

Національний університет “Львівська політехніка”

ПАВИЧ Наталія Ярославівна

УДК 004.942:534-8

**МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЮ ПРУЖНИХ
СЕРЕДОВИЩ З ОБ’ЄМНИМИ НЕОДНОРІДНОСТЯМИ**

01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Львів - 2002

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Національному університеті “Львівська політехніка” Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, с.н.с.

Ємець Володимир Федорович,

Національний університет “Львівська політехніка”,
професор кафедри “Електронні обчислювальні машини”

Офіційні опоненти : доктор фізико-математичних наук, професор

Яворський Ігор Миколайович,

Фізико-механічний інститут ім. Карпенка НАН України,
зав. відділом відбору та обробки статистичних даних;

кандидат технічних наук, доцент

Березька Катерина Миколаївна,

Тернопільська академія народного господарства
доцент кафедри економіко-математичних методів і моделей

Провідна установа: Державний науково-дослідний інститут

інформаційної інфраструктури Державного комітету
зв'язку та інформатизації і НАН України (м.Львів),
відділ інформаційних технологій та систем

Захист відбудеться 30 серпня 2002 року о 16 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.05 у Національному університеті “Львівська політехніка” за адресою: 79013, вул. С.Бандери, 12, м. Львів-13.

З дисертацією можна ознайомитись у науковій бібліотеці Національного університету “Львівська політехніка” за адресою: вул. Професорська, 1, м. Львів-13, 79013.

Автореферат розісланий 29 липня 2002 р.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради,

доктор технічних наук

Федасюк Д.В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Важливою проблемою при виготовленні та експлуатації різноманітних елементів конструкцій і систем, зокрема елементів атомних реакторів, виробів аерокосмічної галузі, хімічної промисловості тощо, є виявлення та ідентифікація прихованих внутрішніх дефектів типу тріщин, порожнин та різного типу неоднорідностей. Вирішення такої проблеми покладається на спеціальні засоби неруйнівного контролю, більшість із яких забезпечують лише виявлення наявності останніх та ґрунтуються на акустичній моделі деформівного середовища. В той же час для багатьох випадків важливо вміти інтерпретувати дані неруйнівного контролю з метою встановлення геометричних та фізико-механічних характеристик неоднорідностей. Складність даної проблеми обумовлена тим, що не існує простих аналітичних залежностей між шуканими характеристиками розсіювачів та параметрами, що вимірюються безпосередньо.

Для контролю пружних середовищ найефективнішими є методи, що використовують ультразвукові хвилі. При цьому процес розповсюдження ультразвукових хвиль в середовищі, їх дифракція на неоднорідностях характеризується специфічними закономірностями змін параметрів полів ультразвукових хвиль. Залежності між характеристиками дефектів та розсіяних полів описуються складними аналітичними співвідношеннями. Виявлення та дослідження цих залежностей є важливою та актуальною задачею, вирішення якої сприяє подальшому розвитку методів та засобів неруйнівного контролю якості пружних середовищ та конструкцій.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота безпосередньо пов'язана з виконанням держбюджетної теми у Національному університеті “Львівська політехніка” “Інтелектуалізована вимірвальна система” (1999-2000 рр., номер держреєстрації 0198U007858) та з виконанням у Львівському науково-дослідному радіотехнічному інституті госпдоговірної теми “КОЛЬЄ” (1998-2000 рр., номер держреєстрації 0197И017576).

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є побудова математичної моделі ультразвукового неруйнівного контролю пружних середовищ з об'ємними неоднорідностями та розробка методів дистанційного визначення геометричних параметрів неоднорідностей за характеристиками розсіяння полів пружних хвиль.

Мета досягається розв'язанням таких задач:

- побудовою математичної моделі процесів розповсюдження ультразвукових хвиль в пружному півпросторі та їх дифракції на об'ємних неоднорідностях;
- розробкою ефективних підходів до розв'язання проблеми дистанційного визначення форми локальної неоднорідності за характеристиками розсіяння, заданими у хвильовій зоні розсіювача;

- алгоритмізацією запропонованих методів із врахуванням об'єму обчислювальної роботи, необхідної для їх числової реалізації, та проведенням числових експериментів на модельних прикладах;
- розробкою структурних схем технічних засобів для моделювання процесів ультразвукового контролю пружних середовищ.

Об'єкт дослідження – пружні середовища та елементи конструкцій.

Предмет дослідження – моделі процесів ультразвукового контролю пружних середовищ з об'ємними неоднорідностями та встановлення закономірностей між параметрами неоднорідностей та розсіяними хвильовими полями.

Методи досліджень. З метою моделювання даних розсіяння використано T-матричний метод, перетворення Фур'є та методи інтегральних рівнянь розв'язування основних задач теорії пружності усталених коливань для півпростору, які, в свою чергу, є наслідком співвідношення Бетті для безмежної області. Методологія реконструкції форми неоднорідності ґрунтується на схемах розв'язування нелінійних некоректних задач (побудова нормальних псевдорозв'язків та регуляризуючих операторів, метод регуляризації Тихонова, принцип ітеративної регуляризації на основі методу Ньютона-Канторовича), теорії катастроф, методі стаціонарної фази.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Розроблено математичну модель типових процесів ультразвукового контролю пружних середовищ з об'ємними неоднорідностями, що враховує, на відміну від відомих, фізику дифракційних явищ. В запропонованій моделі: середовище моделюється пружним півпростором; модель зондуючої ультразвукової хвилі побудовано як результат дії вектора нормальних напружень на деякій ділянці поверхні півпростору вільного від напружень; взаємодія зондуючої ультразвукової хвилі з розсіювачем змодельована на основі методу “нульового поля”; зв'язок розсіяного поля із вихідним сигналом приймача змодельовано з використанням електромеханічної аналогії Аулда.
2. Розвинуто асимптотичний метод визначення форми поверхні замкненої неоднорідності типу порожнини або абсолютно жорсткого включення в області високих частот зондування, що ґрунтується на алгоритмі відображення точок поверхні розсіювача на точки гаусової сфери з подальшим визначенням відповідних рівнянь опорних площин, комп'ютерна реалізація якого забезпечує відтворення форми дефекту конструкційного елемента.
3. Запропоновано новий чисельно-аналітичний алгоритм дистанційного визначення форми порожнини або пружного включення, використовуючи дані моностатичного низькочастотного розсіяння ультразвукових хвиль, ґрунтуючись на схемах розв'язування нелінійних некоректних задач, а саме на методі Ньютона – Канторовича та принципі ітеративної регуляризації.

Практичне значення отриманих результатів:

- розроблена математична модель процесів ультразвукового контролю пружних середовищ з об'ємними неоднорідностями дозволяє підвищити ефективність проведення натурних експериментів, запропоновані методи дистанційного визначення форми поверхонь об'ємних неоднорідностей у пружному середовищі є методологічною основою для покращення характеристик існуючих та створення нових засобів неруйнівного контролю, розширяють функціональні можливості цих засобів та дозволяють пряме відтворення форми об'ємної неоднорідності;
- розроблена імітаційна модель системи контролю на базі сучасних комп'ютерних засобів та технологій забезпечує високу обчислювальну продуктивність проведення дослідницького експерименту.

Особистий внесок здобувача. Всі основні положення дисертації, винесені на захист, розроблені автором самостійно. У друкованих працях, написаних у співавторстві, авторів дисертації належать: виконання модельних обчислювальних експериментів, побудова моделей та розробка відповідних методів ультразвукового контролю пружних середовищ з об'ємними неоднорідностями [1,2,5,7,9,11,12], вдосконалення алгоритмів побудови планів багатofакторного експерименту [3,10], розробка теоретичної частини моделі процесів у нелінійних ланках автокомпенсаційного перетворювача імпульсних сигналів [4].

Апробація результатів дисертаційної роботи. Основні результати дисертаційних досліджень доповідались та обговорювались на: -3-ому міжнародному симпозиумі українських інженерів-механіків, Львів, 1997; – 3nd International Conference on Genetic Algoritmus, Optimization Problems, Fuzzy Logic, Neural Networks, Rough Sets MENDEL'97, Brno, Czech Republic, 1997; - Другий Міжнародний конференція “Конструкційні та функціональні матеріали”, КФМ'97, Львів, 1997; - Міжнародній конференції TC SET'98, Львів, 1998; - Vth International Seminar / Workshop DIPED – 2000, Tbilisi, October 3-6, 2000; - Міжнародній конференції “Автоматика - 2000”, Львів, 2000; - семінарах та конференціях ДУ “Львівська політехніка” (1997-2000 pp.).

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 12 друкованих праць, в тому числі 9 статей у фахових наукових журналах та збірниках. 2 роботи виконані без співавторства.

Структура та обсяг робіт. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, списку використаних джерел (101 найменування) та додатків. Робота викладена на 136 сторінках (без додатків) та містить 24 ілюстрації У додатках наведено акти впровадження дисертаційних досліджень.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У *вступі* висвітлено актуальність проблеми моделювання процесів ультразвукового контролю пружних середовищ, визначено мету та основні завдання дисертаційного дослідження, подано наукову новизну, практичне значення та апробацію результатів роботи.

У *першому розділі* розглянуто теоретичні підходи до неруйнівного ультразвукового контролю пружних середовищ, проаналізовано існуючі моделі та методи, приведено теоретичні підходи до розв'язання некоректних задач.

Проблема створення ефективних математичних моделей процесів ультразвукового контролю пружних середовищ та елементів систем складає важливу передумову при оцінці їх надійності, створенні відповідних процедур прийняття рішень про можливість експлуатації. Побудова даних процедур, що ґрунтується на математичному моделюванні, потребує системного підходу, оскільки передбачає вирішення низки питань, пов'язаних з плануванням та проведенням контролю, міцністю елементів конструкцій та систем, методами інтерпретації даних експерименту, відкликом елементів систем на специфічні аномалії в їх матеріалах тощо. При цьому найбільш важливою частиною математичної моделі є опис взаємодії зондуючої хвилі та неоднорідності матеріалу, розв'язання на цій основі нелінійної некоректної в класичному сенсі задачі дистанційного визначення форми неоднорідності.

Найбільш прості в реалізації є променеві методи, що лежать в основі більшості існуючих на даний час наукових і промислових пакетів прикладних програм моделювання та обробки результатів ультразвукового зондування. Проте дані методи не є ефективними у випадку, коли розміри дефекту співрозмірні або менші довжини зондуючої хвилі. Тому при математичному моделюванні процесів дифракції використовують метод інтегральних рівнянь, варіаційно-різницеві методи, метод Т-матриць (нульового поля).

Огляд публікацій, направлених на розв'язування задач визначення форми локальних перешкод, тобто задач пов'язаних із інтерпретацією даних ультразвукового неруйнівного контролю за характеристиками розсіяння полів ультразвукових хвиль показав, що найбільш перспективними з точки зору застосувань є наступні два методи. Перший із них ґрунтується на квазіньютонівському методі та використовує ітеративну регуляризацию і наближене обчислення похідної Фреше оператора прямої задачі розсіяння. Цей метод є канонічним щодо вибору конкретної частоти зондування, але вимагає зміни напрямків векторів спостереження та зондування. Другий із них використовує бістатичні дані розсіяння, задані на інтервалі малих довжин хвиль у порівнянні з лінійними розмірами дефекту.

Розглянуто питання єдиності розв'язку задач реконструкції форми поверхні замкнених перешкод, яке займає важливе місце при її дослідженні не тільки із математичної точки зору, але й

тому, що його вирішення багато в чому визначає способи побудови алгоритму реконструкції. Наприклад, форма та тип граничних умов для порожнини або абсолютно жорсткого нерухомого включення, визначаються єдиним чином, якщо відомі при всіх напрямках у просторі відповідні їм діаграми розсіяння поздовжніх та поперечних хвиль.

У *другому розділі* зроблено загальну постановку задачі ультразвукового контролю, розроблено математичну модель процесу поширення ультразвукових хвиль у пружному середовищі з об'ємними неоднорідностями.

Середовище моделюється пружним півпростором, у якому міститься деяка замкнена область, обмежена гладкою поверхнею. Усталені коливання пружного середовища описуються системою рівнянь Ламе:

$$\mu \Delta \mathbf{u}(\mathbf{x}) + (\lambda + \mu) \operatorname{grad} \operatorname{div} \mathbf{u}(\mathbf{x}) + \rho \omega^2 \mathbf{u}(\mathbf{x}) = 0, \quad (1)$$

де $\mathbf{U}(\mathbf{x}) = \mathbf{u}(\mathbf{x}) e^{-i\omega\tau}$ - вектор зміщень, τ - час, λ , μ і ρ - постійні Ламе і густина матеріалу середовища, Δ - оператор Лапласа, ω - кругова частота, $\mathbf{x} = (x, y, z)$ - декартові координати із початком відліку всередині розсіювача (рис.1).

На вільній від зусиль поверхні півпростору розташовано джерело гармонійних коливань, дія якого задана поверхневим навантаженням. Тип джерела (направлений або ненаправлений) визначається конкретним видом прикладеного навантаження.

В загальному випадку напрямленого випромінювача електричний сигнал збуджує в п'єзокристалі плоску хвилю поздовжнього або поперечного типу, що падає під деяким кутом на зону його контакту з поверхнею матеріалу. Переломлюючись на границі розділу матеріалів ця хвиля збуджує зондує поле $\mathbf{u}^i(\mathbf{x})$. У цьому випадку за прикладене навантаження достатньо взяти розподіл напружень, що виникає при падінні плоскої хвилі на границю розділу середовищ. Зокрема, для хвиль поздовжнього типу маємо наступну граничну умову:

$$\mathbf{t}(X, Y) = f(X, Y) i \mu k_L (\xi^{-2} - 2 \sin^2 \gamma) \hat{\mathbf{z}} e^{-ik_L X \sin \gamma}, \quad (2)$$

де \mathbf{t} - вектор нормальних напружень, заданий в області $|X| < a, |Y| < b$ (рис.1); γ - кут зондування; $\xi = c_T / c_L$ - відношення швидкостей поперечних та поздовжніх ультразвукових хвиль; $\hat{\mathbf{z}}$ - одиничний вектор в напрямку осі Z ; функція $f(X, Y)$ описує поведінку напружень на границі області її визначення, k_L - хвильове число поздовжніх хвиль.

Задане навантаження збуджує в середовищі хвильове поле $\mathbf{u}^i(\mathbf{x})$, представлення якого побудовано, використовуючи перетворення Фур'є за координатами x, y рівняння Ламе (1) та граничну умову (2).

Розсіяне неоднорідністю поле $\mathbf{u}^s(\mathbf{x})$ задовольняє умовам випромінювання В.Д. Купрадзе, які повністю характеризують поведінку розв'язків рівнянь Ламе у хвильовій зоні розсіювача. З цих умов випливає

$$\mathbf{u}^s(\mathbf{x}) = - (4\pi r)^{-1} \sum_{A=L,T} e^{ik_A r} \mathbf{f}^A(\omega; \mathbf{l}, \mathbf{v}) + O(r^{-2}), \quad (r = |\mathbf{x}| \rightarrow \infty)$$

де $\mathbf{f}^A(\omega; \mathbf{l}, \mathbf{v})$ – комплексна векторна амплітуда (діаграма) розсіяння поздовжніх та поперечних хвиль; $\mathbf{v} = \mathbf{x} / r$ – напрямок спостереження; $\mathbf{l} = (l_1, l_2, l_3)$ – напрямок зондування; k_A – хвильове число, пов'язане із швидкістю c_A ; індекс $A = L$ відповідає поздовжнім, а індекс $A = T$ – поперечним об'ємним хвилям.

Неоднорідність моделюється порожниною, абсолютно жорстким або пружним включенням, так що виконуються наступні граничні умови:

$$\mathbf{t}(\mathbf{x}) = 0, \quad \mathbf{x} \in S, \quad \text{для порожнини;} \quad (3)$$

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}) = 0, \quad \mathbf{x} \in S, \quad \text{для абсолютно жорсткого включення;} \quad (4)$$

$$(\mathbf{u}(\mathbf{x})) = (\mathbf{u}(\mathbf{x}))_1, \quad (\mathbf{t}(\mathbf{x})) = (\mathbf{t}(\mathbf{x}))_1, \quad \mathbf{x} \in S, \quad \text{для пружного включення,} \quad (5)$$

де $\mathbf{n} = (n_1, n_2, n_3)$ – напрямок зовнішньої нормалі до поверхні неоднорідності S ; $\mathbf{t} = \mathbf{t}^s + \mathbf{t}^i$ – вектор зусиль на поверхневому елементі з нормаллю \mathbf{n} ; символами $(\cdot)_1, (\cdot)$ позначено граничні значення на S відповідно із середини та зовні S ; $\mathbf{u}(\mathbf{x}) = \mathbf{u}^s(\mathbf{x}) + \mathbf{u}^i(\mathbf{x})$ – повне поле зміщень.

Задача розсіяння полягає у визначенні поля зміщень пружного середовища $\mathbf{u}(\mathbf{x})$, коли задано падаюче поле $\mathbf{u}^i(\mathbf{x})$, поверхня перешкоди S та контактні (граничні) умови на S . Задача реконструкції форми неоднорідності у пружному середовищі своєю метою ставить визначення поверхні S , коли задано падаюче поле $\mathbf{u}^i(\mathbf{x})$, контактні умови на S та амплітуди розсіяння $\mathbf{f}^A(\omega; \mathbf{l}, \mathbf{v})$, виміряні на наборі частот зондування і напрямків \mathbf{l} та \mathbf{v} .

Задачу моделювання процесу розсіяння ультразвукових хвиль розглянуто на прикладі півпростору V , що містить локальну неоднорідність V_0 (рис.1). Зміщення у розсіяному полі зображено у вигляді

$$\mathbf{u}^s(\mathbf{x}) = \int_S \left\{ \mathbf{u}_i^s(\mathbf{y}) n_j \bar{\Sigma}_{ij}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) + \mathbf{t}_j^s(\mathbf{y}) \bar{\Gamma}_j(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \right\} dS_y, \quad \mathbf{x} \in V, \quad (6)$$

де $\bar{\Gamma}_j(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ – тензор зміщень Гріна для півпростору; $\bar{\Sigma}_{ij}(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ – відповідний йому тензор напружень.

Введений тензор Гріна подано у вигляді суми двох складових

$$\bar{\Gamma}_j(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \bar{\Gamma}_j^0(\mathbf{x}, \mathbf{y}) + \bar{\Gamma}_j^1(\mathbf{x}, \mathbf{y}),$$

де $\Gamma_{ij}(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ – компоненти тензора зміщень Гріна для півпростору; $\Gamma_{ij}^0(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ – компоненти матриці фундаментальних розв'язків В.Д.Купрадзе; $\Gamma_{ij}^1(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ – поправки, що враховують наявність границі півпростору.

У співвідношенні (6) невідомою величиною є розподіл зміщень або напружень на поверхні неоднорідності. Для його визначення використовується Т- матричний метод та одна із граничних умов (3)-(5).

Так у випадку порожнини, використовуючи розв'язки повного поля $\mathbf{u}(\mathbf{y}), \mathbf{y} \in S$, за повною системою функцій $A_M(\hat{\mathbf{r}})$ (циліндричних або сферичних гармонік) для коефіцієнтів розкладу x_M маємо

$$\sum_{M'} a_{MM'} x_{M'} = c_M, \quad (7)$$

$$a_{MM'} = \int_S A_{M'}(\hat{\mathbf{r}}) \cdot \mathbf{G}(U_M) dS, \quad c_M = - \int_S \mathbf{t}^i(\mathbf{y}) \cdot \mathbf{U}_M(\mathbf{y}) dS,$$

$$\mathbf{G}(U_M) = \mathbf{n} \lambda \nabla \cdot \mathbf{U}_M + 2\mu \frac{\partial \mathbf{U}_M}{\partial n} + \mu \mathbf{n} \times (\nabla \times \mathbf{U}_M), \quad \bar{\Gamma}_j(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = i\kappa \sum_M U_M(\mathbf{y}) \text{Re} \Phi_M(\mathbf{x}),$$

$$U_M(\mathbf{y}) = \Phi_M(\mathbf{y}) + \Phi_M^1(\mathbf{y}),$$

де функції $\Phi_M(\mathbf{y})$ зображаються через базові векторні хвильові функції розкладу тензорів $\bar{\Gamma}_j(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ та $\bar{\Sigma}_{ij}(\mathbf{x}, \mathbf{y})$, функції $\Phi_M^1(\mathbf{y})$ отримуються із розв'язку задачі про відбиття хвилі $\Phi_M(\mathbf{y})$ від границі півпростору; $\kappa = k_T / (\rho \omega^2)$, $M \equiv \{\tau, \sigma, m, l\}$, ($\tau = 1, 2, 3$) для просторового та $\kappa = \pi / (\rho \omega^2)$, $M \equiv \{\tau, \sigma, l\}$, ($\tau = 1, 2$) для плоского випадків відповідно; $\sigma = 1, 2$; $l = 0, 1, 2, \dots$; $m = 0, 1, 2, \dots, l$.

Співвідношення (7) та (6) повністю визначають розсіяне порожниною поле $\mathbf{u}^s(\mathbf{x})$ та моделюють взаємодію зондуєчої хвилі $\mathbf{u}^i(\mathbf{x})$ з локальною неоднорідністю матеріалу середовища.

Для зв'язку розсіяного поля та сигналу, що поступає від давача розташованого на поверхні півпростору, ідеальною для використання є електромеханічна аналогія. Для локальної неоднорідності у випадку моностатичних даних розсіяння (приймач суміщено з випромінювачем) вона дає можливість вимірювання електричного коефіцієнта відбиття

$$\delta \Gamma = - \frac{i\omega}{4P} \int_{\Omega} (\mathbf{u}_2 \mathbf{t}_1 - \mathbf{u}_1 \mathbf{t}_2) dS,$$

де індекси 1 та 2 вказують на динамічні стани півпростору з та без неоднорідності відповідно, Ω - деяка поверхня, що охоплює розсіювач, P – електричний аналог енергії випроміненого сигналу (величина, що пропорційна квадрату амплітуди електричного сигналу джерела). Для порожнини отримано

$$\delta \Gamma(\omega) = \frac{i\omega}{4P} \sum_{MM'} \left[a_{M'} x_M \int_S A_M \mathbf{t}(\text{Re} \bar{\Phi}_{M'}) dS + a_{M'} a_M \int_S \text{Re} \bar{\Phi}_M \mathbf{t}(\text{Re} \bar{\Phi}_{M'}) dS \right]. \quad (8)$$

Співвідношення (8), (7) та (6) використані для моделювання характеристик розсіяного порожниною поля ультразвукових хвиль.

На рис. 2а показано залежність безрозмірного потоку енергії P_0 (віднесеною до інтенсивності прикладеного навантаження) від хвильового розміру $\omega_0 = k_T a$ для сфероїдальних порожнин при відносній глибині залягання дефектів $h_0 = h/a = 3$, де a – характерний розмір порожнини, ε – ексцентриситет її меридіального перетину. На рис. 2б приведено залежність потоку енергії від глибини залягання тунельної порожнини еліптичної форми ($\varepsilon = 0.1$), де цифрам 1,2,3 відповідають значення $h_0 = 2, 10, \infty$. Показано, що при глибині залягання неоднорідності, більшій від подвійного характерного розміру об'єкту, впливом границі півпростору можна знехтувати.

Отримано представлення амплітуд розсіяння, які визначають розсіяне поле в дальній зоні перешкоди через значення полів зміщень або напружень на її поверхні.

З метою конструктивного визначення геометричних параметрів розсіювача запропоновано використовувати наближені значення полів на поверхні неоднорідності. Побудовано відповідні асимптотики амплітуд розсіяння у довгохвильовій та короткохвильовій областях частот зондування.

Отримані результати надалі використано при розробці конкретних алгоритмів відтворення форми неоднорідності.

Третій розділ присвячено розробці методів дистанційного визначення форми об'ємної неоднорідності. Запропоновано два види методів: асимптотичний та чисельний.

Так у випадку височастотного діапазону зондування розроблено та апробовано метод визначення рівнянь опорних площин для області, яку займає недеформівна перешкода. Метод ґрунтується на отриманому асимптотичному поданні

$$\mathbf{f}^L(\omega; \mathbf{l}, \mathbf{v}) = \varepsilon 2\pi A_0 \mathbf{v} \sum_k \beta_k |\lambda_{1k} \lambda_{2k}|^{-1/2} e^{ik_L(\boldsymbol{\eta}^L, \mathbf{y}^k)} (1 + O(\gamma^{-1})), \quad \boldsymbol{\eta}^L = \mathbf{l} - \mathbf{v} \quad (9)$$

Підсумовування у формулі (9) проводиться за всіма невідродженими критичними точками \mathbf{y}^k , в яких $\mathbf{n}_{\mathbf{y}^k} = -\boldsymbol{\eta}^L / |\boldsymbol{\eta}^L|$; $\mathbf{v} \approx -\mathbf{l}$ – напрямки спостереження, що вибираються близькими до напрямку оберненого розсіяння; через $\lambda_{1k}, \lambda_{2k}$ позначено головні кривини поверхні $S_+ = \{\mathbf{x} \in S : (\mathbf{l}, \mathbf{n}_x) < 0\}$ в точці \mathbf{y}^k ; $\varepsilon = 1$ для порожнини, $\varepsilon = -1$ для абсолютно жорсткого включення; $\gamma = aL^{-1} \gg 1$, L – довжина зондуючої хвилі, a – характерний радіус кривини поверхні S .

Гладка поверхня S_+ може бути розділена на частини S_j , кожна із яких є опуклою, ввігнутою або сідлового типу (невироджені критичні точки \mathbf{y}^k ізольовані). Тип поверхні S_j визначається коефіцієнтом β_k , і перехід від однієї частини S_j до іншої пов'язаний зі зміною знаків $\lambda_{1k}, \lambda_{2k}$. Причому поверхня, сусідня з опуклою і ввігнутою поверхнями, повинна бути сідлового типу.

Визначення розмірів S_+ ґрунтується на алгоритмі, що дає можливість розділяти фази доданків правої частини рівності (9) і визначає шукані геометричні характеристики розсіювача, як точки максимуму $t=t_k=-|\boldsymbol{\eta}^L|p_k c_L^{-1}$ функцій $g(t)$:

$$\varepsilon \mathbf{v} \sum_k |\lambda_{1k} \lambda_{2k}|^{-1/2} \beta_k \frac{\exp[-ik_L(c_L t + |\boldsymbol{\eta}^L| p_k)]}{-i(c_L t + |\boldsymbol{\eta}^L| p_k)} \Big|_{k_-}^{k_+} \approx \mathbf{v} g(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{k_-}^{k_+} A_0^{-1}(k_L) \exp(-ik_L c_L t) \mathbf{f}^L(\omega; \mathbf{l}, \mathbf{v}) dk_L, \quad (10)$$

де $p_k = -(\boldsymbol{\eta}^L, \mathbf{y}^k) |\boldsymbol{\eta}^L|^{-1} = (\mathbf{n}, \mathbf{y}^k)$ – віддаль від початку координат до площини, що дотикається до S_+ в точці \mathbf{y}^k .

Формула (10) відповідає випадку, коли гесіан функції $(\boldsymbol{\eta}^L, \mathbf{y})$ у критичних точках \mathbf{y}^k не вироджений. У протилежному випадку для такої точки, використовуючи класифікацію елементарних катастроф, отримано

$$g(t_k) = \frac{1}{2\pi} \varepsilon A_s \mathbf{v} \frac{k_+^{1+\xi} - k_-^{1+\xi}}{1+\xi},$$

де A_s – елементарні катастрофи, ξ – відповідні константи елементарних катастроф.

Досліджено, що вироджені критичні точки “світять” більш яскраво, ніж не вироджені критичні точки. До того ж функція $g(t)$ в шуканих точках $t=t_k$, що відповідають виродженим точкам поверхні, володіє як дійсними, так і уявними значеннями. Зрозуміло, що ця функція буде трудно інтерпретованою при суперпозиції внесків декількох критичних точок поверхні розсіювача, що знаходяться на одній опорній площині. У цьому випадку необхідно змінювати ракурс зондування або напрямки прийому (змінювати вектор $\boldsymbol{\eta}^L$).

У загальному випадку методики дослідження даного класу задач повинні опиратися на використання комп’ютерних систем, алгоритмічне забезпечення яких складають чисельні методи. Так для порожнини, поверхня якої є зірковою і параметризується у формі $\mathbf{y} = \rho(\hat{\mathbf{y}}) \hat{\mathbf{y}}, |\hat{\mathbf{y}}| = 1$, дані моностатичного розсіяння $f^0(\omega; \mathbf{l}) = (\mathbf{f}^L(\omega; \mathbf{l}, -\mathbf{l}), \mathbf{l})$ мають вигляд

$$f^0(\omega; \mathbf{l}) = A(\omega; \mathbf{l}) \circ \rho = -ik_L \int_{S_0} U_m(\omega; \rho) u_m(\rho(\hat{\mathbf{y}}) \hat{\mathbf{y}}) d\theta d\phi, \quad (11)$$

$$U_m(\omega; \rho) = [(1 - 2\xi^2) S_m + 2\xi^2 (\mathbf{l}, \mathbf{S}) \nu_m] \exp[ik_L \rho (\mathbf{l}, \hat{\mathbf{y}})], \quad \xi = c_T / c_L,$$

$$S_1 = \rho \rho'_\phi \sin \phi + \rho \sin \theta \cos \phi [\rho \sin \theta - \rho'_\theta \cos \theta],$$

$$S_2 = -\rho \rho'_\phi \cos \phi + \rho \sin \theta \cos \phi [\rho \sin \theta - \rho'_\theta \cos \theta],$$

$$S_3 = \rho \sin \theta \cos \phi [\rho \cos \theta + \rho'_\theta \sin \theta] \hat{\mathbf{y}} = (\sin \theta \cos \phi, \sin \theta \sin \phi, \cos \theta),$$

де S_0 – поверхня одиничної сфери; $u_m(\rho(\hat{\mathbf{y}}) \hat{\mathbf{y}})$ – компоненти вектора зміщень на поверхні порожнини, що задовольняють системі сингулярних інтегральних рівнянь, $m=1,2,3$.

Лінеаризація рівності (11) приводить до співвідношення

$$D_F \circ \delta \rho \equiv \int_{S_0} D_F(\omega; \mathbf{l}, \hat{\mathbf{y}}) \delta \rho(\hat{\mathbf{y}}) d\theta d\phi = f[\rho_0; \mathbf{l}], \quad \mathbf{l} \in S_0, \quad (12)$$

$$D_F(\omega; \mathbf{l}, \hat{\mathbf{y}}) = \frac{\partial}{\partial \rho_0} [U_m(\omega; \rho_0) u_m(\rho_0 \hat{\mathbf{y}})], \quad f[\rho_0; \mathbf{l}] = \frac{f^0(\omega; \mathbf{l}) - A \circ \rho_0}{k_L} i, \quad \delta \rho = \rho(\tilde{\mathbf{y}}) - \rho_0(\tilde{\mathbf{y}})$$

Лінійне інтегральне рівняння Фредгольма першого роду (12) - базове співвідношення для розв'язування даної задачі. Шукану функцію $\rho(\hat{\mathbf{y}})$, ґрунтуючись на методі Ньютона-Канторовича, представлено як границю рекурентної послідовності

$$\rho^{(n+1)} = \rho^{(n)} + (D_F^* D_F + \gamma_n E)^{-1} [D_F^* \circ f(\rho^{(n)}, \mathbf{l}) - \gamma_n \rho^n], \quad (13)$$

$$\gamma_n \rightarrow 0, n \rightarrow \infty; \rho^{(0)} = \rho_0, n = 0, 1, 2, \dots,$$

де D_F^* - спряжений оператор до оператора D_F в сенсі скалярного добутку в $L_2(S_0)$; E - одиничний оператор; ρ_0 - початкове наближення.

Доповнюючи процедуру (13) правилом зупинки $n = n(\delta)$, де δ - рівень похибок задання даних розсіяння, отримуємо регуляризируючий алгоритм.

З практичної точки зору обчислення ядра оператора D_F вимагає величезних обчислювальних затрат, трудно реалізованих на сучасних ПК, оскільки на кожному ітераційному кроці передбачає знаходження розв'язків системи сингулярних інтегральних рівнянь. Тому з практичної точки зору доцільно використовувати квазіньютонівський метод побудови рекурентної послідовності (13). Крім того, покладаючи $\rho_0 = a$, де a - радіус сфери, менший половини діаметра області, що займає порожнина, вираз для поля $\mathbf{u}(a\tilde{\mathbf{y}})$ можна записати в квадратурах. Все це дозволяє значно зменшити обсяг необхідних обчислень.

Для пружного включення дані моностатичного розсіяння представляються у вигляді

$$f^0(\omega, \mathbf{l}) = A(\omega; \mathbf{l}) \circ \rho = -\delta k_L^2 \int_D l_m u_m(\mathbf{y}) \exp[ik_L(\mathbf{l}, \mathbf{y})] d\mathbf{y}, \quad \mathbf{l} \in S_0, \quad (14)$$

Шукана характеристика розсіювача $\rho(\hat{\mathbf{y}})$ визначається як розв'язок нелінійного інтегрального рівняння (14), де функції $u_m(\mathbf{y}), m = 1, 2, 3$ задовольняють системі інтегральних рівнянь Фредгольма I-го роду

$$T(\mathbf{x}) \circ \mathbf{u}(\mathbf{x}) = \mathbf{u}^i(\mathbf{x}), \quad \mathbf{x} \in D, \quad T: L_2(D) \rightarrow L_2(D)$$

$$T(\mathbf{x}) \circ \mathbf{u}(\mathbf{x}) = \mathbf{u}(\mathbf{x}) - \delta_M \frac{k_T^2}{4\pi_D} \int u_k(\mathbf{y}) \mathbf{G}_k(\mathbf{x}, \mathbf{y}) d\mathbf{y}$$

$$\mathbf{G}_k = (G_{1k}, G_{2k}, G_{3k}), G_{mk} = g_T \delta_{mk} - k_T^{-2} \frac{\partial^2}{\partial x_m \partial x_k} (g_L - g_T)$$

$$g_A = \frac{\exp[ik_A |\mathbf{x} - \mathbf{y}|]}{|\mathbf{x} - \mathbf{y}|}, \delta_M = \frac{\rho_i}{\rho_e} - 1, d\mathbf{y} = dy_1 dy_2 dy_3,$$

а повторюваними індексами проводиться підсумовування, ρ_i і ρ_e - густина матеріалу матриці і включення відповідно. Шукану функцію $\rho(\hat{\mathbf{y}})$ представлено як границю рекурентної послідовності (13).

На рис. 3 зображено тіло обертання, що описується рівнянням $r = r(\theta) = 1 - 0,4P_2(\cos \theta) - 10^{-3}[P_4(\cos \theta) - P_6(\cos \theta)]$, $0 \leq \theta \leq \pi$, $0 \leq \varphi \leq 2\pi$.

На рис. 4 показано результати відтворення поперечного перерізу поверхні даного тіла обертання, використовуючи процедуру (13), замінюючи при цьому $\rho(\hat{\mathbf{y}})$ його інтерполяційним аналогом ряду Фур'є за поліномами Лежандра при $k_L = m^{-1}$, $\gamma_n = 1/(1 + 0,5n)$ (m - одиниця довжини), $\mathbf{u}^i(\mathbf{x}) = l \exp[ik_L(\mathbf{l}, \mathbf{x})]$, $\mathbf{l} = (\sin \theta_i, 0, \cos \theta_i)$, $\theta_i = \arccos[2i/(N_i + 1) - 1]$ (N_i - кількість напрямків зондування). Нульове наближення на рисунку показано пунктирною лінією і відповідає сфері радіуса $0,5m$; істинну криву показано суцільною лінією; крива 1 отримана після 3 ітерацій ($n=3$), а крива 2 відповідає значенню $n=4$; причому кількість напрямків зондування $N_i=1$: $\theta_1=0$; $\theta_2=\pi/2$.

Дослідження показали, що збільшення кількості напрямків зондування приводить до збільшення точності відтворення поверхні розсіювача.

У *четвертому розділі* описано загальну структуру імітаційної системи ультразвукового контролю пружних середовищ, відображено особливості планування модельних та натурних експериментів.

Особливості процесів ультразвукового контролю визначають склад та структуру прикладних моделей імітаційної системи, загальна структура якої приведена на рис. 5. Вона включає чотири основні складові, які перед кожним варіантом обчислення встановлюються у певний початковий стан та налаштовуються на необхідний режим роботи. Наприклад, модель зондуючих сигналів налаштовується на конкретну довжину, амплітуду ультразвукових хвиль та кут зондування, модель пружного середовища - на конкретний тип середовища та граничні умови, що виконуються на поверхні неоднорідності, програмне забезпечення визначення форми неоднорідності - на конкретну довжину ультразвукових хвиль.

Модель визначення форми неоднорідності ґрунтується на особливостях розв'язку оберненої задачі розсіяння та формує інформацію про характеристики дефекту. Основною метою при створенні та відлагодженні цієї системи є забезпечення мінімальної розбіжності між характеристиками дефекту, які вводяться в модель пружного середовища, та отриманими результатами моделювання. Розглянуті моделі та вся імітаційна система реалізуються на

сучасному персональному комп'ютері з використанням стандартної операційної системи класу Windows та засобів математичної системи Maple V.

Експерименти із використанням моделей є важливим етапом розв'язку задачі із створення засобів ультразвукового контролю пружних середовищ і їх ефективність в значній мірі залежить від процесу планування. Для синтезу блок-схем планів експерименту запропоновано використовувати наступні фактори: напрямок зондування, частота зондування, напрямок спостереження, кількість спостережень, що дозволяє скоротити як час, так і загальні затрати проведення експериментів.

На основі аналізу сучасних підходів у створенні високопродуктивних комп'ютерних систем запропоновано структурні схеми двох систем, що включають комп'ютерні засоби, формувачі ультразвукових сигналів, рефлектометри. Комп'ютерні засоби орієнтовані на використання компонент IBM-подібних комп'ютерів, в тому числі мікропроцесорів фірми Intel. Перша система орієнтована на використання шинних зв'язків між пристроями на базі шини PCI (Peripheral Component Interconnect bus - шина взаємодії периферійних компонент), в той же час як друга система орієнтована на комбіноване застосування магістральних та радіальних зв'язків з використанням спеціалізованого комутатора з інтерфейсом NGIO (Next Generation Input/Output). Взаємодію між ядром комп'ютера та формувачем-приймачем ультразвукових сигналів забезпечує спеціалізований адаптер.

З метою кількісної оцінки ефективності застосування контролю вибрано відомий критерій ефективності Евланова Л.Г., який достатньо повно враховує основні фактори, відносно просто обчислюється та нормується:

$$E = B_e - \lambda \frac{\alpha_0}{\beta} - \frac{C_1 + C_2 + C_3}{C_0 \beta n}, \quad \lambda = C_\alpha / C_\beta - 1,$$

де B_e – відносна вірогідність контролю; α_0 – ймовірність ризику виробника; β – ймовірність ризику замовника; C_1 – вартість проектування та виготовлення однієї системи контролю; C_2 – вартість експлуатації однієї системи контролю; C_3 – середня вартість виконання контролю одного об'єкта контролю; C_0 – середня вартість одного об'єкта контролю; n – загальна кількість об'єктів, яку може проконтролювати система контролю за весь термін експлуатації;

де C_α , C_β - величини затрат на ризику виробника та замовника відповідно.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі розв'язана нова наукова задача з розробки теоретичних засад щодо побудови моделей процесів ультразвукового контролю пружних середовищ з об'ємними неоднорідностями, орієнтованих на визначення їх форми за характеристиками розсіяння полів пружних хвиль. При цьому отримано наступні результати.

1. На основі огляду та аналізу стану засобів неруйнівного контролю пружних середовищ сформульовано шляхи розширення їх функціональних можливостей за рахунок створення методик, що враховують алгоритми відтворення форми об'ємних неоднорідностей та використовують ультразвукові пружні хвилі.
2. Розроблено математичну модель типової ситуації для неруйнівного ультразвукового контролю пружних середовищ з об'ємними неоднорідностями з врахуванням фізики дифракційних явищ, що є основою для вдосконалення існуючих та створення нових засобів контролю конструкційних елементів. В запропонованій моделі: середовище моделюється пружним півпростором; модель зондуючої ультразвукової хвилі побудовано як результат дії вектора нормальних напружень на деякій ділянці поверхні півпростору вільного від напружень; взаємодія зондуючої ультразвукової хвилі з розсіювачем змодельована на основі методу нульового поля; зв'язок розсіяного поля із вихідним сигналом приймача змодельовано з використанням електромеханічної аналогії.
3. Запропоновано довго- та короткохвильові модельні зображення характеристик розсіяння, що використані для побудови стійких наближених методів визначення форми об'ємних перешкод.
4. Розвинуто асимптотичний метод до розв'язання задачі визначення форми поверхні замкненої неоднорідності типу порожнини або абсолютно жорсткого включення в області високих частот зондування, що ґрунтується на алгоритмі відображення точок поверхні розсіювача на точки гаусової сфери з подальшим визначенням відповідних рівнянь опорних площин, комп'ютерна реалізація якого забезпечує відтворення форми неоднорідності.
5. Запропоновано чисельно-аналітичний алгоритм дистанційного визначення форми порожнини або пружного включення, використовуючи дані моностатичного низькочастотного розсіяння ультразвукових хвиль, ґрунтуючись на схемах розв'язування нелінійних некоректних задач, а саме на методі Ньютона – Канторовича та принципі ітеративної регуляризації.
6. Розроблено структурні схеми апаратних засобів імітаційної системи ультразвукового контролю пружних середовищ з об'ємними неоднорідностями. Комп'ютерна частина системи, що ґрунтується на Next Generation Input/Output (NGIO) технології та на базі системного інтерфейсу PCI, забезпечує високу обчислювальну продуктивність і потребує лише адаптації оригінального програмного забезпечення.

ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

1. Ємець В.Ф., Павич Н.Я. Алгоритм ідентифікації форми пружної неоднорідності на основі методу ітеративної регуляризації // Вісник державного університету “Львівська політехніка”: Комп'ютерна інженерія та інформаційні технології. - Львів, 1998.- №351.- С.160-164.

2. Матус В., Павич Н., Грилицький М. Моделювання процесу поширення ультразвукових хвиль в пружному півпросторі з порожниною // Вісник державного університету “Львівська політехніка”: Комп’ютерна інженерія та інформаційні технології. - Львів, 1999.- №370.- С.60-67.
3. Різник В., Павич Н. Моделювання комбінаторних конфігурацій ідеальними кільцевими в’язанками // Вісник державного університету “Львівська політехніка”: Комп’ютерна інженерія та інформаційні технології. - Львів, 1999.-№386.- С.108-112.
4. Іванців А., Іванців Л., Павич Н. Адаптивна модель процесів у нелінійних ланках автокомпенсаційного перетворювача імпульсних сигналів // Вісник державного університету “Львівська політехніка”: Комп’ютерна інженерія та інформаційні технології. - Львів, 1999.- №380.- С.166-171.
5. Ємець В.Ф., Павич Н.Я. Сферичний образ замкненої неоднорідності в пружному тілі та алгоритм її розпізнавання // Вісник державного університету “Львівська політехніка” : Комп’ютерна інженерія та інформаційні технології. - Львів, 2000. -№398. -С.79-83.
6. Павич Н.Я. Метод дистанційного визначення форми порожнини в пружному середовищі // Збірник наукових праць Інституту проблем моделювання в енергетиці НАНУ :Моделювання та інформаційні технології. - Київ, 2000.-Випуск 6. С.182-185.
7. Ємець В.Ф., Павич Н.Я. Методи ультразвукового контролю пружних середовищ та елементів систем // Збірник наукових праць Інституту проблем моделювання в енергетиці НАНУ.- Київ, 2000.-Випуск 10.- С.197-203.
8. Павич Н. Система для дослідження процесів ультразвукового контролю пружних середовищ з об’ємними неоднорідностями // Вісник національного університету “Львівська політехніка”: Комп’ютерна інженерія та інформаційні технології. - Львів, 2000.- №413.- С.56-60.
9. Ємець В.Ф., Павич Н.Я. Моделювання процесу ультразвукового контролю пружних тіл з дефектами типу порожнин. // Збірник наукових праць Інституту проблем моделювання в енергетиці НАНУ.- Київ, 2001.-Випуск 7. С.166-171.
10. Різник В.В., Парамуд Н.Я. Застосування апарату теорії в’язанок для синтезу багатofакторних планів експерименту // Волинський математичний вісник. - Рівне , 1997.- Випуск 4.- С.127-130.
11. Ємець В.Ф., Павич Н.Я. Автоматизація експериментів з розповсюдженням ультразвукових хвиль в пружному півпросторі з порожниною. Праці міжнародної конференції “Автоматика-2000”.- Львів, 11-15 вересня, 2000. -Т.7, ч.1.- С.185-187.
12. V.Emets, V.Marchywka, N.Pavych. Finite signal reconstruction from its Fourier’s spectrum // Vth International Seminar / Workshop DIPED-2000. - Tbilisi, October 3-6, 2000. -P.124-129.

АНОТАЦІЯ

Павич Н.Я. Моделирование процессов ультразвукового контроля пружных сред с объемными неоднородностями. – Рукопись.

Диссертация на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи. – Національний університет “Львівська політехніка”, Львів, 2001.

В дисертації розв’язана задача розробки теоретичних засад щодо побудови математичних моделей та інтерпретації даних ультразвукового контролю пружних середовищ з об’ємними неоднородностями.

Розроблена математична модель поширення ультразвукових хвиль у пружному півпросторі з об’ємними неоднородностями, метод відтворення форми поверхні замкненої неоднорідності типу порожнини або абсолютно жорсткого включення в області високих частот зондування, методи дистанційного визначення форми зіркової області, яку займає порожнина або пружне тіло дозволяють розширити функціональні можливості засобів неруйнівного контролю.

Ключові слова: моделювання процесів ультразвукового контролю, неруйнівний контроль, об’ємна неоднорідність.

АННОТАЦИЯ

Павыч Н.Я. Моделирование процессов ультразвукового контроля упругих сред с объемными неоднородностями. – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 01.05.02 – математическое моделирование и вычислительные методы. – Национальный университет “Львовская политехника”, Львов, 2001.

В диссертации решена задача разработки теоретических вопросов построения математических моделей и интерпретации данных ультразвукового контроля упругих сред с объемными неоднородностями.

Разработана математическая модель распространения ультразвуковых волн в упругом полупространстве с объемными неоднородностями, метод определения формы поверхности замкнутой неоднородности типа полости или абсолютно жесткого включения в области высоких частот зондирования, методы дистанционного определения формы звездной области, которую занимает полость или упругое включение разрешают расширить функциональные возможности средств неразрушающего контроля.

Ключевые слова: моделирование процессов ультразвукового контроля, неразрушающий контроль, объемная неоднородность

ANNOTATION**Pavych N.Ja. Elastic medium with volumetric inhomogeneities ultrasonic control processes modeling. – Manuscript.**

The dissertation for obtaining of a scientific degree of Candidate of Technical Science in a speciality 01.05.02 – mathematical modeling and numerical methods. – Lviv polytechnik National University, Lviv, 2001.

Theoretical modelling of ultrasonic non-destructive testing of an elastic medium with volumetric inhomogeneity is described.

The mathematical model of ultrasonic waves propagation in elastic halfspace with volumetric inhomogeneities is developed. The surface form reconstruction method is proposed for the closed cavity or absolutely hard inclusions in high-frequency band. Remote methods of determination of the form of star region occupied by a cavity or elastic body are also offered. These methods allow for the extension of the functional potential of nondestructive control means.

In the first chapter certain theoretical approaches to nondestructive ultrasonic control of systems and constructions elements are considered. Known models and methods of analysis are carried out. The expedience of development of the new mathematical models and methods of volumetric inhomogeneities in elastic medium form determination is founded. A problem of ultrasonic determination of the form of volumetric inhomogeneities in the elastic medium is defined and referred to as the class of ill-posed problems.

In the second chapter, the mathematical model of the ultrasonic waves scattering process in the elastic halfspace is developed. A model of an ultrasonic probe is presented as a result of the action of a normal stress vector on the surface of tension free of halfspace. The null field (T-matrix) method is used for the modelling interaction of the fields radiated by the probe and the medium. To model the electric signal obtained from the receiving probe, the electromechanical analogy is used.

In the third chapter the surface form reconstruction method for the closed inhomogeneities of cavity or absolutely hard inclusions in high-frequency bands are offered. The new algorithm of scatterer surface points mapping into the Gaussian sphere points and consecutive determination of supporting planes equations is developed.

The remote method of determination of the form of starlike region occupied by a cavity or elastic body, using low-frequency monostatic ultrasonic wave scattering data is also offered. It is based on the schemes of nonlinear ill-posed problem solving, namely, Newton-Kantarovich method and iterative regularization principle.

In the fourth chapter the ways of practical realization of ultrasonic control means based on aforementioned methods are offered. The general structure of the imitation system and technical methods,

and the general approaches to construction of the model of resilient environment as a control object are given. Peculiarities in the planning of model and actual experiments are considered.

The results of the dissertation have been used in two research projects.

Key words: process of ultrasonic control, nondestructive control, volumetric inhomogeneity.