення якості зображень в системах ультразвукового неруйнівного контролю.

У першому розділі проводиться короткий аналіз стану теорії і практики ультразвукового неруйнівного контролю, в тому числі можливостей підвищення якості формування А,В,С та томографічних зображень в УЗ НК, ставиться завдання розробки нових методів, які дозволяють підвищити розрізняювальну здатність та отримувати якісне зображення неоднорідностей внутрішньої структури об'єктів контролю, в тому числі при обмеженому числі напрямків сканування і точок прозвучування з урахуванням особливостей об'єкта.

У другому розділі розглядаються можливості математичного моделювання багатовимірних ультразвукових сигналів, де побудовані моделі функціонування ультразвукового перетворювача, проведено математичне моделювання ультразвукового вимірювально-го перетворення, описані моделі ехо-сигналів при повному відбитті та відбиванні від слабких неоднорідностей, розроблюються нові методи підвищення точності ультразвукових товщиномірів за рахунок використання зондуючих сигналів - радіоімпульсів відносно довгої тривалості та амплітудно-фазового аналізу ехо-сигналів із урахуванням кумулятивного фазового накопичення.

У третьому розділі розроблюються способи підвищення розрізняювальної здатності за рахунок цифрової локально-інваріантної фільтрації, адекватної об'єкту контролю та аналітичного подовження спектру при цифровій обробці ехо-сигналів.

У четвертому розділі аналізуються можливості підвищення якості формування зображень в комп'ютерній томографії, отримані узагальнена модель функціонування УЗ системи НК візуалізацією зображення та ідеалізована модель функціонування системи формування В-зображення. Виведена узагальнена модель комп'ютерної томографії та розглянуті проблеми її технічної реалізації, визначена методика розрахунку необхідного числа напрямків прозвучування. Запропоновані цифрові способи обробки сигналів для покращення якості формування зображень.

У п'ятому розділі пропонуються шляхи покращання метрологічних характеристик методу вільних коливань для забезпечення можливостей неруйнівного контролю виробів із полімерно-компози-

ційних матеріалів та твердості поверхневого шару деталей з конструкційних сплавів.

У додатках вміщені акти про впровадження розробок автора в промисловості та навчальному процесі ряду вузів України. Наведені дані про практичні розробки: систему ультразвукового контролю нерудних матеріалів з формуванням зображень тріщин та неоднорідностей у гранітних блоках; систему автоматизованого ультразвукового контролю виробів із конструкційної кераміки; систему контролю виробів із композиційних матеріалів; систему автоматизованого контролю твердості деталей на базі методу вільних коливань; комплекс програм цифрової обробки дискретизованих сигналів NUMER 2.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обгрунтована актуальність теми дисертації, сформульоване завдання, вирішення якого має важливе народногосподарське значення, мета роботи, наукова новизна і практична цінність, відображені основні результати роботи.

У першому розділі за літературними джерелами зроблений короткий аналіз стану теорії та практики ультразвукового неруйнівного контролю, зроблена класифікація різноманітних можливостей, що використовуються для підвищення розрізняювальної здатності, в тому числі при формуванні зображень в ультразвуковому неруйнівному контролі та розглядаються в роботах Василенко Г.І., Виборнова Б.І., Гурвіча А.К., Домараскаса В.І., Єрмолова І.М., Карлова В.А., Качанова В.К., Ключева В.В., Ліхтермана Л.Б., Пілецкаса Е.Л., Шкарлета Ю.М., а також Вудса Р., Кайно Г., Нортон С., Робінсона Д., Уейда Г., Хілла К. та ряду інших учених.

Як відомо, мінімальний об'єм об'єкта контролю, що розрізняється  $\Delta V$ , визначається, як відомо, повздовжньою  $\Delta L$  та поперечною  $\Delta L_n$  розрізняювальною здатністю

$$\Delta V = \Delta L (\Delta L_n)^2. \quad (1)$$

Для покращання реальної поперечної розрізняювальної здатності в системах прямого фокусування зображень найбільш доцільно використовувати колімований промінь, шляхом переміщення котрого у просторі можна послідовно опромінювати різні зони

об'єкта контролю. Траекторія сканування шляхом механічного переміщення джерела та приймача випромінювання або електронним перемиканням джерел та приймачів багатоеlementних ґраток залежить від методів формування зображень та форми об'єкту. Аналіз показує, що економічно вигідніше в системах НК використовувати механічне сканування і томографічні методи формування зображень. При цьому об'єкт контролю необхідно опромінювати за множиною різних напрямів. В кожному напрямку кута  $\varphi$  реєструється величина, пропорційна інтегралу вздовж напрямку випромінювання від розподілу

$$f_0(\varphi) = \int_{L(\varphi)} f(x, y) dL(\varphi). \quad (2)$$

За множиною функцій  $\{f_0(\varphi)\}$ , отриманих для різних кутів  $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_N$  реалізується зворотне перетворення, за допомогою якого можна сформувати  $f(x, y)$ . Як відомо, практична реалізація томографічних УЗ методів різко обмежується на сьогодні можливостями введення ультразвукових сигналів у об'єкт, та необхідністю вирішення проблеми визначення необхідної кількості напрямків опромінення об'єкта контролю (кутів  $\varphi$ ) та створення відповідних алгоритмів формування зображень неоднорідностей внутрішньої структури об'єктів контролю, що розглянуті в главі 4.

При вирішенні задачі формування зображень неоднорідностей внутрішньої структури об'єктів контролю важливою проблемою є покращення повздовжньої розрізняювальної здатності. Проведений короткий аналіз апаратурних (за рахунок розширення смуги пропускання окремих складових електроакустичного тракту) та алгоритмічних (за рахунок фільтрації та синтезованої апертури) методів покращення розрізняювальної здатності показує, що відомі методи відносно добре відтворюють геометричну форму неоднорідностей середньої складності, а також відносний контраст різних зон, але при формуванні зображень відомими алгоритмами, як правило, не вдається досягти необхідної чіткості. Проблема підвищення розрізняювальної здатності та чіткості формування зображення вирішується у даній роботі за рахунок аналітичного подовження спектру.

Відзначається, що для матеріалів, які характеризуються значним затуханням ультразвуку (наприклад, полімерно-композиційні матеріали мають аномально високе частотнозалежне затухання ультразвукових хвиль та складну багатозарову структуру),

традиційні методи та засоби ультразвукового ехо-імпульсного контролю не дають можливості отримати необхідну інформацію. Через затухання ехо-сигнал від дефекта може знаходитися нижче порогового рівня чутливості приймальної частини дефектоскопа. Проведений аналіз показує, що існуючі методи не вирішують проблеми виділення сигналів із шуму, абсолютна чутливість ультразвукових дефектоскопів обмежена "знизу" рівнем шумів приймальної частини. Збільшити амплітуду ехо-сигналів за рахунок підвищення амплітуди сигналу зондування не завжди вдається через обмеження, що накладаються на вихідний каскад генератора, а в ряді випадків (наприклад, в медичній діагностиці, контролі вибухонебезпечних речовин і т.д.) амплітуда сигналу обмежена властивостями об'єкта контролю. Таким чином, в ультразвуковому контролі існує проблема підвищення абсолютної чутливості контролю. Вирішується ця проблема в роботі за рахунок аналітичного подовження спектру та локально-інваріантної фільтрації.

Наступна проблема заключається в необхідності забезпечити високу розрізняльну здатність сигналів (в поздовжньому напрямі розповсюдження УЗ хвилі), наприклад, відбитих від сусідніх шарів при контролі багат шарових матеріалів. З більшито при цьому частоту зондування не вдається через зростання затухання УЗ хвиль в об'єкті контролю, тобто чутливість зменшується. Таким чином виникає протиріччя між розрізняльною здатністю (необхідно підвищувати частоту) та чутливістю (необхідно зменшувати частоту).

Наступною є проблема підвищення точності вимірювання часового положення ехо-сигналу, що виникає в ехо-імпульсній товщинометрії. В традиційних товщиномірах фіксація ехо-сигналу ведеться за переднім фронтом ехо-імпульсу. В матеріалах із значним затуханням ультразвуку форма вказаного імпульсу спотворюється, передній фронт затягується, що веде до появи похибки вимірювання. Подібні похибки зростають також через вплив завад. Все це обмежує застосування відомих приладів УЗК для контролю композитів. Шляхи вирішення цих проблем пропонуються в роботі за рахунок використання нового типу сигналів зондування - довготривалих радіоімпульсів із наступним вимірювання фазового зсуву сигналів несучої частоти радіоімпульсів.

Для цього в другому розділі 2 перш за все проведене математичне моделювання багатовимірних ультразвукових сигналів. Розглянута та проаналізована математична модель ультра-

звукового перетворювача (УЗП) з використанням так званої схеми Мезона. Отримані передаточні функції випромінювача і приймача в ехо-імпульсному режимі.

Проведене математичне моделювання ультразвукового поля у вільному від втрат середовищі (рис.1,2). Показано, що зміна тиску  $p$  від часу в точці простору  $\bar{r}$  пропорційна затриманому на час проходження звуку  $|\bar{r}|/c_0$  і відповідно  $x/c_0$  прискоренню  $dV_2/dt$  коливань від зовнішньої поверхні УЗП

$$p(\bar{r}, t) \approx \begin{cases} \rho_0 \bar{H}_{rad}(\bar{r}) \frac{\partial}{\partial t} [V_2(t - |\bar{r}|/c_0)] & \text{в дал. зоні поля УЗП} \\ \rho_0 \bar{H}_{rad}(\bar{r}) \frac{\partial}{\partial t} [V_2(t - x/c_0)] & \text{в фок. зоні поля УЗП} \end{cases} \quad (3)$$

де  $\bar{H}_{rad}(\bar{r})$  - локальна передаточна функція випромінювання (функція звукового пучка),  $c_0$  - швидкість поширення звуку,  $\rho_0$  - щільність матеріалу. На основі моделювання звукового поля у вільному від втрат середовищі отриманий розв'язок для локально-залежної функції імпульса відгука випромінювача УЗП. Виведені співвідношення для розрахунку параметрів УЗ сигналів в будь-якій точці об'єкта контролю. Отримані математичні залежності між параметрами ехо-сигналів та формою відбивача на основі моделювання ехо-сигналів при повному відбиванні та відбиванні від слабких неоднорідностей. Показано, що ділянка відбиття (в Лапласовій області) описується як

$$Y(s) = G(s) e^{-s(r_{01} + r_{02})/c_0} [U_1(s) - E(s)], \quad (4)$$

де  $s$  - змінна Лапласа,  $r_{01}$  та  $r_{02}$  - відповідно відстань від точки поверхні відбивача до випромінювача та приймача УЗ хвиль (рис.2), передаточна функція системи

$$G(s) = R(s) \frac{1}{4\pi^2 r_{01} r_{02}} \left(\frac{s}{c_0}\right)^2 \iint_{(\Lambda_1)} G_2(\bar{r}_2, s) d\bar{\Lambda}_2 \iint_{(\Lambda_n)} G_n(\bar{r}_n, s) d\bar{\Lambda}_n, \quad (5)$$

а функція відбивача

$$U_1(s) = \iint_{(\Lambda_1)} e^{-s(r_1 + r_n)/c_0} \bar{n}_1 d\bar{\Lambda}_1 \quad (6)$$

і функція помилки

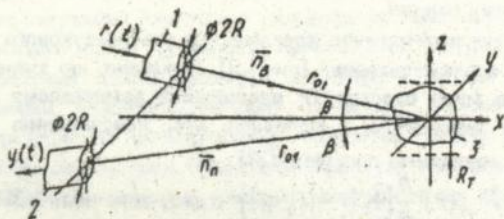


Рис.1. Ескіз побудови ультразвукового виміру:  
 1 - випромінювач, 2 - приймач, 3 - тіло відбивача

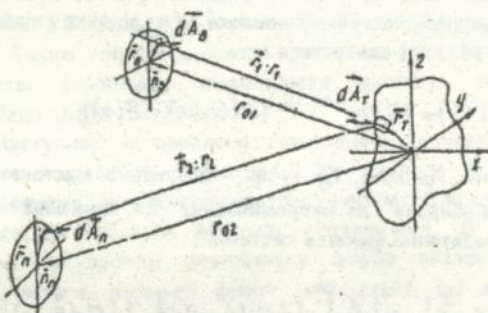


Рис.2. Ескіз побудови математичної моделі ультразвукового виміру

$$E(s) = \left[ \iint_{(A_s)} G_s(\bar{r}_s, s) dA_s \iint_{(A_n)} G_n(\bar{r}_n, s) dA_n \right]^{-1} \iint_{(A_s)} G_n(\bar{r}_n, s) \iint_{(A_s)} G_s(\bar{r}_s, s) \times \\ \times \iint_{(A_s)} e^{-s(\bar{r}_s + \bar{r}_n)/c_0} \left[ 1 - \frac{1}{\bar{n}_s \bar{n}_n} \frac{\bar{r}_1}{r_1} \frac{\bar{r}_2}{r_2} \frac{\bar{r}_{01}}{r_1} \frac{\bar{r}_{02}}{r_2} e^{-s(\Delta r_1 + \Delta r_2)/c_0} \right] \bar{n}_s d\bar{\lambda}_s d\bar{\lambda}_n d\bar{A}_n, \quad (7)$$

де  $\Delta r_1 = r_1 - r_{01} - \bar{n}_s \bar{r}_r$ ,  $\Delta r_2 = r_2 - r_{02} - \bar{n}_n \bar{r}_r$ .

Проаналізована похибка за рахунок лінеаризації, коли колова (сферична) хвиля апроксимується плоскою. Отримані умови зменшення вказаної похибки шляхом використання перетворювача зі зменшеними поверхнею випромінювання і поперечними розмірами, а також збільшення відстані від УЗП.

Показано, що формування розподілу так званих слабких неоднорідностей, коли в звичайному однорідному середовищі в обмеженому об'ємі V знаходиться середовище з локально зміненими параметрами (наприклад, для потреб медичної діагностики), відбувається аналогічно формуванню зображень неоднорідностей, які повністю відбивають УЗ хвилі. Але функція відбивача в рівнянні (5) буде мати вже дві складові частини: частотозалежну  $U_{rc}(s)$ , яка виникає внаслідок існування в точках простору відхилення швидкості звуку, і частину  $U_{rp}(s)$ , яка з'являється в результаті зміни щільності і залежить від положення падаючої хвилі у відношенні до градієнта щільності:

$$U_r(s) = U_{rc}(s) + U_{rp}(s) = \frac{s}{c_0} \int_{(x_0)} \iint_{(y_0, z_0)} f_c(\bar{r}_0) dy_0 dz_0 e^{-s(2x_0/c_0)} dx_0 + \\ + \frac{1}{2} \int_{(x_0)} \iint_{(y_0, z_0)} \frac{\partial \rho(\bar{r}_0)}{\partial x_0} dy_0 dz_0 e^{-s(2x_0/c_0)} dx_0. \quad (8)$$

де  $x_0, y_0, z_0$  - компоненти  $\bar{r}_0$ .

На основі отриманих результатів розроблені моделі реальних відбивачів (неоднорідностей). При цьому виведені функції відбивачів тіл обертання: плоского циліндра, плоского циліндра із східчастим виступом, конуса, конуса з поглибленням (пазом), внутрішнього конуса з пазом, та інших.

Запропоновано шляхи вирішення задачі підвищення завадостійкості та точності вимірювання часового положення ехо-сигналу при товщинометрії виробів зі значним затуханням ультразвуку за рахунок когерентних методів аналізу ехо-сигналів при зондуванні об'єктів контролю довготривалими радіоімпульсними УЗ сигналами. Показано, що випромінювання довготривалих радіоімпульсів (10-20 періодів несучої частоти) замість стандартних коротких імпульсів у традиційній УЗ товщинометрії (також і в дефектоскопії) дає вигреш у завадостійкості у 20-40 разів за рахунок зуження спектру прийнятих сигналів. Підвищенню завадостійкості при цьому сприяє також можливість значного збільшення енергії сигналів зондування та використання фазового методу вимірювання часового положення ехо-сигналу. Показано, що застосування відомих з радіотехніки методів вимірювання фазового зсуву радіоімпульсних сигналів при точності  $3 \cdot 10^{-5}$  дозволяє отримати вигреш у точності виміру товщини виробів на три-чотири порядки. При такому вимірюванні виникає необхідність визначення кумулятивного фазового зсуву  $\theta = n2\pi + \varphi$  (повного фазового набігу), що вирішується шляхом проведення виміру на двох близьких частотах  $\omega_1 = 2\pi f_1$  та  $\omega_2 = 2\pi f_2$  за умови незмінності  $n$ .

У третьому розділі розробляються можливості підвищення розрізняювальної здатності при цифровій обробці сигналів за рахунок фільтрації та аналітичного подовження спектру. Аналіз відомих методів інверсної та вінерівської фільтрації показує, що теоретично за рахунок використання оптимального фільтра Вінера (за критерієм мінімальності середньоквадратичної похибки між сигналом без завад та сигналом на виході фільтра) можна досягти підвищення розрізняювальної здатності приблизно вдвічі при відношенні сигнал/завада більше 50. Запропоновано використовувати локально-інваріантну фільтрацію з урахуванням властивостей функцій точкового та лінійного відбивачів (ФТВ та ФЛВ) в однорідному та неоднорідному середовищах. Оптимізовані спектральні характеристики ФТВ та ФЛВ для однорідних та неоднорідних середовищ дозволяють ефективно проводити локально-інваріантну фільтрацію і досягти підвищення розрізняювальної здатності до рівня оптимальної фільтрації. Розроблений алгоритм реалізації такої фільтрації для дискретизованих сигналів з допомогою ПЕОМ.

Показано, що розрізняювальна здатність ультразвукових систем інтроскопії зменшується також через те, що приймальна частина апаратури контролю може працювати лише в обмеженому

діапазоні частот. Таким чином частина спектру корисних сигналів втрачається. Вирішити проблему підвищення розрізняльної здатності шляхом отримання частин спектра сигналів, яких не вистачає, пропонується за допомогою аналітичного продовження спектра. В роботі доведено, що спектр обмеженої локальної функції є 2М-аналітичною функцією як в напрямі  $x$ , так і  $y$ , оскільки  $\omega_x$  і  $\omega_y$  (через обмеженість  $x$  і  $y$ ) аналітичні. Причому, якщо можна отримати цей спектр на основі вимірювань в одній площині локальних частот, то цей спектр може бути продовжений 2М-аналітично на всій площині. Тоді вже не має значення вздовж якої лінії координат відбувається це продовження, якщо навіть воно пов'язане з системою координат через аналітичне перетворення. Таким чином, з'являється можливість використовувати метод зворотної проєкції спільно з аналітичним подовженням спектра для формування двовимірного зображення за результатами обробки сигналів в системах УЗ контролю.

Проведений аналіз показує, що при цьому з'являється можливість досягнення теоретично найвищої розрізняльної здатності  $\rho \approx 1/2 f_c$ , що співпадає із оцінкою розрізняльної здатності системи, що має полосу пропускання  $2f_c$ . Досліджені можливості двовимірного формування зображення неоднорідностей на основі ехо-сигналів при проведенні ультразвукового контролю об'єкта під кінцевою множиною кутів. Для цього розроблений алгоритм формування зображень за допомогою частотно-обмежених локальних функцій. Враховано, що кожний ехо-сигнал має проєкцію  $h(\xi)$  шуканої локальної функції щільності відбиття  $\hat{f}(\rho, \varphi) = f(\xi, \eta)$ . Із ехо-сигналів, які отримують при вимірюванні під кінцевою множиною кутів,  $\hat{f}(\rho, \varphi)$  можна не формувати, якщо відомо, що ця функція локально обмежена і, таким чином, повинна мати 2М-аналітичний спектр. Виведене відповідне рівняння вимірювального перетворення і показані шляхи його розв'язку.

Розгляд джерел виникнення та аналіз найбільш характерних похибок - за рахунок лінеаризації, багаторазового відбивання (у випадку структурно-неоднорідних матеріалів, чи багат шарових середовищ), викривлення часового положення вікна відновлення, впливу завад, малих власних значень рівнянь розгортки, обмеженості поперечної розрізняльної здатності, за рахунок тіней, кінцевого числа кутів вимірювань та геометрії порядку проведення вимірювань підтверджує можливість використання розроблених

методів для формування зображень в системах ультразвукового неруйнівного контролю.

З метою аналізу переваг та недоліків формування зображень об'єктів методами комп'ютерної томографії (КТ), які на сьогодні інтенсивно розробляються в світовій практиці ультразвукового неруйнівного контролю в розділі 4 розглянута блок-схема (рис.3) загальної моделі УЗ системи отримання зображення. Ця модель, можна сказати, умовно охоплює всі концепції отримання зображень (звичайні способи формування В-зображень, УЗ комп'ютерна томографія, формування синтетичної апертури), які вимагають зовнішнього УЗП і середовища, яке їх зв'язує. За такою моделлю системи формування зображень можна встановити просторовий розподіл одного чи багатьох акустичних параметрів. Тут присутні всі компоненти в системно-теоретичному значенні лінійної системи, що дає можливість описати взаємозв'язок між функцією об'єкта та дійсною функцією зображення за допомогою інтегралу

$$g(\xi, \eta) = \iint_{-\infty}^{\infty} f(x, y)h(\xi, \eta, x, y)dxdy + n(\xi, \eta). \quad (9)$$

При цьому ядро  $h$  є так званою функцією зображення точки (ФЗТ). Науково-інженерне завдання побудови УЗ системи з формуванням зображень об'єктів контролю, яка реалізує таке рівняння, зводиться до оптимізації компонент 2 і 8, 12, 13 (за рис.3). За допомогою вказаної моделі проведений аналіз УЗ системи, що базується на ехо-імпульсному методі, та запропоновані можливості покращання якості зображення опорних точок. Функція зображення для випадку В-сканування

$$g(x, y) = \mu(x, y) ** [h_{xx}(x)h_y(-y)]. \quad (10)$$

де знак \*\* означає двовимірну згортку. Тобто, отримані за допомогою В-сканування функції зображення  $g(x, y)$  виникають на основі функції відбивача  $\mu(x, y)$  проведенням двовимірної лінійної фільтрації з локально-інваріантним ядром фільтрації. Осьова компонента  $h_x$  ядра залежить від електроакустичних властивостей УЗП, бічна  $h_y$  визначається властивостями УЗ поля. Мінус в аргументі  $h_y$  має лише формальне значення, тому що на практиці УЗП, а також  $h_y$ , симетричні відносно площини  $y=0$ .

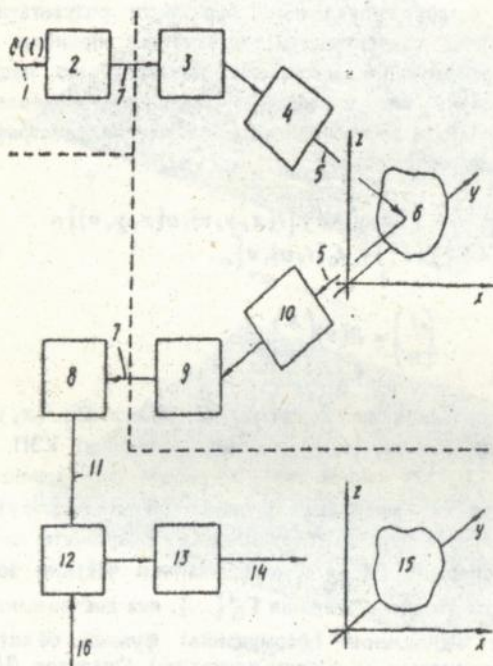


Рис. 3. Блок-схема узагальненої моделі УС системи отримання зображень:

- 1 - тригер; 2 - генератор сигналів; 3, 9 - УСП; 4 - звукове поле; 5 - звуковий тиск; 6, 15 - функція об'єкта; 7, 11 - електрична напруга; 8 - обробка сигналів; 10 - відбите поле; 12 - побудова зображення; 13 - обробка зображення; 14 - яскравість; 16 - координати УСП

Розроблений спосіб підвищення розрізняювальної здатності, що базується на процедурі підсумовування В-зображень у різних напрямках. Він дозволяє аналітично передрікти результати, а також обчислити і скоректувати систематичні похибки, які виникають при формуванні зображень. Показано, що подібна обробка В-зображень має схожість з рівняннями відновлення двовимірних функцій за їх проєкціями (комп'ютерна томографія). При цьому функція зображення

$$b(x, y, v) = f(x, y) * f\{t(x, y, v), u(x, y, v)\} = \Gamma\{f(x, y), f_0(t, u), v\}. \quad (11)$$

де

$$\begin{pmatrix} t \\ u \end{pmatrix} = R(v) \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}.$$

$R(v)$  -  $R$ -операція звичайної комп'ютерної томографії,  $(x, y)$  - система координат об'єкта,  $(t, u)$  - система координат УЗП,  $v$  - аспекти кут,  $\Gamma\{\dots\}$  - однозначне інтегральне перетворення в локальній області, яке відображує функцію об'єкта  $f(x, y)$  як функцію  $b(x, y, v)$ . Ця функція трьох змінних є сукупністю частин зображення, а операція  $\Gamma\{\dots\}$  - вимірюванням частини зображення. Шуканою є зворотна операція  $\Gamma^{-1}\{\dots\}$ , яка дає можливість здійснити точне відновлення (формування) функції об'єкта з  $b(x, y, v)$  (або оптимально за певним критерієм). Оператор  $R\{\dots\}$  можна розуміти як особливий випадок оператора  $\Gamma\{\dots\}$ . Тобто показано, що відновлення функції об'єкта за її проєкціями (звичайна комп'ютерна томографія) може розглядатися як особливий випадок більш загального рівняння формування (відновлення) функції об'єкта із частин зображень.

Розглянуті проблеми технічної реалізації запропонованої узагальненої моделі. Отримані співвідношення для розрахунку необхідних інтервалів дискретизації частин зображень. Мінімальний інтервал аспектичних кутів, як показали результати моделювання, визначається із співвідношення

$$\Delta v < 2 \arcsin(\omega_0 / \omega_{oc}). \quad (12)$$

де  $\omega_0$ ,  $\omega_{oc}$  - граничні колові частоти функції зображення в осьовому та бічному напрямках. Так, наприклад, за  $\omega_{oc} / \omega_0 = 5$  отримує-

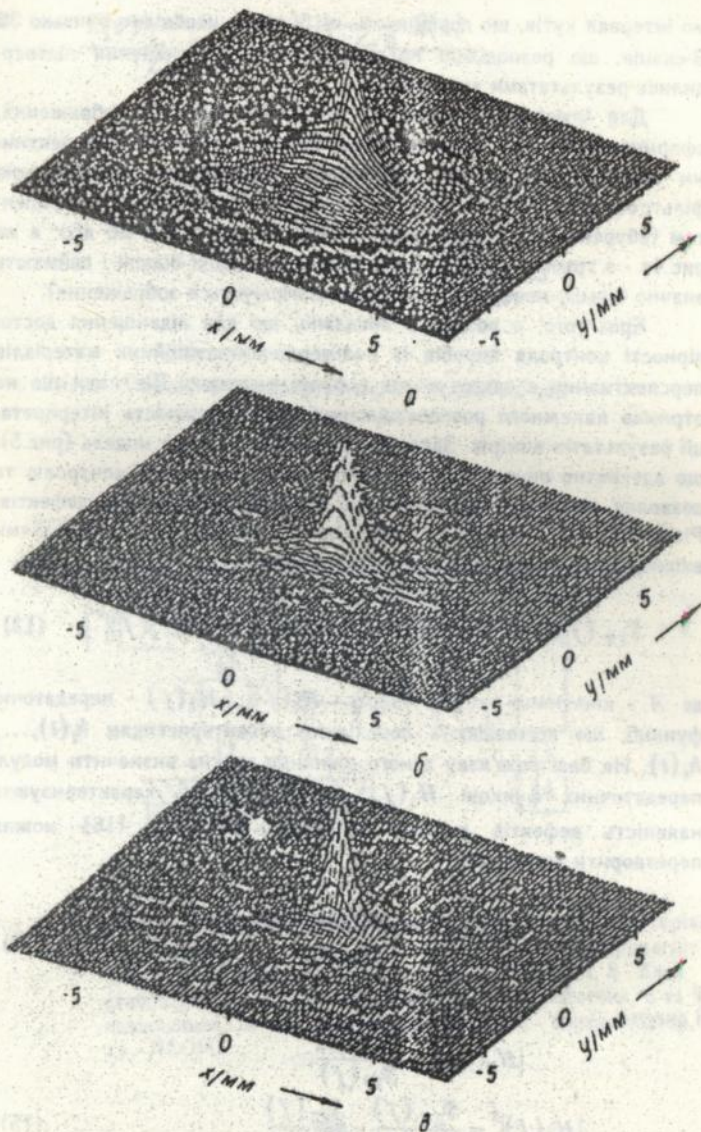


Рис. 4. Сумарне зображення та відфільтроване сумарне зображення з допомогою нерекурсивних фільтрів: б - із 31 коефіцієнтом, в - із 3 коефіцієнтами.

мо інтервал кутів, що дорівнюють  $\pi/15$ , тобто необхідно близько 30 В-сканів, що розподілені по всьому колу. Ці значення підтвердились результатами експериментів.

Для ілюстрації на рис.4,а подається сумарне зображення, сформоване на базі змодельованого В-зображення за 45 аспектичними кутами. На рис.4,б зображений результат з попередньою фільтрацією за допомогою нерекурсивного фільтра з 31 коефіцієнтом (збурення не перевищують ступінь квантування 36 дБ), а на рис.4в - з трьома коефіцієнтами (збурення вдвічі більші і займають значно більшу поверхню; відповідно погіршується зображення).

Крім того, в розділі 5 показано, що для підвищення достовірності контролю виробів із полімерно-композиційних матеріалів перспективним є також метод вільних коливань. Він поки що не отримав належного розповсюдження через складність інтерпретації результатів вимірів. Запропонована математична модель (рис.5), що адекватно описує перетворення сигналу в об'єкті контролю та дозволяє виділити параметри, що зв'язані з наявністю дефектів. Рівняння, що описує зв'язок між спектральними щільностями вхідного та вихідного сигналів такої моделі

$$S_{ZZ}(f) = A^2 |H_1(f)|^2 |H_3(f)|^2 \left[ |H_2(f)|^2 + |H_4(f)|^2 \right], \quad (13)$$

де  $A$  - кінетична енергія удара;  $H_1(f), \dots, H_4(f)$  - передаточні функції, що відповідають перехідним характеристикам  $h_1(t), \dots, h_4(t)$ . На базі розв'язку даного рівняння можна визначити модулі передаточних функцій  $H_3(f)$  та  $H_4(f)$ , які характеризують наявність дефектів у зоні контролю. Рівняння (16) можна перетворити до вигляду

$$\begin{cases} S_{YY}(f) = A^2 |H_1(f)|^2 |H_3(f)|^2, \\ S_{ZZ}(f) = S_{YY}(f) \left[ |H_2(f)|^2 + |H_4(f)|^2 \right]. \end{cases} \quad (14)$$

і знайти

$$\begin{cases} |H_3(f)|^2 = \frac{S_{YY}(f)}{S_{YY}(f)}, \\ |H_4(f)|^2 = \frac{S_{ZZ}(f)}{S_{YY}(f)} - \frac{S_{ZZ}(f)}{S_{YY}(f)}. \end{cases} \quad (15)$$

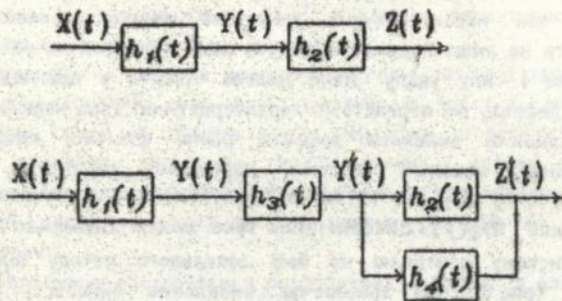


Рис. 5. Моделі: а - бездефектної, б - дефектної зон

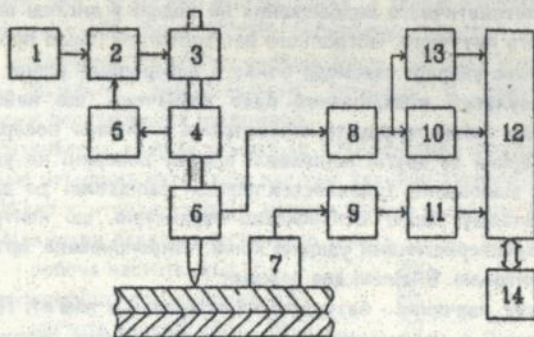


Рис. 6. Структурна схема системи контролю композиційних матеріалів:

1 - генератор, 2 - підсилювач потужності, 3 - електромагніт ударного вібратора, 4 - датчик лінійної швидкості, 5 - блок стабілізації, 6 - датчик імпульса сили, 7 - п'езодатчик, 8 та 9 - підсилювачі, 10 та 11 - ФНЧ, 12 - АЦП, 13 - синхронізатор, 14 - ПЕОМ.

Розв'язок (18) показує, що для визначення передаточних функцій, які характеризують наявність дефектів, необхідно вимірювати не лише параметри відгука зони контролю на ударний вплив, але і силу удару. Дана модель ставить у відповідність кожному дефекту дві передаточні характеристики. Така надмірність дає можливість виявляти дефекти різної фізичної природи: підповерхневі, локальні розломи, порушення структури, що викликає появу  $H_3(f)$ , та глибинні дефекти типу непоклеїв, розшарувань -  $H_4(f)$ . Використання такої моделі дозволило побудувати систему контролю на базі локального методу вільних коливань (рис.6), що забезпечує виявлення більшості типів дефектів, які характерні для об'єктів контролю із полімерно-композиційних матеріалів.

Подальший аналіз ударно-акустичного методу з метою розширення його функціональних можливостей показав шляхи вирішення проблеми неруйнівного контролю твердості поверхневого шару виробів із конструкційних сплавів. Такий висновок виник в результаті математичного моделювання на моделі у вигляді шаристо-однорідного пружного, ізотропного напівпростору. Було промодельовано процес ударної взаємодії бойка з поверхнями різної твердості. В результаті моделювання було визначено, що найбільш чутливими до зміни твердості параметрами коливань поверхні є амплітуда першої та другої напівхвилі відгуку поверхні на ударне збудження і відношення тривалостей першої напівхвилі до другої. На основі аналізу задачі ідентифікації параметрів, що контролюються, за характеристиками ударної хвилі, запропонована загальна методика контролю. Виділені два режими:

1 режим: навчання - базується на створенні в пам'яті ПЕОМ сіточної функції з нерівномірним кроком, яка описує залежність інформативних параметрів кривої коливань від твердості поверхні деталей.

2 режим: визначення параметрів твердості поверхні за вимірними інформативними характеристиками кривої коливань - базується на знаходженні аргументу еталонної залежності. Вона задана сіточною функцією, для якої зважене середньоквадратичне відхилення вимірних інформативних параметрів параметрів коливань від еталонних, є мінімальним.

Таким чином, з'являється можливість побудови системи контролю, що базується на використанні описаної різновидності методу вільних коливань за режимом "навчання", що дозволяє

контролювати таку важливу фізико-механічну характеристику як твердість поверхневого шару деталей.

Розроблена система контролю, основні технічні характеристики та короткий опис якої наведені в додатку, дозволили вирішити задачі експериментальної перевірки теоретичних положень, визначити оптимальні конструктивні і схемні рішення, оптимізувати алгоритм ідентифікації твердості поверхневого шару деталей, дослідити вплив дестабілізуючих факторів на точність вимірювань.

Практичне застосування розроблених способів та алгоритмів обробки сигналів пропонується реалізовувати за допомогою розробленого та коротко описаного в додатку комплексу програм цифрової обробки дискретизованих сигналів NUMERI-2 (його перша версія опублікована як додаток до підручника: Шрюфер Е. Обробка сигналів / За ред. В.П.Бабака. - К.: Либідь, 1992. - 296 с.). Він забезпечує обробку залежностей, які задаються як в аналітичній формі, так і у вигляді файлів даних, а також вводяться під час експерименту. Діалог з ПЕОМ забезпечує простий та зручний спосіб формування та обміну наборів даних, що дає змогу будувати моделі складних вимірювальних процесів з різноманітними способами перетворення інформації.

Розроблена вперше в країнах СНД система ультразвукового контролю нерудних матеріалів має такі технічні характеристики:

Об'єкт контролю - граніт, мрамур (блоки розміром 2x2x2 м<sup>3</sup>)

Параметри електроакустичного тракту

- |                              |     |
|------------------------------|-----|
| - робоча частота, кГц        | 250 |
| - коефіцієнт підсилення, дБ  | 60  |
| - частота дискретизації, МГц | 20  |

Розрізнявальна здатність

- |                               |           |
|-------------------------------|-----------|
| - в поздовжньому напрямку, мм | 50 (10)*  |
| - в поперечному напрямку, мм  | 200 (50)* |

Різновид сканування

ручний, механічний

Тип зображення

A,B,C

(\*) - за рахунок цифрової обробки сигналів

Для контролю виробів із технічної кераміки розроблена автоматизована система контролю, що забезпечує такі технічні характеристики:

Параметри електроакустичного тракту

- |                             |     |
|-----------------------------|-----|
| - робоча частота, МГц       | 100 |
| - коефіцієнт підсилення, дБ | 60  |

· діапазон аттенюатора, дБ	0...40
Розрізнявальна здатність, мкм	20
Різновид сканування	механічний
Тип зображення	A, B, C

Для контролю виробів із композиційних матеріалів розроблена автоматизована система контролю на базі комплексного методу вільних коливань. При цьому запропоновано проводити вимірювання спектрів вільних коливань зони контролю та сили ударної взаємодії, а як узагальнений інформативний параметр використати передаточну функцію зони контролю. При створенні апаратури контролю вирішені питання нанесення механічного удару з нормованою енергією, вимірювання параметрів пружних коливань об'єктів контролю та сили ударної взаємодії, обробка інформативних сигналів в часовій та частотних областях, а також можливість автоматизованої класифікації дефектів та винесення рішення про придатність виробів. Розроблене програмне забезпечення дозволяє ефективно використовувати систему для дослідницьких та виробничих завдань.

Для неруйнівного контролю твердості поверхневого шару деталей із конструкційних сплавів розроблена система автоматизованого контролю, що забезпечує можливість контролю твердості в діапазоні 20-70 од. HRC з абсолютною похибкою вимірювальної частини  $\pm 0,1$  од. HRC. Достовірність контролю за результатами обчислень та експериментами становить 95 відсотків.

## ВИСНОВКИ

1. На основі проведеного аналізу розроблені моделі взаємодії УЗ сигналів та полів з об'єктами контролю, з допомогою яких встановлена залежність між параметрами УЗ перетворювачів, УЗ хвиль та матеріалів об'єктів.

2. Запропоновані шляхи підвищення точності ультразвукових засобів товщинометрії за рахунок амплітудно-фазового аналізу сигналів. Вперше в практиці неруйнівного контролю для зондування об'єкта контролю використані відносно довгі радіоімпульси з наступним вимірюванням кумулятивного фазового накопичення, що дозволяє зменшити амплітуду сигналів зондування в десятки разів та підвищити точність визначення товщини об'єктів із матеріалів зі значним затуханням ультразвуку на два-три порядки.

3. Проаналізовані можливості фільтрації для покращення якості зображень шляхом урахування властивостей зображень в залежності від характеристик неоднорідностей. Сформульовані рекомендації по поліпшенні характеристик таких фільтрів.

4. Розроблені способи підвищення розрізняювальної здатності ультразвукових систем неруйнівного контролю шляхом цифрової локально-інваріантної фільтрації, адекватної об'єкту контролю та аналітичного подовження спектру при цифровій обробці ехосигналів. Узагальнено досвід досліджень при формуванні багатовимірних зображень неоднорідностей внутрішньої структури об'єктів контролю на основі цифрової обробки УЗ сигналів та розроблена методика визначення необхідного числа напрямків прозвучування. Це відкриває нові можливості в практиці неруйнівного контролю з візуалізацією дефектів за рахунок підвищення чіткості зображення (шляхом підвищення розрізняювальної здатності в 4-6 разів).

5. Виведена узагальнена модель функціонування УЗ системи неруйнівного контролю з візуалізацією зображень. На основі аналізу методів комп'ютерної томографії теоретично розроблені та експериментально підтверджені шляхи покращення розрізняювальної здатності таких систем, що дало можливість узагальнити концепцію комп'ютерної томографії та визначити шляхи її технічної реалізації з використанням розроблених алгоритмів цифрової обробки дискретизованих сигналів.

6. Розроблені та впроваджені в практику неруйнівного контролю прилади та системи контролю якості матеріалів на основі цифрової обробки УЗ сигналів для цілей формування зображення неоднорідностей внутрішньої структури об'єктів контролю. Впровадження розроблених засобів контролю дозволяє підвищити якість продукції, скоротити витрати, пов'язані з прийняттям необґрунтованих висновків про дефектність виробів.

7. Теоретично та експериментально показана доцільність використання методу вільних коливань для підвищення якості контролю полімерно-композиційних матеріалів. Отримано узагальнений інформативний параметр - передаточну функцію зони контролю. При створенні апаратури контролю вирішені питання нанесення механічного удару з нормованою енергією, вимірювання параметрів пружних коливань об'єктів контролю та сили ударної взаємодії, обробка інформативних сигналів в часовій та частотних

областях, а також можливість автоматизованої класифікації дефектів та винесення рішення про придатність виробів.

8. Запропонований та досліджений спосіб контролю твердості поверхневого шару виробів на базі методу вільних коливань з використанням навчаючої вибірки, що дозволило створити апаратуру неруйнівного контролю твердості деталей.

Основні результати дисертації опубліковані в роботах:

1. Бабак В.П. Обработка сигналов при формуванні зображень об'єктів (Монографія). - К.: Либідь, 1994. - 192 с.

2. Маєвський С.М., Бабак В.П., Шербак Л.М. Основи побудови систем аналізу сигналів в неруйнівному контролі. - К.: Либідь, 1993. - 200 с.

3. Структурно-логічні методи обробки інформації в дефектоскопії/За ред. В.П.Бабака. - К.: ІСДО, 1994. - 104 с.

4. Сучасні методи та засоби неруйнівного контролю з використанням статистичної обробки сигналів/За ред. В.П.Бабака. - К.: ІСДО, 1994. - 132 с.

5. Бабак В.П. Контрольно-измерительные системы для неразрушающего контроля. К.: КПИ, 1987. - 105 с.

6. Бабак В.П. Автоматизированные системы неразрушающего контроля на базе микропроцессоров и микро-ЭВМ. - К.: УМК ВО, 1988. - 77 с.

7. Бабак В.П. Социальные и экономические аспекты применения неразрушающего контроля в народном хозяйстве. - К.: Знание, 1987. - 24 с.

8. Бабак В.П. Формирование изображения дефектов при ультразвуковом контроле//Вестник Киев. политехн. ин-та. Серия "Приборостроение". - К., 1992. Вып. 22. - С. 3-8.

9. Бабак В.П. Возможности обработки сигналов при формировании изображений в компьютерной томографии//Вестник Киев. политехн. ин-та. Серия "Приборостроение". - К., 1993. Вып. 23. - С. 23-30.

10. Бабак В.П. Использование аналитического продолжения спектра при обработке результатов ультразвукового контроля//Вестник Киев. политехн. ин-та. Серия "Приборостроение". - К., 1993. Вып. 23. - С. 12-17.

11. Бабак В.П. Система контроля композиционных материалов // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 1993, №2. - С.96.

12. Бабак В.П., Ерёменко В.С., Прикладовский О.С. Система контроля композиционных материалов методом свободных колебаний // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 1994, №2. - С.37-42.

13. Бабак В.П., Зозуля В.И., Прикладовский О.С., Авраменко О.В. Автоматизированный ультразвуковой дефектоскоп с микропроцессорным управлением // Контрольно-измерительная техника. - 1989. Вып.46. - С. 41-44.

14. Бабак В.П., Лиховид С.Г., Прикладовский О.С., Рыбин И.И. Комплекс аппаратуры для автоматизированного неразрушающего контроля изделий машиностроения // Технология та автоматизация машинобудування. - 1992. Вип. 49. - С. 3-7.

15. Бабак В.П., Еременко В.С. Математическое моделирование метода свободных колебаний // Вестник Киев. политехн. ин-та. серия "Приборостроение". - К., 1993. Вып. 23. - С. 18-23.

16. Бабак В.П., Прикладовский О.С. Микропроцессорная система для автоматизированного ультразвукового контроля сварных соединений // Вестник Киев. политехн. ин-та. Серия "Электророзенергетика". - К., 1989. Вып. 26. - С.37-41.

17. Babak V.P. Ein Prüfverfahren für Verbundwerkstoffe/ Internationale Symposium. Technische Universität München, 1993. - S.13.1-13.11.

18. Babak V.P. Möglichkeiten zur Signalverarbeitung bei der Bildung von Objektdarstellungen in der Computertomographie/ Internationale Symposium. Technische Universität München, 1993. - S.13.12-13.20.

19. Babak V.P. Bildung von Defektdarstellungen bei der Ultraschallprüfung/ Internationale Symposium. Technische Universität München, 1993. - S. 13.21-13.34.

20. Бабак В.П. Формирование изображений объектов при ультразвуковом контроле по неполным данным / В кн.: Радиотехнические системы (навигации, связи), средства измерений, новые информационные технологии. Труды междунар. научно-техн. конф. - Красноярск, 1992. Ч.1. - С. 21-22.

21. Антонюк В.М., Бабак В.П., Белов Б.В. Автоматизированный контроль физико-механических параметров изделий из метал-

лов/В кн.: Проблемы комплексной автоматизации. Труды IV Междунар. научно-техн. конф. - К., 1990. - С. 18-22.

22. Антонюк В.М., Бабак В.П., Белов Б.В., Щербак Л.Н. Автоматизированная система контроля упрочняющего слоя деталей/В кн.: Проблемы комплексной автоматизации. Труды IV Междунар. научно-техн. конф. - К., 1990. - С.22-24.

23. Бабак В.П., Ерёменко В.С. Автоматизированная система контроля механических параметров композиционных материалов/В кн.: Методы и средства измерения механических параметров в системах контроля и управления. Труды Всесоюзной научно-техн. конф. - Пенза, 1992. - с. 79-81.

24. Бабак В.П., Прикладовский О.С. Аппаратура и алгоритмы обработки информации при измерении параметров неоднородностей объектов/В кн.: Радиотехнические системы (навигации, связи), средства измерений, новые информационные технологии. Труды междунар. научно-техн. конф. - Красноярск, 1992. Ч.1. - С.23-24.

25. Бабак В.П., Прикладовский О.С. Ультразвуковой томограф для контроля изделий из керамики/В кн.: Приборы и методы неразрушающего контроля. - К., 1989. - С. 10-11.

26. Бабак В.П., Прикладовский О.С. Метод формирования изображений при ультразвуковом исследовании биологических объектов/В кн.: Новые возможности современного медицинского приборостроения. Сб. трудов научно-техн. конф. - К., 1991. - С. 57-58.

27. Бабак В.П. Математическое моделирование ультразвуковых систем формирования изображений объектов контроля/В кн.: Применение вычислительной техники и математических методов в научных исследованиях. Тезисы докл. научно-техн. конф. - К., 1991. - С. 19.

28. Бабак В.П. Методы и алгоритмы формирования изображения объектов при ультразвуковом контроле по неполным данным/В кн.: Измерительная техника в технологических процессах и конверсии производств. Тезисы докл. научно-техн. конф. стран СНГ. - Хмельницкий, 1992. - С. 15.

29. Бабак В.П. Комплекс программ для цифровой обработки сигналов/В кн.: Физические методы и приборы неразрушающего контроля для технической и медицинской диагностики. Тезисы докл. научно-техн. конф. - Севастополь, 1993. - С. 59-60.

30. Бабак В.П. Метод и аппаратура контроля изделий из полимерно-композиционных материалов/В кн.: Физические методы и приборы неразрушающего контроля для технической и медицин-

ской диагностики. Тезисы докл. научно-техн. конф. - Севастополь, 1993. - С. 48.

31. Бабак В.П. Автоматизированный контроль структурно-неоднородных материалов/В кн.: Автоматизация методов неразрушающего контроля качества. Тезисы докл. научно-техн. конф. - Славское, 1994. - с. 25-26.

32. Бабак В.П. Компьютерная обработка сигналов/В кн.: Компьютерные технологии в промышленности. Тезисы докл. междунар. научно-техн. конф. - Песчаное, 1994. - С. 23.

33. Бабак В.П. Компьютерная система обработки информации при контроле изделий из полимерно-композиционных материалов/В кн.: Проблемы и перспективы развития сертификации промышленной продукции. Тезисы докл. научно-техн. конф. - Сколе, 1995. - С. 10-11.

34. Бабак В.П. Ультразвуковая дефектоскопия технологической оснастки и инструмента с использованием амплитудно-фазовой обработки сигналов/В кн.: Оснастка - 95. Тезисы докл. научно-техн. конф. - К., 1995. - с. 3.

35. Бабак В.П., Прикладовский О.С. Обработка информации при ультразвуковом контроле нерудных материалов/В кн.: Застосування обчислювальної техніки та математичних методів в наукових дослідженнях. Зб. доп. наук.-техн. конф. - К., 1992. - С. 20-21.

36. Бабак В.П., Ерёмченко В.С. Алгоритмы обработки сигналов при дефектоскопии материалов/В кн.: Застосування обчислювальної техніки та математичних методів в наукових дослідженнях. Зб. доп. наук.-техн. конф. - К., 1992. - С. 18-19.

37. А.с. №892346 (СССР) МКИ G01R 25/08/Бабак В.П. - Оpubл. в БИ №47, 1981.

38. А.с. №1030743 (СССР) МКИ G01R 25/00/Бабак В.П. - Оpubл. в БИ №27, 1983.

39. А.с. №1239626 (СССР) МКИ G01R 25/00/Бабак В.П., Ванюрихин А.И., Маевский С.М. - Оpubл. в БИ №23, 1986.

40. А.с. №1257561 (СССР) МКИ G01R 25/00/Бабак В.П., Ванюрихин А.И. - Оpubл. в БИ №34, 1986.

41. А.с. №1265646 (СССР)/Бабак В.П., Ванюрихин А.И. - Оpubл. в БИ №39, 1986.

42. А.с. №1277015 (СССР) МКИ G01R 25/04/Бабак В.П., Ванюрихин А.И., Маевский С.М. - Оpubл. в БИ №46, 1986.

43. А.с. №1307384 (СССР) МКИ G01R 25/00/Бабак В.П., Ванюрихин А.И. - Оpubл. в БИ №16, 1987.

#### Аннотация

Бабак В.П. Методы повышения разрешающей способности ультразвуковых систем неразрушающего контроля.

Диссертация из области научной степени доктора технических наук по специальности 05.11.13 - приборы и методы контроля и защиты окружающей среды, веществ, материалов и изделий, Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт", Киев, 1995.

Защищается 60 научных работ, в том числе монография и 15 авторских свидетельств, которые содержат теоретические исследования и разработку путей повышения разрешающей способности и способов улучшения качества изображения ультразвуковых систем интроскопии путем цифровой обработки отраженных сигналов с учетом частотных характеристик среды объекта контроля, за счет применения в качестве зондирующих сигналов длительных радиоимпульсов с последующей амплитудно-фазовой обработкой эхо-сигналов, а также аналитического продолжения спектра и локально-инвариантной фильтрации. Предложены пути повышения метрологических характеристик локального метода свободных колебаний и использования его для определения физико-механических характеристик материалов. Разработаны и внедрены ряд приборов и систем контроля, в том числе с формированием изображений неоднородностей внутренней структуры объекта, а также комплекс программ цифровой обработки дискретизированных сигналов.

#### Annotation

Babak V.P. Methods of increase resolving power of control ultrasonic unraged systems.

Doctoral technological sciences dissertation by speciality 05.11.13 - instruments and control methods and defense of nature, matters, materials and articles, the National Technical University of Ukraine "Kiev Polytechnic Institute", Kiev, 1995.

60 scientific works including 1 monograph and 15 autor's certificates are defended. These works contain theoretical investigations and working out of ways of increasing ability and methods for the improvement of the quality of the reflection of ultrasonic introscopy systems by means of the digital treatment of the reflected signals with the taking into account of frequency characteristics of the enviroment of the control object at the expense of the use of the prolonged radioimpulses as the sounding signals with the further amplitude-phase treatment of echo-signals and also with the analitical prolongation of the spektrum and local-invariant filtration. The ways of increasing of metrologikal characteristics of the local methods of free vibrations and using them for the determination of physics-mechanics characteristics of materials are suggested in this thesis. The number of control systems including the instruments with the forming of the reflection of the heterogeneities of the internal structure of the object and also the complex of programmes of the digital signals are worked out and implemented into practice by the autor of this scientific thesis.

#### Ключові слова:

ультразвук, неруйнівний контроль, розрізнявальна здатність, формування зображення.

---

Підписано до друку 26.05.95. Формат 60×84/16. Папір друкар. Офсетний друк. Ум. фарбовід. 8. Ум. друк. арк. 1,86. Обл.-вид. арк. 2,0. Тираж 100 прим. Замовлення № 102-1. Вид. № 242/III.

---

Видавництво КМУЦА.  
252058. Київ-58, проспект Космонавта Комарова, 1.

289538

AB 32.568

**AB 32.568**