

На правах рукопису

УДК 620.179.14

**ХАНДЕЦЬКИЙ Володимир Сергійович**

**МЕТОДИ ВИХОРОСТРУМОВОГО КОНТРОЛЮ  
ВУГЛЕЦЕВОВМІЩУЮЧИХ  
КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ**

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



Національний технічний університет України  
"Київський політехнічний інститут"

На правах рукопису

УДК 620.179.14

ХАНДЕЦЬКИЙ Володимир Сергійович

МЕТОДИ ВИХОРОСТРУМОВОГО КОНТРОЛЮ  
ВУГЛЕЦЕВОВМІЩУЮЧИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

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

ЛНБ України ім. В. Стефаника



00761245 (P)

Дисертація є рукопис

Робота виконана в Д

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, ст. наук. співр.  
Нікітін А.І.  
доктор технічних наук, професор  
Себко В.П.  
доктор технічних наук, професор  
Скрипник Ю.А.

Провідна установа: Конструкторське бюро "Південне"  
(м. Дніпропетровськ)

Захист відбудеться "21" 11 1995 р. о 15 годині  
на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 01.02.14 при  
Національному технічному університеті України "Київський  
політехнічний інститут" за адресою: 252056, м. Київ, пр.  
Перемоги 37, корп. І.

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

Автореферат розісланий "4" 10 " 1995 р.

ЛНБ ім. В. Стефаника  
АН України

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради, проф.

В.П. Бабак

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Об'єктивні потреби розвитку різних галузей техніки обумовили створення нових конструкційних матеріалів з високою міцністю і модулем пружності. Застосування композитних матеріалів на полімерній основі дозволило різко зменшити масу виробів, що особливо важно для аерокосмічної техніки. Провідне місце за обсягами виробництва на цей час починають займати композити з вуглецевими волокнами завдяки, у першу чергу, високим механічним якостям самих волокон та їх невисокій вартості.

Висока технологічність конструкцій із композитних матеріалів сполучується з високою чутливістю до змін параметрів технологічного процесу. Елементи конструкцій виготовляються, переважно, по таким технологічним схемам, які приводять до з'явлення всередині матеріалу початкових напружень. Часто їх рівень досягає 50-60% від руйнуючих. Структурі композита органічно властива наявність пор, мікротріщин, внутрішніх меж розділу фаз, що є, як правило, осередками зародження і розвитку дефектів.

Спроможність вуглецевих волокон проводити електричний струм робить можливим використання для композитів вихорострумового методу, що добре зарекомендував себе при контролі металевих об'єктів. Проте тут виникає низка специфічних для композиту проблем, що пов'язані з малою величиною його питомої електричної провідності, непостійністю провідності в об'ємі матеріала, наявністю складної періодичної структури матеріалу та її спотворенням, складною конфігурацією та наявністю специфічних дефектів суцільності, а також значною шорсткістю поверхні.

Тому розвиток теорії вихорострумового контролю шляхом вирішення специфічних для композиту проблем, розробка методів і приладів структуро- та дефектоскопії цих матеріалів є актуальним у теоретичному та практичному аспектах.

Мета роботи. Метою роботи є теоретичне та експериментальне дослідження основних проблем, що виникають при вихорострумовій структуро- та дефектоскопії слабопровідних структурно-анізотропних середовищ, створення на цій основі методів і приладів контролю композитів, що містять вуглець.

Основні завдання наукового дослідження.

1. Провести дослідження питань структуроскопії ткаливих шарува-

тих матеріалів з перпендикулярним та нахиленим до зовнішньої поверхні розташуванням шарів. Розробити теоретичні основи метода однородно-анізотропного еквівалентування кусково-лінійних середовищ у полі накладного вихорострумового перетворювача (ВСП).

2. Провести дослідження впливу найбільш характерних дефектів суцільності у композиті - тріщин, розшарувань, зон з підвищеною концентрацією мікрodefektів на параметри накладних вихорострумових перетворювачів різної конфігурації.

3. Розробити методи цифрової обробки сигналів, орієнтовані на вилучення модуляційного імпульсу дефекта з шуму, специфічного для композиту у різних режимах сканування.

4. Здійснити дослідження і розробку високочастотних автогенераторних, резонансних перетворювачів з параметричними ВСП. Розглянути питання чутливості, корекції заважаючих факторів.

5. Розробити засоби покращення метрологічних характеристик вихорострумових приладів шляхом варіації їх структури.

6. Розробити прилади вихорострумового контролю для рішення практичних задач структуроскопії, вимірювання фізико-механічних характеристик, дефектоскопії виробів з композитних матеріалів.

Загальна методика досліджень. Теоретичні дослідження базуються на сучасному математичному апараті системного аналізу, теорії функцій, дискретної математики, методів цифрової обробки сигналів, булевої алгебри, секвентного аналізу.

Експериментальні дослідження проводилися переважно на спеціально складених установках, що містять стандартні і розроблені прилади, перетворювачі, обчислювальну техніку.

Результати теоретичних досліджень зведені, як на проміжному етапі, так і в останній стадії до граничних випадків, що є характерними для однорідних матеріалів. Існуючі для однорідних матеріалів результати зіставлені з граничними, оцінюються значення помилки. Здійснене фізичне обґрунтування одержаних залежностей. Проведена велика кількість експериментальних досліджень, що мають як самостійне значення, так і служать для підтвердження висновків теорії. Усе це дозволяє вважати високою ступінь дослідженості тематики дисертації.

Наукова новизна. Наукова новизна дисертації та її теоретична цінність ґрунтується на наступних основних положеннях.

Створена теорія взаємодії накладних вихорострумкових перетворювачів (ВСП) осесиметричного та лінійного (прямокутного) типів з структурно-анізотропним періодичним середовищем, що містить вертикальні або нахилені до зовнішньої поверхні шари. Розроблено метод орієнтаційного усереднення сигналів перетворювачів.

Досліджені питання дефектоскопії нахилених, у загальному випадку, тріщин у слабопровідному структурно-анізотропному матеріалі. Визначено вплив геометричних параметрів тріщин, форму модуляційних імпульсів, визначені спектральні області максимальної чутливості активного та реактивного опорів ВСП. Розроблено метод обчислення параметрів ВСП, розташованого понад зонах з підвищеною концентрацією мікрodefektів.

Створені теоретичні основи вихорострумкового контролю розшарувань, що містяться біля поверхні матеріалу, - у зв'язку з цим досліджені питання взаємодії розшарувань з тангенціальною складовою поля ВСП двох типів: з П-подібною магнітною осердею та у вигляді смуги струмових ниток, що розташована на поверхні матеріалу.

Створена статистична модель шуму, що виникає при переміщенні ВСП вздовж траєкторії сканування, причиною якого є вплив рельєфу поверхні композиту та змін його електричної провідності на опір ВСП. Досліджені кореляційні та спектральні функції шуму для різних типів композиту. Визначено вплив поверхневої тріщини на спектр

Розроблено метод виділення модуляційного імпульсу дефекта із шуму, що є основою на використанні моделі випадкового телеграфного сигналу з "притягальною" кореляцією відводу та підводу ВСП до поверхні матеріалу при перекосі.

Розроблена низка методів ідентифікації зашумлених модуляційних імпульсів дефектів на основі бінарних кореляційних та спектральних перетворень двійкових виборок відліків та булевих функцій, що описують процес дефектоскопії. Визначені ймовірності виявлення дефекту, зокрема з використанням критерію Неймана-Пірсона.

Усебічно, на основі рівнянь стаціонарного режиму, досліджені високочастотні автогенераторні перетворювачі триточечного типу з різними резонансними системами, та перетворювачі на негатронах А-типу. Проаналізовані питання просторово-частотного та просто-

рово-часового розділу вимірювальних каналів у високочастотних дефектоскопах. Запропоновані та досліджені методи автоматичної корекції заважачих факторів.

#### Практична цінність роботи та її реалізація.

На основі проведених досліджень розроблено ряд приладів для структуроскопії, вимірювання фізико-механічних характеристик, дефектоскопії вуглецевміщуючих композитних матеріалів, що працюють в режимах ручного, механізованого та комбінованого сканування. Цим створені основи практичного приладобудування в області вихорострумового контролю композитів, що містять вуглець.

Численні дослідження виробів, проведені з використанням розроблених приладів на виробництві, дозволили установити низку статистичних залежностей для здійснення промислового неруйнівного контролю важливих фізико-механічних характеристик виробів з композитів (гушини, коефіцієнта теплопровідності, коефіцієнта теплового лінійного поширення та інших), а також визначити пороги чутливості дефектоскопії та точність дефектометрії в різних умовах контролю. Прилади та методики контролю впроваджені переважно на підприємствах і в організаціях машинобудівного комплексу, що здійснюють проектування та дослідне відпрацювання перспективних виробів.

Тематика проведених робіт сформована відповідно до завдань трьох міжвузівських цільових комплексних програм МЗСОО СРСР, охоплюючих період з 1982 по 1992 рік; координаційного плану Академії наук; п'яти тематичних карт Міністерства загального машинобудування, випущених з 1983 по 1990 рік; трьох рішень Комісії Ради Міністрів.

Розроблені алгоритми цифрової обробки інформації та відповідні системні програми, методи будування спеціалізованих аналогоцифрових перетворювачів та проектування цифрових вимірювальних приладів, що містять програмовані логічні матриці та мікропроцесорні прилади, використовуються у навчальному процесі на кафедрах радіофізичного факультету Дніпропетровського державного університету.

Апробація роботи. Основні положення дисертації розглядалися на 29 конференціях, серед яких IX, X, XI, XII Всесоюзні конференції "Неразрушающие физические методы и средства контроля" (Мінськ, 1981 р.; Львів, 1984 р.; Москва, 1987 р.; Свердловськ, 1990 р.), IV і

УІ Всесоюзні конференції "Методы и средства измерений электромагнитных характеристик радиоматериалов на ВЧ и СВЧ (Новосибірськ, 1979 р., 1987 р.), ІУ Всесоюзна міжвузівська конференція "Электромагнитные методы контроля качества материалов и изделий (Омськ, 1983 р.), Українські конференції "Физические основы построения первичных измерительных преобразователей" (Вінниця, 1977 р.), "Состояние и перспективы развития систем и приборов для анализа состава веществ" (Ужгород, 1978 р.), "Структурные методы повышения точности, быстродействия и чувствительности измерительных устройств и систем" (Ужгород, 1981 р.), Всесоюзна конференція "Методы и средства диагностики несущей способности изделий из композитов" (Рига, 1988 р.), Всесоюзна конференція "Проблемы теории чувствительности измерительных датчиков, электронных и электромеханических систем" (Москва, 1989 р.), конференція країн СНД "Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления" (Москва, 1994 р.), Міжнародна конференція з композитних матеріалів "МІСС-90" (Москва, 1990 р.), Міжнародна конференція "Ненарушающий контроль и диагностика свойств композитов и изделий из них" (Рига, 1991 р.)

Доповіді по темі дисертації були прийняті на У Європейську (Трієст, Італія, 1991 р.) та XIII Всесвітню (Сан-Паулу, Бразилія, 1992 р.) конференції з неруйнівного контролю.

Особистий внесок автора. В дисертації узагальнені результати досліджень, проведених автором з 1977 по 1994 рік. Основні положення та результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. Частина робіт по експериментальному дослідженню, виготовленню та впровадженню приладів у виробництво виконувалась спільно із співробітниками, котрі приймали також участь у обговоренні деяких наукових робіт. Прізвища цих співробітників наведені у переліку публікацій. Із робіт, що опубліковані в співавторстві, використовуються результати, отримані особисто пошукувачем.

Публікації. По матеріалам дисертації опубліковано 70 наукових праць, в тому числі навчальний посібник, 33 статті у центральних наукових журналах, 11 статей у збірниках видавництва Дніпропетровського державного університету, 25 авторських свідоцтв.

Структура та обсяг дисертаційної роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, семи розділів, висновків, списку літератури та додатку. Вона вміщує 298 сторінок основного тексту, 167 рисунків, 25 таблиць, список використаної літератури із 484 найменувань та додаток на 18 сторінках.

Перший розділ містить аналітичний огляд. Другий розділ присвячений дослідженню питань структуроскопії тканинних шаруватих матеріалів вихоровими струмами. У третьому розділі досліджено вплив найбільш характерних дефектів в композиті на параметри накладних ВСП. У четвертому розділі розроблені методи цифрової обробки сигналів, орієнтовані на вилучення модуляційного імпульсу. У п'ятому розділі наведені результати дослідження автогенераторних перетворювачів з параметричними ВСП. У шостому розділі розглянуті питання покращення метрологічних характеристик приладів шляхом варіації їх структури. У сьомому розділі наведені результати впровадження розроблених приладів і методик контролю.

#### ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

Перший розділ містить аналітичний огляд стану питань дослідження. Відзначається збіг понять матеріалу та виробу для композитів, бо створення композитного матеріалу і конструкції здійснюється, як правило, у єдиному технологічному процесі.

Розглянуті особливості руйнування композитів з вуглецевими волокнами. Особливу увагу тут приділяють ефектам, пов'язаним з великими градієнтами напружень на бокових гранях, поверхні внутрішніх вирізів виробів. Ці ефекти мають назву кромкових. Напруження на кромці приводять до руйнування конструкцій при навантаженнях, значно менших граничних, що відповідають руйнуванню моношару. Перші тріщини та розшарування найбільш часто з'являються на кромках виробів.

Однією з основних та специфічних особливостей механіки композитів (у тому числі і механіки руйнування) є врахування структури композита. При цьому, коли характерний параметр явища, що розглядається, значно перевищує параметр структури, композит моделюється анізотропним матеріалом з приведеними постійними, які залежать від фізико-механічних властивостей, геометричної форми та розмірів наповнача та зв'язуючого, а також від їх концентрації.

Зібрані дані про значення питомої електричної провідності вуглецевих волокон та матриці у залежності від типу сировини, її

властивостей, режиму термообробки, вогкості, температури вимірювання. Електрична провідність волокон добре корелює з модулем пружності.

Проаналізовані питання вихорострумозого контролю вуглецево-вмішуваних композитів. Відзначається чутливість методу до об'ємного вмісту фракції вуглецевих волокон у армованих пластиках. Наведені в літературі результати та методики контролю вельми уривчасті, часто суперечать один одному, що є характерним для початкового етапу досліджень.

Проаналізовано стан теорії вихорострумозого контролю металевих об'єктів відповідно до задач структуро- та дефектоскопії композитів. Розглянуті принципи будовання і характеристики існуючих приладів вихорострумозого контролю металевих об'єктів та їх метрологічне забезпечення. Проведений тут огляд дозволив визначити сучасний рівень приладобудовання у даній області.

Другий розділ присвячений дослідженню питань структуроскопії тканинних шарових матеріалів вихоровими струмами.

Композитний матеріал в області кромки виробу моделюється середовищем з ортогональним до зовнішньої поверхні, періодичним розташуванням шарів армуючої тканини та матриці. Досліджені - двовимірна модель з ВСП у вигляді двопроводової лінії та дві тривимірні моделі. В першій з них розглянутий ВСП осесиметричного типу, у іншій аналізується поворот прямокутної рамки відносно подовжньої осі анізотропії матеріалу.

Розв'язання рівняння Гельмгольца у декартовій та циліндричній системах координат здійснюється методом кінцевих різниць. Використована рівномірна сітка з кроком  $h = 0,1$  мм. Товщина шару тканини прийнята рівною  $T_t = 0,3$  мм, шару зв'язуючого -  $T_z = 0,3$  та  $0,1$  мм. Частота струму  $f = 3 \cdot 10^7$  Гц. Електрична провідність графітованої тканини змінювалась в діапазоні від  $10^4$  до  $10^6$  См/м. Співвідношення провідностей зв'язуючого  $\sigma_z$  та тканини  $\sigma_t$  задавалось рівням  $\sigma_z/\sigma_t = 0,01; 0,1; 0,5$ .

Розраховані годографи внесеного імпедансу. Показано, що у післяекстремальній області годографа можливо здійснити вимірювання провідності тканини, по активній складовій внесеного імпедансу, незалежно, у визначеному діапазоні, від товщини та провідності шарів зв'язуючого. Визначені залежності відносного внесеного активного опору ВСП  $R^o = R_{вн}/\omega L_0$  від об'ємної долі вугле-

цевої тканини  $V_f$  в композиті та залежності  $R^\circ$  від кута повороту рамки.

Шляхом аналітичного розв'язання двовимірного рівняння Гельмгольца, здійсненого з використанням перетворення Фур'є, знайдено розподіл векторного потенціалу магнітного поля  $\vec{A}$  для ВСП прямокутної форми у провідному немагнітному напівпросторі. Результати здобуті в інтегральній формі. Обчислення інтегралів проведене чисельно при відношенні напівдовжин подовжньої та поперечної сторін рамки  $\ell/a > 7$ . Усе це дозволило визначити розподіл густини вихорового струму  $j$  у вертикальних шарах вуглецевої тканини та матриці:  $j_m(x, z) = -i \omega \sigma_m \vec{A}_{ym}(x, z)$  де  $\omega$  - частота,  $\sigma_m$  - провідність відповідного шару,  $\vec{A}_{ym}$  - векторний потенціал магнітного поля подовжньої сторони прямокутної рамки, розташованої ортогонально межах розділу шарів. Використовуючи умову безперервності вихорового струму, що протікає під проводом рамки і послідовно перетинає шари тканини та зв'язуючого з цього випадку, і критерій рівності активних втрат у шаровому та еквівалентному йому середовищах при подовжньому розташуванні довгої сторони рамки, визначені приведені складові провідності, поперечна і подовжня, однорідного у континуальному наближенні, ортотропного матеріалу.

Запропоновано і детально розроблен метод визначення приведеної (еквівалентної) провідності композита з довільним нахилом шарів до зовнішньої поверхні у полі прямокутного ВСП. Довгі сторони рамки ВСП розташовані ортогонально внутрішнім межах розділу шарів у місці їх виходу на поверхню матеріала (рис. 1).

Розподіл густини модуля вихорового струму  $j$  в перерізі, ортогональному подовжній стороні рамки, визначений на основі існуючих даних та зроблених розрахунків, прийнято у вигляді:

$$\vec{j} = \frac{\lambda \omega \sigma_m \epsilon_0}{4\pi^2} \cdot \frac{F(\bar{x}) e^{-Bz}}{D}, \quad \text{де } \lambda = 3a/2, \quad a - \text{півширина рамки ВСП};$$

$$B = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\lambda^2 + \omega^2 \sigma^2 \mu_0^2)^{1/2} \lambda^2]^{1/2}, \quad D = [\lambda^2 + 2B\lambda + (\lambda^2 + \omega^2 \sigma^2 \mu_0^2)^{1/2}]^{1/2}, \quad (1)$$

$$\bar{x} = x/a; \quad F(\bar{x}) = 3I\sqrt{\bar{x}} - 9/\sqrt{\bar{x}} \quad \text{для } \bar{x} < 1; \quad F(\bar{x}) = 3I/\bar{x}\sqrt{\bar{x}} - 9/\sqrt{\bar{x}}$$

для  $\bar{x} > 1$ ;  $\vec{j} = |\vec{j}|/j_0$ , де  $j_0$  - амплітуда струму в рамці.

Проведемо заміну елементарної пари шарів тканини та зв'язуючого шаром однорідного матеріала товщиною  $T_e = T_1 + T_2$ , що

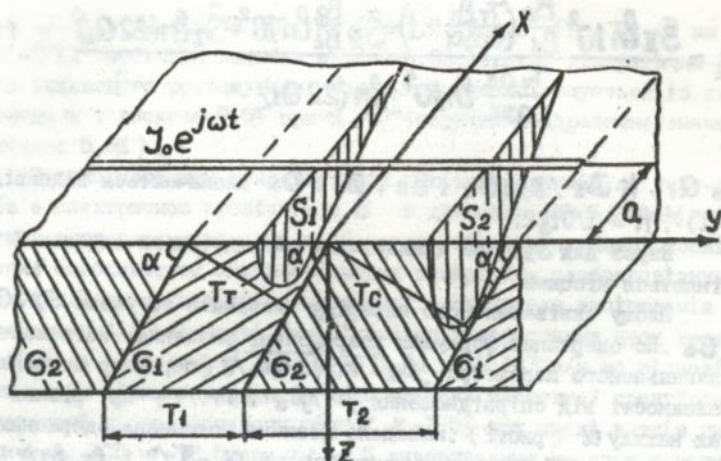


Рис.1. Модель композита з нахиленими шарами.

має рівний елементарній парі омічний опір вихоровому струму:

$$\frac{T_1 + T_2}{G_e S_e} = \frac{T_1}{G_1 S_1} + \frac{T_2}{G_2 S_2}, \quad (2)$$

де  $T_{1,2} = T_{\tau,3} / \sin \alpha$ ;  $G_1$  і  $G_2$ ,  $S_1$  і  $S_2$  - відповідно питомі провідності та площі перерізів трубки вихорового струму в шарах;  $G_e$  і  $S_e$  - аналогічні параметри еквівалентного елементарній парі шару однородного матеріала.

Нахил шарів призводить до того, що переріз трубки струму обмежується знизу та зверху внутрішніми площинами розділу і змінюється в межах товщини шару.

Аналітично визначені межі перерізів в областях I, II і III, де трубка вихорового струму в шарі обмежується зверху, не обмежується і обмежується знизу. Шляхом інтегрування густини  $\vec{J}(1)$  в межах перерізів визначені струми, потім - площі перерізів трубки з постійною густиною  $\vec{J}_{max}$  в визначених областях:  $S_1$ ,

$S_{II}$  і  $S_{III}$ . Площі  $S_1$  і  $S_{III}$  змінюються вздовж осі  $Y$ , визначені середні площі  $Y$  підсумку формула для середньої площі трубки в шарі тканини визначається формулою:

$$\bar{S}_I = \frac{\bar{S}_H \ln 10^2 \frac{\beta_2}{\beta_1} \left( \frac{T_7 \beta_1}{\cos \alpha} - 1 \right) + \bar{S}_{III} \frac{\beta_2}{\beta_1} \ln 10^2 + \bar{S}_I \ln(22 Q_1)}{\frac{T_7 \beta_2}{\cos \alpha} \ln 10^2 + \ln(22 Q_1)}, \quad (3)$$

де  $Q_1 = k D_1 / D_2$ ;  $\beta_1$  і  $\beta_2$ ,  $D_1$  і  $D_2$  визначаються відповідно (I),  $k = 1/0,22$ .

Вираз для  $\bar{S}_2$  має аналогічний вигляд, тільки індекси I і 2 міняються місцями.

Площу еквівалентного перерізу визначили із умови  $b_1 = b_2 = b_e$ . По одержаних формулах розраховані значення еквівалентного узагальненого параметра  $\beta_e = 2Q \sqrt{\omega b \mu_0} / 3$  (параметр Ценнека), у залежності від співвідношення  $\beta_T / \beta_3$  і  $T_7 / T_3$  при різних кутах нахилу  $\alpha$  (рис. 2). Наведене фізичне пояснення одержаних закономірностей. У граничному випадку, при  $\alpha = \pi/2$  і  $\beta_T, \beta_3 \gg 1$

$$\beta_e = \frac{(T_7 + T_3) \beta_T \beta_3}{\beta_T T_3 + \beta_3 T_7}. \quad (4)$$

Проведені експерименти на фізичних моделях.

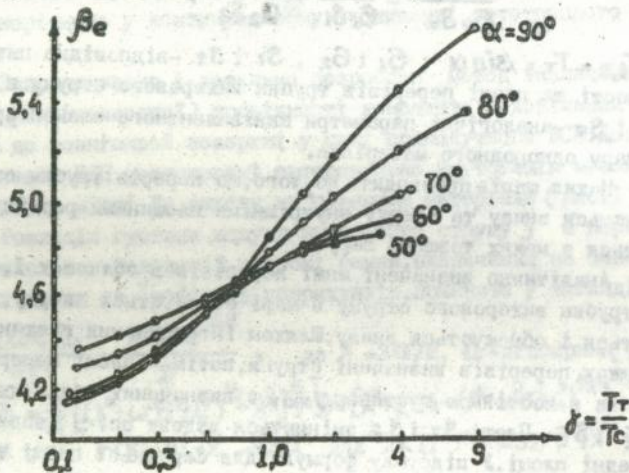


Рис. 2. Залежності  $\beta_e$  від  $\delta = T_7 / T_3$  при різних кутах нахилу  $\alpha$ .

В результаті зіставлення розрахункових та експерименталь-

них значень  $\beta_e$  для  $T_T / T_3 = 0,5 ; 1 ; 2 ; 4$  при  $T_T + T_3 = 2$  мм для  $\alpha = \pi/2$  найбільша похибка склала 5,6%, середнє квадратична - 3,2%. Для нижнього розташування шарів похибка збільшується із зменшенням  $\alpha$  і досягає 9,5% при  $\alpha = 50^\circ$  (середнє квадратичне значення складає 5,6%).

З використанням монокристалів напівпровідників, як тест-взірців з електричною провідністю  $\sigma$  в діапазоні  $(10^{-5} - 10^4 \text{ См/м})$  композитів з вуглецевими волокнами, проведено експериментальні дослідження особливостей вихорострумових вимірювань слабопровідних середовищ. Визначено похибки частотної градуировки вимірювачів електричної провідності. Так, наприклад, використання двох тест-взірців в діапазоні  $\sigma$  від  $2 \cdot 10^2 \text{ См/м}$  до  $5 \cdot 10^4 \text{ См/м}$ , що відповідає межах діапазону, призводить до похибки частотної градуировки всередині цього діапазону рівної  $\gamma = 2,5\%$  при числі витків циліндричного ВСП  $W = 13,5$ ; при  $W = 4,5$  використання не двох, а чотирьох стандартних взірців, що рівномірно розподілені по діапазону, знижує похибку для  $W = 4,5$  до 0,4%.

При збільшенні провідності кристалу, при переході від квазі-стаціонарного до хвильового поля, різко погіршується (похибка досягає 11-14% і далі збільшується) ідентичність впливу квадрату частоти і діаметра циліндричного ВСП на величини внесених опорів.

Доказана наявність максимуму в залежностях відносних внесених опорів маловиткового одношарового ВСП від числа витків  $W$ , розташованого в діапазоні  $W = 3-6$  при змінюванні  $\sigma$  кристалу від  $17,9$  до  $5 \cdot 10^4 \text{ См/м}$  (найбільший діаметр ВСП в експерименті  $D_m = 14,7$  мм). Розроблена методика "зшивання" меж частотних діапазонів відносних внесених параметрів ВСП для ідентичних по формі котушок з різним числом витків.

Експериментально визначено геометричний еквівалент радіуса витка для прямокутного ВСП, який залежить від провідності матеріалу. Досліджені залежності коефіцієнту посилення відносних внесених опорів ВСП осередковані із фериту від провідності взірця та частоти поля. Показано, що величина посилення максимальна у доекстремальній області годографа; ефект посилення практично зникає у області після екстремуму, при значному, порядку  $2 \cdot 10^{11} \text{ См/м} \cdot \text{с}$  добутку провідності матеріалу на частоту поля  $\sigma \omega$ .

У третьому розділі досліджено вплив найбільш характерних дефектів в композиті на параметри накладних ВСП.

Наведено результати експериментальних досліджень модуляційних характеристик поверхневих тріщин у композиті типу "вуглець-вуглець". Модуляційні характеристики по  $R^\circ$  для поперечних довгих тріщин з назначеною глибиною мають двогорбий вигляд, що зовнішню нагадує амплітудно-частотні криві зв'язаних резонансних контурів. При цьому координата мінімуму западини між двома боковими пелюстками є координатою площини симетрії тріщини. Для модуляційних імпульсів внесеної індуктивності  $L^\circ$  характерна менша відносна інтенсивність бокових пелюстків.

Із збільшенням глибини тріщини форма імпульсу  $R^\circ$  наближається до форми окремого екстремума. Особливо інтенсивно цей процес розвивається для тріщин з малим (менше ніж 100 мкм) розкритом, -бокові пелюстки незначні вже для глибин близько радіуса ВСП. Форма імпульсів пояснюється зміною траєкторії вихорового струму в області тріщини при наближенні до неї ВСП.

Показано, що вимірювання глибини тріщин доцільно здійснювати в діапазоні, що не перевищує радіуса ВСП. Розширення діапазону супроводжується значним зниженням чутливості.

Величина розкриття тріщини набагато слабше впливає на параметри ВСП у порівнянні з впливом глибини у оптимальному для її вимірювання діапазоні. Тріщина, довжина якої вже у 2,9-3 рази, перевищує діаметр ВСП, може розглядатися як безмежна. Напрямки впливу тріщини та "відводу" ВСП збігаються у доекстремальній і протилежні по  $R^\circ$  у післяекстремальній області годографа ВСП для тріщин з малим (порядку 100 мкм) розкритом. При збільшенні розкриття вплив тріщини в області після екстремума зменшується до нуля, після чого змінює знак і по напрямку збігається з напрямком "відводу".

Із збільшенням кута між нормаллю до площини симетрії тріщини і траєкторією сканування модуляційний імпульс поширюється, -глибина модуляції при цьому практично не змінюється.

Розглянута тривимірна модель вертикально-шарового середовища з тріщиною, що перерізає шари і "виходить" на зовнішню поверхню під довільним кутом  $\Theta$ . Як ВСП використовується квадратна рамка з гармонійним струмом. Розв'язання рівняння Гельмгольца здійснюється методом кінцевих різниць у декартовій системі координат.

Амплітуда реактивного модуляційного імпульсу тріщини  $L_m$  у структурно-анізотропному середовищі не перевищує значення амплітуди у однорідному ізотропному матеріалі з провідністю  $\epsilon_0 = \epsilon_T$ , де  $\epsilon_T$  - провідність армуючої тканини композиту. Для активного модуляційного імпульсу  $R_m$  ця умова строго виконується у доекстремальній області годографа ВСП.

Залежність  $R_m(\theta)$  немонотонна, має максимум. Сам імпульс при нахиленні тріщини стає асиметричним, що виявляється у різній крутості його схилів. Відзначені закономірності підтверджені експериментально. Наведено їх фізичне пояснення.

Найбільше напрямки впливу дефекту в однорідному напівпросторі ( $\epsilon_0$ ) та у вертикально-шаровому середовищі з  $\epsilon_T = \epsilon_0$  відрізняються у екстремальній області годографу, - при фіксованих нами параметрах ВСП це відповідає  $\epsilon_T = 3 \cdot 10^4$  См/м, де, наприклад, фазовий кут  $\Psi$  між ними при  $\epsilon_3 / \epsilon_T = 0,5$  складає  $\Psi = 22^\circ$ , а при  $\epsilon_3 / \epsilon_T = 0,1$  -  $\Psi = 30^\circ$ .

Амплітуди активного  $R_m$  та реактивного  $L_m$  модуляційних імпульсів досягають максимумів на різних частотах: для  $R_m$  - нижче, а для  $L_m$  - вище по шкалі частот. Це, а також значно більш слабка залежність  $L_m(\theta)$  у порівнянні з  $R_m(\theta)$  для нахилених тріщин, значно менша ступінь асиметрії реактивного модуляційного імпульсу у порівнянні з активним, менша залежність  $L_m$  від глибини тріщини свідчать, що величина внесеної індуктивності більше, ніж внесений активний опір, залежить від інтенсивності вихорових струмів, близьких до поверхні матеріалу.

Теоретично здійснено приведення середовища, що вміщує область з підвищеною концентрацією мікротріщин (у вигляді окремого вертикального шару), до однорідного ізотропного середовища провідністю  $\epsilon_e$ . Критерієм еквівалентності є рівність активних втрат у обох випадках. Тут розглядається двовимірна модель з ВСП у вигляді двопроводової лінії, розташованої паралельно межам аномального шара. Визначені модуляційні характеристики  $\epsilon_e$  при проходженні ВСП понад дефектної зоною. Одержані формули визначають залежність  $\epsilon_e$  від розмірів дефектної зони, її провідності та провідності матеріалу за її межами, а також параметрів ВСП. Розроблено методику обчислення внесених опорів та методику розв'язання зворотної

задачі. Значення провідності в зоні локалізації мікротріщин зв'язане з об'ємною концентрацією волокон, що збереглися неруйнованими. Це дає можливість зробити оцінку реальної величини коефіцієнту армування в області з підвищеним ризиком руйнування.

Теоретично проаналізована взаємодія поля ВСП з П-подібною магнітною осердею та паралельного зовнішній поверхні розшарування у слабопровідному середовищі. Тангенціальна напруженість електричної складової поля ВСП у нижньому напівпросторі визначена двовимірним однорідним рівнянням Гельмгольца. Напруженість власного поля ВСП зображена у вигляді ряду Фур'є. Розглянуто схеми заміщення магнітного кола ВСП, що враховують різну глибину розташування дефекту. Визначено внесені опори ВСП.

Установлено наявність різних по значенню та розташуванню максимумів чутливості активної та реактивної складових внесеного імпеданса до розшарування у залежності від добутку частоти поля на провідність матеріалу  $\omega\sigma$ .

Глибина розташування дефекту впливає на параметри ВСП значно більше, ніж його розкриття. Градієнт чутливості до зміни розкриття на різних глибинах падає із зменшенням добутку  $\omega\sigma$ .

П-подібний ВСП є більш чутливим до розшарування, ніж ВСП осесиметричного типу, його реакція менше залежить від глибини розташування дефекту.

Здійснено моделювання плоскопаралельного поля ВСП одношаровою полоскою безмежних в напрямку  $Y$  струмових ниток, розташованих на поверхні матеріалу. Векторний потенціал поля нитки у провідному напівпросторі визначен у вигляді:

$$A(\beta, x, z) = \frac{\mu_0 I_0}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{z}{\sqrt{2}} P(\beta, \lambda)} \frac{\lambda + \frac{i}{\sqrt{2}} P(\beta, \lambda) - \frac{i}{\sqrt{2}} Q(\beta, \lambda)}{\lambda^2 + \sqrt{2} \lambda P(\beta, \lambda) + (\lambda^4 + \beta^4)^{1/2}} e^{-i[\frac{z}{\sqrt{2}} Q(\beta, \lambda) + \lambda x]} d\lambda, \quad (4)$$

де  $\lambda$  - параметр перетворення Фур'є,  $\beta = \sqrt{\omega\sigma\mu_0}$ ,  $P(\beta, \lambda) = \sqrt{\lambda^2 + \beta^4 + \lambda^2}$ .

Рішення (4) одержане у аналітичному вигляді з використанням апроксимуваних виразів.

Для розрахунків векторного потенціалу поля, формуемого вихорними струмами  $J_r$ , які утворюються в шарі, що прилягає до верхньої грані розшарування, необхідно знати величину  $J_r$  (тут здійсню-

ється моделювання розшарування вторинним джером поля). Величина  $J_r$  прийнята пропорційно густині вихорового струму у місці розташування дефекту при його відсутності:  $J_r = k J_0 / M_d \sqrt{1 + \alpha^2} / \sqrt{1 + \alpha^2}$ , де  $J_0$  - струм у нитках первинного джерела поля,  $k$  - емпіричний коефіцієнт пропорційності,  $M_d = \beta / (2\alpha + \beta)$ , де  $\alpha = 13,5$  1/м.

Визначено годографи ВСП, розташованого над безперервним напівпростором та годографи імпедансу, внесеного розшаруванням (рис.3). Проведено експериментальні дослідження на фізичних моделях.

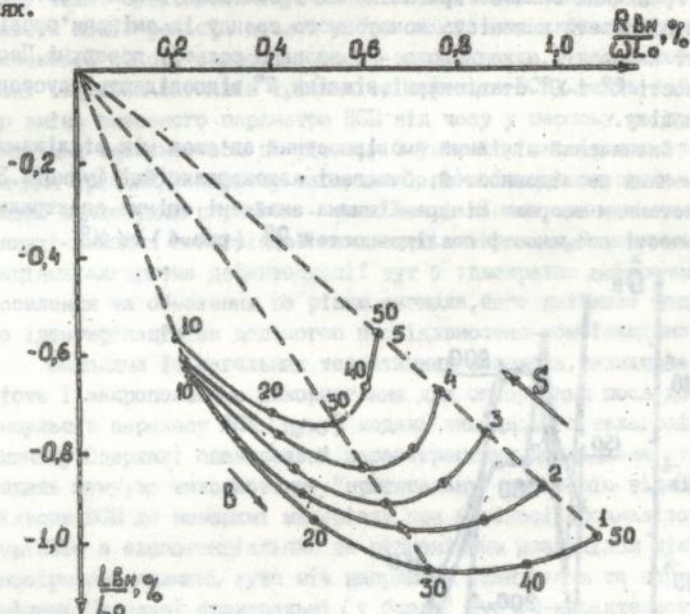


Рис.3. Розрахункові годографи відносного імпедансу, внесеного у ВСП розшаруванням, розташованим на глибині  $S$ , мм ( $\beta = \sqrt{60 S \mu_0}$ , 1/м).

У четвертому розділі здійснено дослідження та розроблені методи цифрової обробки сигналів, орієнтовані на вилучення модуляційного імпульсу з шуму.

Наводяться результати дослідження статистичних характеристик сигналів. Збирання даних здійснювалось на взірцях вуглець-

-вуглецевих композитів різних модифікацій "вирізаних" із стінок виробу на ділянках із значною шорсткістю. ВСП являє собою коротку циліндричну котушку діаметром 1,8 мм. Вимірювання проводились на частоті  $f = 100$  МГц. Найбільший крок сканування - 0,25 мм.

Обробка результатів показала, що послідовності відліків вміщують тренд, при цьому монотонний тренд більш властивий вибіркам  $R^\circ$ , а коливний -  $X^\circ$ . Аналіз відхилів значень інверсій та серій від граничних значень при зміні крока сканування дозволив ідентифікувати наявність монотонного тренду із змінами провідності композиту, а коливного - з впливом рельєфу поверхні. Послідовності  $R^\circ$  і  $X^\circ$  стаціонарні, відліки  $R^\circ$  відповідають гауссовому розподілу.

Визначений лінійний ймовірнісний зв'язок між відліками одноіменних послідовностей, обчислені автокореляційні функції. З використанням теореми Вінера-Хінчина знайдені оцінки спектральної щільності потужності послідовностей  $R^\circ$  (рис. 4) та  $X^\circ$ .

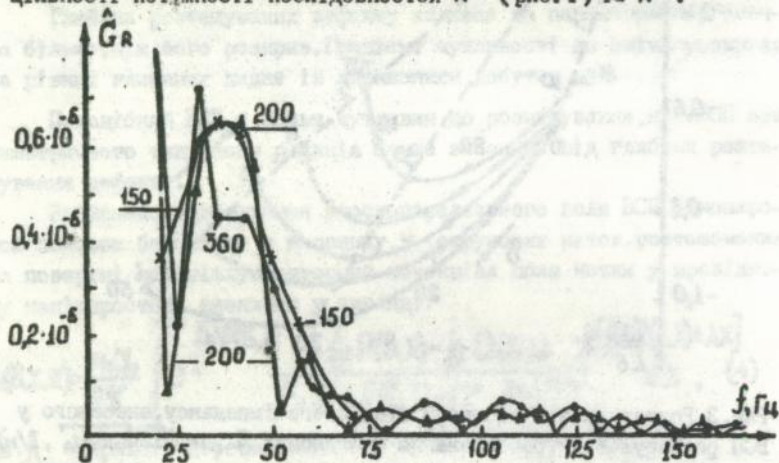


Рис. 4. Спектральна (Фур'є) щільність потужності послідовності  $R^\circ$ .

Для згладжування оцінок, виходячи із загальних теоретичних положень, були вибрані і використані спектральні вікна Бартлетта, Ханна, Парзена, ГЕО та їх кореляційні аналоги. Найкращі результати одержані з використанням кореляційного вікна Ханна. Застосована

процедура стягування вікна. Визначено спектральний пік, що відповідає поверхневій тріщині. Цей пік виявився стійким при змінненні ширини вікна, його потужність змінюється відповідно із зміною глибини тріщини  $g$  (для рис. 4  $g = 0,85$  мм).

Розглянуті питання відокремлення сигналів тріщини та перекосу ВСП у режимі безперервного сканування.

Вимірювання кількісних, метричних характеристик шорсткості ряду типів вуглецевовміщуючих композитів показало, що розподіл висоти піків рельєфа досить добре описується експоненціальним законом. В основі запропонованого алгоритма, що відокремлює поодинокі імпульси сигналів тріщини та перекоса ВСП, лежить той факт, що зміна внесеного параметра ВСП від часу у першому та другому випадках здійснюється по різному. В умовах рівномірного сканування для тріщини, у першому наближенні, це змінення описується гауссовою кривою, для перекоса – експоненціальними залежностями. Розглянуті випадки нестійкої швидкості сканування. Основними операціями алгоритма дефектоскопії тут є: двократне диференціювання, посилення та обмеження по рівню сигналу, його двійкове кодування та ідентифікація за допомогою послідовно-комбінаційної схеми.

Виходячи із загальних теоретичних положень, визначена можливість і запропоновано використання для описування послідовності імпульсів перекосу ВСП (шуму) модель випадкового телеграфного сигналу. Одержані спектральні характеристики. Досліджена уточнена модель шуму, що використовує "притягальну" кореляцію відводу та підводу ВСП до поверхні матеріалу при перекосі. Проаналізовані варіанти з експоненціальним та різномірним розподілом щільності ймовірності значень кута між напрямком сканування та нормаллю до тріщини. Наведені спектральні (у базисі Фур'є) характеристики, які є свідками, що у випадку рівномірного розподілу, характерного для композиту з непрозорим покриттям, частотний діапазон вилучення сигналу із шуму звукується.

Проведено логічний аналіз модуляційних характеристик тріщин у композитних матеріалах.

Послідовність відліків внесеного сигналу перетворюється у дві двійкові послідовності  $X$ ,  $Y$  відповідно до знаку та величини (у відношенні до порогу) швидкості зміни сигналу на кожному дискретному кроці сканування. На основі аналізу усіх можливих

комбінацій відліків у двійковій виборці, визначені булеві функції, що відповідають наявності дефекту та характеризуються різним рівнем невизначеності. Розраховані їх спектральні характеристики у базисі Уолша. Показано, що ймовірність пропуску дефекта падає із зростанням числа відліків у виборці. Наведені аналітичні вирази двовимірних  $(X, Y)$  булевих функцій, описуючих процес дефектоскопії для чотирьох, п'яти, шести та семи відліків у виборці в процесі її скочання по траєкторії сканування. Проаналізовані питання реалізації функцій за допомогою комбінаційних схем, програмованих логічних матриць, мікропроцесорних систем, наведений текст системної програми.

Для аналізу виборок з восьми і більш відліків запропонований більш швидкодіючий алгоритм, оснований на дослідженні автокореляції функції  $\Psi(\eta)$ , що визначається рангом набору з булевих функцій рівнозначності двох значень  $X_i$ , відокремлених одне від другого інтервалом  $\eta$  :

$$\Psi(\eta) = \sum_{i=1}^n (X_{i+\eta} \oplus X_i) \pmod{2}, \quad (5)$$

де  $n$  - число відліків у групі, що аналізується.

Визначені часові втрати. Вони дозволяють при роботі мікропроцесора середньої продуктивності у реальному масштабі часу проводити сканування з швидкістю порядку 50 мм/с (для виборки з 8 відліків). Використання дев'ятого відліка у наборі збільшує втрати машинного часу приблизно на 10-12%, десятого - на 9-11% і так далі по спадаючій залежності.

Послідовність відліків  $X_i$  визначена у вигляді двійкової функції  $X(S)$  від дискретної координати  $(S)$  вздовж траєкторії сканування  $X(S)$ . Подаючи цю функцію у вигляді полінома Жегалкіна стандартних функцій  $\mathcal{F}_i(S)$  :

$$X(S) = \oplus \sum_{j=0}^{\infty} \mathcal{F}_j(S) X^{(j)}(0) \quad (6)$$

проаналізували значення коефіцієнтів  $X^{(j)}(0)$ , що являють собою  $j$ -ті похідні  $X(S)$  у нульовій точці виборки. Поліном був обмежений 16 доданками. Установлено, що для усіх різновидів симетричних модуляційних характеристик значення восьмої та дев'ятої похідних зберігаються нульовими.

Досліджені асиметричні характеристики, що відповідають нахилу тріщини. При значній зміні коефіцієнту асиметрії (від 3/11 до

1) зберігається нульовим значення восьмої бінарної похідної. Набір з 16-ти похідних визначено як двійковий вектор, знайдена кодова відстань (метрика по Хемінгу) між векторами, що відповідають різним (суміжним) кутам нахилу тріщини. Із збільшенням нахилу кодова відстань збільшується, що покращує розрізняльну спроможність методу. Наведена системна програма ідентифікації дефекту, визначені часові втрати, які є меншими, чим у попередньому випадку.

Дослідження діагностичної кореляції між булевими функціями, що описують послідовні етапи скочвання вікна по модуляційній кривій, дозволили виділити максимуми кореляційних функцій, що зберігаються при спотворенні інформації навіть більш ніж у половині двійкових розрядів виборки, обмеженої вікном. Визначена ймовірність "просочування" між булевими функціями по розрядах виборки з перешкодою. Так для скочаючої виборки з чотирьох розрядів, при наявності перешкоди в двох з них, ймовірність хибного спрацювання знаходиться у межах від 0,068 до 0,28 відносно ймовірності виявлення, що прийнята за 1.

Теоретично, шляхом перетворення по Фур'є модуляційної характеристики, що одержана з врахуванням розподілу густини вихорового струму у середовищі, визначена форма спектра поверхневої тріщини. Цей спектр відповідає одержаному раніше по експериментальній виборці. Досліджено вплив змін електричної провідності, швидкодійної періодичної завади, що обумовлена рельєфом поверхні композита (розташуванням дугтів волокон, "прошивок" по третій координаті, тощо), на спектр.

Частотна характеристика логічного фільтра, визначена у базисі Уолша, перетворена у базис Фур'є (рис. 5). Тут, як проміжний, використаний перехід між логічною та арифметичною кореляційними функціями та теорема Вінера-Хінчина.

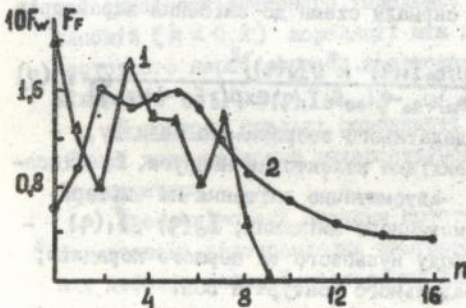


Рис. 5. Частотні характеристики логічного фільтру: 1—спектр Уолша, 2—спектр Фур'є.

З використанням критерія Неймана-Пірсона визначена ймовірність виявлення тріщини у залежності від ймовірності несправного спрацювання  $Q_d(Q_0)$  при поодинокому вимірюванні. Відокремлення сигналу від завади (перекіс ВСП) здійснюється по тривалості їх модуляційних імпульсів. Значення  $Q_d=0,9$  досягається при значеннях  $Q_0$  не вище 0,1.

У п'ятому розділі наведені результати дослідження автогенераторних перетворювачів з параметричними ВСП.

Досліджені діаграми зриву, коливні характеристики та характеристики навантаження високочастотних триточечних перетворювачів з різним підімкненням резонансних контурів. Максимальну чутливість в області високих значень добротності має емісна і три точка з резонансною системою у вихідному колі. Розширення діапазону значень добротності, у якому здійснюється вимірювальний режим, досягається при одночасному збільшенні коефіцієнту додатного зворотнього зв'язку (20-50%) по змінному і глибини від'ємного зворотнього зв'язку по постійному струму. При цьому спостерігається м'яке збудження коливань.

Збільшення напруженості до ступеня, що відповідає критичному та початку перенапруженого режиму, збільшує стабільність вимірювальної схеми. Для схем, що використовують підімкнення коливної системи у коло керування, чи у коло додатного зворотнього зв'язку, більш характерні релейні режими.

Теоретично, з аналізом змінних та постійних складаючих струмів та напруг, визначені рівняння стаціонарного режиму базової схеми автогенераторного перетворювача. На підставі цього визначена чутливість амплітудного сигналу схеми до зміння параметрів резонансного контура :

$$S = \frac{(1 + \delta U_{Ra}) [2(1-k)U_{Ra}I_0(\varphi) - k^2 U I_0(\varphi)]^2}{U_{Ra} [2(1-k)R_0 I_0(\varphi) I_1(\varphi) + 2(1 + \delta U_{Ra}) U_{Ra} - \gamma I_{co} R_0 I_1(\varphi) \exp(\delta E_{\delta} - \delta U_{Ra})]} \quad (7)$$

де  $\varphi = \gamma k U$ ,  $k$  - коефіцієнт додатного зворотнього зв'язку,  $\gamma$  - ефективність емітера,  $U$  - вихідна колекторна напруга,  $E_{\delta}$  - фіксоване зміщення на базі,  $U_{Ra}$  - автоматичне зміщення на емітері транзистора,  $R_0$  - опір автоматичного зміщення;  $I_0(\varphi)$ ,  $I_1(\varphi)$  - функції Бесселя першого роду нульового та першого порядків;  $R_e$  - еквівалентний опір паралельного контура з ВСП.

Проаналізовані різні варіанти автоматичної відстройки від

впливу змін проміжку між робочим торцем ВСП та поверхністю матеріалу. Більш широкий діапазон відстроки характерний для схем, що використовують електросмнісні та електропотенціальні давачі проміжку, які поєднані з ВСП. Цю функцію можуть виконувати і різноманітні котушки, що працюють у діапазоні від сотень МГц до одиниць ГГц. При малих розмірах робочих ВСП, коли таке поєднання давачів здійснити важко, більш доцільні схеми, основані на вимірюванні тангенсу фазового кута внесеного імпедансу. Запропоновані різні варіанти схем таких перетворювачів.

У ряді випадків при контролі підповерхневих дефектів в вуглець-вуглецевих композитах, при структуро- та дефектоскопії композитів під електрично провідним покриттям використовується діапазон менших частот та низькодобротні ВСП. Проведені експериментальні дослідження показали, що для цієї мети доцільним є використання автогенераторів на  $\Lambda$ -діодах.

Докладно теоретично, з використанням еквівалентних схем, і експериментально досліджені вольт-амперні характеристики (ВАХ)  $\Lambda$ -діодів; коливні характеристики та характеристики навантаження автогенераторних перетворювачів. Досліджені їх недонапружені та перенапружені режими. Розглянуті способи дискретного та неперервного керування параметрами ВАХ; досліджені перетворювачі на керованих  $\Lambda$ -діодах. Запропонована схема термостабільного автогенератора.

Теоретично і експериментально досліджений двохчастотний автогенераторний перетворювач з параметричними ВСП. Одержані вирази, що зв'язують стаціонарні амплітуди коливань двох частот з параметрами контурів. Визначені умови вилучення дійсної та уявної складових внесеного імпедансу ВСП на кратних частотах при слабкій ( $k < 0,2$ ) кореляції між ними. Запропонована схема двохчастотного перетворювача з автоматичною корекцією вплива проміжку.

У шостому розділі розглянуті питання покращення метрологічних характеристик вихорострумових приладів шляхом варіації їх структури.

Проаналізовані питання просторово-частотного і просторово-часового відокремлення вимірювальних каналів у високочастотних дефектоскопах. Використання двох просторово об'єднаних ВСП

дозволяє завжди зберегти постійно відстань між відліками сигналу. В схемах з використанням одного перетворювача при часовому формуванні сигналів запиту відстань між відліками залежить від швидкості переміщення зонду. При ручному скануванні ця відстань змінюється, що вносить невизначеність у формування інформаційного сигналу.

Проаналізовані логічні ситуації, що виникають при дефектоскопії композитів. Розроблені схеми визначення інформаційних сигналів. Визначена схема комутації високодобротних резонансних контурів. Випробування приладів показали, що поріг чутливості по глибині поверхневої тріщини складає 0,2-0,3 мм. Дефектоскопу з просторово-частотним відокремленням каналів властива більша чутливість (0,2 мм); дефектоскопу з просторово-часовим - більша точність при вимірюванні глибини тріщини за рахунок кращого розв'язання вимірювального та опорного каналів.

Розглянуті способи та прилади, запропоновані для структуроскопії, дефектоскопії та дефектометрії композитів. Усі пропозиції захищені авторськими свідоцтвами.

У сьомому розділі наведені результати практичного використання розроблених приладів.

На основі проведених досліджень розроблено п'ять типів приладів для структуроскопії і контролю фізико-механічних властивостей і п'ять приладів для дефектоскопії та дефектометрії вуглецевміслючих композитів. Дослідження, проведені за допомогою цієї апаратури в організаціях та на підприємствах показали наступне.

На ряді виробів з вуглепластиків і органовуглепластиків спостерігається значний (до 40%, а іноді і вище) розкид значень електричної провідності  $\sigma$ , зв'язаний, у першу чергу, з непостійністю густини армуючої вуглецевої тканини на різних ділянках виробу.

Дослідження залежності  $\sigma$  вуглепластиків різних типів від їх гущини, проведені на масиві (біля 90) спеціально зроблених (для аналітичних вимірювань) зрізів, показали, що величина статистичного зв'язку між цими параметрами в значній мірі залежить від структури і температури технологічної обробки вуглецевої тканини. Значення коефіцієнтів кореляції лежать в діапазоні  $k$

$=0,56-0,99$ . Значний статистичний зв'язок спостерігається між теплофізичними характеристиками, зокрема коефіцієнтом теплопровідності  $\lambda$  і теплового лінійного поширення  $\alpha$ , та  $G$ . Коефіцієнт кореляції між усередненими значеннями  $\bar{\lambda}$  і  $\bar{G}$  (усереднення проводилось в межах партії взірців даного типу, як правило п'ять циліндричних взірців) складає  $k = 0,945$ .

У наслідку прямих експериментів показано, що електрична провідність вуглепластиків вирішальним чином залежить від об'ємної частки вуглецевої тканини в композиті. Цим пояснюються також і високі значення коефіцієнту кореляції  $G$  з величиною унесення жаси ( $k = 0,62-0,89$  для різних типів композита).

Прилади для дефектоскопії та дефектометрії мають різні робочі частоти (від 60 до 370 МГц у залежності від призначення приладу і типу композита), відрізняються структурною організацією, режимом сканування первинного перетворювача.

Прилади, що працюють у режимі ручного сканування з часовим формуванням імпульсів запиту, мають поріг чутливості по глибині поверхневої тріщини - 0,2-0,3 мм у залежності від рівня шорсткості поверхні. В приладах з механічним і комбінованим скануванням, з формуванням міток шляху по траєкторії переміщення зонду поріг чутливості зменшується до 0,1-0,2 мм. Тут здійснена більш складна обробка інформації по алгоритмах, що описані вище, за допомогою вбудованої мікропроцесорної системи (в приладі з механізованим скануванням) чи з використанням персональної ЕОМ (прилад з комбінованим скануванням).

Розроблені прилади для вимірювання концентрації дрібнодисперсного графіту в кускових пробах графітової руди безпосередньо в кар'єрі. Робоча частота  $f = 76$  МГц. Діапазон вимірювань починається з 1% вміщення графіту у взірцях руди. Провідність руди з назначною вологістю, що вже підлягає технологічній переробці, складає декілька одиниць См/м і вище.

Розроблені та виготовлені прилади, методики контролю впроваджені в організаціях та на підприємствах, в основному, машинобудівного профілю. Підтверджені ці документи наведені у додатку дисертації.

## ВИСНОВКИ

1. З використанням методу кінцевих різниць розраховані годографи накладних ВСП осесиметричного і прямокутного типів, розташованих над областю середовища з вертикальними до зовнішньої поверхні шарами (кромка виробу). Визначені залежності внесеного активного опору ВСП від коефіцієнту армування та від кута повороту прямокутної рамки відносно подовжньої осі анізотропії композита.

Проведене однорідно-анізотропне еквівалентування кусково-лінійного композита у полі прямокутного ВСП. Отримані аналітичні вирази для приведених провідностей ортотропного тіла, модуляційні характеристики подовжньої провідності.

Запропоновано метод обчислення приведеної провідності шаруватих середовищ з вільним кутом "виходу" шарів на зовнішню поверхню. Визначена методика обчислення внесених опорів ВСП.

2. Теоретично, з використанням методу кінцевих різниць, та експериментально визначена форма активного та реактивного модуляційних імпульсів для перпендикулярної і нахиленої тріщини у структурно-анізотропному матеріалі, а також її зміна в залежності від кута нахилу, геометричних параметрів тріщини, частоти поля.

Отримані аналітичні залежності, що описують вплив області з більш високою концентрацією мікротріщин на приведену провідність середовища у полі накладного ВСП. Дана методика обчислення внесених опорів, методика вирішення зворотної задачі.

3. Теоретично визначені залежності внесених опорів ВСП з П-подібною феритовою осередком, що розташований понад слабопровідним матеріалом з розшаруванням, від електромагнітних та геометричних параметрів системи ВСП-дефектний виріб. Установлено наявність максимумів чутливості активної та реактивної складових імпедансу ВСП до розшарування у залежності від добутку частоти поля на провідність матеріалу.

Теоретично, шляхом моделювання розшарування вторинним джерелом поля, визначені внесені опори для одношарової полоси струмових ниток, що лежать на поверхні матеріалу.

4. Проведені статистичні дослідження послідовностей еквідистантних (крок 0,25 мм і згше) по траєкторії сканування відліків внесених опорів ВСП. Обчислені кореляційні функції, визначені оцінки спектральної (Фур'є) щільності. Виділений спектральний пік, що відповідає поверхневій тріщині.

Запропоновано алгоритм, що дає можливість відокремити поодинокі імпульси тріщини і перекоосу. Для описання сигналів перекоосу ВСП при безперервному скануванні застосована модифікована модель випадкового телеграфного сигналу.

Запропоновано метод дефектоскопії, оснований на створенні родини тестових модуляційних характеристик, представлених у вигляді бінарних послідовностей. Визначені булеві функції, що описують процес дефектоскопії, розраховані їх спектри Уолша. Для аналізу значного числа відліків запропоновані також більш швидкодіючі алгоритми, що використовують кореляційні та спектральні перетворення. Середні бінарних послідовностей відліків та булевих функцій в процесі сканування виборки вздовж модуляційної кривої.

Теоретично визначена форма спектру Фур'є поверхневої тріщини, та вплив на нього змін електричної провідності, швидкодіючих періодичних та випадкових завад, обумовлених рельєфом поверхні композиту. Частотна характеристика логічного фільтру, що побудована в базисі Уолша, перетворена в базис Фур'є, показана її відповідність спектру тріщини.

З використанням критерію Неймана-Пірсона визначена ймовірність знаходження тріщини у залежності від ймовірності помилкової тривоги.

6. Теоретично і експериментально досліджені високочастотні триточечні автогенераторні перетворювачі; перетворювачі на негетронних  $\Delta$ -типу. Визначені рівняння стаціонарного режиму. Всебічно досліджені вимірювальні режими в широкому діапазоні змін добротності ВСП. Запропоновані різні варіанти автоматичної корекції впливу змін проміжку для накладного ВСП.

Проаналізовані питання просторово-частотного і просторово-часового відокремлення вимірювальних каналів у високочастотних вихорострумових дефектоскопах.

7. На основі проведених досліджень розроблена низка типів приладів для структуроскопії і контролю фізико-механічних властивостей композитів, що вміщують вуглець.

Численні вимірювання на реальних виробках дали можливість визначити міру несталості властивостей виробів вздовж просторових координат; доведена наявність тісного статистичного зв'язку між електричною провідністю вуглепластиків різних типів та їх густиною, теплофізичними характеристиками, об'ємним вміщенням вуглецевих

волокон.

Розроблена низка типів дефектоскопів, що працюють в режимах ручного, механізованого та комбінованого сканування.

Для корекції впливу заважаючих факторів створені методи, основані на варіації структури приладів, цифровій обробці інформації за допомогою вбудованих обчислювальних схем, мікропроцесорів персональних ЕОМ.

З використанням монокристалів напівпровідників досліджені особливості вихорострумових вимірювань в діапазоні низьких провідностей, що мають практичне значення для композитів.

Розроблені прилади та методики контролю впроваджені в організації та на підприємствах переважно машинобудівного профілю. Підтверджуючі це документи наведені у додатку дисертації.

Список опублікованих наукових робіт, відображаючих основні положення дисертації.

1. Хандецкий В.С. Цифровая измерительно-информационная техника. - Днепропетровск: Днепропетровский гос. ун-т, 1985. - 91 с.
2. Хандецкий В.С. Разделение измерительных каналов в высокочастотных вихретоковых дефектоскопах // Дефектоскопия. - 1989. - №6. - С. 40-46.
3. Хандецкий В.С. Логический анализ модуляционных характеристик трещин в композитах // Дефектоскопия. - 1991. - №12. - С. 48-57.
4. Хандецкий В.С. Выявление слоев с повышенной концентрацией микротрещин в углеродсодержащих композитах вихретоковым методом // Механика композитных материалов. - 1992. - №6. - С. 741-749.
5. Хандецкий В.С. Влияние расслоения слабопроводящего композиционного материала на параметры вихретокового преобразователя с плоскопараллельным полем // Дефектоскопия. - 1993. - №12. - С. 32-40.
6. Хандецкий В.С. Анализ сигналов модуляционных вихретоковых дефектоскопов с использованием двоичной логики // Известия ВУЗов. Приборостроение. - 1992. - №10. - С. 46-53.
7. Хандецкий В.С. Вихретоковая структуроскопия углеродсодержащих композитов на кромке образца // Механика композитных материалов. - 1994. - №1. - С. 274-282.
8. Хандецкий В.С. Вихретоковая дефектоскопия трещин в структурно-анизотропных материалах // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. - 1994. - №2. - С. 22-28.
9. Хандецкий В.С. Аппроксимация характеристик  $\Lambda$ -диодов, как не-

линейных элементов автогенераторных измерителей // Приборостроение-Київ: Техніка. - 1981. - Вып. 31. - С. 82-85.

10. Хандецкий В.С. Вихретоковый контроль поверхностных трещин в углерод-углеродных композитах // Технология. - 1987. - №1. - С. 74-80.

11. Хандецкий В.С., Серебренников С.В. Автогенераторный преобразователь для контроля слабопроводящих материалов // Дефектоскопия. - 1984. - №8. - С. №16-21.

12. Хандецкий В.С., Гречка А.Т. Спектральная диагностика сплошности углеродсодержащих композитов // Механика композитных материалов. - 1989. - №5. - С. 922-924.

13. Хандецкий В.С., Серебренников С.В. Особенности вихретоковых измерений удельной электрической проводимости слабопроводящих композитов // Измерительная техника. - 1990. - №10. - С. 39-41.

14. Хандецкий В.С., Гречка А.Т. Цифровая фильтрация при автоматической дефектометрии трещин в композиционных материалах // Известия ВУЗов. Приборостроение. - 1990. - №12. - С. 41-46.

15. Хандецкий В.С., Маркович В.А. Расчет методом сеток внесенных параметров вихретоковых преобразователей, расположенных над структурно-анизотропным материалом // Дефектоскопия. - 1991. - №2. - С. 60-68.

16. Хандецкий В.С., Серебренников С.В. Вихретоковый измеритель удельной проводимости углепластиков // Дефектоскопия. - 1992. - №1. - С. 46-51.

17. Хандецкий В.С., Серебренников С.В. Расчет эквивалентной проводимости вертикально-слоистой среды в поле прямоугольного вихретокового преобразователя // Дефектоскопия. - 1992. - №4. - С. 44-55.

18. Хандецкий В.С., Сопильник А.В., Гречка А.Т. Обнаружение поверхностных трещин в углеродсодержащих композитах // Дефектоскопия. - 1994. - №2. - С. 47-57.

19. Флоров А.К., Хандецкий В.С. Двухконтурная система для электромагнитного контроля электропроводности сред // Известия ВУЗов. Приборостроение. - 1978. - №6. - С. 5-9.

20. Флоров А.К., Хандецкий В.С. Измерение индуктивности ВП в непрерывном ВЧ диапазоне // Изв. ВУЗов. Приборостроение. - 1980. - №9. - С. 12-16.

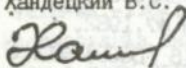
21. Арш Э.И., Твердоступ Н.И., Хандецкий В.С. Особенности построения автогенераторных измерителей на  $\Delta$ -диодах // Измерительная техника. - 1981. - №1. - С. 53-56.

22. Флоров А.К., Хандецкий В.С. Повышение чувствительности двухконтурных кварцевых автогенераторных измерителей // Известия ВУЗов. Приборостроение. - 1981. - №6. - С. 21-25.

23. Арш Э.И., Серебренников С.В., Хандецкий В.С. Анализ измерительных режимов трехточечных автогенераторов с различным включением резонансных контуров // Измерительная техника. - 1982. - №9. - С.40-41.
24. Серебренников С.В., Хандецкий В.С. Исследование диаграмм срыва измерительных автогенераторов с контуром в цепи управления // Приборостроение - Київ: Техніка. - 1982. - Вып.33. - С.100-104.
25. Серебренников С.В., Твердоступ Н.И., Хандецкий В.С. Управление ВАХ  $\Lambda$ -типа для коррекции характеристик измерительных автогенераторных преобразователей // Метрология. - 1983. - №10. - С.43-48.
26. Серебренников С.В., Хандецкий В.С. Сопоставление метрологических характеристик АП с различным включением резонансных контуров // Приборостроение - Київ: Техніка. - 1983. - Вып.35. - С.52-56.
27. Сопильник А.В., Хандецкий В.С. Электропотенциальная отстройка от изменений зазора и перекося в приборах вихретокового контроля углепластиков // Дефектоскопия. - 1990. - №7. - С.28-35.
28. Серебренников С.В., Хандецкий В.С., Дряпко Н.К. Анализ чувствительности автогенераторных датчиков // Метрология. - 1991, №8. - С.48-58.
29. Сопильник А.В., Хандецкий В.С., Комарова Л.П. и др. Измерение глубины трещин в углеграфитовых композитах // ПТО. - 1989. - №3. - С.98-104.
30. Редько В.И., Сопильник А.В., Хандецкий В.С. и др. Неразрушающий контроль физико-механических характеристик углеграфитовых композитов // Техника, экономика, информация. - 1983. - №6. - С.95-105.
31. Сопильник А.В., Твердоступ Н.И., Хандецкий В.С. и др. Резонансный измеритель магнитной проницаемости с коррекцией динамических погрешностей // Измерительная техника. - 1987. - №9. - С.50-52.
32. Серебренников С.В., Сопильник А.В., Хандецкий В.С. Двухчастотный автогенераторный преобразователь на негатронах  $\Lambda$ -типа // Известия ВУЗов. Радиозлектроника. - 1984. - №1. - С.89.
33. Арш Э.И., Лейзерович А.Г., Хандецкий В.С. и др. Автогенераторный многопараметрический измеритель // ПТЭ. - 1979. - №6. - С.179.
34. Хандецкий В.С. Выделение сигнала дефекта из шума при динамическом вихретоковом контроле изделий из композитов // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. - 1995. - №2. - С.36-43.
35. А.с. №613229 (СССР) МКИ G 01 N 27/02 / Арш Э.И., Хандецкий В.С. - Оpubл. в БИ №10, 1981.
36. А.с. №894550 (СССР) МКИ G 01 N 27/90 / Хандецкий В.С., Сопильник А.В., Пеньков А.П. - Оpubл. в БИ №48, 1981.
37. А.с. №907464 (СССР) МКИ G 01 N 27/32 / Арш Э.И., Хандецкий В.С.,

- Серебренников С.В. - Оpubл. - в БИ №7, 1982.
38. А.с. №907485 (СССР) МКИ G 01 R 33/16/Арш Э.И., Хандецкий В.С. - Оpubл. в БИ №7, 1982.
39. А.с. №938116 (СССР) МКИ G 01 N 27/02/Хандецкий В.С., Серебренников С.В. - Оpubл. в БИ №23, 1982.
40. А.с. №940109 (СССР) МКИ G 01 V 3/26/ Арш Э.И., Хандецкий В.С. - Оpubл. в БИ №24, 1982.
41. А.с. №953602 (СССР) МКИ G 01 R 33/00/Арш Э.И., Хандецкий В.С., Серебренников С.В. - Оpubл. в БИ №31, 1982.
42. А.с. №967491 (СССР) МКИ G 01 N 27/02/Арш Э.И., Хандецкий В.С., Коваленко Р.П. - Оpubл. в БИ №1, 1983.
43. А.с. №967551 (СССР) МКИ G 01 V 3/10 Арш Э.И., Хандецкий В.С., Серебренников С.В. - Оpubл. в БИ №1, 1983.
44. А.с. №998938 (СССР) МКИ G 01 N 27/90/Арш Э.И., Редько В.И., Сопильник А.В., Хандецкий В.С. - Оpubл. в БИ №7, 1983.
45. А.с. №1000892 (СССР) МКИ G 01 N 27/90/Арш Э.И., Редько В.И., Твердоступ Г.М., Хандецкий В.С. - Оpubл. в БИ №8, 1983.
46. А.с. №1022041 (СССР) МКИ G 01 N 27/90/Хандецкий В.С. - Оpubл. в БИ 21, 83.
47. А.с. №1030972 (СССР) МКИ G 03 L 1/00/ Арш Э.И., Хандецкий В.С., Серебренников С.В., Твердоступ Н.И. - Оpubл. в БИ №27, 1983.
48. А.с. №1099269 (СССР) МКИ G 01 N 27/90/Хандецкий В.С., Редько В.И., Серебренников С.В. - Оpubл. в БИ №23, 1984.
49. А.с. №1173295 (СССР) МКИ G 01 N 27/90/Хандецкий В.С. - Оpubл. в БИ 30, 85.
50. А.с. №1206676 (СССР) МКИ G 01 N 27/72/Хандецкий В.С., Канунников В.П. - Оpubл. в БИ №3, 1986.
51. А.с. №1260835 (СССР) МКИ G 01 N 27/90/Хандецкий В.С., Астамонок С.И., Редько В.И. и др. - Оpubл. в БИ № 36, 1986.
52. А.с. №1308885 (СССР) МКИ G 01 N 27/90/Хандецкий В.С., Гречка А.Т., Комарова Л.И. и др. - Оpubл. в БИ №17, 1987.
53. А.с. №1308887 (СССР) МКИ G 01 N 27/90/Хандецкий В.С., Флоров А.К., Редько В.И. и др. - Оpubл. в БИ №17, 1987.
54. А.с. №1388779 (СССР) МКИ G 01 N 27/90/Хандецкий В.С. - Оpubл. в БИ 14, 88.
55. А.с. №1449890 (СССР) МКИ G 01 N 27/90/Хандецкий В.С., Сопильник А.В., Рябичев О.Я. и др. - Оpubл. в БИ №1, 1989.
56. А.с. №1629830 (СССР) МКИ G 01 N 27/86/Хандецкий В.С. - Оpubл. в БИ 34, 90.
57. А.с. №1647376 (СССР) МКИ G 01 N 27/90/Хандецкий В.С., Гречка А.Т. - Оpubл. в БИ №1, 1991.
58. А.с. №1682209 (СССР) МКИ G 01 R 33/00/Серебренников С.В., Хандец-

кий В.С., Твердоступ Н.И. - Оpubл. в БИ N40, 1991.  
 59. А.с. N1770888 (СССР) МКИ G01N27/90/ Хандецкий В.С.  
 - Оpubл. в БИ N39, 1992.



#### А н н о т а ц и я

Хандецкий В.С. Методы вихретокового контроля углеродсодержащих композитных материалов.

Диссертация (рукопись) на соискание ученой 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 70 научных работ, в том числе 25 авторских свидетельств, которые содержат теоретические исследования проблем вихретокового контроля структурно-анизотропных слабопроводящих материалов, бездефектных и дефектных, а также результаты экспериментальных исследований. Предложены методы идентификации дефектов, коррекции погрешностей. Осуществлено промышленное внедрение методов и средств.

#### A n n o t a t i o n

Khandetsky V.S. Methods of eddy current testing for carbon composite materials.

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

Khandetsky V.S. defends 70 scientific works including 25 authors certificates which contain the theoretical investigations of the eddy current testing problems for structure-anisotropy low conductivity materials, perfect and defective, as well as the experimental results. The methods of defects identification and errors correction are suggested in this thesis. The industry realization of the created methods and instruments was realized.

#### Ключові слова

вуглець, композит, вихрострумний перетворювач, дефектоскопія.

Підписано, до друку 25.08.95 р. Формат 60×84. Папір друкар.  
Офсетний друк. Ум. друк. арк. 1,86. Обл.-вид. арк. 2,0. Тираж 100 прим.  
Замовлення № 1337.

---

Друкарня Дніпропетровського держуніверситету  
320050, м. Дніпропетровськ, вул. Казакова, 4б.

11/4018

AB 33.094