

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу  
Учаніна Валентина Миколайовича  
**«Розроблення методів і засобів вихрострумового контролю**  
**матеріалів та конструкцій»,**  
представлену на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук  
за спеціальністю 05.11.13 – прилади і методи контролю  
та визначення складу речовин.

### Актуальність теми дисертації

Розроблення сучасних методів і засобів неруйнівного (зокрема вихрострумового) контролю важливо для забезпечення надійної експлуатації конструкцій, особливо працюючих в умовах високої температури і підвищеного тиску, дії високих змінних навантажень і агресивних середовищ. Вихрострумовий метод неруйнівного контролю є перспективним, так як дає можливість виявляти дефекти різного типу та оцінювати зміни структури матеріалу без контакту з контролюваною поверхнею. На чутливість і глибину вихрострумового контролю, при цьому, можуть суттєво впливати завади, які з'являються в інформаційному сигналі через зміни зазору між вихрострумовим перетворювачем і контролюваною поверхнею, шорсткість поверхні, вплив конструктивних елементів тощо. Створення методів і засобів, які дозволяють зменшити вплив завад, дозволяє розширити сфери застосовності вихрострумового методу. Не менш важливими є, поставлені автором, питання розвитку методів визначення параметрів дефектів. У цьому аспекті робота співзвучна з основними тенденціями сучасного етапу розвитку неруйнівного контролю, для якого характерний поступовий перехід на кількісний контроль (від дефектоскопії до дефектометрії) при виявленні дефектів, так як це необхідно для їх об'єктивної оцінки із залученням підходів механіки руйнування.

Вирішення поставлених в роботі задач дозволить забезпечити реальне збільшення надійності експлуатації конструкцій сучасної техніки. Тому дисертаційну роботу Учаніна В.М. слід вважити актуальною.

В дисертації використані результати наукових досліджень, які виконувались за участю та під керівництвом автора дисертації у Фізико-механічному інституті ім. Г.В. Карпенка відповідно до плану науково-дослідних робіт з державною реєстрацією № ДР 0103U003350, № ДР 0106U004812, № ДР 0109U002657, № ДР 0112U002783, № ДР 0115U000123, № ДР 0107U005214, № ДР 0107U005231, № ДР 0110U004565, № ДР 0110U004574, № ДР 0116U006337, № ДР 0104U005233, № ДР 0107U009825.

### **Аналіз змісту дисертації, повнота викладу в опублікованих працях**

Дисертація складається з анотації, вступу, восьми розділів, висновків, списку використаної літератури із 383 найменувань та додатків на 29 сторінках. Загальний обсяг дисертації – 467 сторінок. Робота містить 244 рисунки і 25 таблиць.

У вступі обґрутована актуальність обраної дисертантом теми дисертаційної роботи, сформульована мета та завдання досліджень, наукова новизна, прак-

тичне значення і особистий внесок здобувача та представлений дані по апробації результатів.

**У першому розділі** дисертації проведено аналіз сучасного стану розвитку вихрострумового методу. Проаналізовано роботи, в яких розглядаються питання реальної глибини контролю, і показано, що вона суттєво обмежується впливом завад. Проаналізовано джерела завад для накладних вихрострумові перетворювачів (ВСП) і запропоновано їх класифікацію. Розглянуто методи моделювання задач вихрострумового контролю, зокрема метод об'ємних інтегральних рівнянь, який використано в роботі. Проаналізовано і класифіковано конструкції накладних ВСП, в яку введено анаксіальні ВСП і ВСП подвійного диференціювання. Проаналізовано і класифіковано схеми автогенераторних вихрострумових дефектоскопів, а також показано оптимальні підходи для їх створення. Проведено аналіз характеристик дефектоскопів універсального типу, на основі якого визначено технічні вимоги для їх створення. Подано засоби вихрострумової структурoscopії немагнітних матеріалів, побудовані на вимірюванні питомої електропровідності. Показано, що для зменшення впливу зміни зазору найперспективнішим є побудова структурoscopії на основі вимірювання фази сигналу. Розглянуто засоби для контролю змін структури в тонких поверхневих шарах матеріалу на підвищених робочих частот.

**Другий розділ** присвячений дослідженню сигналів параметричних і анаксіальних накладних ВСП. Представлено методику розрахунків сигналів ВСП під час взаємодії з електропровідним об'єктом контролю (у тому числі з дефектом) методом об'ємних інтегральних рівнянь з використанням програми VIC-3D і результати її відпрацювання. Ефективність методики розрахунків підтверджена порівнянням розрахункових і експериментальних даних. Запропоновано новий спосіб визначення довжини тріщини за характеристичними точками розподілу другої похідної залежності сигналу ВСП вздовж тріщини. Проведено дослідження сигналів анаксіальних ВСП, які дозволили встановити низку особливостей формування сигналів для різної орієнтації цих ВСП від тріщин різної довжини.

**У третьому розділі** наведено результати експериментальних досліджень ВСП подвійного диференціювання. Представлено комплект ВСП цього типу діаметром від 4 до 33 мм для роботи на різних робочих частотах. Встановлено низку особливостей формування сигналів ВСП подвійного диференціювання від дефектів. Запропоновано фізичну модель «квазінескінченної тріщини» і визначено граничні значення глибини залягання тріщин, що можуть бути виявленими цими ВСП. Показано, що площа контуру, яка охоплює годограф сигналу ВСП від тріщини у комплексній площині залежить від її нахилу. Ці результати дали можливість запропонувати новий спосіб визначення параметрів нахилених тріщин. Досліджено чутливість ВСП подвійного диференціювання під час виявлення дефектів через шар захисного покриття. Проведено дослідження ВСП подвійного диференціювання у складі томографічної установки вихрострумового контролю, яка відобразила вертикальний переріз розподілу питомої електропровідності в зоні дефектів. Побудовано математичну модель впливу анізотропії питомої електропровідності на сигнал ВСП подвійного диференціювання і визначено закономірності зміни сигналу під час обертання ВСП над анізотропним матеріалом. Дослі-

джено годографи зміни сигналу ВСП під дією напруженів розтягу і стиску, а також залежності амплітуди сигналу від цих напруженів.

У четвертому розділі запропоновано новий параметр для оцінювання ефективності обмоток ВСП незалежно від абсолютноого значення їх індуктивності. Проведено аналіз виразу для коефіцієнта вихрострумової ефективності на основі моделі обмотки ВСП прямокутного перерізу над електропровідним півпростором, який показав інваріантні властивості запропонованого параметра відносно кількості витків за заданого перерізу обмотки, а також відносно розмірів обмотки за умови збереження співвідношення її геометричних параметрів. Запропоновано методику визначення коефіцієнта вихрострумової ефективності, що дозволило запропонувати новий спосіб визначення ефективності обмоток ВСП. Інваріантність параметра проілюстровано розрахунками методом об'ємних інтегральних рівнянь. Досліджено вплив на ефективність ВСП різних параметрів обмоток на феритовому осерді, зокрема довжини осердя і відступу обмотки від його кінця. Проаналізованого вплив конструкційних факторів на індуктивність обмоток з феритовим осердям.

П'ятий розділ присвячено розробленню автогенераторних ВД з параметричним ВСП. Розроблено комплект ВСП для рішення різних задач та методику визначення чутливості автогенераторних ВД, що працюють в режимі переривчастої генерації. Розроблено і досліджено нові схеми структурних елементів автогенераторного ВД, зокрема: схему двоконтурного автогенератора на польовому транзисторі з ізольованим затвором, схему управління робочою частотою автогенератора і схему регенерації коливань. Запропоновані технічні рішення використано для створення низки автогенераторних ВД типу ЛЕОТЕСТ ВД, які пройшли державні випробування і включені в регламенти з технічного обслуговування авіаційної техніки. Подано результати використання дефектоскопів в різних галузях промисловості.

У шостому розділі представлена низка засобів і технологій вихрострумового контролю з використанням ВСП подвійного диференціювання. Представлено дефектоскоп з обертовим ВСП для виявлення дефектів в латунних трубках теплообмінників тепловозів і результати його впровадження на ДП «Завод ім. В.О. Малишева». Представлено вихрострумові дефектоскопи універсального типу, особливістю яких є використання ВСП подвійного диференціювання. Представлено технології ручного контролю із застосуванням ВСП подвійного диференціювання. Показано ефективність ВСП подвійного диференціювання для виявлення дефектів в умовах дії завад, пов'язаних з порушеннями геометрії і зміною структури в зоні зварних швів конструкцій із алюмінієвих сплавів і феромагнітних сталей. Запропоновано технології виявлення прихованих дефектів авіаційних багатошарових конструкцій (в тому числі заклепкових з'єднань), а також дефектів літва з шорсткою поверхнею. Представлено автоматизовані системи контролю із використанням ВСП подвійного диференціювання для виявлення дефектів труб печей вторинного риформінгу товщиною, залізничних осей і колісних пар.

Сьомий розділ присвячено розробленню вихрострумових структуроскопів. Розроблено і досліджено ВСП різною локальністі для вимірювання питомої електропровідності неферомагнітних матеріалів. Запропоновано і досліджено вдосконалену схему вимірювання фази сигналу ВСП на логічних схемах з додатковим

гістерезисом для зменшення впливу паразитних осциляцій. Запропоновано і досліджено методику налаштування фазових вимірювачів електропровідності з метою зменшення похибки від змін зазору, новий спосіб вимірювання електропровідності і схему лінеаризації. Представлено низку вихрострумових структуроскопів типу ВЕП-21, ВЕП-22 і ВЕПР-31 для вимірювання електропровідності алюмінієвих сплавів. Показано їх ефективність для визначення розподілу електропровідності матеріалу в зоні зварного шва і для моніторингу структурної деградації алюмінієвих сплавів авіаційних конструкцій. Розроблено і досліджено винесені автогенераторні ВСП і вихрострумові структуроскопи, які працюють на підвищених частотах понад 100 МГц. Показано можливість кількісного контролю параметрів поверхневих шарів (зокрема газонасичених шарів титанових сплавів), на основі чого запропоновано новий спосіб кількісного контролю.

У восьмому розділі роботи розглянуто питання метрологічного забезпечення засобів вихрострумової дефектоскопії. Запропоновано нову класифікацію стандартних зразків дефектоскопії. Представлено нові конструкції стандартних зразків для імітації внутрішніх і нахилених дефектів. Проаналізовано причини розходження сигналів від штучних і реальних дефектів, зокрема вплив розкриття (ширини) тріщини. Зокрема, шляхом розрахунків методом об'ємних інтегральних рівнянь показано вплив розкриття дефектів на сигнал параметричного ВСП. Запропоновано статистичний спосіб атестації стандартних зразків дефектоскопії. Запропоновано способи і засоби перевірки вихрострумових дефектоскопів з ВСП подвійного диференціювання за допомогою електронних імітаторів, які дозволяють проводити метрологічні процедури без застосування стандартних зразків. Представлено імітатор сигналів вихрострумового контролю типу ICBK-1 для перевірки дефектоскопів з ВСП подвійного диференціювання.

У додатках подано документи по впровадженню результатів роботи.

Зміст дисертації належним чином відображає мету та задачі досліджень, отримані науково-технічні результати.

За результатами дисертаційного дослідження опубліковано 4 монографії і розділи в монографіях, 42 статей у фахових виданнях (в тому числі 7 статей у виданнях, що входять до наукометричної бази даних Scopus), 43 статей у матеріалах конференцій (в тому числі світових і європейських конференціях з неруйнівного контролю). По темі роботи автором отримано також 26 авторських свідоцтв і патентів України.

Основні принципові результати роботи та положення, які відображають її наукову новизну, опубліковані в одноособових публікаціях, зокрема в монографії. Кількість та зміст публікацій за темою дисертації повністю висвітлюють її зміст і відповідають вимогам до докторських дисертацій в цій частині

**Основні результати роботи і їх наукова новизна.** У дисертації вирішена проблема вихрострумового неруйнівного контролю конструкцій і виробів, яка полягає у виявлені дефектів на фоні завад високого рівня. Для цього запропоновано відповідну методологію і створено нові технічні засоби. Це дозволило розширити сферу застосовність методу на виявлення дефектів у зварних швах і багатошарових авіаційних вузлах, під головкою заклепки, під шаром захисного діелектричного покриття, у виробах з неоднорідною структурою і грубообробленою поверх-

нею, а також у феромагнітних матеріалах з неоднорідними магнітними властивостями.

**Як наукову новизну** можна зазначити:

1. Закономірності розподілу сигналу параметричного ВСП від тріщин різної довжини, які дозволили встановити можливість знаходження координат кінців тріщини на основі мінімумів другої похідної розподілу сигналу.

2. Встановлення особливостей формування сигналів ВСП подвійного диференціювання від дефектів.

3. Розроблено фізичну модель «квазінескінченої тріщини» для граничних значень глибини залягання тріщин, які можуть бути виявлені за допомогою ВСП подвійного диференціювання.

4. Метод визначення параметрів нахилених тріщини, за якого площа області, що охоплює сигнал від дефекту у комплексні площині використана в якості характеристичної ознаки кута нахилу тріщини.

5. Математична модель впливу анізотропії питомої електропровідності на сигнал ВСП подвійного диференціювання і закономірності зміни його сигналу під час обертання над анізотропним об'єктом контролю.

6. Метод відлаштування від впливу зазору під час вимірювання питомої електропровідності фазовим методом і метод кількісного контролю змін структури тонких поверхневих шарів.

**Обґрунтованість і вірогідність наукових положень, висновків, рекомендацій.** Сформульовані в дисертації наукові положення, висновки і рекомендації обґрунтовані теоретичним аналізом, розрахунками, експериментальними дослідженнями на фізичних моделях дефектів і зразках.

Вірогідність результатів забезпечується коректністю постановки задачі, виконаних розрахунків, відповідністю застосованих розрахункових методів і методів експериментального дослідження задачам дослідження і підтверджується впровадженням результатів досліджень.

**Практична цінність роботи полягає в тому,** що отримані в роботі результати дозволили створити низку засобів і технологій вихрострумового контролю, зокрема:

1. Розроблено вихрострумові дефектоскопи ЛЕОТЕСТ ВД 3.03Н; ВД 3.02Н, ВД 3.03Н і ВД 4.01Н. Дефектоскопи пройшли державні випробування і включені у державний реєстр засобів вимірювальної техніки. Дефектоскопи широко впроваджено на різних підприємствах України. Їх включено в регламент з обслуговування літаків ДП “Антонов” та авіаційних двигунів ДП “Івченко-Прогрес” і ПАТ “Мотор-Січ”.

2. Розроблено і впроваджено комплект ВСП подвійного диференціювання. На основі ВСП і дефектоскопів типу ОКО-01, ВД 3-71, ВД 3-81 і Еддікон-С розроблено нові технології вихрострумового контролю об'єктів, що характеризуються високим рівнем завад, зокрема: виявлення прихованых дефектів багатошарових конструкцій авіаційної техніки, у тому числі під головкою заклепок; виявлення поверхневих і підповерхневих дефектів зварних швів; виявлення дефектів у литих деталях із шорсткою поверхнею і дефектів чавунних автомобільних циліндрів з неоднорідною поверхнею. Розроблено анаксіальний ВСП для виявлення тріщин у зоні заклепок у п'ятишаровому авіаційному вузлі. ВСП подвійного диференцію-

вання використано для створення автоматизованих систем, зокрема: чотириканальної системи КРАБ для виявлення дефектів труб вторинного риформінгу із нержавної сталі; багатоканальних вихрострумових трактів для системи контролю за лізничих осей і системи контролю залізничних колісних пар.

3. Розроблено і впроваджено на ДП «Завод ім. В.О. Малишева» дефектоскоп типу ЛЕОТЕСТ ВД-5Д з обертельним ВСП подвійного диференціювання, який забезпечує виявлення дефектів тонкостінних латунних трубок з ідентифікацією виявленіх дефектів за глибиною.

4. Розроблено вихрострумові структуроскопи типу ВЕП-21, ВЕП-22 і ВЕПР-31, які дозволили реалізувати моніторинг експлуатаційної деградації алюмінієвих сплавів авіаційних конструкцій на ДП «Антонов».

5. Розроблено вихрострумові структуроскопи типу АЛЬФА, ДЕЛЬТА, СІГМА і АЛЬФА-М для виявлення і оцінювання поверхневих газонасичених шарів титанових сплавів на підвищених робочих частотах понад 100 МГц.

### Зауваження

1. В першому пункті наукової новизни вказано: « Встановлено і досліджено нові особливості формування сигналів..», що не пояснює суть наукової новизни пункту.

2. В п. 5 «наукової новизни» на мою думку потрібно було підкреслити результати і подати його віншій редакції де спершу показати що пропонується, а потім, що дає запропоноване твердження в науковому плані, наприклад, «Запропонований новий підхід (метод) ..., що дало можливість.... .

3. Потрібно було таблиці, рисунки результати окремих (подібних) результатів винести в додатки, що зменшить об'єм основної роботи.

4. В роботі досліжується метод об'ємних інтегральних рівнянь, який використовується програмою VIC-3D, не пояснено який науковий вклад дисертанта в розвиток методу об'ємних інтегральних рівнянь. Ст. 48. В формулах (1.2-1.8) не вказується, що відоме, а що доказано дисертантом, що затруднює оцінити правильність рішення задачі і де результати цієї задачі, які виковуються в подальшому. Наприклад, ст. 86, вибирається кількість комірок  $NX = 32$  і  $NY = NZ = 32$  за трьома координатами. Не ясно яким чином враховується кількість комірок при визначені відносних розбіжностей.

5. На ст. 72, стверджується, що збільшення зазору між перетворювачем і тріщиною приводить до підвищення добротності контуру каскаду, що використовується у вихрострумовому дефектоскопі (ВД) але не доказується чому, так як і не порівнюються принципові електричні схеми із іншими відомими рішеннями та використанням інших типів польових транзисторів, хоч всі польові транзистори мають високий вхідний опір, зокрема двох затворні особливо по другому затвору.

6. Не достатньо повно показано як забезпечується при скануванні вихрострумовим перетворювачем (ВСП) над тріщиною рівномірність віддалі від поверхні ВСП до ОК, яка впливає на досліджувані параметри.

7. Ст. 99, вважаю, що твердження автора, що зроблені у вигляді висновків, більше підходять до проміжного опису особливостей дослідження.

8. В роботі зустрічаються неточності у викладенні матеріалу, наприклад:

8.1. Рис. 3.7, показані сигнали в комплексній площині, але не вказані координати, розмірності а тільки форма.

8.2. Автор досліджує амплітуду сигналу від напруження розтягу і стиску. Проте не зрозуміло, чи враховуються інші види напружень, наприклад від кручення.

### **Висновок щодо відповідності дисертації встановленим вимогам**

Дисертаційна робота Учаніна В.М. є завершеною працею, в якій отримано нові науково обґрунтовані теоретичні та експериментальні результати, важливі для удосконалення вихрострумового методу контролю об'єктів, що характеризуються високим рівнем завад.

Отримані в дисертації результати є новими, їх цінність підтверджена результатами практичного застосуванням. Дисертаційна робота відповідає спеціальності 05.11.13 - прилади і методи контролю та визначення складу речовин.

Висновки за результатами виконаної роботи відповідають поставленій меті та задачам дослідження. Автореферат вірно відображає зміст та основні положення дисертації.

За актуальністю і новизною розглянутої теми, обсягом проведених досліджень і практичною спрямованістю робота Учаніна В.М. «Розроблення методів і засобів вихрострумового контролю матеріалів та конструкцій» відповідає вимогам до докторських дисертацій, а її автор заслуговує присвоєння йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу речовин.

Офіційний опонент,  
докт. техн. наук, професор кафедри  
програмного забезпечення  
автоматизованих систем  
Івано-Франківського національного  
технічного університету нафти і газу



I. З. Лютак

|                         |                    |
|-------------------------|--------------------|
| Підпис(и)               | <i>I. Z. Lutak</i> |
| посвідчує               | <i>B. Protsuk</i>  |
| Вчений секретар ІФНТУНГ |                    |
| 06.06.2007 р.           |                    |