

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДНІПРОПЕТРОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ОЛЕСЯ ГОНЧАРА**

ГЕРАСИМОВ ВОЛОДИМИР ВОЛОДИМИРОВИЧ



УДК 004.9:620.179.147

**ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ВИХОРОСТРУМОВОЇ
ДЕФЕКТОСКОПІЇ В УМОВАХ ДІЇ ВИСОКОІНТЕНСИВНИХ ЗАВАД
СКЛАДНОЇ СТРУКТУРИ**

Спеціальність 05.13.06 – інформаційні технології

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дніпро – 2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі електронних обчислювальних машин Дніпропетровського національного університету імені Олеся Гончара Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник:

доктор технічних наук, професор
Хандецький Володимир Сергійович,
Дніпропетровський національний університет ім. О. Гончара,
завідувач кафедри електронних обчислювальних машин,
м. Дніпро

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Жуковицький Ігор Володимирович,
Дніпропетровський університет залізничного транспорту
ім. академіка В. Лазаряна,
завідувач кафедри електронних обчислювальних машин,
м. Дніпро

доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Якунін Анатолій Олександрович,
Університет митної справи та фінансів,
завідувач кафедри інформаційних систем та технологій,
м. Дніпро

Захист відбудеться “27” вересня 2017 року о 14:00 на засіданні спеціалізованої вченої ради К 08.051.01 у Дніпропетровському національному університеті імені Олеся Гончара за адресою: 49010, м. Дніпро, вул. Наукова, 9, корп. 12, ауд. 512

З дисертацією можна ознайомитись у науковій бібліотеці Дніпропетровського національного університету імені Олеся Гончара за адресою: 49107, м. Дніпро, вул. Казакова, 8.

Автореферат розісланий “ 22 ” серпня 2017 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради К 08.051.01,
доцент



Земляна С. В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми роботи визначається необхідністю підвищення ефективності неруйнівного контролю виробів і конструкцій машинобудування, авіакосмічного комплексу і транспортного господарства. Для дефектоскопії тріщин в металевих та електропровідних композитних матеріалах найбільш оптимальним є вихорострумний метод контролю. Дефектоскопія композитних матеріалів значно ускладнюється внаслідок неоднорідності їх структури, наявності складного, з різним ступенем стохастичності, рельєфу поверхні виробів. Сканування такої поверхні вихорострумними перетворювачами (ВСП) в ручному режимі супроводжується неконтрольованими змінами ефективного зазору, перекосами перетворювача. Безконтактне сканування поверхні виробів в автоматичному режимі у ряді випадків обмежується складною формою виробів, неідеальністю форми, биттями у вузлах обладнання для сканування. Тому, для автоматичної корекції впливу факторів і завад, які заважають, актуальною є розробка інформаційної технології дефектоскопії.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Основні результати дисертаційної роботи одержано під час виконання науково-дослідних робіт кафедри електронних обчислювальних машин Дніпропетровського національного університету ім. Олеса Гончара: "Розробка методів формування та обробки зображень дефектів на основі штучних нейронних мереж" (№ 0100U005247, 2000 – 2002 р.), "Розробка теоретичних основ імовірнісної дефектоскопії з використанням нечіткої логіки" (№ 0103U000580, 2003 – 2005 р.), "Створення методів і алгоритмів обробки даних імовірнісної дефектоскопії з використанням принципів штучного інтелекту" (№ 0106U000801, 2006 – 2008 р.), "Розробка теорії безконтактних вимірювань електрофізичних властивостей слабопровідних гетерогенних матеріалів у вихорових магнітних полях" (№ 0109U000146, 2009 – 2011 р.), "Дослідження та розробка засобів і технологій комп'ютерної інженерії" (№ 0116U003636, терміни виконання 2016 – 2018 р.).

Мета роботи полягає у вирішенні актуальної науково-технічної задачі створення інформаційної технології вихорострумної дефектоскопії, що базується на розробці методів статистичної, кореляційної та спектральної обробки інформації в режимі реального часу, яка одержана в процесі сканування поверхні виробу, направленої на імовірнісну ідентифікацію сигналу дефекту в умовах дії квазідетермінованих завад, пов'язаних з неконтрольованим перекосом чи відводом вихорострумного перетворювача в процесі сканування, та високоінтенсивного шуму, обумовленого значною шорсткістю поверхні матеріалу, особливо композиційного, армованого джгутами волокон.

Для досягнення цієї мети в роботі необхідно вирішити наступні завдання:

- проаналізувати сучасні методи обробки даних у задачах неруйнівного вихорострумного контролю композитних матеріалів;
- експериментально дослідити вплив змін просторового розташування вихорострумного перетворювача відносно поверхні виробу на складові імпедансу датчика та розробити модель сигналу перекосу ВСП відносно нормалі до поверхні виробу;
- уточнити вплив на параметри і форму модуляційного імпульсу (МІ) поверхневої тріщини її розмірів, частоти поля зондування і електропровідності матеріалу;

— оцінити характер завад, що виникають при динамічному безконтактному контролі металевих виробів, та шуму, що виникає при скануванні шорсткої поверхні виробів з композитних матеріалів, і обрати його модель для подальших досліджень;

— розробити і дослідити комбіновані швидкодіючі алгоритми обробки інформації на основі статистичних і кореляційних досліджень сигналів, одержаних в процесі дефектоскопії;

— розробити методи спектральної, у базисах Фур'є і вейвлетів, ідентифікації сигналів дефектів за визначеним критерієм в умовах дії квазідетермінованих завад визначеної форми, але з випадковим часом з'явлення і випадковою амплітудою, та високоінтенсивного гаусового шуму;

— провести статистичні дослідження та імовірнісний аналіз сигналів дефектів при різних значеннях імовірності помилкової тривоги і різних інтенсивностях шуму на основі розроблених методів спектральної ідентифікації;

— удосконалити спектральний, у базисі Фур'є, метод ідентифікації щодо розрізнявальної здатності та універсальності відносно геометричних параметрів дефектів;

— розробити інформаційну технологію, що поєднує розроблені методи обробки інформації як в часовій, так і в спектральній області з метою оптимізації процесу виявлення дефектів та підвищення імовірності їх ідентифікації.

Об'єктом дослідження є процес вихорострумової дефектоскопії матеріалів в умовах дії високоінтенсивних завад складної структури.

Предметом дослідження є засоби, моделі, методи та інформаційні технології обробки та аналізу сигналів дефектів в умовах дії квазідетермінованих завад з випадковим часом з'явлення та випадковою амплітудою, а також високоінтенсивного шуму.

Методи дослідження — статистичні, кореляційні, спектральні в базисі Фур'є і вейвлетів методи, теорія статистичних випробувань, методи і програми моделювання.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що:

1. Вперше запропоновані спектральні, в базисах Фур'є і вейвлетів, методи ідентифікації сигналів дефектів в умовах дії квазідетермінованих завад (сигналів перекосів/відводів датчика відносно поверхні матеріалу), а також високоінтенсивного шуму, обумовленого значною шорсткістю поверхні матеріалу, з використанням запропонованих критеріїв.

2. Вперше з використанням запропонованих спектральних методів ідентифікації і теорії статистичних випробувань проведено імовірнісний аналіз процесу ідентифікації сигналів дефектів при різних значеннях імовірності помилкової тривоги і різних інтенсивностях шуму; проведено порівняння запропонованих спектральних методів ідентифікації за результатами імовірнісного аналізу; визначені імовірності виявлення та відокремлення сигналів поверхневих тріщин різних розмірів від сигналів квазідетермінованих завад в залежності від амплітуд сигналів та інтенсивності шуму.

3. Шляхом моделювання процесу сканування поверхні моношару з джгутів волокон армування у випадках, коли діаметри джгутів розподілені за гаусовим і рівномірними законами, визначено модель шуму, обумовленого шорсткістю поверхні

композитних матеріалів.

4. На базі статистичної і кореляційної обробки інформації, одержаної при моделюванні процесу сканування дефектної поверхні матеріалу, удосконалено швидкодіючі комбіновані методи обробки, що є оптимальними за критерієм сигнал/шум для різних варіантів режимів сканування.

5. Вперше запропоновано інформаційну технологію, що поєднує розроблені методи обробки дефектоскопічної інформації як в часовій, так і в спектральній області і забезпечує імовірнісну оптимізацію процесу ідентифікації дефектів в умовах дії квазідетермінованих завад та високоінтенсивного шуму.

Практичне значення одержаних результатів. Одержані теоретичні і експериментальні результати можуть бути використані при розробці апаратури, відповідного програмного забезпечення, методик дефектоскопії та дефектометрії поверхневих тріщин у виробках машинобудування, авіакосмічного комплексу, транспортної промисловості. Використання розробленої автором дисертації інформаційної технології в процесі дефектоскопії в реальному режимі часу дозволяє без зменшення продуктивності контролю підвищити імовірність виявлення поверхневих дефектів у виробках зі значною шорсткістю поверхні, неідеальністю форми, в умовах неконтрольованих відхилень від заданої траєкторії сканування.

Матеріали дисертації в частині методів і алгоритмів обробки сигналів використано при розробці вихорострумового дефектоскопу для контролю елементів роликового підшипника буксових вузлів пасажирських та вантажних вагонів (ТОВ "НВП СКБ Неркон", довідка від 2016 р.), при розробці комп'ютерних програм "Программное обеспечение к системе контроля эксплуатации транспортных средств "Дельта-СУ" и её модификации" та "Автоматизована система тягового рухомого складу АСТРС" (ТОВ "НВО Дніпротехтранс"), в навчальному процесі Дніпропетровського національного університету імені Олеся Гончара (акт від 2017 р.).

Особистий внесок здобувача. Усі основні результати, що виносяться на захист, отримані здобувачем особисто. У роботах, опублікованих зі співавторами, здобувачеві належить: [12] — фізичні експерименти по дослідженню впливу змін взаємного розташування датчиків і зразків досліджуваних матеріалів на внесений імпеданс ВСП; [13, 21, 24] — моделювання змін просторового розташування датчика відносно поверхні матеріалу на розподіл щільності вихорового струму, наведеного в матеріалі, що характеризує чутливість дефектоскопії; [20] — визначено закономірності впливу на параметри і форму модуляційного імпульсу поверхневої тріщини її розмірів, частоти поля датчика та електропровідності матеріалу; [15, 26] — статистичні дослідження при моделюванні процесу сканування поверхні моношару з джгутів волокон армування; [2, 17, 23] — моделювання процесу цифрової фільтрації при скануванні поверхні виробу в режимі реального часу; [3, 4, 18, 22] — статистичні і кореляційні дослідження коротких вибірок, що представляють собою адитивну суміш шуму з модуляційним імпульсом поверхневої тріщини; [6] — розроблено спектральний, в базисі Фур'є, метод ідентифікації сигналів дефектів в умовах дії квазідетермінованих завад (сигналів перекосів/відводів датчика відносно поверхні матеріалу) з випадковим часом з'явлення і випадковою амплітудою, а також високоінтенсивного шуму, обумовленого складним рельєфом поверхні матеріалу; [7] — досліджено вплив віконних функцій і запропоновано використання віконної функції

Гауса для покращення ефективності спектрального, в базисі Фур'є, методу ідентифікації сигналів дефектів; [11, 19] — досліджено імовірнісні характеристики спектрального, в базисі Фур'є, методу ідентифікації модуляційних імпульсів дефектів; [1, 25, 27] — проведено порівняльний аналіз спектральних методів ідентифікації сигналів дефектів в базисах Фур'є і вейвлетів; [5, 14] — виконано спектральні дослідження модуляційних імпульсів поверхневих тріщин.

Роботи [8-10, 16] виконані автором самостійно під керівництвом професора Хандецького В. С.

Апробація результатів дисертації. Результати роботи доповідались та обговорювались на 4 міжнародних та 3 всеукраїнських конференціях: "WCNDT '96" (New Delhi, 1996), "Датчик-97" (Гурзуф, 1997), "ММЕТ *04" (Дніпропетровськ, 2004), "Application of Contemporary Non-Destructive Testing in Engineering" (Portorož, 2005), "Информационные технологии в управлении сложными системами" (Дніпропетровськ, 2011, 2013), "МКММ-2014" (Херсон, 2014).

Публікації. Результати дисертації відображені в 27 публікаціях: 10 статей у фахових виданнях (з них 4 без співавторів) і 6 тез доповідей на конференціях; 4 статті цитуються у наукометричній базі Scopus, ще 7 — в інших наукометричних базах.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів оригінальних досліджень, висновків, додатку і переліку використаних джерел. Загальний обсяг роботи складає 198 сторінок, з них 160 сторінок основного тексту, 1 рисунок на 1 окремій сторінці, список використаних джерел із 161 найменування на 15 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дослідження, встановлено зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами, сформульовано мету роботи, наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів. Наведено відомості щодо апробації результатів дослідження, кількості публікацій за матеріалами дисертації, структури та обсягу роботи.

Перший розділ містить огляд методів формування і обробки інформаційних сигналів при вихорострумовій дефектоскопії.

Теорія вихорострумової дефектоскопії, методи і засоби обробки сигналів дефектів розроблені і продовжують розвиватися в основному для однорідних металевих виробів у напрямку підвищення чутливості дефектоскопічної апаратури, надійності виявлення дефектів і визначення їх геометричних розмірів, автоматизації процесу контролю.

Дефектоскопія композитних матеріалів значно ускладнюється внаслідок неоднорідності їх структури та анізотропії властивостей в залежності від напрямків та схеми армування. Електропровідність таких матеріалів змінюється в значних межах. Основними причинами цього є: непостійність об'ємного вмісту волокон армування, зміни власних провідностей волокон і матриці внаслідок наявності температурних градієнтів в об'ємі матеріалу при виготовленні виробу, змінення контактної опору між волокнами і джгутами волокон армування, різна пористість матеріалу. Ще одним фактором, що значно утрудняє процес дефектоскопії є наявність складного, з різним ступенем стохастичності, рельєфу поверхні виробів. Контактне в механічно-

му відношенні сканування такої поверхні ВСП супроводжується змінами ефективного зазору, які не контролюються, перекосами перетворювача. Безконтактне сканування поверхні виробів у ряді випадків обмежується складною формою виробів, неідеальністю форми, биттями обладнання для сканування.

Сучасні задачі підвищення чутливості дефектоскопії обумовлюють необхідність використання наряду з детермінованими багатопараметровими методами контролю статистичних та спектральних методів обробки інформації, що одержана в процесі сканування поверхні виробів. Це особливо актуально для матеріалів і виробів, що характеризуються складною структурою та формою, мають значну шорсткість поверхні.

Відповідні дослідження відображені в роботах Родигіна Н. М., Дорофєєва А. Л., Ключєва В. В., Герасимова В. Г., Федосенко Ю. К., Шкарлета Ю. М., Сухорукова В. В., Сандовського В. А., Нікітіна А. І., Хандецького В. С., Назарчука З. Т., Тетерко А. Я., Учанина В. Н., Себко В. П., Udpa L., Lord W., Beissner R. E., Kinsaid T. G., Dodd C. V., Rajesh S. N., Kahn A. H., Sabbagh H. A., Auld B. A., Treece J. C., Vernon S. N. та інших.

Актуальним питанням сучасної дефектоскопії наряду з підвищенням чутливості є необхідність здійснення оцінки ймовірності виявлення дефекту шляхом відповідної обробки інформації в режимі реального часу в процесі сканування.

У **другому розділі** наведено результати дослідження та визначення характеру і форми завад, що спотворюють сигнал дефекту в процесі сканування поверхні виробу.

Експериментальні дослідження впливу змін просторового розташування вихорострумowego перетворювача відносно поверхні матеріалу на складові імпедансу датчика проводилися з використанням 3 різних котушок і 2 пластин: з композитного матеріалу і міді. Досліджено вплив відхилення осі котушки відносно нормалі до поверхні досліджуваної пластини на внесений у котушку опір. Отримані сигнали імпульсного типу "відхилення — повернення ВСП у початкове положення" були апроксимовані квадратичним поліномом, коефіцієнти якого залежать від кута відхилення осі ВСП.

Проведено моделювання впливу відхилення площини симетрії довгої вузької прямокутної рамки від нормалі до поверхні пластини на розподіл щільності вихорострумowego струму (ВС) в пластині. Визначено залежності положення точки максимальної щільності ВС та значення цієї щільності від кута відхилення та узагальненого параметра β , що при заданій геометрії рамки визначається добутком електропровідності матеріалу σ і частоти поля зондування f .

Залежність усередненого значення наведеного в рамці струму від кута відхилення було апроксимовано параболою при різних значеннях узагальненого параметру β .

Проведені експериментальні і модельні дослідження показали правомірність застосування у якості моделі сигналу завади (сигналу перекоосу ВСП) сигналу параболічного типу.

Моделювання процесу переміщення ВСП у вигляді довгої вузької прямокутної рамки зі струмом над поверхнею досліджуваного матеріалу з поперечною поверхневою тріщиною прямокутного перерізу дозволило уточнити закономірності впливу

на параметри і форму модуляційного імпульсу (МІ) дефекту ширини і глибини тріщини при різних значеннях електропровідності σ і частоти f . Форму МІ описано сумою експонент з коефіцієнтами, що залежать від геометричних параметрів системи "датчик-дефект" та добутку $\sigma \cdot \omega$.

За допомогою розробленої програми здійснено моделювання процесу сканування ділянок поверхні композитного матеріалу з однонаправлених джгутів вуглецевих волокон армування. Діаметри джгутів, як випадкові величини, змінювались за гаусовим і рівномірним законами. Проведені статистичні та кореляційні дослідження дозволяють вважати, що у першому випадку шум, що супроводжує процес сканування вже при кроці сканування не менше ніж 25 % від діаметру джгута може вважатися білим гаусовим шумом.

Проведені розрахунки величини завад, що пов'язані з неконтрольованими змінами зазору між вихорострумовим перетворювачем та поверхнею металевого виробу при використанні фазових механізмів послаблення впливу зазору і перекоосу ВСП, які застосовуються внаслідок значної електропровідності металів. Показано, що у ряді випадків амплітуда завад стає помітною у порівнянні з фазовим сигналом дефекту.

У **третьому розділі** наведено результати розробки методів і алгоритмів цифрової фільтрації на основі статистичної і кореляційної обробки сигналів в режимі реального часу при скануванні.

Проведено моделювання процесу цифрової фільтрації при вихорострумовій дефектоскопії поверхневих тріщин у композитних матеріалах. Опіраючись на результати попереднього розділу, вплив рельєфу поверхні відображено шляхом генерації білого гаусового шуму, МІ дефекту заданий у вигляді дзвіноподібної кривої. Локальне згладжування даних у межах ковзного вікна здійснено лінійним способом і за допомогою полінома другого ступеня. Коефіцієнти полінома в кожній точці траєкторії сканування обчислювались методом найменших квадратів.

У результаті згладжування відношення сигнал/шум збільшується приблизно в три рази в обох випадках. Однак при лінійному згладжуванні спостерігається суттєве викривлення форми МІ, поліноміальне згладжування в свою чергу вимагає обчислення коефіцієнтів в кожній точці сканування.

Наступним етапом процесу обробки було обчислення кореляційних функцій згладжених вибірок. На цьому етапі відношення сигнал/шум збільшилося ще приблизно в 3 рази. Кращі результати отримані з використанням взаємної кореляційної функції. Проте необхідність використання тут сполучених перетворювачів робить доцільним використання цього варіанту для автоматизованого контролю великогабаритних виробів з тріщинами значної довжини. У випадку контролю невеликих виробів складної форми шляхом ручного сканування доцільно використовувати автокореляційну обробку.

Проведено статистичні і кореляційні дослідження коротких вибірок, що представляють собою адитивну суміш нормального шуму, який відображує вплив шорсткості поверхні композита на сигнали перетворювача, з модуляційним імпульсом поверхневої тріщини, поміщеним у середину вибірки. Мінімальна ширина імпульсу задана рівною 21 відліку, при кроці між відліками $\Delta = 0.25$ мм.

Отримано залежності вибіркового коефіцієнта кореляції \hat{r} , обчисленого по

схилах модуляційного імпульсу, від відношення сигнал/шум q . Підтверджено гіпотезу про однорідність вибірових коефіцієнтів кореляції \hat{r} , що особливо істотно для використовуваних вибірок малої довжини. Досліджено залежність коефіцієнта детермінації від q при квадратичній функції регресії. Дослідження залежностей коефіцієнтів функції регресії від величини q показало, що залежності коефіцієнтів як лінійної, так і квадратичної складових від q є лінійними.

Для підвищення швидкодії запропоновано визначення коефіцієнтів поліномів згладжування на початку процесу дефектоскопії за результатами попередніх досліджень рельєфу поверхні виробу. Одержані результати згладжування знаходяться на тому ж рівні, що і результати, одержані при визначенні коефіцієнтів поліномів згладжування в кожній точці траєкторії сканування.

Проведено дослідження різних варіантів чергування згладжування і кореляційної обробки послідовностей відліків. Кореляційній обробці передувала або навпаки завершувала її процедура згладжування. Як критерії порівняння використовувалися: кількість зафіксованих вірних сигналів F з 1000 експериментів і відношення кількості вірних сигналів до кількості помилкових η . Кращі результати отримані при використанні попереднього згладжування з наступною взаємною кореляційною обробкою: при значеннях F порядку 70 % і вище, величина η досягає значень більше 100. Однак для взаємної кореляційної обробки необхідним є використання двох просторово сполучених вихорострумових перетворювачів. При цьому, якщо тріщина перетинається траєкторією сканування під довільним кутом, синхронізація модуляційних імпульсів порушується, що значно погіршує результати обробки. Крім того, використання двох сполучених ВСП накладає обмеження на мінімальну довжину тріщини і вимагає вживання спеціальних заходів для розв'язки вимірювальних каналів, що досить складно здійснювати в робочому діапазоні метрових, а іноді і дециметрових довжин хвиль.

Запропоновано алгоритм автокореляційного типу, вільний від зазначених недоліків, де обчислення ведуться з використанням відліків однієї траєкторії сканування датчика

$$r_i = \sum_{j=1}^L (f_{i-\tau-L/2+j} \cdot f_{i+\tau+L/2-j}), \quad (1)$$

де $L = 5, 7, 9, 11$ — інтервал для обчислення коефіцієнта кореляції, $L/2$ — цілочислене ділення, $\tau = \frac{\Delta S - 1}{4} + 1$, ΔS — ширина ковзного вікна.

Доведено, що перед застосуванням алгоритму раціонально провести згладжування методом зважених коефіцієнтів, що в незначній мірі спотворює форму модуляційних імпульсів, і не вимагає значних витрат машинного часу. У підсумку, при значеннях F не нижче, ніж у попередньому випадку величина η становить кілька десятків і більше.

Досліджено ситуації, коли траєкторія сканування датчика перетинає поверхневу тріщину під кутом, відмінним від прямого, при цьому модуляційний імпульс розширюється. Аналізувалися вибірки з максимальною шириною, рівною 51 відліку. Показано, що розширення вікна, що ковзає по траєкторії сканування, при одночас-

ному розширенні імпульсу дає вищі значення довірчої ймовірності w для вибіркового коефіцієнта кореляції \hat{r} . При цьому звуження імпульсу знижує w у значно меншому ступені, ніж це спостерігається при розширенні імпульсу у випадку, коли ширина вікна зафіксована на рівні мінімальної ширини імпульсу, рівній 21 відліку.

У **четвертому розділі** викладено результати розробки та дослідження методів ідентифікації сигналів дефектів в умовах дії високоінтенсивних завод з використанням спектральних перетворень в різних базисах.

Була поставлена задача розробки методу імовірнісної ідентифікації сигналів з використанням їх спектрів Фур'є, тобто розділення сигналів тріщини і перекосу вихорострумового перетворювача (завод) на фоні шуму, обумовленого складним рельєфом поверхні композитних матеріалів. Опираючись на попередні дослідження, в якості моделі модуляційного імпульсу було обрано різницю експонент

$$s_1(t, k) = e^{-1.5t^2} - ke^{-3t^2} \quad (2)$$

де $k = 0 \dots 1$ відповідає за форму огинаючої сигналу (рис. 1а).

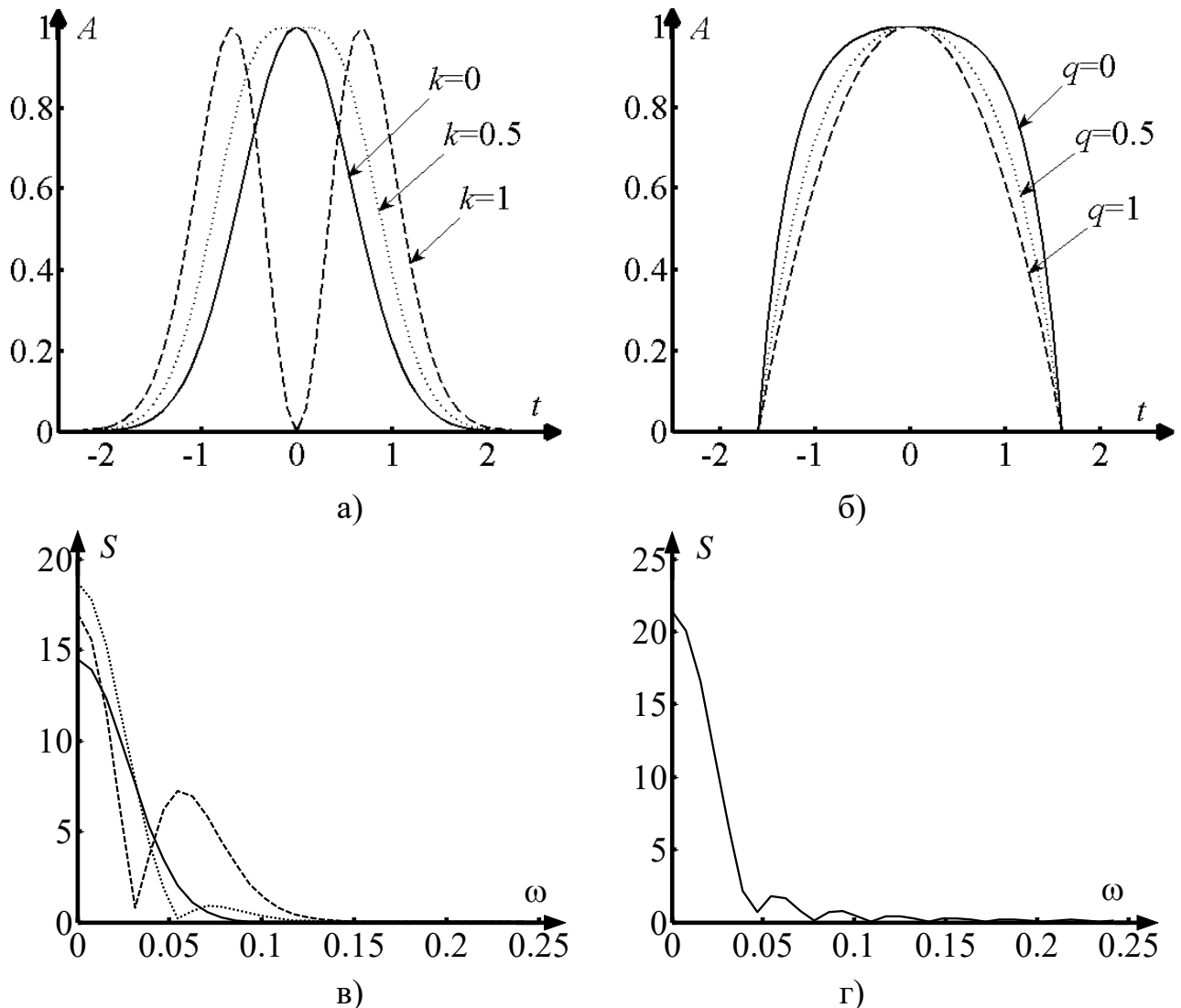


Рис. 1. Сигнали і відповідні спектри: а) МІ поверхневих тріщин; б) сигнал перекосу ВСП; в) спектр МІ поверхневих тріщин; г) спектр сигналу перекосу ВСП (завода), $q = 1$

В якості узагальненої моделі сигналу перекосу ВСП було обрано сигнал параболічного типу:

$$s_2(t, q) = (1 - e^{(2.7q-3)(t+2)})_+ (1 - e^{(2.7q-3)(2-t)}), \quad (3)$$

де $q = 0 \dots 1$ характеризує форму завади (рис. 1б). Для подальших досліджень було обрано $q = 1$, що відповідає випадку рівномірного переміщення вихорострумowego перетворювача. На рис. 1 амплітуди A сигналів віднормовані до відповідних максимальних значень, тому і амплітуди гармонік S безрозмірні; частота ω віднормована до максимальної частоти дискретизації. Час віднормований на часовий проміжок, протягом якого вихорострумний перетворювач проходить відстань, що дорівнює його радіусу.

Аналіз спектрів сигналів дефекту і завади відповідно (рис. 1в,г) показав доцільність застосування для їх ідентифікації критерію, що характеризує розподіл потужності сигналів в діапазоні значень ω $0 \div 0.1$. Для визначення типу сигналу за його спектром було запропоновано використання спектрального критерію ідентифікації (СКІ) виду

$$K_h = \sum_{i=6}^{14} S_i / \sum_{i=1}^{14} S_i, \quad (4)$$

де S_i — амплітуди відповідних гармонік, $i = 14$ приблизно відповідає $\omega = 0.1$.

Значення K_h обчислювались для трьох сигналів дефектів $s_1(t, 0)$, $s_1(t, 0.5)$, $s_1(t, 1)$ та завади $s_2(t, 1)$ відповідно до виразів (2) і (3). Середньоквадратичне значення (СКВ) шуму σ змінювали в діапазоні $0 \div 2$, тобто від 0 до подвійної нормованої амплітуди A (рис. 1а, б). Було проведено 10000 серій обчислень для кожного з перерахованих сигналів, побудовані гістограми статистичних частот.

Використовуючи теорію статистичних гіпотез і, зокрема, критерій Неймана-Пірсона отримані робочі характеристики, тобто залежності імовірності виявлення дефекту Q_d від імовірності помилкової тривоги Q_0 (помилка першого роду, коли сигнал завади приймається за сигнал дефекту). Відповідні графіки показані на рис. 2.

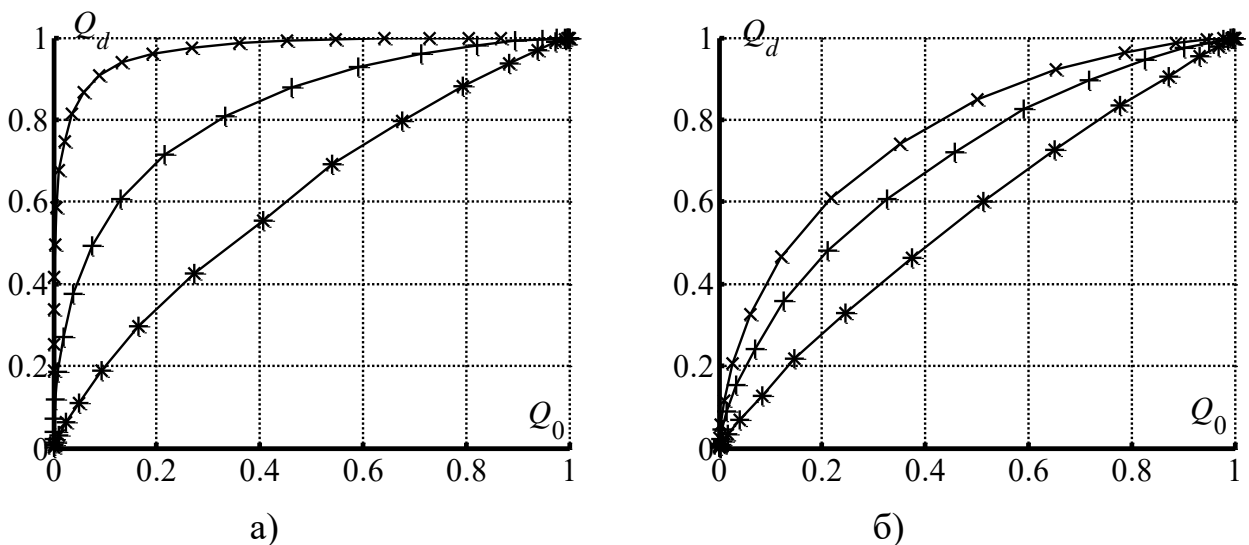


Рис. 2. Робочі характеристики при СКВ шуму $\sigma = 0.5$ (а) і $\sigma = 1$ (б):

+ — $s_1(t, 0)$, * — $s_1(t, 0.5)$, × — $s_1(t, 1)$

Для дослідження вейвлет-спектрів, виходячи з форми досліджуваних сигналів дефектів і завади, було обрано гаусовий вейвлет 2-го порядку. Аналіз вейвлет-спектрів сигналів дефектів і завад показав доцільність використання для їх ідентифікації значень коефіцієнтів вейвлет-розкладання на центральній ділянці осі абсцис, тобто спектрального критерію ідентифікації виду

$$K_w = \int_{s_r-h}^{s_r+h} \int_{x_0-w}^{x_0+w} W(s, x) dx ds \quad (5)$$

де $W(s, x)$ — спектральна щільність; $2h$ і $2w$ — розміри області спостереження відповідно за масштабом s і зсувом x ; $h = w = 4$; $s_r = 8$; $x_0 = 64$.

Аналогічно наведеному вище з використанням СКІ K_w (5) одержані робочі характеристики вейвлет-аналізу. Зафіксувавши імовірність помилкової тривоги на рівні 10 %, отримали карти імовірності розпізнавання сигналу дефекту в залежності від форми його модуляційного імпульсу і рівня шуму для спектрального аналізу в обох базисах (рис. 3).

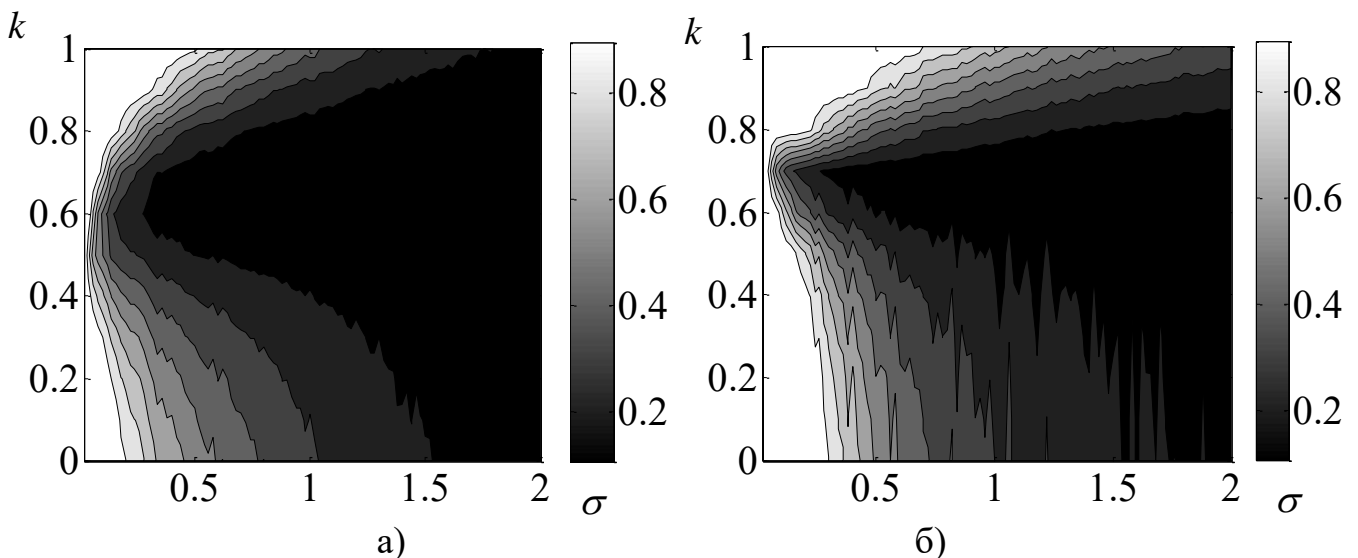


Рис. 3. Імовірність розпізнавання сигналу поверхневої тріщини: а) метод спектрального, в базисі Фур'є, перетворення; б) метод неперервного вейвлет-перетворення

Метод неперервного вейвлет-перетворення в цілому показав кращу здатність щодо ідентифікації сигналів дефектів, ніж метод Фур'є. Проте він має зону нечутливості, яка відповідає модуляційним імпульсам поверхневих тріщин з $k = 0.62 \div 0.71$. Слід враховувати теж більшу ресурсоемність відповідного алгоритму, тому у випадку порівняно невеликих шумів (з середньоквадратичним відхиленням шуму σ до $40 \div 50$ % від амплітуди імпульсу дефекту) спектральний, в базисі Фур'є, метод може виявитись практично більш вигідним завдяки його вищій швидкодії і, як наслідок, вищій допустимій швидкості сканування, так як обробка інформації здійснюється в режимі реального часу.

У **п'ятому розділі** викладено результати подальшого дослідження та удосконалення спектрального, в базисі Фур'є, методу ідентифікації та розробки інформаційної технології вихрострумової дефектоскопії в умовах дії високоінтенсивних завад складної структури.

Для покращення характеристик спектрального, в базисі Фур'є, методу ідентифікації сигналів дефектів на фоні дії квазідетермінованих завад та високоінтенсивного шуму було досліджено вплив віконних функцій і запропоновано використання вікна Гауса при виконанні перетворення Фур'є (рис. 4).

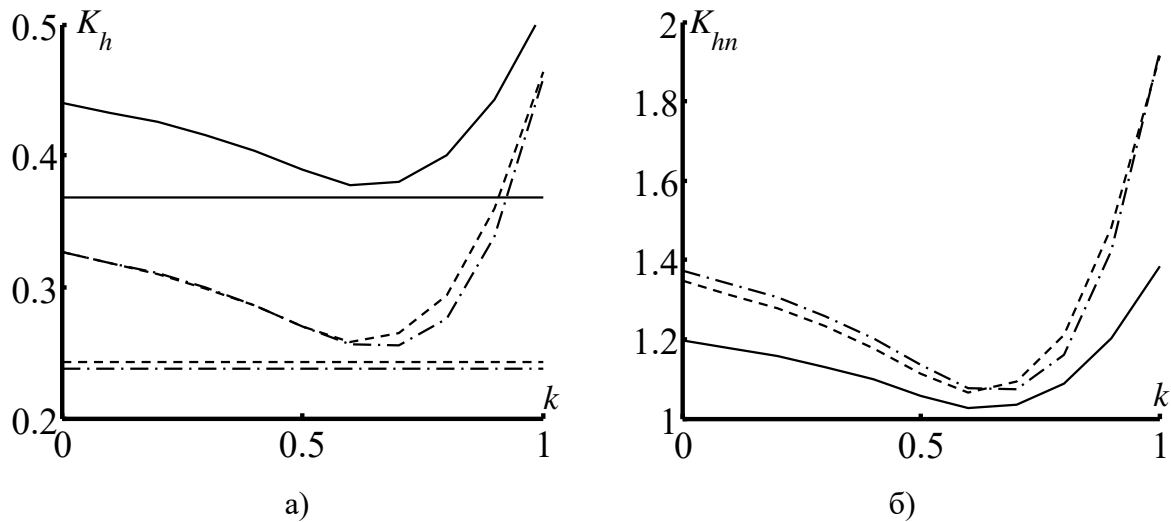


Рис. 4. Залежність СКІ від параметру k , що характеризує форму модуляційного імпульсу тріщини, при $\sigma = 0.5$: — сигнали без віконних функцій; - - вікно Гауса; - — вікно Хемінга

На рис. 4а константні лінії відповідають сигналу перекосу вихорострумового перетворювача, на рис. 4б значення СКІ поверхневої тріщини віднормовані на відповідні значення СКІ сигналу перекосу ВСП. Наведені дані свідчать про суттєве покращення розпізнавання сигналів дефектів і завад, особливо у випадку коротких тріщин ($k \rightarrow 1$). Так, значення $K_h \approx 0.4$ без віконної функції з певною імовірністю може відповідати і поверхневій тріщині, і сигналу перекосу ВСП (рис. 4а). Після використання віконної функції з високою імовірністю таке значення СКІ відповідає тільки поверхневій тріщині.

Одержані дані свідчать про суттєве покращення розпізнавання сигналів дефектів і завад. Особливо слід відзначити покращення розпізнавання модуляційних імпульсів тріщин певної форми ($k = 0.5 \div 0.6$), які на фоні значного шуму і дії квазідетермінованих завад візуально не розпізнаються.

Визначено оптимальну ширину вікна, що використовується при обчисленні спектрального критерію ідентифікації, з урахуванням ефективності відокремлення сигналів дефектів від завад.

Досліджена залежність СКІ від амплітуди модуляційного імпульсу дефекту. Виявлено, що на фоні значного шуму, коли його середньоквадратичне відхилення σ є порівняним з амплітудами модуляційного імпульсу дефекту і сигналу завади, збільшення амплітуди модуляційного імпульсу не завжди покращує відокремлення сигналу дефекту від сигналу квазідетермінованої завади. Пов'язано це зі зміною співвідношення між СКІ цих сигналів. У випадку порівняних амплітуд сигналу дефекту і завади СКІ останнього має значення менше, ніж СКІ для сигналу дефекту (рис. 4а). За наявності значного шуму обидва СКІ (для дефекту і завади) наближаються до значення СКІ чистого шуму (без будь-якого сигналу), тобто їх абсолютне значення

збільшується. Якщо не змінюється відношення амплітуд сигналів дефекту і завади — не міняється співвідношення між їх СКІ. Якщо амплітуда сигналу дефекту починає збільшуватись відносно амплітуди сигналу завади — СКІ дефекту починає наближатися до СКІ завади, що погіршує їх розрізнювання.

Здійснено модифікацію алгоритму обчислення спектрального критерію ідентифікації K_m з метою збільшення його ефективності для розпізнавання сигналів дефектів певних розмірів. Модифікований СКІ обчислюється шляхом зміни його нормування: він нормується до суми гармонік шуму в межах робочого спектрального вікна. В цілому запропонована модифікація забезпечує кращі характеристики розпізнавання ніж попередній варіант (4) (рис. 5). Проте в області малих амплітуд двомодових модуляційних імпульсів, що відповідають поверхневим тріщинам з малими довжиною та розкриттям, які наближаються до точкових, кращі результати дає використання попереднього варіанту обчислення спектрального критерію ідентифікації (4) (рис. 5в).

Результати проведених досліджень дозволили розробити інформаційну технологію, головна діаграма діяльності якої представлена на рис. 6. Підготовчий етап для цієї технології відображено на рис. 7.

На підготовчому етапі необхідно виконати вибірку даних на бездефектній ділянці поверхні досліджуваного матеріалу, обчислити середньоквадратичне відхилення вибірки σ (S_d) і її спектр. За відношенням σ до амплітуд тестових модуляційних імпульсів поверхневих тріщин необхідно визначити, яке згладжування необхідно виконувати (вихідний параметр C_s). Використовуючи отриманий спектр, обчислити суму перших 14 гармонік (вихідний параметр S_n). Отримані параметри використовуються в основному процесі (рис. 6).

Основний процес дефектоскопії починається з формування ковзного вікна даних, які є сумішшю модуляційних імпульсів поверхневих тріщин, сигналів перекосу вихорострумowego перетворювача та шуму. В залежності від значення параметру C_s виконується лінійне або нелінійне згладжування (див. розділ 3). На наступному етапі за наявності 2 синхронізованих вихорострумowych перетворювачів виконується обробка даних за допомогою обчислення взаємнокореляційної функції, за наявності лише одного — за допомогою запропонованого алгоритму автокореляційного типу (1).

Після розглянутої обробки даних в часовій області виконується підрахунок перевищень порогового рівня точок отриманої вибірки. При досягненні кількості перевищень граничного значення — посилається сигнал на обчислення спектру Фур'є вихідної вибірки даних з використанням вікна Гауса. Обчислюється спектральний критерій ідентифікації K_h (4) та модифікований критерій K_m (див. вище) з використанням попередньо підготовленого значення S_n .

Значення $K_h \geq 0.65$ свідчить про те, що у вибірці ніякого сигналу немає і в подальшій обробці інформації немає сенсу. У випадку $0.2 \leq K_h < 0.65$ за його значенням визначається коефіцієнт k [1, 6], який в першому наближенні відповідає за довжину поверхневої тріщини. У випадку $K_h < 0.2$ визначити k без додаткової обробки не можна, а тому посилається сигнал на обчислення вейвлет-спектру і обчислюється відповідний спектральний критерій ідентифікації K_w (5). Значення $K_w \sim -40$ свідчить про те, що виявлений сигнал є сигналом перекосу ВСП [1, 19] і в подальшій обробці

інформації також немає сенсу. В іншому випадку за K_w визначається k .

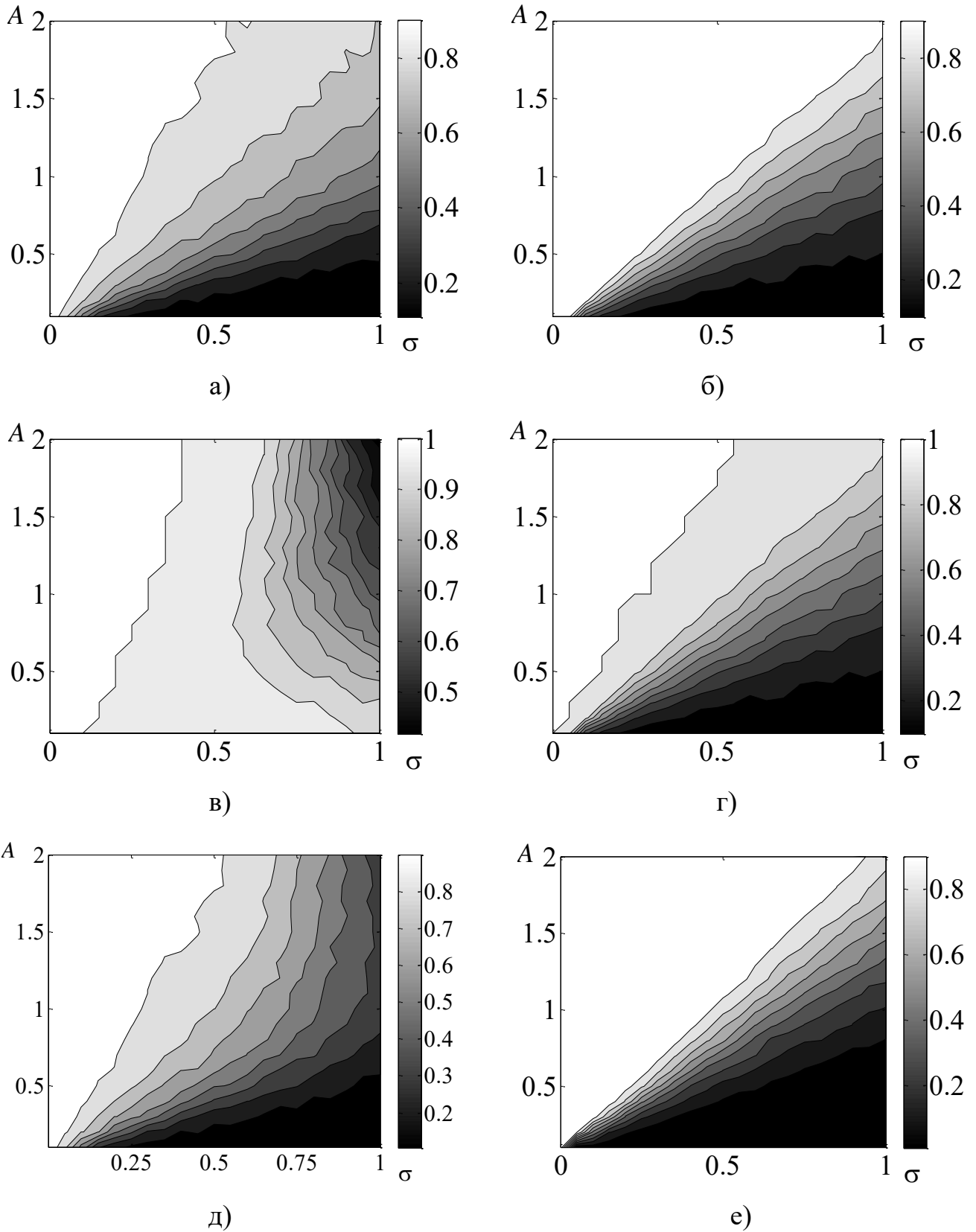


Рис. 5. Імовірнісні карти при $k = 1$: а), в), д) — K_h ; б), г), е) — K_{ms} ;
а), б) виявлення поверхневої тріщини; в), г) ідентифікації поверхневої тріщини;
д), е) спільна імовірність виявлення та ідентифікації

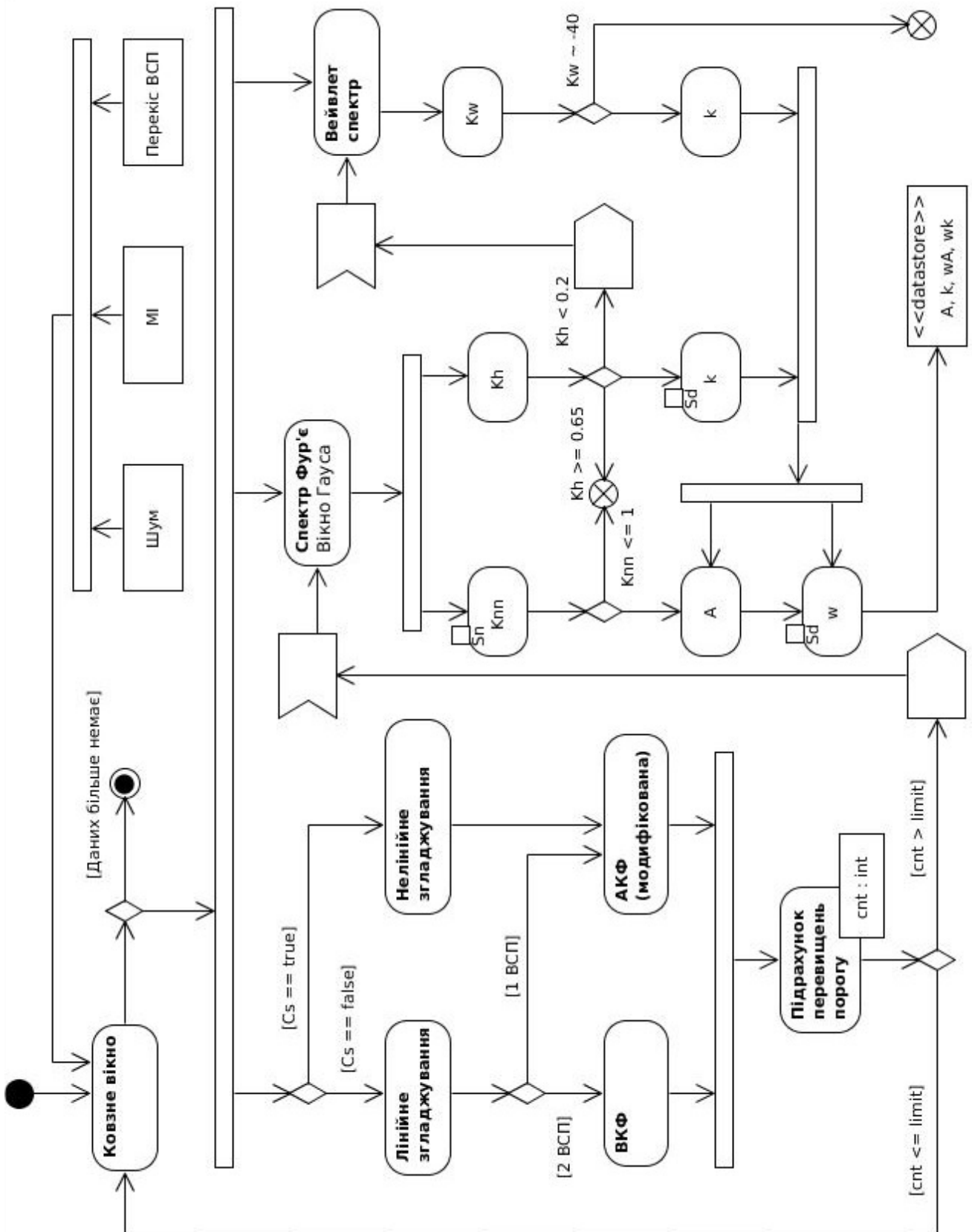


Рис. 6. Інформаційна технологія вихорострумової дефектоскопії в умовах дії високоінтенсивних завад складної структури

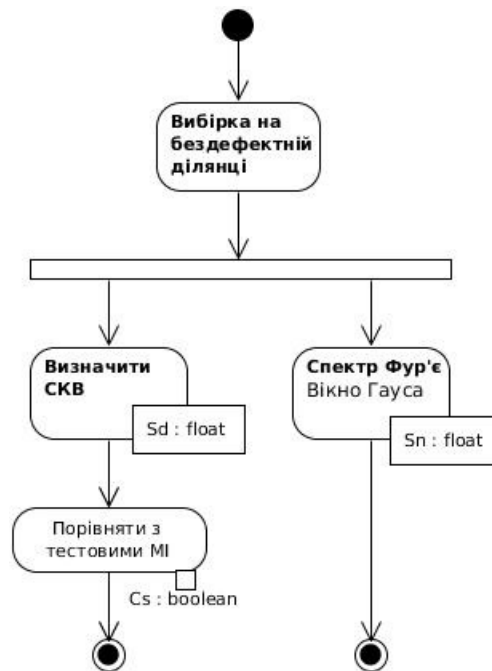


Рис. 7. Підготовчий етап дефектоскопії

Якщо коефіцієнт k визначено через СКІ K_h або K_w , то використовуючи K_{nm} можна оцінити амплітуду модуляційного імпульсу A [11]. При цьому значення $K_{nm} \leq 1$ свідчить про те, що амплітуда модуляційного імпульсу дуже мала в порівнянні з рівнем шуму і оцінити її таким способом не можна.

На останньому етапі за отриманими даними про рівень шуму σ , амплітуду A та форму k модуляційного імпульсу визначаються імовірності виявлення дефекту з відповідними параметрами [1, 6, 11, 19] і всі результати заносяться до сховища даних, виводяться на екран або фіксуються іншим зручним способом.

ВИСНОВКИ

В дисертації представлена нова інформаційна технологія вихорострумової дефектоскопії в умовах дії завод складної структури, пов'язаних з неконтрольованим перекосом чи відводом вихорострумового перетворювача в процесі сканування, та високоінтенсивного шуму, обумовленого значною шорсткістю поверхні матеріалу, особливо композиційного, армованого джгутами волокон. Запропонована інформаційна технологія, яка поєднує розроблені методи обробки інформації як в часовій, так і в спектральній області, забезпечує імовірнісну оптимізацію процесу ідентифікації дефектів.

Наукові результати дисертаційної роботи полягають у наступному:

1. Проведено аналіз методів формування і обробки інформаційних сигналів при вихорострумовій дефектоскопії.
2. На основі проведених експериментальних досліджень обґрунтовано модель квазідетермінованої завади, яка відображує процес перекосу (відхилення осі чи площі симетрії датчика від нормалі до поверхні матеріалу і повернення його у початкове положення) вихорострумового перетворювача в процесі сканування поверхні матеріалу зі значною шорсткістю. Визначені залежності параметрів моделі від геометричних розмірів датчика, частоти поля зондування та електропровідності матеріалу.

3. Проведене моделювання впливу змін просторового розташування вихорострумового перетворювача відносно поверхні матеріалу на щільність вихорового струму, наведеного в матеріалі, що характеризує чутливість дефектоскопії. Уточнена модель модуляційного імпульсу поверхневої тріщини, зокрема закономірності впливу на параметри і форму модуляційного імпульсу тріщини її розмірів, частоти поля та провідності матеріалу.

4. Здійснено моделювання процесу сканування ділянок поверхні композитного матеріалу з однонаправлених джгутів вуглецевих волокон у випадку, коли діаметри джгутів змінюються за гаусовим і рівномірним законами розподілу; підтверджена модель шуму, який супроводжує процес сканування шорсткої поверхні композиту, як білий гаусовий шум, встановлено відповідний розмір кроку сканування. Проведені розрахунки величини завад, що пов'язані з неконтрольованими змінами зазору між ВСП та поверхнею металевого виробу при використанні фазових механізмів корекції.

5. Проведено моделювання процесу цифрової фільтрації при скануванні поверхні виробу в режимі реального часу; на основі статистичних і кореляційних досліджень запропоновано швидкодіючі комбіновані алгоритми, які включають лінійне та нелінійне згладжування та кореляційну обробку відліків в межах ковзного вікна і є оптимальними за критерієм сигнал/шум для різних варіантів режимів сканування.

6. Відповідно до вищезгаданих моделей розроблено спектральні, в базисах Фур'є і вейвлетів, методи ідентифікації сигналів дефектів в умовах дії квазідетермінованих завад з випадковим часом з'явлення і випадковою амплітудою, а також високоінтенсивного шуму. Запропоновано засоби розрахунків спектральних критеріїв ідентифікації, із застосуванням яких здійснюється визначення сигналів поверхневих тріщин з різними геометричними розмірами в спектральних областях Фур'є і вейвлетів.

7. На основі розроблених спектральних методів ідентифікації з використанням теорії статистичних випробувань проведено імовірнісний аналіз процесу ідентифікації сигналів дефектів при різних значеннях імовірності помилкової тривоги і різних інтенсивностях шуму. Проведене порівняння запропонованих спектральних методів ідентифікації за результатами імовірнісного аналізу. Так сигнали коротких поверхневих тріщин ідентифікуються з імовірністю не нижче 0.8 з використанням СКІ на базі спектру Фур'є при середньоквадратичному відхиленні шуму в 60 % від амплітуди модуляційного імпульсу тріщини, з використанням СКІ на базі вейвлет-спектру — при середньоквадратичному відхиленні шуму в 100 %. Проте останній метод за умови однакових обчислювальних ресурсів вимагає часу на 2 порядки більше.

8. Для покращення ефективності спектрального, в базисі Фур'є, методу ідентифікації сигналів дефектів було досліджено вплив віконних функцій і запропоновано використання вікна Гауса. Визначено оптимальну ширину вікна. Метод удосконалено шляхом додавання ще одного СКІ з іншим нормуванням, що покращило імовірнісні характеристики розпізнавання в більш широкому діапазоні геометричних розмірів тріщин.

9. Результати наукових досліджень впроваджено у ТОВ "НВО Дніпротех-

транс", у ТОВ "НВП СКБ Неркон", в навчальному процесі Дніпропетровського національного університету імені Олеся Гончара.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у виданнях, що включені до міжнародних наукометричних баз:

1. Gerasimov V., Khandetsky V., Gnoevoy S. Research of probability characteristics in defect detection of composite materials using wavelet transform / Int. J. Materials and Product Technology. 2006. Vol. 27, № 3/4. P. 210 – 220. Цитується у базах Journal Citation Reports, Scopus, Compendex, Science Citation Index Expanded, Academic OneFile, Google Scholar, Inspec.
2. Ханецкий В. С., Герасимов В. В. Вопросы цифровой фильтрации при вихретоковой дефектоскопии композитных материалов / Дефектоскопия. 1997. № 7. С. 3 – 14. Цитується у базі Scopus.
3. Ханецкий В. С., Герасимов В. В. Статистические исследования при вихретоковой дефектоскопии композитных материалов / Дефектоскопия. 1998. № 9. С. 59 – 70. Цитується у базах Scopus, Google Scholar.
4. Ханецкий В. С., Герасимов В. В. Корреляционная обработка сигналов при вихретоковой дефектоскопии композитов / Дефектоскопия. 1998. № 10. С. 3 – 13. Цитується у базі Scopus.
5. Герасимов В. В., Герасимова О. Л. Спектры сигналов перекося датчика и сигнала от трещины после дифференцирования / Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Вип. 5(28). Дніпропетровськ, 2003. С. 24 – 32. Цитується у базі Google Scholar.
6. Ханецкий В. С., Герасимов В. В. Спектральная идентификация сигналов в дефектоскопии композитов с использованием теории статистических испытаний / Вісник Дніпропетр. ун-ту. Фізика. Радіоелектроніка. 2003. Вип. 10. С. 128 – 132. Цитується у базі Google Scholar.
7. Ханецкий В. С., Герасимов В. В. Вплив віконних функцій на розпізнавання сигналів в дефектоскопії композитних матеріалів / Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Вип. 5(88). Дніпропетровськ, 2013. С. 42 – 49. Цитується у базі Google Scholar.
8. Герасимов В. В. Спектральна ідентифікація модуляційних імпульсів різних амплітуд в дефектоскопії композитних матеріалів / Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Вип. 1(90). Дніпропетровськ, 2014. С. 69 – 74. Цитується у базі Index Copernicus, Google Scholar.
9. Герасимов В. В. Вероятностная спектральная дефектоскопия композитов с использованием оконных функций / Вестник ХНТУ, № 50. Херсон, 2014. С. 46 – 50. Цитується у базах Google Scholar, РИНЦ.
10. Герасимов В. В. До вибору параметру ідентифікації на базі перетворення Фур'є в дефектоскопії композитних матеріалів / Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Вип. 1(96). Дніпропетровськ, 2015. С. 42 – 48. Цитується у базі Index Copernicus, Google Scholar.
11. Герасимов В. В., Ханецкий В. С. Развитие спектрального метода идентификации модуляционных импульсов в дефектоскопии композитных материалов / Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Вип. 1(102). Дніпропетровськ, 2016. С. 3 – 11. Цитується у базі Index Copernicus, Google Scholar.

Статті у фахових виданнях України:

12. Герасимов В. В., Герасимова О. Л. Исследование сигнала перекоса вихретокового датчика / Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Вип. 5(16). Дніпропетровськ, 2001. С. 39 – 41.
13. Герасимов В. В., Герасимова О. Л. Двумерное моделирование в вихретоковой дефектоскопии композитных материалов / Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Вип. 6(41). Дніпропетровськ, 2005. С. 124 – 133.
14. Герасимов В. В., Герасимова О. Л. Амплитудно-фазовые исследования сигнала перекоса катушки с током над поверхностью материала / Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Вип. 5(64). Дніпропетровськ, 2009. С. 33 – 37.
15. Хандецкий В. С., Мищенко В. В., Герасимов В. В. Оценка характера шума, возникающего при сканировании поверхности изделий из волокнистых композитов / Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Вип. 1(72). Дніпропетровськ, 2011. С. 3 – 11.
16. Gerasimov V. V. Information technology of eddy current inspection in the conditions of action of high-intensity noises of complex structure / Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Вип. 6(107). Дніпропетровськ, 2016. С. 51 – 56. Цитується у базі Index Copernicus.

Статті у наукових виданнях України:

17. Хандецкий В. С., Герасимов В. В. Статистичний аналіз та моделювання в дефектоскопії композитних матеріалів / Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Вип. 3. Дніпропетровськ, 1998. С. 157 – 162.
18. Герасимов В. В., Герасимова О. Л. Статистический анализ генератора числовых последовательностей / Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Вип. 7. Дніпропетровськ, 1999. С. 33 – 37.
19. Хандецкий В. С., Герасимов В. В., Гноевой С. Н. Вероятностная дефектоскопия углеродсодержащих полимерных композитов с использованием вейвлет-спектров / Вісник Дніпропетр. ун-ту. Фізика. Радіоелектроніка. 2004. Вип. 12. С. 3 – 9.
20. Хандецкий В. С., Герасимов В. В. Динамика изменения векторного потенциала рамки при сканировании поверхностных трещин с различной геометрией / Вісник Дніпропетр. ун-ту, сер. "Фізика, радіоелектроніка". 2008. Вип. 15, № 2/1. С. 99 – 105.
21. Хандецкий В. С., Герасимов В. В. Распределение вихревых токов при изменении расположения источника поля относительно поверхности слабопроводящего материала / Вісник Дніпропетр. ун-ту, сер. "Фізика, радіоелектроніка". 2008. Вип. 15, № 2. С. 165 – 170.

Матеріали наукових конференцій:

22. Khandetsky V., Kostyrko V., Gerasimov V. Eddy current control of surface defects in carbon fibers composites / Trends in NDE Science & Technology (WCNDT '96) : Proc. of 14th World Conference on Non-Destructive Testing, December 8-13, 1996 : proceeding book. New Delhi, India: 1996. P. 1677 – 1680.
23. Хандецкий В. С., Герасимов В. В. Расчет чувствительности систем дефектоскопии и дефектометрии поверхностных трещин в композитных материалах / Датчики и преобр. инф. систем измерения, контроля и управления (Датчик-97) : IX

- наук.-техн. конф. з уч. зар. спец., 12-16 травня, 1997 р.: тези доп. 1997. С. 366 – 367.
24. Khandetskyu V., Gerasimov V. Research of electrodynamic processes in defectoscopy of composites / Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET*04) : Proc. of 10th Int. Conf., September 14-17, 2004 : proceeding book. Dnepropetrovsk, Ukraine: 2004. P. 283 – 285.
25. Gerasimov V. V., Khandetsky V. S., Gnoevoy S. N. Research of Probability Characteristics in Defect Detection of Composite Materials using Wavelet Transform / Application of Contemporary Non-Destructive Testing in Engineering : Proc. of 8th Int. Conf. of Slovenian Society for Non-Destructive Testing, September 1-3, 2005 : proceeding book. Portorož, Slovenia: 2005. P. 209 – 215.
26. Хандецкий В. С., Мищенко В. В., Герасимов В. В., Мартынович Л. Я. Исследование рельефа поверхности углеграфитовых композитов / Информационные технологии в управлении сложными системами : наук. конф. до 100-річчя М. К. Янгеля, 24 червня, 2011 р.: тези доп. Дніпропетровськ, 2011. С. 239 – 243.
27. Хандецкий В. С., Герасимов В. В. Вероятностный анализ спектральных методов идентификации сигналов при вихретоковой дефектоскопии композитов / Информационные технологии в управлении сложными системами - 2013 [Электронный ресурс] : научная конференция (19-20 июня 2013 г.) : сборник докладов. Секция 7. URL: <http://www.itm.dp.ua/>

АНОТАЦІЯ

Герасимов В. В. Інформаційна технологія вихорострумової дефектоскопії в умовах дії високоінтенсивних завад складної структури. — Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.06 інформаційні технології. — Дніпропетровський національний університет ім. О. Гончара, м. Дніпро, 2017 р.

На основі проведених досліджень: обґрунтовано модель квазідетермінованої завади, яка відображує процес перекошу вихорострумового перетворювача в процесі сканування поверхні матеріалу, і модель шуму, що виникає внаслідок значної шорсткості поверхні; уточнена модель модуляційного імпульсу поверхневої тріщини. На основі статистичних і кореляційних досліджень запропоновано швидкодіючі комбіновані алгоритми цифрової фільтрації даних.

Вперше розроблено спектральні, в базисах Фур'є і вейвлетів, методи ідентифікації сигналів дефектів в умовах дії квазідетермінованих завад і високоінтенсивного шуму. На цій основі з використанням теорії статистичних випробувань проведено імовірнісний аналіз процесу ідентифікації дефектів. Запропоновано інформаційну технологію, яка поєднує розроблені методи обробки інформації як в часовій, так і в спектральній області.

Ключові слова: інформаційна технологія, вихорострумова дефектоскопія, квазідетерміновані завади, шум, ідентифікація.

АННОТАЦИЯ

Герасимов В. В. Информационная технология вихретоковой идентификации в условиях действия высокоинтенсивных помех сложной структуры. — Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.06 информационные технологии. — Днепропетровский нацио-

нальный университет им. О. Гончара, г. Днепр, 2017 г.

На основании проведенных экспериментальных и модельных исследований обоснована модель квазидетерминированной помехи, которая отображает процесс перекоса вихретокового преобразователя в процессе сканирования шероховатой поверхности материала, в виде квадратичного полинома, коэффициенты которого зависят от угла отклонения оси преобразователя от нормали к исследуемой поверхности. В результате моделирования процесса перемещения вихретокового преобразователя в виде длинной узкой прямоугольной рамки с током над поверхностью исследуемого материала с поперечной поверхностной трещиной прямоугольного сечения уточнены закономерности влияния на параметры и форму модуляционного импульса дефекта ширины и глубины трещины. Проведенные статистические и корреляционные исследования результатов моделирования процесса сканирования участков поверхности композитного материала с однонаправленных жгутов армирующих углеродных волокон позволили использовать в качестве модели шума, обусловленного значительной шероховатостью поверхности, белый гауссовый шум.

Проведено моделирование процесса цифровой фильтрации при вихретоковой дефектоскопии поверхностных трещин в композитных материалах. На основании статистических и корреляционных исследований предложены быстродействующие комбинированные алгоритмы цифровой фильтрации данных. Проведены исследования разных вариантов чередования сглаживания и корреляционной обработки последовательностей отсчетов. В качестве критерия сравнения использовались количество зафиксированных верных сигналов трещин F и отношение количества верных сигналов к количеству ложных η . Для случая коротких поверхностных трещин предложен алгоритм автокорреляционного типа, где вычисления проводятся с использованием отсчетов одной траектории сканирования датчика. В результате при значениях F порядка 70 % величина η составляет несколько десятков и более.

В результате анализа спектров сигналов дефекта (поверхностной трещины) и помехи (перекоса вихретокового преобразователя) для целей их идентификации предложено использование критерия, который характеризует распределение мощности сигналов среди их первых 14 гармоник. Предложенный спектральный критерий идентификации вычислялся для сигнала помехи и сигналов дефектов, соответствующих поверхностным трещинам разной длины относительно диаметра датчика вихретокового преобразователя. На сигналы был наложен белый гауссовый шум в диапазоне от 0 до удвоенной амплитуды соответствующего сигнала. Для каждого уровня шума было проведено по 10000 вычислений спектрального критерия идентификации. С использованием теории статистических гипотез и, в частности, критерия Неймана-Пирсона получены рабочие характеристики, т.е. зависимости вероятности выявления дефекта от вероятности ложной тревоги.

Анализ вейвлет-спектров сигналов дефекта и помехи, полученных с помощью гауссового вейвлета 2-го порядка, показал целесообразность использования для их идентификации значений коэффициентов вейвлет-разложения в определенном диапазоне сдвига и небольших масштабах. По методике, описанной выше для спектров Фурье, были получены рабочие характеристики с использованием спектральных критериев идентификации, вычисленных с помощью коэффициентов вейвлет-разложения. Были получены карты вероятности распознавания сигнала дефекта в

зависимости от формы его модуляционного импульса (относительной длины) и уровня шума в обеих базисах спектрального разложения при фиксированной вероятности ложной тревоги на уровне 10 %.

На базе разработанных спектральных методов идентификации с использованием теории статистических испытаний проведен вероятностный анализ процесса идентификации сигналов дефектов при разных значениях вероятности ложной тревоги и разных интенсивностях шума. Проведено сравнение предложенных спектральных методов идентификации за результатами вероятностного анализа. Так сигналы коротких поверхностных трещин идентифицируются с вероятностью не ниже 0.8 с использованием спектрального критерия идентификации на основе спектра Фурье при среднеквадратическом отклонении шума в 60 % от амплитуды модуляционного импульса трещины, с использованием спектрального критерия идентификации на основе вейвлет-спектра — при среднеквадратическом отклонении шума в 100 %. Но последний метод при условии одинаковых вычислительных мощностей требует времени на 2 порядка больше.

Для улучшения характеристик спектрального, в базисе Фурье, метода идентификации сигналов дефектов было предложено использование окна Гаусса. Определена оптимальная ширина окна, используемого при вычислении спектрального критерия идентификации, с учетом эффективности отделения сигналов дефектов от помех. Выполнена модификация алгоритма вычисления спектрального критерия идентификации с целью увеличения его эффективности для распознавания дефектов определенных размеров. Предложено информационную технологию, которая объединяет разработанные методы обработки информации как во временной, так и в спектральной областях.

Ключевые слова: информационная технология, вихретоковая дефектоскопия, квазидетерминированная помеха, шум, идентификация.

ABSTRACT

Gerasimov V. V. Information technology of eddy current inspection in the conditions of action of high-intensity noises of complex structure. — Manuscript.

Thesis for a Doctor of Philosophy's Degree by specialty 05.13.06 — Information technologies. — Oles Honchar Dnipropetrovsk National University, Dnipro, 2017.

Based on the conducted researches: the model of the quasidetermined interference which describes process of a tilt of the eddy current sensor during scanning of a material surface, and model of noise which arises owing to the considerable roughness of a surface is justified; the model of the modulation pulse of a surface crack is specified. Based on statistical and correlative investigations high-speed combined algorithms of digital data filtering is offered.

Spectral methods, in Fourier bases and wavelet, of identification of defect signals in the conditions of action of the quasidetermined interference and high-intensity noise are for the first time developed. On this basis with use of the theory of statistical tests the probable analysis of process of defect identification is carried out. It is offered an information technology which integrates the developed methods of information processing both in temporal, and in spectral areas.

Keywords: information technology, eddy current inspection, quasidetermined interference, noise, identification.

Підписано до друку 26.07.2017 р. Формат 60×90 1/16.
Папір офсетний. Друк цифровий. Гарнітура "Times New Roman".
Ум. авт. арк. 0,9. Тираж 100 прим. Зам. № 146.

Друкарня "Ліра ЛТД"
вул. Наукова, 5, м. Дніпро, 49107.
Свідоцтво про внесення до Держреєстру ДК № 188 від 19.09.2000