

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Лисенко Юлія Юріївна

УДК 620.179.14

**ІНФОРМАЦІЙНО – ДІАГНОСТИЧНА СИСТЕМА ІМПУЛЬСНОГО
ВИХРОСТРУМОВОГО НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ВИРОБІВ
МАШИНОБУДУВАННЯ**

**Спеціальність 05.11.13 – прилади і методи контролю
та визначення складу речовин**

**Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук**

Київ – 2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі приладів і систем неруйнівного контролю Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Куц Юрій Васильович,
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря
Сікорського», професор кафедри приладів і систем
неруйнівного контролю

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Гальченко Володимир Якович
Черкаський державний технологічний університет,
професор кафедри приладобудування, мехатроніки та
комп'ютеризованих технологій

кандидат технічних наук, доцент
Хомяк Юрій Валентинович
Національний технічний університет «Харківський
політехнічний інститут», доцент кафедри комп'ютерних
та радіoeлектронних систем контролю та діагностики

Захист відбудеться «06» лютого 2018 р. о 15:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради у Д26.002.18 в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою:
03056, Київ, проспект Перемоги, 37, корп. 1, ауд. 293

З дисертацією можна ознайомитись у науково-технічній бібліотеці ім. Г. І. Денисенка Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою:
03056, Київ, проспект Перемоги, 37.

Автореферат розісланий «28» грудня 2017 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Н.І. Бура

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Вихрострумовий неруйнівний контроль (ВСНК) є одним з найпоширеніших видів неруйнівного контролю (НК), характеризується простим способом взаємодії об'єкта контролю (ОК) з вихрострумовим перетворювачем (ВСП) та відносною дешевизною.

Вагомих результатів досягнуто у розвитку теорії ВСНК з гармонічним збудженням вихрових струмів та створенні відповідних засобів ВСНК – перетворювачів, дефектоскопів, товщиномірів тощо. Значний внесок у розвиток теорії та практики ВСНК у цьому напрямі зробили відомі вітчизняні та закордонні вчені: Білокур І.П., Бучма І.М., Дорофеев О.Л., Карпаш О.М., Ключев В.В., Кісіль І.С., Луценко Г.Г., Маєвський С.М., Гальченко В.Я., Яцун М.А., Хандецький В.С., Мірошніков В.В., Себко В.П., Сухоруков В.В., Сучков Г.М., Тетерко А.Я., Тюпа І.В., Учанін В.М., Шкарлет Ю.М., M.J. Johnson, M. L. Burrows, R. A. Morris, S. B. Chan та ін.

У випадку гармонічного збудження ВСП електрофізичні характеристики матеріалів і геометричні параметри ОК визначаються через такі параметри інформаційних сигналів ВСП як амплітуда, частота і фазовий зсув. Аналіз сигналів ВСП та інтерпретацію результатів контролю ускладнює дія ряду перешкоджаючих факторів, серед яких найбільш небезпечними є зазор між ВСП та ОК, варіація електромагнітних властивостей металу, кривизни та шорсткості поверхні ОК, зовнішні та апаратурні шуми і завади різної природи.

Фахівці з ВСНК періодично звертаються до ідеї використання імпульсного збудження ВСП, який має ряд переваг: збільшену глибину контролю; додаткові інформативні параметри; можливість одночасного аналізу сигналу на декількох частотах; можливість аналізу сигналу ВСП в часовій області. Проте, теорія і практика застосування ВСНК з імпульсним збудженням ще не набула завершеного вигляду, а результати досліджень мають частковий характер, та не узагальнені, викладені в окремих роботах вітчизняних та закордонних вчених, наприклад в роботах Л. Валлесе, Д. Роуз, Е. Юзел, Д. Вейделіч, В. Ключева, Р. Шарпа, Яцуна М.А., та ін.

В практиці імпульсного ВСНК (ІВСНК) найчастіше використовуються такі інформативні ознаки сигналів: зміщення моменту перетину сигналом певного рівня, часовий інтервал між певними вузловими точками, пікові значення амплітуди та перевищення амплітудою певних порогових значень та моменти цих перетинів. Недоліком таких реалізацій імпульсного ВСНК є використання окремих характерних точок сигналу ВСП, тобто не повне використання інформаційних можливостей сигналу та незахищеність вищезгаданих точкових характеристик від впливу завад. У зв'язку з цим значної ваги набувають питання підвищення інформативності та достовірності ВСНК на основі подальшого дослідження ІВСНК, пошуку нових інформативних параметрів та характеристик сигналів ВСП та удосконалення методів їх аналізу в засобах ВСНК.

Таким чином, тема дисертаційної роботи, що пов'язана з розв'язанням науково-технічної задачі удосконалення методу та створення нових засобів

ІВСНК, обґрунтування нових для ВСНК інформативних параметрів сигналів ВСП та дослідження їх зв'язків з параметрами ОК, є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами та темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі приладів і систем неруйнівного контролю КПП ім. Ігоря Сікорського в рамках державних науково-дослідних робіт «Прецизійні методи фазових вимірювань та цифрового опрацювання сигналів неруйнівного контролю авіаційної техніки» (№0113U000086) та «Дослідження вихрострумowego методу неруйнівного контролю з використанням імпульсного збудження перетворювача» (№0116U004742), де здобувач був виконавцем окремих етапів.

Мета і завдання дисертаційної роботи. Мета дисертаційної роботи полягає у вирішенні науково-технічної задачі удосконалення імпульсного методу ВСНК за рахунок використання нових для ВСНК інформативних параметрів сигналів ВСП, розроблення інформаційно-діагностичної системи імпульсного ВСНК.

Для досягнення цієї мети у роботі поставлені та вирішені наступні завдання:

- проаналізувати сучасні засоби ВСНК з імпульсним збудженням та існуючі методи аналізу інформаційних сигналів ВСП, обґрунтувати необхідність та можливість розробки інформаційно-діагностичної системи ІВСНК виробів машинобудування;

- удосконалити фізико-математичну модель системи ВСП-ОК в умовах імпульсного збудження перетворювача з метою пошуку нових інформативних параметрів сигналів ВСП та зв'язку параметрів сигналу ВСП з параметрами та характеристиками ОК;

- розробити метод визначення та аналізу дискретних амплітудної та фазової характеристик сигналів (АХС та ФХС) імпульсного ВСНК, який ґрунтується на поєднанні дискретного перетворення Гільберта та статистичному згладжуванні характеристик сигналів ВСП;

- провести аналіз похибок визначення характеристик сигналів ВСП у формі загасаючих гармонічних коливань та визначити їх вплив на запропоновані інформативні параметри ІВСНК;

- провести математичне моделювання запропонованого методу аналізу сигналів ВСП в умовах імпульсного збудження та за умови впливу адитивних гауссових шумів, розробити методику та алгоритмічне забезпечення, яке реалізує запропонований метод аналізу сигналів ВСП та отримання амплітудної та фазової характеристик сигналів з їх подальшим статистичним аналізом;

- розробити інформаційно-діагностичну систему імпульсного ВСНК, що використовує запропоновані інформативні параметри сигналів ВСП в умовах імпульсного збудження та розроблену методику, та алгоритмічне забезпечення їх аналізу та оцінювання;

- впровадити результати досліджень та розробок в практику використання для виробничих та навчальних задач.

Об'єкт дослідження – процес формування та аналізу інформаційних сигналів ВСНК виробів машинобудування.

Предмет дослідження – методи і засоби ВСНК та відповідні методики цифрового аналізу інформаційних сигналів ВСП з імпульсним режимом збудження вихрових струмів.

Методи дослідження базуються на використанні: методів технічної діагностики і неруйнівного контролю; теорії вимірювань та методи електричних вимірювань; теорії електричних кіл, зокрема методів аналізу перехідних процесів, теорія функції комплексної змінної; цифрових методів аналізу сигналів: перетворення Гільберта, чисельні методи апроксимації функцій; методи математичного аналізу: теорія функцій, диференціальне та інтегральне числення, диференціальні рівняння); комп'ютерного моделювання та обробки експериментальних даних, які виконані в системі MatLab; теорії ймовірності та математичної статистики.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Удосконалено фізико-математичну модель системи «вихрострумний перетворювач – об'єкт контролю» за рахунок врахування додаткових ємності та опору в еквівалентній схемі вихрострумного перетворювача для аналізу процесів формування сигналів перетворювача з імпульсним збудженням, представлених у формі загасаючих гармонічних коливань, та вперше запропоновано використання власної частоти і коефіцієнта загасання в якості інформативних параметрів сигналів вихрострумного перетворювача, що дозволило встановити функціональні зв'язки цих інформативних параметрів з параметрами об'єкту контролю.

2. Запропоновано метод визначення та аналізу дискретних амплітудної та фазової характеристик сигналів імпульсного ВСНК, який ґрунтується на поєднанні дискретного перетворення Гільберта та статистичному згладжуванні характеристик сигналів вихрострумного перетворювача, що забезпечує підвищення точності визначення функціональних залежностей між власною частотою коливань і коефіцієнтом загасання сигналів перетворювача та параметрами і характеристиками об'єкта контролю.

3. Запропоновано та обґрунтовано аналітичні вирази критерію вибору часового інтервалу аналізу сигналів вихрострумного перетворювача, що дозволило мінімізувати похибки визначення запропонованих інформативних параметрів сигналу перетворювача.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що

1. Розширено науково-технічну базу проектування засобів ВСНК за рахунок використання нових інформативних параметрів сигналів ВСП, які доступні в імпульсному режимі збудження перетворювача і надають нові можливості для створення багатопараметрових методів контролю шляхом комплексного використання неперервного та імпульсного режимів роботи.

2. Розроблено методику та алгоритмічне забезпечення, яке реалізує запропонований метод аналізу сигналів ВСП та отримання амплітудної та фазової характеристик сигналів з їх подальшим статистичним аналізом та оцінюванням.

3. Створено дослідний зразок інформаційно-діагностичної системи імпульсного ВСНК для проведення експериментальних досліджень роботи різних типів ВСП в умовах імпульсного збудження на серіях зразків (пласкої та циліндричної форми), що підтвердило можливість використання запропонованих інформативних параметрів сигналів ВСП у формі загасаючих гармонічних коливань – власної частоти та коефіцієнта загасання сигналу в завданнях контролю електропровідності матеріалів, діаметру прутків, товщини покриття, глибини залягання дефектів, геометричних параметрів ОК.

Результати теоретичних та експериментальних досліджень впроваджені у виробничий процес ДП «Луцький ремонтний завод «Мотор» (м. Луцьк), у навчальний процес кафедри приладів та систем неруйнівного контролю КПІ ім. Ігоря Сікорського під час викладання дисциплін «Електромагнітні методи неруйнівного контролю» та «Технічні та медичні системи неруйнівного контролю».

Особистий внесок здобувача. Основні наукові результати дисертаційної роботи, які виносяться на захист, отримані здобувачем особисто. Роботи [15, 23] написані автором самостійно. У роботах, опублікованих у співавторстві, особисто автором виконано: [1, 2, 7, 12, 21, 22] – аналіз методів аналізу сигналів ВСП в імпульсному режимі збудження; [6, 17, 26] – аналіз можливості використання перетворення Гільберта в задача аналізу сигналів ВСП; [10, 14, 24] – розроблення математичної моделі процесу формування реакції системи «ВСП – ОК» з імпульсним режимом збудження вихрових струмів; [2, 3, 4, 5] – розробка інформаційно-діагностичної системи імпульсного ВСНК для оцінювання параметрів та характеристик виробів машинобудування; [19, 20] – аналіз залежності інформативних параметрів сигналу ВСП від параметрів та характеристик ОК та розробка способу двопараметрового контролю об'єктів циліндричної форми за рахунок оцінювання діаметру та електропровідності матеріалу; [8, 11, 30] – аналіз можливості підвищення точності визначення інформативних параметрів сигналів ВСП з імпульсним режимом збудження за рахунок використання методів апроксимації амплітудної та фазової характеристики цього сигналу; [13, 17, 25, 28, 29] – розроблення методики аналізу сигналів ВСП в імпульсному режимі збудження з аналізом цих сигналів в часовій області на основі використання перетворення Гільберта; [11, 16] – аналіз похибок визначення інформативних параметрів сигналів ВСП з імпульсним збудженням. Також автором проведені необхідні експериментальні дослідження, що знайшли своє відображення в [7, 9, 18, 27].

Апробація результатів дисертаційної роботи. Основні положення та результати роботи доповідались та обговорювались на наступних конференціях, конгресах, з'їздах, семінарах, нарадах: міжнародній науково-технічній конференції “Приладобудування: стан і перспективи” (м. Київ, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2016, 2017); міжнародній конференції «Дні неруйнівного контролю» (м. Созополь, Болгарія, 2011, 2013, 2014, 2016, 2017); міжнародному молодіжному форумі «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке» (м. Харків, 2011, 2013, 2015); національній науково-технічній конференції «Неруйнівний контроль та технічна діагностика - UkrNDT-2012» (м. Київ, 2012),

«Неруйнівний контроль та технічна діагностика - UkrNDT-2016» (м. Київ, 2016); європейській конференції «11th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT 2014)» (м. Прага, Чеська Республіка, 2014); світовій конференції «19th World Conference on Non-Destructive Testing (WCNDT 2016)» (м. Мюнхен, Німеччина, 2016); міжнародних науково-технічних конференціях «Приборостроение-2015» та «Приборостроение-2016» (м. Мінськ, Республіка Білорусь, 2015, 2016); міжнародній науково-технічній конференції IEEE «Електротехніка та комп'ютерна інженерія» (IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering, «UKRCON 2017») (м. Київ, 2017).

Результати досліджень доповідались та обговорювались на наукових семінарах кафедри приладів і систем неруйнівного контролю Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Публікації. За темою дисертаційних досліджень опубліковано 30 наукових праць, з яких: 4 у фахових виданнях України та 7 у закордонних виданнях (в тому числі 1, що входить до науково-метричної бази Scopus), 2 патенти України, 17 тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновку, списку використаних джерел та 6 додатків. Загальний обсяг дисертації становить 172 сторінки, 70 рисунків до тексту, 6 таблиць до тексту. Список використаних джерел складається зі 132 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету та основні завдання роботи, наведено дані про її зв'язок з науковими програмами, викладено наукову новизну і практичне значення результатів досліджень, визначено особистий внесок автора, вказано відомості щодо апробації результатів дисертації, їх публікації та впровадження.

У першому розділі проведено аналіз наукових праць, які стосуються методів гармонічного та імпульсного ВСНК та їх практичної реалізації на сучасному етапі розвитку науки і техніки. Особлива увага приділена питанням розвитку способів підвищення достовірності контролю та способів зменшення впливу завад і різних перешкоджаючих факторів на результати контролю, розширення функціональних можливостей ВСНК, аналізу різних способів збудження вихрових струмів. Виконано порівняльний аналіз існуючих методів аналізу сигналів ВСП та визначення залежностей інформативних параметрів сигналів від характеристик та параметрів ОК.

Аналіз сучасних методу та засобів ВСНК з імпульсним збудженням показав, що метод має ряд переваг – проведення аналізу сигналу ВСП в часовій області з оцінкою відповідних інформативних параметрів; можливість зміни потужності сигналу для покращення рівня сигнал/шум; збільшення глибини проникнення. Проте, як інформативні параметри найчастіше використовуються

характерні точки сигналів ВСП (максимальне амплітудне значення, часовий момент перетину сигналом певного амплітудного рівня та, в деяких випадках, зміна загасання магнітного поля), які є нестійкими до впливу шумів, що не дозволяє реалізувати потенційні можливості цього режиму збудження. Відповідні засоби надають кількісну оцінку параметру ОК, проте не ідентифікують дефект та його параметри, що говорить про необхідність розвитку теоретичного базису, пошуку нових інформативних параметрів ВСП і удосконалення багатопараметрових методів контролю шляхом комплексного використання неперервного та імпульсного режимів роботи.

Крім того, проведений аналіз літературних джерел показав тенденцію розвитку імпульсного методу ВСНК, його засобів та сфери їх застосування. За рахунок використання окремих характерних точок сигналу ВСП, тобто не повного використання інформаційних можливостей сигналу та незахищеність таких точкових характеристик від впливу завад, сучасні засоби, що базуються на імпульсному методі ВСНК, не мають високої чутливості і дають дуже наближену оцінку певної характеристики ОК. Загалом, ВСНК з імпульсним збудженням може доповнити відомі методи за рахунок можливості аналізу таких параметрів сигналів як частота, дисперсія фази, коефіцієнт загасання і часове положення характерних точок сигналу.

Проведений аналіз дозволив сформулювати наведені вище мету та задачі дисертаційної роботи та обрати відповідні їм методи досліджень.

У другому розділі приведені результати теоретичних досліджень процесів в параметричному та трансформаторному вихрострумівих перетворювачах в умовах імпульсного збудження. Проведено аналіз впливу параметрів та характеристик ОК на інформативні параметри сигналу ВСП. Розглянуто спосіб визначення та аналізу дискретних амплітудних та фазових характеристик інформативного сигналу ВСП, який ґрунтується на застосуванні дискретного перетворення Гільберта (ДПГ).

З метою аналізу процесів формування інформаційних сигналів в системі «ВСП-ОК» розглянуто фізико-математичну модель цієї системи, використано її представлення системою індуктивно зв'язаних електричних контурів. Розглянуто еквівалентну схему параметричного ВСП в режимі холостого ходу. Схеми для випадку збудження ВСП імпульсним сигналом приведені на рис. 1а в режимі холостого ходу та рис. 1б в режимі контролю, де $u_T(t)$ – імпульсна напруга джерела живлення, R – резистор, C_1 – сумарна ємність, утворена міжвитковою ємністю котушки та іншими паразитними ємностями перетворювача, R_1 – активний опір котушки індуктивності, L_1 – індуктивність електричної котушки, i_1, i_2, i_3 – струм у відповідних гілках схеми, $R_2(\bar{w})$ та $L_2(\bar{w})$ – активний опір та індуктивність, які залежать від вектору параметрів та характеристик ОК \bar{w} , M – індуктивний зв'язок між котушками L_1 та $L_2(\bar{w})$.

У еквівалентних схемах рис.1 новим є включення та врахування опору R та ємності C_1 , яка є несуттєвою для аналізу неперервного режиму роботи ВСП (у випадку збудження ВСП гармонічним сигналом, тобто у

стаціонарному або квазістаціонарному режимах роботи), але яка відчутно впливає на формування сигналу ВСП в імпульсному режимі роботи.

Напруга джерела живлення $u_{\Gamma}(t)$, яка являє собою періодичну послідовність імпульсів прямокутної форми, представляється виразом:

$$u_{\Gamma}(t) = \begin{cases} u_0, & t \in n \cdot T_n + \tau, n = 0, 1, 2, \dots \\ 0, & t \notin n \cdot T_n + \tau, \end{cases} \quad (1)$$

де u_0 , T_n , τ – відповідно амплітуда, період та тривалість імпульсів.

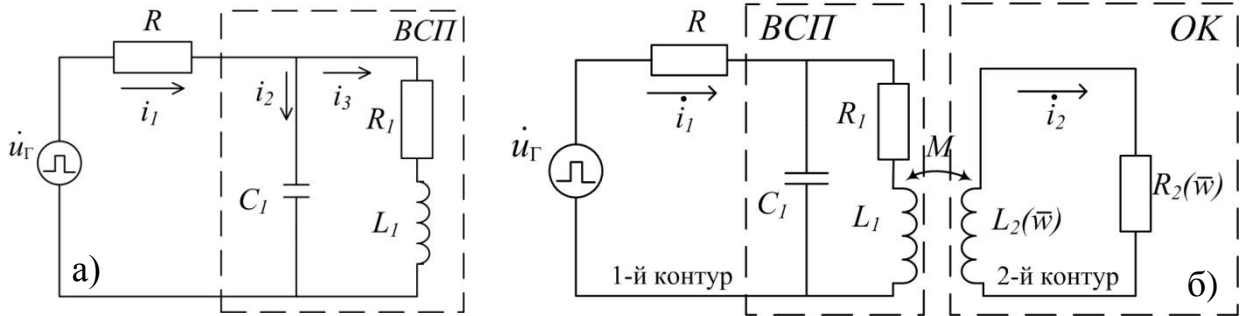


Рис.1. Еквівалентна схема параметричного ВСП без (а) та з ОК (б) за умови його підключення до генератора імпульсних сигналів

За імпульсного збудження параметричного ВСП для виявлення та оцінювання його реакції на фронти збуджуючого імпульсного сигналу доцільним є аналіз перехідних процесів в електричному колі ВСП. Такий аналіз базується на розв'язанні характеристичного рівняння, яке відповідає виразу вхідного комплексного опору контуру електричного ланцюга за змінного струму.

Вхідний комплексний опір для еквівалентної схеми параметричного ВСП (рис. 1) має вигляд:

$$\dot{Z}_{\text{екв}}(\omega) = R + \frac{R_1 + i\omega L_1}{1 + R_1 i\omega C_1 + (i\omega)^2 L_1 C_1}. \quad (2)$$

Відповідне (2) характеристичне рівняння записується як:

$$R + \frac{R_1 + pZ_L}{1 + pR_1 C_1 + p^2 L_1 C_1} = 0 \quad (3)$$

або

$$RZ_1 C_1 \cdot p^2 + (RR_1 C_1 + L_1) \cdot p + R + R_1 = 0, \quad (4)$$

де p – параметр характеристичного рівняння, $p = i\omega$, $i = \sqrt{-1}$.

Розв'язком квадратного рівняння (4) є корені виду:

$$p_{1,2} = -\frac{RR_1 C_1 + L_1}{2RL_1 C_1} \pm \sqrt{\frac{(RR_1 C_1 + L_1)^2}{4R^2 L_1^2 C_1^2} - \frac{R + R_1}{RL_1 C_1}}. \quad (5)$$

Залежно від співвідношення складових $\frac{(RR_1 C_1 + L_1)^2}{4R^2 L_1^2 C_1^2}$ та $\frac{R + R_1}{RL_1 C_1}$ в

рівнянні (5), можливі три типи коренів характеристичного рівняння p_1 та p_2 і відповідно три варіанти виразів для представлення компонент вільної складової струму.

Позначимо критичний опір контура як:

$$R_{кр} = \frac{R_1 C_1 L_1 \pm 2L_1 \sqrt{L_1 C_1}}{R_1^2 C_1^2 - 4L_1 C_1}. \quad (6)$$

Попередній аналіз сигналів ВСП з імпульсним режимом збудження показав, що в ряді випадків виникають загасаючі коливання. Такий режим можливий за умови коли корені характеристичного рівняння є комплексно спряженими. Якщо $R < R_{кр}$, корені є комплексно спряженими з від'ємною дійсною частиною виду $p_{1,2} = -\alpha \pm j\omega_0$, де $\alpha > 0$ – коефіцієнт загасання (декремент), ω_0 – кутова частота власних коливань, що відповідає струму у вигляді загасаючого гармонічного коливання:

$$i_{\epsilon}(t) = Ae^{-\alpha t} \sin(\omega_0 t + v), \quad t \in T_a \gg \frac{1}{\alpha}, \quad A > 0, \quad (7)$$

де A – постійна інтегрування, v – початкова фаза.

З точки зору підвищення інформативності імпульсного ВСП запропоновано використовувати коливальний процес з аналізом нових для вихрострумowego контролю параметрів сигналів ВСП – частоти власних коливань та коефіцієнта загасання. Вільна складова струму представлена в (7) загасаючим синусоїдальним коливанням з кутовою частотою ω_0 та коефіцієнтом загасання α , які зв'язані з параметрами еквівалентної схеми наступними виразами:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{R + R_1}{RL_1 C_1} - \frac{(RR_1 C_1 + L_1)^2}{4R^2 L_1^2 C_1^2}}, \quad (8)$$

$$\alpha = \frac{RR_1 C_1 + L_1}{2RL_1 C_1}. \quad (9)$$

Падіння напруги на ВСП визначається формулою:

$$u(t) = u_0 \cdot f(t - \tau_0) + Ae^{-\alpha t} \sin(\omega_0 t + v), \quad t \in T_a \gg \frac{1}{\alpha}, \quad \tau_0 \in T_a, \quad A > 0, \quad (10)$$

де $f(t - \tau_0)$ – функція одиничного імпульса. З урахуванням перехідного процесу, формула (10) записується як:

$$u(t) = u_0 \cdot f(t - \tau_0) + (u_{C_1}(0) - u_0 \cdot f(t - \tau_0)) e^{-\alpha t} \frac{\sqrt{\alpha^2 + \omega_0^2}}{\omega_0} \sin\left(\omega_0 t + \arctg\left(\frac{\alpha}{\omega_0}\right)\right), \quad (11)$$

де $u_{C_1}(t=0)$ – значення напруги на ємності C_1 в момент часу $t=0$ с.

Виходячи з (11), в якості інформативних параметрів ВСП з імпульсним збудженням запропоновано використання трьох параметрів: коефіцієнта загасання α , частоти власних коливань ω_0 та початкової фази v (за додаткової умови задання опорного сигналу частоти ω_0).

Аналіз роботи ВСП з імпульсним збудженням в режимі холостого ходу дозволив визначити умови виникнення загасаючого гармонічного сигналу

ВСП, який характеризується новими для ІВСНК інформативними параметрами – коефіцієнтом загасання, частотою власних коливань та початковою фазою сигналу.

Крім того, запропоновано спосіб аналізу сигналів імпульсного вихрострумowego контролю в часовій області, який ґрунтується на визначенні гільберт-образу сигналів ВСП та отриманні одночасно амплітудних і фазових дискретних характеристик інформаційного сигналу з наступною ідентифікацією дефектів за цими характеристиками. Такий спосіб дозволяє підвищити швидкість визначення АХС та ФХС за рахунок забезпечення можливості оцінювання їх миттєвих значень в умовах сканування ОК та отримання значно більшого об'єму інформації, що створює можливість застосування статистичних методів аналізу інформації.

Третій розділ присвячено розробці інформаційно-діагностичної системи імпульсного ВСНК, обґрунтуванню її структури, розробці алгоритму роботи та питанням підвищення точності визначення характеристик сигналів ВСП. Подано опис запропонованої методики аналізу сигналів ВСП з імпульсним режимом збудження та проаналізовано стандартну невизначеність вимірювання частоти і коефіцієнта загасання сигналів ВСП, які отримані з їх амплітудної та фазової характеристик (АХС та ФХС). Виконаний аналіз і отримані формули можуть бути використані для інженерного розрахунку числових значень невизначеностей вимірювання коефіцієнта загасання та частоти власних коливань і обґрунтування рекомендацій щодо вибору тривалості інтервалів спостереження сигналу.

Структура розробленої інформаційно - діагностичної системи ВСНК, яка орієнтована на використання декількох типів ВСП, а саме трансформаторних прохідного, накладного та мультидиференціального приведена на рис. 2.

Розроблена система містить: керований генератор (Г), ВСП, вхідний пристрій (Вх.П), фільтр нижніх частот (ФНЧ), цифровий інтерфейс (ЦІ), персональний комп'ютер (ПК), програмно-алгоритмічне забезпечення (АЗ).

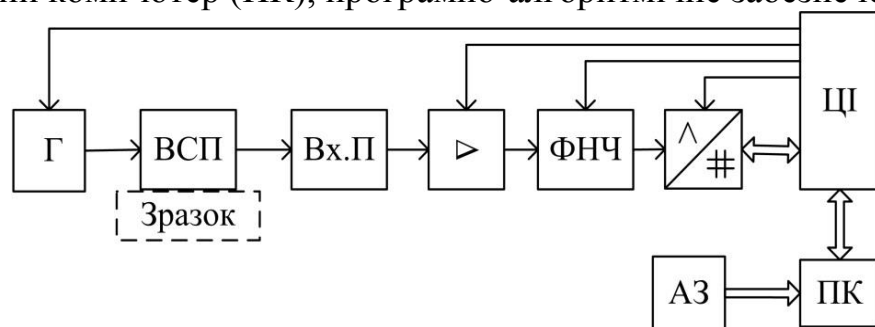


Рис. 2. Функціональна схема розробленої системи ВСНК

Для використання неперервного та імпульсного режиму збудження ВСП, передбачено два режими роботи генератора: імпульсний ($U_{\max}=30\text{В}$) і неперервний ($U_{\max}=5\text{В}$). Регулювання підсилення здійснюється в межах 60дБ, частота зрізу ФНЧ – до 1МГц, розрядність АЦП – 8 біт, частота дискретизації – до 200МГц. Підключення системи відбувається через USB інтерфейс.

На первинну котушку ВСП надходить імпульсний сигнал від генератора, параметри сигналу якого можуть змінюватись програмним шляхом за потребою користувача. Сигнал вимірювальної котушки ВСП підсилюється, фільтрується і оцифровується АЦП. Отримані цифрові дані записуються до буферного регістра пам'яті (БРП), що входить до складу ЦІ, та передаються до персонального комп'ютера (ПК) з необхідним АЗ для подальшої обробки та аналізу. Синхронізацію роботи основних елементів системи забезпечує блок управління, що міститься в ЦІ.

Перевагами запропонованої інформаційно-діагностичної системи ВСНК є можливість комбінації режимів збудження ВСП, можливість використання різних типів ВСП та отримання більш повної інформації про параметри та характеристики ОК за рахунок реалізації багатопараметрового режиму контролю.

В даній системі ВСНК реалізовано розроблену методику аналізу сигналів ВСП з імпульсним збудженням, яка ґрунтується на отриманих у розділі 2 результатах аналізу системи ВСП-ОК (рис. 1), враховує особливості апаратно-програмної реалізації системи імпульсного ВСНК (рис. 2) та приведена на рис. 3. Як інформативні параметри сигналів ВСП розглядались їх коефіцієнт загасання і частота власних коливань. Процес обробки та аналізу характеристик інформаційних сигналів ВСП полягав у наступному:



Рис. 3 Умовне зображення процесу аналізу сигналів імпульсного ВСНК

1) імпорт вихідної вибірки сигналу $u_{\text{всп}}[j, \bar{w}]$ (в режимі обробки експериментальних даних останні надходять з буферного регістра пам'яті

через ЦІ, а в режимі моделювання – з внутрішнього генератора; система забезпечує можливість завантаження даних з файлів різного типу (txt, xls, bin, csv, lvm та інш.), де j – номер відліку сигналу ВСП в цифровому представленні;

2) вибір ділянки аналізу сигналу, який виконується з огляду на загасаючий характер інформаційних сигналів перетворювача, його малу тривалість в часі (не більше 10 періодів несучої) та з метою зменшення впливу завад та подальше визначення АХС та ФХС ВСП;

3) визначення гільберт - образу вибірки $u_{ecn}[j, \bar{w}]$: $u_H[j, \bar{w}] = \mathbf{H}_d[u_{всп}[j, \bar{w}]]$;

4) визначення дискретних ФХС та АХС ВСП:

$$\Phi[j, \bar{w}] = \arctg \frac{u_H[j, \bar{w}]}{u_{всп}[j, \bar{w}]} + \mathbf{L}(u_H[j, \bar{w}], u_{всп}[j, \bar{w}]), \quad (14)$$

$$U[j, \bar{w}] = \sqrt{u_{всп}^2[j, \bar{w}] + u_H^2[j, \bar{w}]}; \quad (15)$$

5) згладжування функції (14) за методом визначення лінійної регресії Бартлетта-Кенуя. В основі методу лежить упорядкування експериментальних даних за часом t і поділ аналізованої частини вибірки $\Phi[j, \bar{w}]$ на три рівні групи обсягом M . У кожній групі знаходять суми виду $\sum \Phi[j, \bar{w}]$ та $\sum t_j$ – відповідно Φ_1, Φ_2, Φ_3 і t_1, t_2, t_3 . Коефіцієнти лінійної регресії оцінюються співвідношеннями:

$$k = \frac{\Phi_3 - \Phi_1}{t_3 - t_1}, \quad b = \bar{\Phi} - k\bar{t} \quad \text{або} \quad b = \frac{\Phi_2}{M} - k \cdot \frac{t_2}{M}, \quad \text{де} \quad \bar{\Phi} = \frac{\sum \Phi[j, \bar{w}]}{3M} \quad \text{та} \quad \bar{t} = \frac{\sum t_j}{3M};$$

6) визначення частоти сигналів ВСП з лінійного тренду функції (14):

$$f_L(\bar{w}) = \frac{\Delta \tilde{\Phi}_L[\Delta T, \bar{w}]}{2\pi \Delta T}, \quad (16)$$

де $\Delta \tilde{\Phi}_L[\Delta T, \bar{w}]$ – накопичена за час $\Delta T = t_2 - t_1$ фаза сигналу ВСП, отримана за функцією лінійної регресії;

7) застосування експоненціальної апроксимації до функції (15) для підвищення точності визначення коефіцієнта загасання сигналу ВСП. Враховується ділянка АХС, яка відповідає першим періодам інформаційного сигналу ВСП, тобто періодам з найбільшою крутістю АХС;

8) визначення коефіцієнта загасання сигналів ВСП за формулою:

$$\alpha(\bar{w}) = \frac{1}{\Delta T} \ln \frac{\hat{U}(t_1', \bar{w})}{\hat{U}(t_2', \bar{w})}. \quad (17)$$

де $\hat{U}(t_1', \bar{w})$, $\hat{U}(t_2', \bar{w})$ – значення апроксимаційних кривих в моменти часу t_1' і t_2' , $\Delta T = t_2' - t_1'$;

9) аналіз отриманих результатів шляхом порівняння з градуовальною характеристикою залежності вимірюваного параметру ОК від інформативного параметру сигналу ВСП;

10) візуалізація отриманих результатів.

Для оцінювання ефективності запропонованих методів підвищення точності визначення АХС та ФХС проведено моделювання з визначення коефіцієнта загасання та частоти власних коливань сигналу ВСП в умовах впливу завад. На часовому інтервалі аналізу відношення сигнал/шум змінювалось від 0,1% (відповідає 60 дБ) до 10%. На рис. 4 наведено графіки довірчих областей регресії для значень розрахованих коефіцієнтів загасання сигналів ВСП з використанням експоненційного тренду АХС (крива 1 – довірна область регресії для індивідуальних розрахованих значень α' , крива 2 – для середніх значень α') та для коефіцієнта загасання, що розраховані без використання експоненційного тренду АХС (крива 3 – довірна область регресії для індивідуальних значень коефіцієнта загасання сигналу, крива 4 – для середніх значень). На рис. 5 наведено графіки довірчих областей регресії для значень розрахованих частот власних коливань сигналу ВСП з використанням лінійного тренду ФХС (крива 1 – границі довірчої області регресії для індивідуальних значень F , крива 2 – для середніх значень F) та для частот власних коливань ВСП, що розраховані без використання лінійного тренду ФХС (крива 3 – границі довірчої області регресії для індивідуальних значень F' , крива 4 – для середніх значень F').

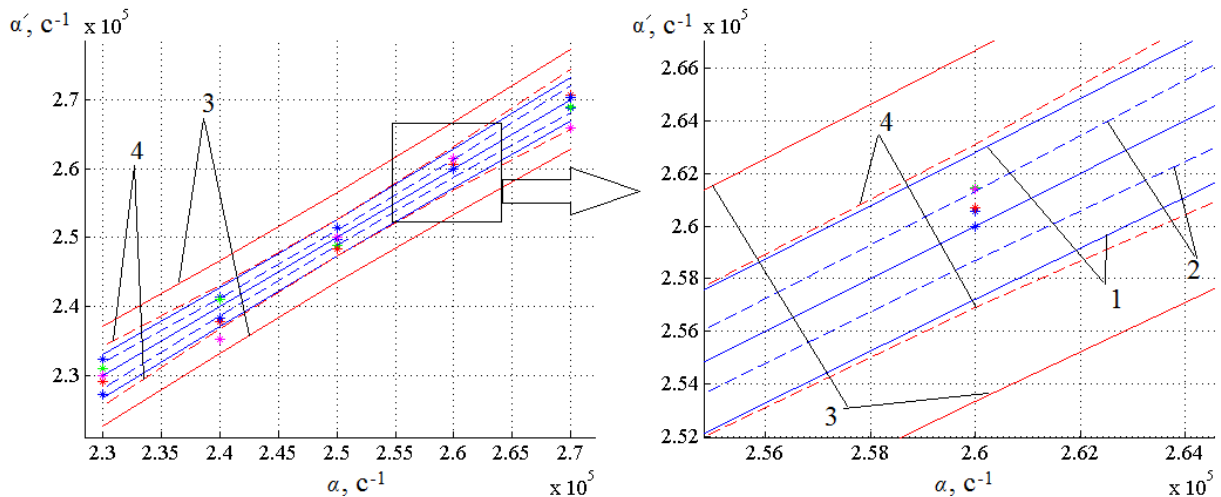


Рис. 4. Графіки довірчих областей регресії для значень α'

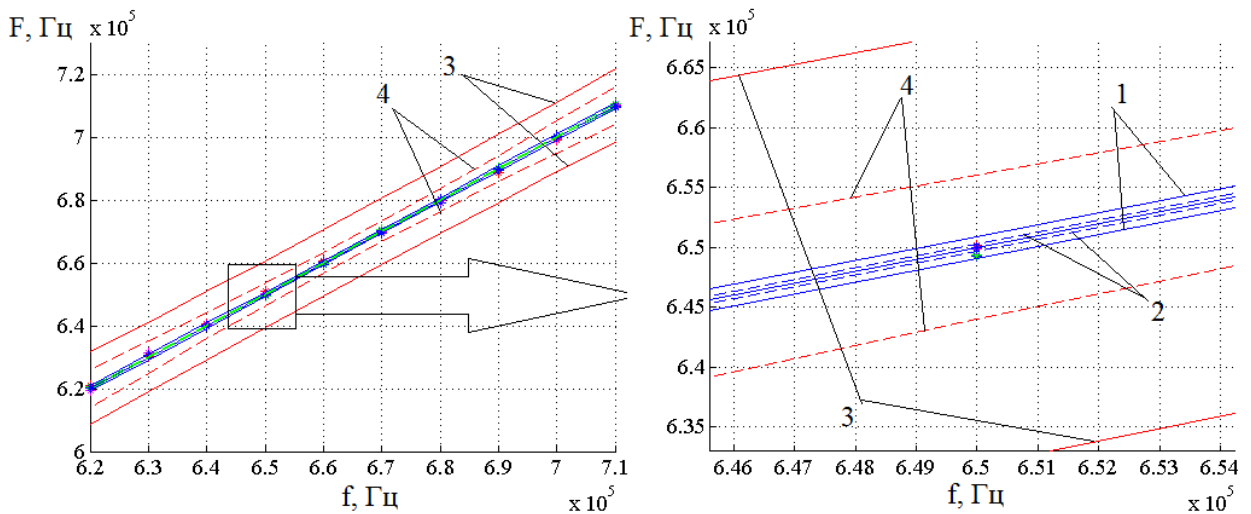


Рис. 5. Графіки довірчих областей регресії для значень F

За результатами проведеного моделювання максимальні відносні похибки визначення коефіцієнта загасання сигналу ВСП за АХС та її експоненційним трендом складає 9% та 3%, відповідно, а визначення частоти власних коливань сигналу ВСП за ФХС та її лінійним трендом – 0.5% та 0.06%, відповідно. Використання трендів АХС та ФХС підвищує точність визначення коефіцієнта загасання сигналу ВСП за запропонованою методикою в ~ 3 рази, частоти власних коливань сигналу – в ~ 8 разів.

Розроблена методика дозволяє проводити аналіз інформативних параметрів сигналів ВСП в часовій області та забезпечує зменшення похибки оцінювання параметрів та характеристики ОК за рахунок методів статистичного аналізу експериментальних даних. Методика реалізована в розробленій інформаційно-діагностичній системі імпульсного ВСНК і перевірена в ряді експериментальних досліджень зразків з циліндричною симетрією та пластинах з діелектричним покриттям.

У дисертаційній роботі проаналізовано похибки визначення частоти власних коливань та коефіцієнта загасання сигналу ВСП, що дозволило визначити оптимальний час для аналізу цього сигналу, що суттєво впливає на результати контролю в умовах впливу завад і шумів. Отримано формули сумарних стандартних невизначеностей оцінки визначення частоти власних коливань сигналу та його коефіцієнта загасання:

$$u_f = \frac{u}{2\pi S_1(\gamma)} \cdot \frac{1}{\Delta T} \cdot \sqrt{1 + e^{2\alpha(\gamma)\Delta T}}, \quad (12)$$

$$u_\alpha = \frac{u}{\Delta T S_1(\gamma)} \sqrt{1 + e^{2\alpha(\gamma)\Delta T}}, \quad (13)$$

де u – невизначеність оцінки значень сигналу, $S_1(\gamma)$ – обвідна сигналу, γ – рівень сигнал/шум, ΔT – інтервал аналізу. Визначено умову отримання мінімальної похибки визначення коефіцієнта загасання сигналу та частоти власних коливань сигналу ВСП, за якими відбувається оцінювання параметрів та характеристик ОК: $\Delta T = 1.1089 / \alpha$. Обґрунтовано шляхи отримання мінімальної похибки визначення інформативних параметрів сигналів ВСП та показано, що неоптимальність вибору ΔT призводить до збільшення відносної похибки в 2 рази.

У **четвертому розділі** наведено результати модельних досліджень процесів формування сигналів ВСП та результати експериментальних досліджень роботи різних типів ВСП в режимі імпульсного збудження. Експериментально досліджено вплив різних параметрів та характеристик ОК на інформативні параметри сигналів перетворювача.

На рис. 6 та 7 представлено отримані залежності параметрів сигналів ВСП за результатами контролю параметрів та характеристик об'єктів циліндричної форми з електропровідних немагнітних матеріалів, проведеним з використанням розробленої інформаційно-діагностичної системи ІВСКН.

В якості ОК використано дві серії циліндричних зразків з алюмінію і бронзи (з питомою електропровідністю відповідно $\gamma_{ал} = 4,87 \cdot 10^7$ См/м,

$\gamma_{\text{бр}} = 2,75 \cdot 10^7$ См/м), з різними діаметрами в діапазоні $34 \div 35$ мм. Дослідження проведені з використанням ВСП прохідного трансформаторного типу в умовах імпульсного збудження.

На рис. 6 наведено отримані залежності власної частоти сигналу ВСП від діаметра алюмінієвих (крива 1) і бронзових (крива 2) зразків та їх лінійні тренди (криві 3 і 4). Встановлено, що зміна діаметра зразків призводить до зміни частоти сигналу ВСП, яка має наближений до лінійного характер функціональної залежності $f(d)$. Лінійний тренд залежності від діаметра простежується і для коефіцієнта загасання сигналу (рис. 7, крива 1 для серії алюмінієвих зразків, крива 2 - для бронзових).

За графіками на рис. 7 встановлено, що використання коефіцієнта загасання в якості інформативного параметру можна застосовувати для розбраковки заготовок за електропровідністю за зміни їх діаметру в певних межах та оцінювання значень діаметру за умови попереднього калібрування системи ВСНК з імпульсним збудженням.

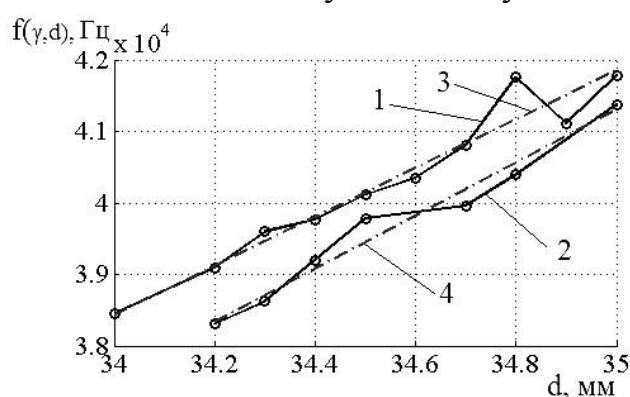


Рис. 6. Залежності власної частоти сигналу ВСП від діаметра ОК

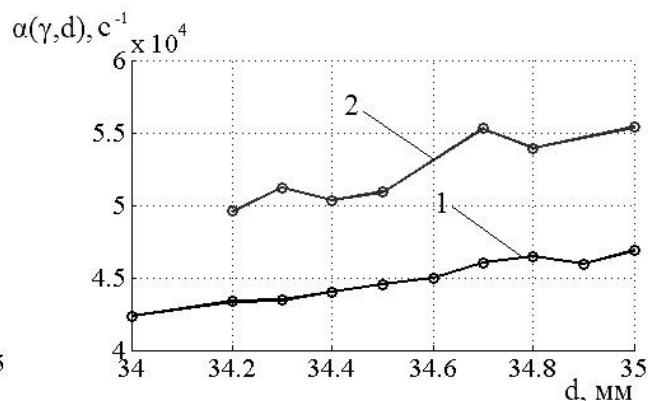


Рис. 7. Залежності коефіцієнтів загасання сигналу ВСП від діаметра ОК

Похибка визначення діаметра даним способом рівна 0,3%, проте без використання лінійного тренду вона може сягати більш ніж 1%.

Результати експериментального дослідження інформаційно-діагностичної системи ІВСНК на пластинах з алюмінію ($\gamma_{\text{ал}} = 4,87 \cdot 10^7$ См/м), бронзи ($\gamma_{\text{бр}} = 2,75 \cdot 10^7$ См/м) та сталі ($\gamma_{\text{ст}} = 1,45 \cdot 10^6$ См/м) наведено на рис. 8 та 9. В дослідженні використано накладний трансформаторний ВСП. На рис. 8 наведено графіки отриманих залежностей $\alpha(h)$, які вказують на збільшення значення коефіцієнта загасання сигналу ВСП за зменшення h . З порівняльного аналізу кривих на рис. 8 зроблено висновок про те, що функціональна залежність $\alpha(h)$ на будь-якій електропровідній основі (магнітній чи немагнітній) має експоненціальний характер.

Встановлено, що характеристики матеріалу основи заготовок впливають на значення крутості одержаних кривих. Незначне відхилення результату від експоненціальної залежності може бути наслідком наявних прихованих дефектів в контрольованому зразку, локальної зміни характеристик заготовок або похибок вимірювання товщини покриття чи коефіцієнта загасання сигналу.

Результати визначення частоти сигналів ВСП як функції товщини h діелектричного покриття приведені на рис. 9. Залежність $f(h)$ дає однозначний результат тільки для немагнітних матеріалів (див. криві для бронзи та алюмінію). В цьому випадку чутливість до товщини покриття збільшується зі зменшенням її величини. З графіків видно, що робити висновки про товщину покриття за таким параметром інформативного сигналу як частота складно. Однак спостерігається істотний вплив магнітної проникності матеріалів заготовок на значення власної частоти сигналу ВСП, при чому цей вплив посилюється зі зменшенням h .

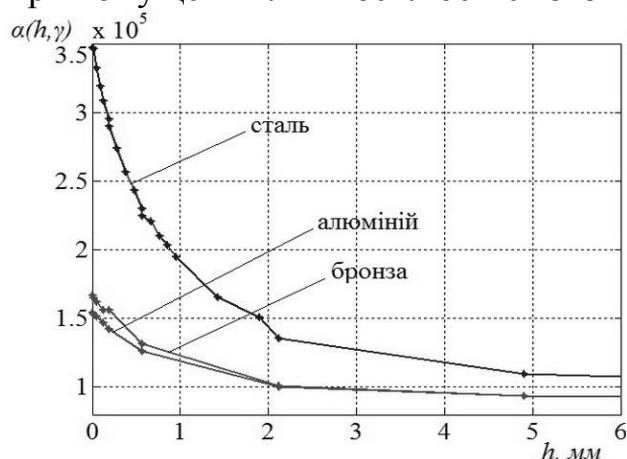


Рис. 8. Залежності коефіцієнтів загасання сигналів ВСП від товщини покриття для різних матеріалів ОК

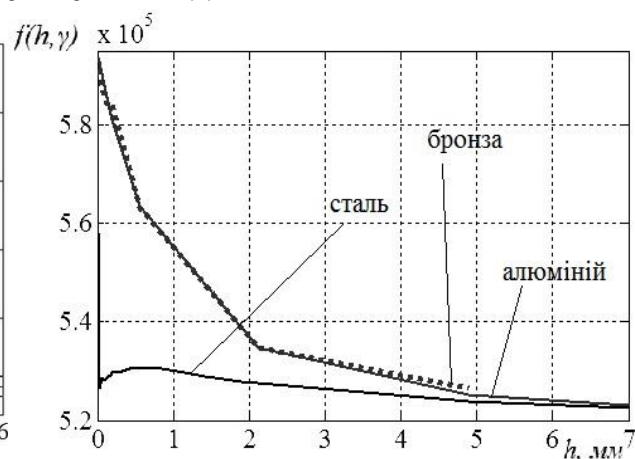


Рис. 9. Залежності частоти сигналів ВСП від товщини покриття для різних матеріалів ОК

Для дослідження інформаційно-діагностичної системи ІВСНК з мультидиференціальним ВСП в якості ОК використано зразок з алюмінієвого сплаву АД31Е5 з моделями тріщин розкриттям 1 мм та глибиною $\delta = 0.1 \div 3.0$ мм. Фотографію експериментального зразка системи наведено на рис. 10.

Результати визначення залежності $f(\delta)$ приведено на рис. 11. З аналізу графіку видно, що характер залежності частоти сигналів ВСП від глибини тріщини δ наближається до експоненціального. Ділянка кривої, що відповідає невеликим значенням глибин тріщин має незначні відхилення від лінії тренду, що відповідає відносній похибці в 0,2% ($\pm 0,4$ мкм).

Залежність максимального значення амплітуди сигналу мультидиференціального ВСП від глибини тріщини наведено на рис. 12. Дана залежність задовільно інтерполюється наведеним на рисунку поліномом 3-го ступеня – похибки інтерполяції не перевищують 0,85 мВ (при відносній

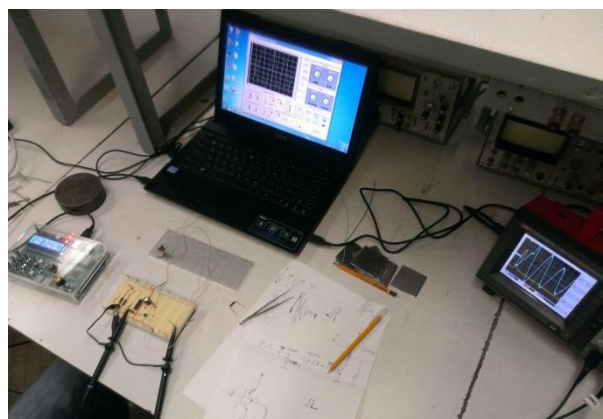


Рис. 10. Експериментальний зразок ІДС імпульсного ВСНК

похибці 1,5%). Отримані в такий спосіб залежності можуть бути використані для кількісного оцінювання глибини тріщин.

З метою порівняння імпульсного та неперервного режимів збудження ВСП, на вищезазначеному зразку проведено дослідження зміни амплітуди сигналу ВСП з неперервним збудженням. Порівняльний графік відносної чутливості по амплітуді сигналів ВСП в двох режимах роботи приведено на рис. 13.

Встановлено, що максимальна різниця чутливості не перевищує 5%, що підтверджує можливість використання одних і тих перетворювачів в обох випадках.

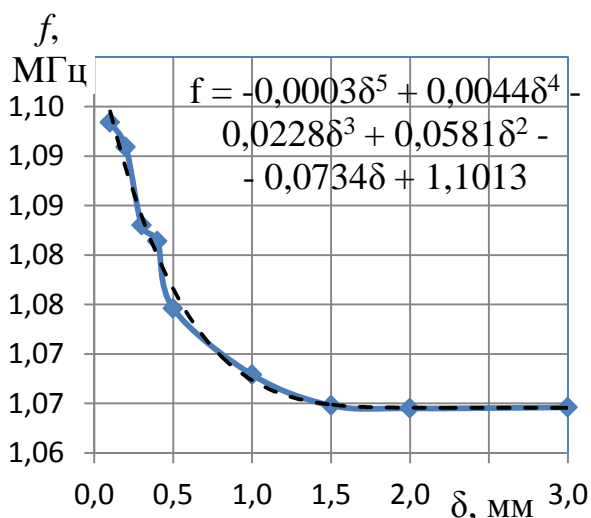


Рис. 11. Залежність частоти сигналів ВСП від глибини тріщини

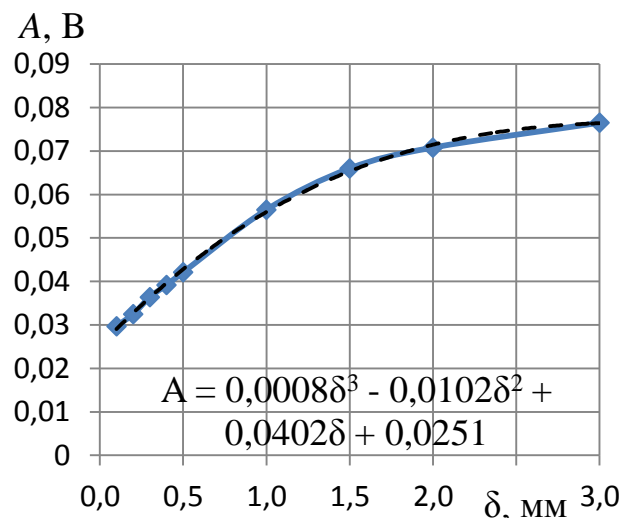


Рис. 12. Залежність максимального значення амплітуди сигналів ВСП від глибини тріщини

Крім того, було проведено дослідження роботи мультидиференційного ВСП з імпульсним збудженням в динамічному режимі роботи та аналізом сигналів такого ВСП в режимі сканування ОК (рис. 14а). Сигнали ВСП отримувались з кроком 1 мм. В сигналах ВСП виділялись максимальні значення амплітуди. Їх розподіл у прив'язці до координат на поверхні ОК представлено на рис. 14б. З аналізу цього розподілу видно, що наявність тріщини в ОК призводить до істотного збільшення амплітуди напруги ближче до країв тріщини і зменшення в центральній частині тріщини.

Додатково були проведені експериментальні дослідження контролю стандартних зразків ВСО-1 та ВСО-2 мультидиференціальним ВСП з імпульсним та гармонічним збудженням. Зразки мали вигляд пластин товщиною 5 мм, довжиною 100 мм, шириною 30 мм, ВСО-1 зі сталі марки

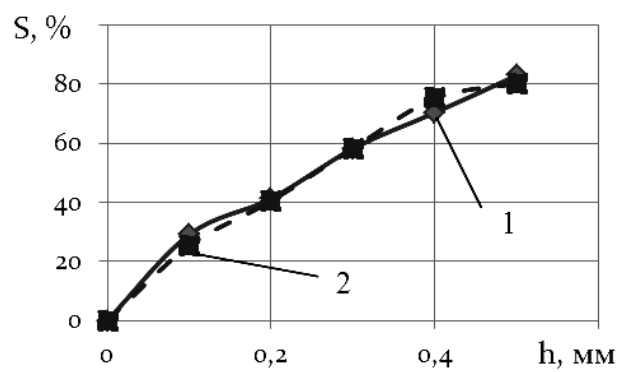


Рис. 13. Порівняльний графік відносної чутливості по амплітуді сигналів ВСП з неперервним (1) та імпульсним (2) збудженням

Ст.20, а ВСО-2 – з алюмінієвого сплаву Д16. На одній з поверхонь обох зразків з рівним інтервалом методом фрезерування нанесено три штучні дефекти, що імітують поверхневі тріщини, шириною 0.2 мм та глибиною $\delta = \{0.2, 0.5, 1.0\}$ мм. Шорсткість робочої поверхні не перевищувала 1,6 мкм.

Порядок обробки та аналізу характеристик інформаційних сигналів ВСП полягав у: дослідженні роботи мультидиференціального ВСП в умовах імпульсного збудження; визначенні частоти власних коливань інформаційного сигналу ВСП; дослідженні роботи мультидиференціального ВСП в умовах неперервного збудження на частоті власних коливань; аналізі інформативних параметрів отриманих сигналів ВСП – залежності амплітуди $A(\delta)$ сигналів, коефіцієнта загасання $\alpha(\delta)$ і частоти власних коливань $f(\delta)$ від δ ; оцінюванні чутливості інформативних параметрів сигналів ВСП до зміни δ в ОК. Під чутливістю до інформативних параметрів розуміються $S_A = \partial A / \partial \delta$, $S_\alpha = \partial \alpha / \partial \delta$, $S_f = \partial f / \partial \delta$.

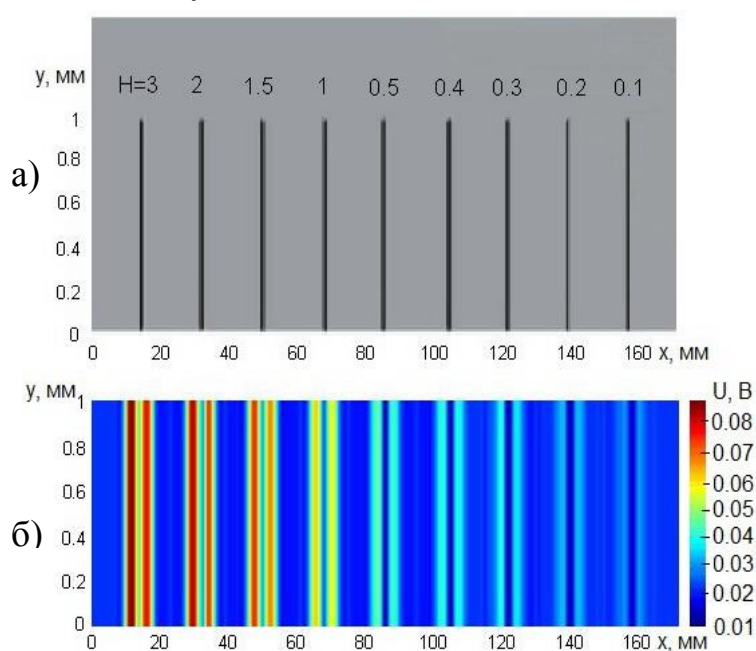


Рис. 14. ОК (а) та графік розподілу на його поверхні (за кольором) пікових значень напруги ВСП (б)

ВСО-1 на частотах 667 кГц та 434 кГц, відповідно; криві 3 та 4 – залежності $A(\delta)$ для зразка ВСО-2 на частотах 787 кГц та 507 кГц, відповідно. З аналізу цих графіків видно, що збільшення глибини тріщини в ОК призводить до збільшення значень амплітуди напруги ВСП. Чутливість амплітуди сигналу перетворювача до глибини тріщини в ОК приведена в таблиці 1.

Встановлено, що залежність зміни амплітуди сигналу ВСП наближена до лінійної, проте чутливість за неперервного збудження ВСП є більшою.

На рис. 17 приведені результати аналізу коефіцієнта загасання сигналу ВСП за імпульсного збудження для двох зразків на різних частотах: рис. 17а та рис. 17в для ВСО-1, рис. 17б та рис. 17г для ВСО-2. З графіків випливає, що збільшення частоти власних коливань сигналу ВСП дає змогу підвищити

Така методика дозволяє виконати коректний співставний аналіз чутливостей мультидиференціального ВСП в різних режимах збудження до такого параметру ОК як глибина тріщини.

Експериментальні значення $A(\delta)$ для сигналу мультидиференціального ВСП в умовах імпульсного та неперервного збудження для вказаних вище зразків представлені на рис. 15 та рис. 16. Криві 1 та 2 на рис. 15 та рис. 16 відповідають залежності $A(\delta)$ для зразка

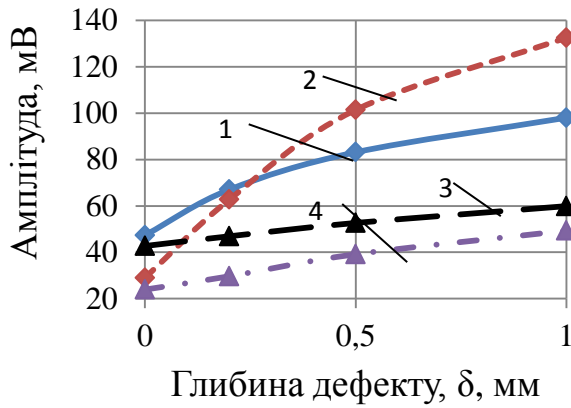


Рис. 15. Залежність $A(\delta)$ за імпульсного збудження ВСП

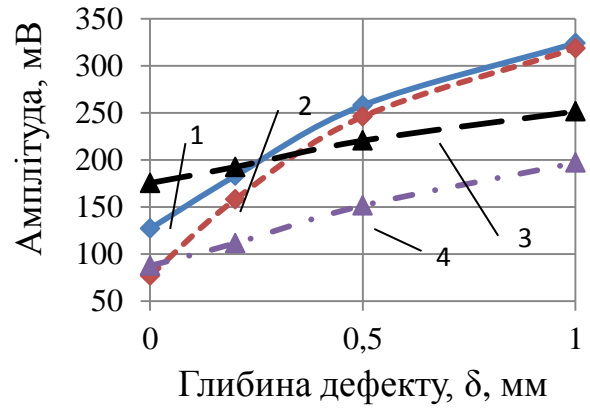


Рис. 16. Залежність $A(\delta)$ за неперервного збудження ВСП

чутливість до глибини тріщини, а саме – для зразка ВСО-1 чутливість $S_a(f=667\text{кГц}) \approx 34 \cdot 10^3 \text{ Гц/мм}$ та $S_a(f=434\text{кГц}) \approx 7 \cdot 10^3 \text{ Гц/мм}$. Крім того співставний аналіз цих графіків показує, що для ОК з різних матеріалів спостерігається різна залежність коефіцієнта загасання від δ , що може бути використано для кількісного оцінювання фізико-механічних параметрів матеріалу ОК.

Таблиця 4.1. Чутливість до глибини тріщин, мВ/мм

Збудження	Зразок 1		Зразок 2	
	667 кГц	434 кГц	787 кГц	507 кГц
імпульсне	29,8	62,3	14,5	20,4
гармонічне	132	145	62	91

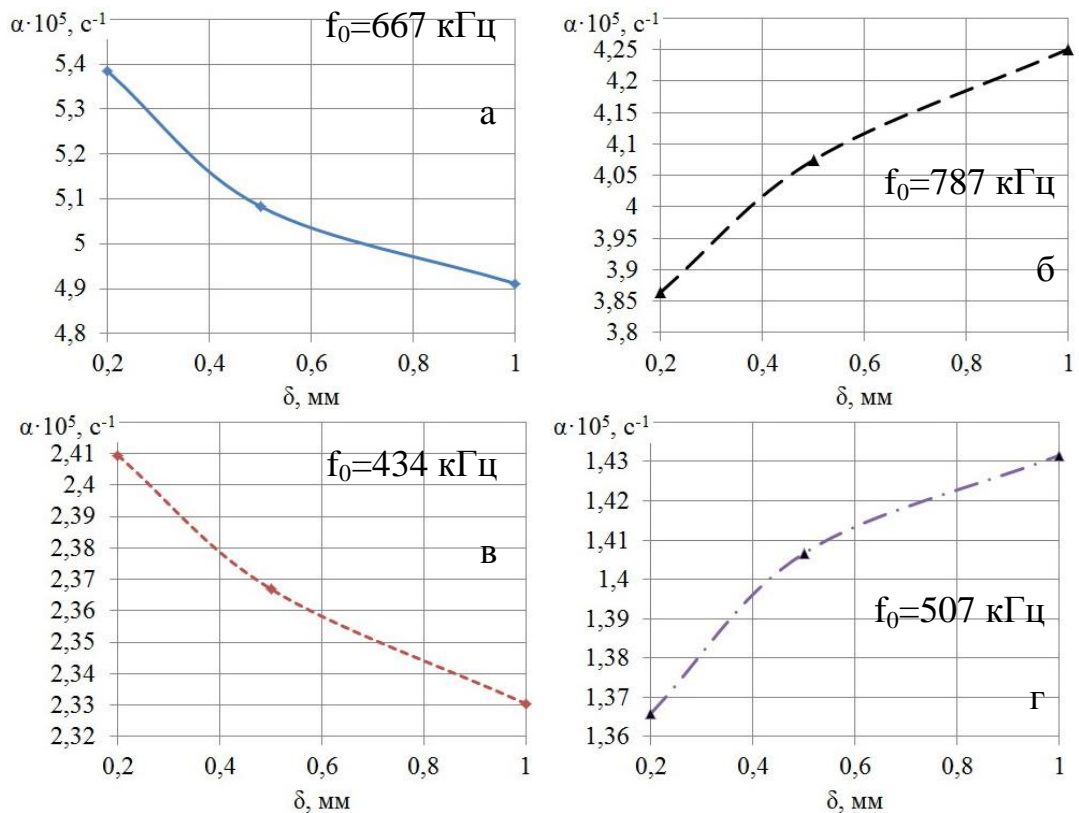


Рис. 17. Залежність $\alpha(\delta)$ за імпульсного збудження ВСП

Результати аналізу зміни частоти власних коливань сигналу ВСП з імпульсним збудженням як функції від глибини тріщини в ОК приведені на рис. 18. Зразку ВСО-1 відповідають графіки залежності $f(\delta)$ у випадку, коли початкова частота власних коливань сигналу ВСП дорівнює 667 кГц та 434 кГц на рис. 18а та рис. 18в, відповідно. Зразку ВСО-2 – рис. 18б для частоти 787 кГц та рис. 18г – 507кГц. З аналізу цих графіків видно, що залежність $f(\delta)$ наближена до лінійної, а f має тенденцію до зменшення в результаті збільшення глибини тріщини δ . В цьому випадку чутливість до глибини тріщини δ покращується зі збільшенням частоти сигналу ВСП: для зразка ВСО-2 чутливість $S_f(f=787\text{кГц})\approx 83,6$ Гц/мм та $S_f(f=507\text{кГц})\approx 28,8$ Гц/мм.

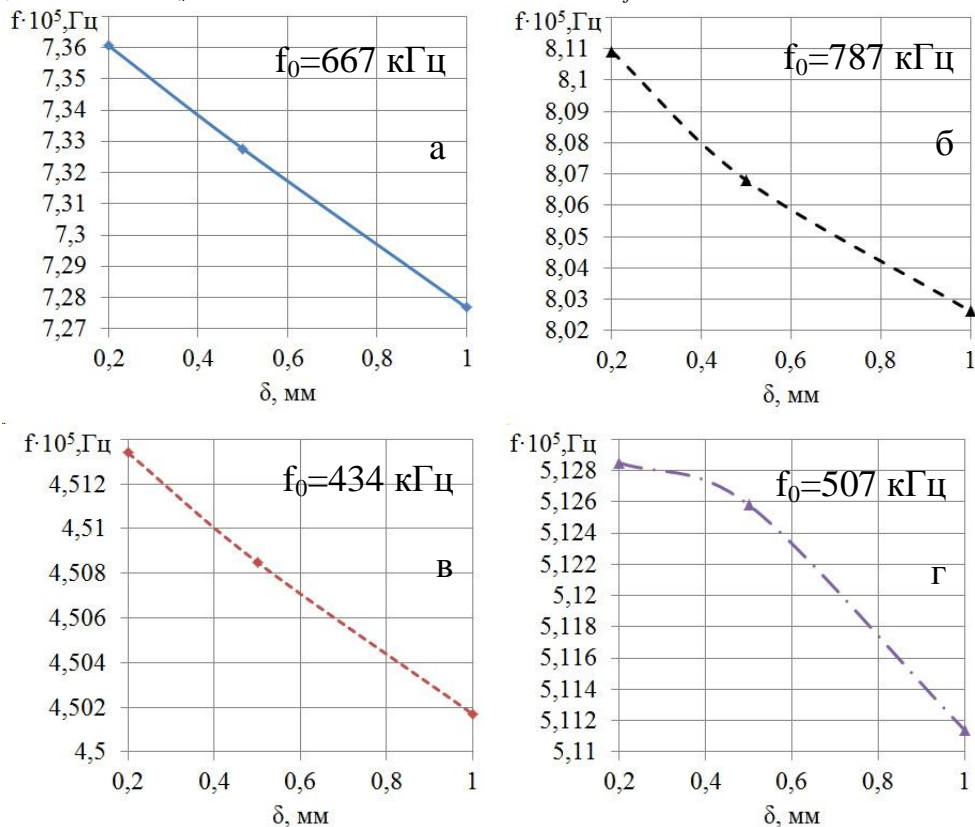


Рис. 18. Залежність $f(\delta)$ за імпульсного збудження ВСП

Порівняння імпульсного та гармонічного режимів збудження мультидиференціального ВСП шляхом оцінювання зміни амплітудних значень сигналів ВСП від глибини тріщини в ОК показало, що чутливість за неперервного збудження ВСП є дещо вищою, проте використання залежності амплітуди сигналів ВСП з імпульсним збудженням від глибини тріщини в ОК дозволяє в деяких випадках розширити функціональні можливості дефектоскопії. Крім того, спостерігається збільшення чутливості таких інформативних параметрів ВСП, як з коефіцієнт загасання та частота власних коливань сигналу перетворювача до глибини тріщини ОК із збільшенням початкової частоти сигналу ВСП.

У додатках прикладені акти впровадження результатів дисертаційної роботи в навчальний процес кафедри приладів і систем неруйнівного контролю КПП ім. Ігоря Сікорського під час викладання дисциплін

«Електромагнітні методи неруйнівного контролю» та «Технічні та медичні системи неруйнівного контролю» та у виробничу діяльність ДП «Луцький ремонтний завод «Мотор» (м. Луцьк); лістинг програмного коду для визначення частоти власних коливань та коефіцієнта загасання сигналу через дискримінант кубічного рівняння, виділення обвідної, визначення коефіцієнта загасання та частоти сигналу та оцінювання похибки.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі в результаті проведених теоретичних та експериментальних досліджень вирішено актуальну науково-технічну задачу удосконалення імпульсного методу ВСНК за рахунок використання нових для ВСНК інформативних параметрів сигналів ВСП та розроблення інформаційно-діагностичної системи імпульсного ВСНК. Отримано такі основні результати:

1. Аналіз сучасних методу та засобів ВСНК з імпульсним збудженням показав, що метод має ряд переваг, зокрема проведення аналізу сигналу ВСП в часовій області з оцінкою відповідних інформативних параметрів, можливість зміни потужності сигналу для покращення рівня сигнал/шум та збільшення глибини проникнення. Встановлено, що на сьогодні як інформативні параметри ІВСНК найчастіше використовуються характерні точки сигналів ВСП, які є нестійкими до впливу шумів і завад. Показана можливість удосконалення ІВСНК за рахунок формування сигналів ВСП у формі загасаючих гармонічних коливань і використання їх параметрів, що потребує подальшого розвитку теоретичного базису ІВСНК.

2. Удосконалено фізико-математичну модель системи ВСП-ОК за рахунок врахування додаткових ємності та опору в еквівалентній схемі ВСП, що є необхідним для адекватного представлення процесів формування сигналів ВСП у вигляді загасаючих гармонічних коливань, що дозволило:

- вперше запропонувати та обґрунтувати використання власної частоти і коефіцієнта загасання сигналів ВСП в якості нових інформативних параметрів;
- визначати зв'язок параметрів сигналів ВСП у формі загасаючих гармонічних коливань з параметрами ОК.

3. Розроблено метод визначення та аналізу дискретних амплітудної та фазової характеристик сигналів імпульсного ВСНК, який поєднує дискретне перетворення Гільберта та використання лінійного тренду фазової та експоненційної апроксимації амплітудної характеристик сигналу ВСП, що дозволило підвищити точність оцінювання параметрів і характеристик ОК через підвищення точності визначення інформативних параметрів сигналів ВСП;

4. Проаналізовано похибки визначення коефіцієнта загасання та частоти власних коливань сигналу ВСП за їх амплітудною та фазовою характеристиками, на основі чого запропоновано та обґрунтовано критерій вибору часового інтервалу аналізу сигналів ВСП для мінімізації цих похибок шляхом коригування часового інтервалу аналізу характеристик сигналів ВСП.

5. Проведено моделювання запропонованого методу аналізу сигналів ВСП в умовах імпульсного збудження, за результатами якого:

- розроблено алгоритмічне забезпечення, що реалізує запропонований метод визначення та аналізу дискретних амплітудної та фазової характеристик сигналів ВСНК, їх подальше оцінювання та статистичний аналіз, який дозволяє виявляти модуляції характеристик сигналів ВСП, викликані дефектами ОК під час його сканування;

- підтверджено ефективність використання методів апроксимації характеристик сигналу ВСП, що забезпечило підвищення точності визначення інформативних параметрів сигналів ВСП за їх амплітудною та фазовою характеристиками у 8 та 3 рази, відповідно;

6. Розроблено дослідний зразок інформаційно-діагностичної системи імпульсного ВСНК, на базі якого проведено експериментальне дослідження запропонованого методу імпульсного ІВСНК на серіях зразків (пласкої та циліндричної форми). Експериментальні результати підтвердили теоретичні та підтвердили можливість використання нових параметрів сигналів ВСП – власної частоти та коефіцієнта загасання сигналу. Встановлено функціональні зв'язки запропонованих параметрів сигналів з параметрами і характеристиками ОК в різних задачах ІВСНК: контролю електропровідності матеріалів, діаметру прутків, товщини діелектричного покриття, глибини залягання дефектів, геометричних параметрів ОК. Зокрема, для циліндричних зразків похибка визначення діаметру становить 0,3%, глибини поверхневих тріщин - 0,2%.

7. Основні теоретичні та експериментальні дослідження інформаційно-діагностичної системи імпульсного вихрострумowego контролю впроваджені у виробничий процес ДП «Луцький ремонтний завод «Мотор» (м. Луцьк), а також використані у навчальному процесі кафедри приладів та систем неруйнівного контролю КПП ім. Ігоря Сікорського під час викладання дисциплін «Електромагнітні методи неруйнівного контролю» та «Технічні та медичні системи неруйнівного контролю».

СПИСОК ПРАЦЬ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Лысенко Ю. Ю. Применение преобразования Гильберта для анализа сигналов вихретоковой дефектоскопии / Ю. Ю. Лысенко, Ю. В. Куц. // Ж-л «Научные известия на НТСМ». - Созополь, Болгария, 2011. – №121. – С. 22–24. (Входить до The Web's Largest Open Access Database of NDT, Google Scholar). *Здобувачем проаналізовано використання ПГ в задачах ВСНК.*

2. Лысенко Ю. Ю. Импульсный вихрострумовой контроль об'єктів циліндричної форми / Ю. Ю. Лысенко, Ю. В. Куц // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. – Київ, 2013. – Вип. 45. – С. 69–75 (Входить до WorldCat, РИНЦ, Google Scholar, BASE, OpenAIRE та інших). *Здобувачем досліджена можливість ІВСНК ОК циліндричної форми.*

3. Лысенко Ю. Ю. Экспериментальное исследование вихретоковой системы контроля крупногабаритных изделий / Ю. Ю. Лысенко, Ю. В. Куц, В. Ф. Петрик, А. Л. Дугин // Ж-л «Научные известия на НТСМ». - Созополь, Болгария, 2013. – №139. – С. 72–74. (Входить до The Web's Largest Open

Access Database of NDT, Google Scholar). *Здобувачем досліджена система ВСНК об'єктів великого розміру та об'єктів, доступ до яких обмежено.*

4. Лысенко Ю. Ю. Исследование импульсной вихретоковой системы контроля диэлектрических покрытий / Ю. Ю. Лысенко, Ю. В. Куц, В. Ф. Петрик, А. Л. Дугин // Ж-л «Научные известия на НТСМ». - Созополь, Болгария, 2014. – №150. – С. 28–30. (Входить до The Web's Largest Open Access Database of NDT, Google Scholar). *Здобувачем розроблена та досліджена система ІВСНК для оцінки товщини діелектричних покриттів.*

5. Lysenko I. Pulsed Eddy Current Non-Destructive Testing of the Coating Thickness [Electronic resource] / I. Lysenko, Y. Kuts, O. Dugin, A. Protasov // The e-Journal of Nondestructive Testing. – 2014. – № 12, Vol. 19. – Access mode: http://www.ndt.net/events/ECNDT2014/app/content/Paper/187_Lysenko_Rev1.pdf (last access: 05.07.17). (Входить до The Web's Largest Open Access Database of NDT, Google Scholar). *Здобувачем досліджено можливості оцінювання товщини покриття ІВСНК, розглянуто методику аналізу сигналів ВСП.*

6. Лисенко Ю. Ю. Імпульсний вихрострумний контроль товщини діелектричного покриття на магнітній основі / Лисенко Ю. Ю., Куц Ю. В. // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. – Київ, 2015. – Вип. 49. – С. 68–74 (Входить до WorldCat, РИНЦ, Google Scholar, BASE, OpenAIRE та інших). *Здобувачем проаналізовано використання методики аналізу інформативних параметрів сигналів ВСП, отриманих за допомогою ПП для оцінювання товщини діелектричного покриття на магнітній основі.*

7. Лисенко Ю. Ю. Аналіз вихрострумного перетворювача з імпульсним збудженням під час контролю циліндричних об'єктів / Ю. В. Куц, О. Ф. Закревський, Ю. Ю. Лисенко, О. Л. Дугин // Фізико-хімічна механіка матеріалів: міжнар. наук.-техн. журн. / Нац. акад. наук України, Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка – Львів, 2016. – Том 52, №3. – С. 120–126 (Входить до Google Scholar). *Здобувачем досліджена робота ВСП в імпульсному режимі збудження на прикладі задачі контролю об'єктів циліндричної форми.*

8. Lysenko I. Improvement of the Eddy Current Method of Non-Destructive Testing with Pulsed Mode Excitation [Electronic resource] / I. Lysenko, Y. Kuts, O. Dugin, A. Protasov // The e-Journal of Nondestructive Testing. – 2016. – № 7, Vol. 21. – Access mode: <http://www.ndt.net/article/wcndt2016/papers/p91.pdf> (last access: 05.07.17). (Входить до The Web's Largest Open Access Database of NDT, Google Scholar). *Здобувачем розроблено методику аналізу сигналу ВСП та визначення АХС та ФХС на основі ДПП, досліджені можливості статистичного аналізу цих характеристик та використання їх для оцінювання параметрів ОК.*

9. Лысенко Ю. Ю. Применение методов статистической фазометрии в неразрушающем контроле / Ю. Ю. Лысенко, Ю. В. Куц, А. В. Дергунов // Ж-л «Научные известия на НТСМ». - Созополь, Болгария, 2016. – №187. – С. 38–42. (Входить до The Web's Largest Open Access Database of NDT, Google Scholar). *Здобувачем проведено модельні та експериментальні дослідження із застосуванням дискретної ФХС сигналів.*

10. Лисенко Ю. Ю. Застосування накладних перетворювачів в імпульсному вихрострумовому контролі / Лисенко Ю. Ю., Куц Ю. В., Протасов А.Г., Дугін О.Л. // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. – Київ, 2016. – Вип. 51. – С. 58–63 (Входить до WorldCat, РИНЦ, Google Scholar, BASE, OpenAIRE та інших). *Здобувачем досліджено процес формування реакції системи ВСП– ОК на прикладі моделі ВСП з імпульсним збудженням; розроблено методику аналізу сигналу ВСП та визначення АХС і ФХС.*

11. Analysis of an Eddy-Current Transducer with Impulsive Excitation in the Nondestructive Testing of Cylindrical Objects / Y. Kuts, Y. Lysenko, A. Dugin, A. Zakrevskii // Materials Science – 2016. – vol. 52, no. 3. - pp 431–437. (Входить до Scopus). *Здобувачем досліджено підвищення точності визначення частоти власних коливань сигналу ВСП з імпульсним збудженням з використанням лінійної регресії фазової характеристики цього сигналу.*

12. Пат. 79648 Україна, МПК G01N 27/90. Спосіб визначення характеристик сигналу для вихрострумової дефектоскопії / Ю.В.Куц, В.К.Цапенко, А.Г. Протасов, Ю.Ю. Лисенко; власники Ю.В.Куц, В.К.Цапенко, А.Г. Протасов, Ю.Ю. Лисенко. – № u201213068 ; заявл. 16.11.2012 ; опублік. 25.04.2013, Бюл. № 8. – 5 с. *Здобувачем проведено теоретичне обґрунтування способу визначення характеристик сигналу ВСП.*

13. Пат. 82594 Україна, МПК G01N 27/00. Спосіб імпульсного вихрострумового контролю об'єктів циліндричної форми / Ю.В.Куц, Ю.Ю. Лисенко; власники Ю.В.Куц, Ю.Ю. Лисенко. – № u201303403; заявл. 20.03.2013 ; опублік. 12.08.2013, Бюл. № 15. – 6 с. *Здобувачем теоретично обґрунтовано спосіб імпульсного ВСНК об'єктів циліндричної форми.*

14. Лисенко Ю. Ю. Моделювання задач вихрострумового неруйнівного контролю в середовищі Matlab / Ю.В. Куц, Ю.Ю. Лисенко // IX міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування 2010: стан і перспективи». Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. – Київ, 2010. – С. 237-238. *Здобувачем аналітично досліджено методику проведення комп'ютерних експериментів з сигналами ВСНК на прикладі задачі контролю параметрів деталей циліндричної форми.*

15. Лисенко Ю. Ю. Використання перетворення Гільберта в задачах обробки сигналів вихрострумового неруйнівного контролю / Лисенко Ю. Ю. // XV Міжнар. молодіжн. форум ["Радіоелектроніка та молодь в ХХІ ст."]. Збірник тез доповідей / ХНУРЕ. – Харків: ХНУРЕ, 2011. – Т. 2, С. 224-225. *Здобувачем аналітично досліджено метод визначення характеристик сигналів ВСНК для прецизійного визначення АХС та ФХС через ДПГ за умови одночасної модуляції амплітуди та фази інформаційного сигналу.*

16. Лисенко Ю. Ю. Аналіз методичних похибок визначення інформативних характеристик сигналів вихрострумової дефектоскопії / Лисенко Ю. Ю., Куц Ю.В. // X міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування 2011: стан і перспективи». Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. – Київ, 2011. – С. 194-195. *Здобувачем*

проаналізовано методичну похибку визначення інформативних характеристик сигналів вихрострумової дефектоскопії.

17. Лисенко Ю. Ю. Використання імпульсного режиму збудження вихрострумового перетворювача при вимірюванні фізико-механічних параметрів циліндричних об'єктів / Лисенко Ю. Ю., Куц Ю.В. // XI міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування 2012: стан і перспективи». Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. – Київ, 2012. – С. 203. *Здобувачем проведено дослідження методу вимірювання діаметру неферомагнітних ОК циліндричної форми.*

18. Лисенко Ю. Ю. Дослідження імпульсного режиму збудження вихрострумових перетворювачів / Ю. Ю. Лисенко, Ю. В. Куц // зб. тез доповідей 7-ї Нац. наук.-техн. конф. ["НК та технічна діагностика - UkrNDT-2012"] / УТ НКТД – Київ: УТ НКТД, 2012. – С. 162-163. *Здобувачем досліджено імпульсний режим збудження ВСП в задачі контролю циліндричних ОК.*

19. Лисенко Ю. Ю. Експериментальне дослідження імпульсного вихрострумового контролю циліндричних об'єктів / Лисенко Ю. Ю., Дугін О.Л. // XVII Міжнар. молодіжн. форум ["Радіоелектроніка та молодь в ХХІ ст."]. Збірник тез доповідей / ХНУРЕ. – Харків: ХНУРЕ, 2013. – Т. 2, С. 180-181. *Здобувачем проаналізовано залежності інформативних параметрів сигналу ВСП від діаметру ОК та електропровідності його матеріалу.*

20. Лисенко Ю. Ю. Розвиток імпульсного вихрострумового неруйнівного контролю / Лисенко Ю. Ю., Куц Ю.В. // XII міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування 2013: стан і перспективи». Зб. тез доп. / НТУУ «КПІ», ПБФ. – Київ, 2013. – С. 184-185. *Здобувачем запропоновано спосіб двопараметрового контролю об'єктів циліндричної форми – оцінювання діаметру та електропровідності матеріалу.*

21. Лисенко Ю. Ю. Імпульсний вихрострумний неруйнівний контроль / Лисенко Ю. Ю., Водзик Д.П. // VI науково-практична конференція «Погляд у майбутнє приладобудування 2013». Зб. тез доповідей / НТУУ «КПІ», ПБФ. – Київ, 2013. – С. 163. *Здобувачем розглянуто переваги імпульсного ВСНК.*

22. Лисенко Ю. Ю. Оцінка товщини діелектричного покриття на провідній основі імпульсним вихрострумним методом / Лисенко Ю. Ю., Куц Ю.В., Дугін О.Л. // XIII між нар. наук.-техн. конф. «Приладобудування 2014: стан і перспективи». Зб. тез доп. / НТУУ «КПІ», ПБФ. – Київ, 2014. – С. 184-185. *Здобувачем досліджена можливість використання імпульсного режиму ВСП для оцінювання товщини діелектричного покриття на сталій пластині.*

23. Лисенко Ю. Ю. Візуалізація результатів вихрострумного контролю за допомогою діаграм Пуанкаре / Лисенко Ю. Ю. // XIV між нар. наук.-техн. конфер. «Приладобудування 2015: стан і перспективи». Зб. тез доп. / НТУУ «КПІ», ПБФ. – Київ, 2015. – С. 195-196. *Здобувачем запропоновано експрес аналіз динамічної системи ВСП– ОК за допомогою діаграми Пуанкаре.*

24. Лысенко Ю. Ю. Исследование импульсного вихретокового контроля цилиндрических объектов / Лысенко Ю. Ю., Дугин А.Л. Закревский А.Ф. // XIV Междунар. молодежн. форума ["Радиоэлектроника и молодежь в

XXI веке"]]. Сборник трудов конфер. / ХНУРЭ. – Харьков: ХНУРЭ, 2015. – Т. 2, С. 205-206. *Здобувачем проведено математичний аналіз роботи ВСП в перехідному режимі роботи, що розширює його практичне застосування за рахунок підвищення інформативності вихідного сигналу.*

25. Лысенко Ю. Ю. Методика обработки сигналов в системах импульсной вихретоковой дефектоскопии / Лысенко Ю. Ю., Куц Ю.В., Дугин А.Л. // 8-я Международная научно-техническая конференция «Приборостроение-2015» (25-27 ноября 2015р. г. Минск, Республика Беларусь). Материалы конференции / БНТУ. – Минск, 2015. – Т. 1, С. 244-246. *Здобувачем запропоновано методику аналізу сигналів імпульсного ВСНК на прикладі контролю товщини діелектричного покриття заготовок із різних матеріалів.*

26. Лысенко Ю. Ю. Использование амплитудной и фазовой характеристик сигнала в приборах вихретокового контроля / Лысенко Ю. Ю., Авраменко Б.В. // 8-я Междунар. научн.-техн. конф. молод. уч. и студ. «Новые направления развития приборостроения -2016» (20-22.04.2016г. Минск, Беларусь). Материалы конференции, Т. 1 / БНТУ. – Минск, 2016. – Т. 1, С. 6. *Здобувачем досліджено використання АХС та ФХС ВСП.*

27. Лысенко Ю. Ю. Дослідження мультидиференційного вихрострумowego перетворювача в імпульсному режимі збудження / Лысенко Ю. Ю., Куц Ю.В., Дугин О.Л. // XV міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування 2016: стан і перспективи». Зб. тез доп. / НТУУ «КПІ», ПБФ. – Київ, 2016. – С. 172-173. *Здобувачем проаналізовано вплив зміни глибини тріщини в алюмінієвому ОК на параметри сигналу мультидиференціального ВСП.*

28. Лысенко Ю. Ю. Застосування імпульсної вихрострумовой дефектоскопії для моніторингу технічного стану великогабаритних об'єктів / Лысенко Ю. Ю., Куц Ю. В., Дугин О.Л. // зб. матеріалів 8-ї Нац. наук.-техн. конф. ["НК та технічна діагностика - UkrNDT-2016"], (Київ, 22-24 листоп. 2016 р.) / УТ НКТД – Київ: УТ НКТД, 2016. – С. 174-178. *Здобувачем запропоновано методику аналізу і відображення інформації для застосування в системах ІВСНК стану великогабаритних ОК.*

29. Лысенко Ю. Ю. Анализ информационных параметров сигналов импульсного вихретокового контроля / Лысенко Ю. Ю., Куц Ю.В., Дугин А.Л. // 9-я Междунар. научно-техн. конф. «Приборостроение - 2016» (23-25.11.2016р. г. Минск, Беларусь). Матер. конф. / БНТУ. – Минск, 2016. – С. 88-90. *Здобувачем запропонована методика аналізу сигналів ВСП з аналізом сигналу в часовій області на основі використання ДПГ.*

30. Лысенко Ю. Ю. Визначення координат дефектів в імпульсному вихрострумowому контролі / Лысенко Ю.Ю., Куц Ю.В., Дугин О.Л., // XVI міжнар. наук.-техн. конф. «Приладобудування 2017: стан і перспективи». Зб. тез доп. / НТУУ «КПІ», ПБФ. – Київ, 2017. – С. 155-156. *Здобувачем надано рекомендації щодо удосконалення методики аналізу сигналів ВСП.*

АНОТАЦІЯ

Лисенко Ю.Ю. Інформаційно – діагностична система імпульсного вихрострумowego неруйнівного контролю виробів машинобудування. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу речовин. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», МОН України, Київ, 2017.

Дисертація присвячена розробці інформаційно – діагностичної системи імпульсного вихрострумowego неруйнівного контролю виробів машинобудування. В роботі проаналізовано процеси в ланцюгах вихрострумowego перетворювача в умовах імпульсного режиму збудження та визначено умови виникнення загасаючих гармонічних коливань, що дозволило в якості інформативних параметрів сигналів вихрострумowego перетворювача запропонувати використання їх власної частоти та коефіцієнта загасання.

В роботі розроблено методикку обробки та аналізу інформативних параметрів сигналів вихрострумowego перетворювача в імпульсному режимі збудження, в основі якої лежить визначення запропонованих інформативних параметрів цих сигналів через їх амплітудну та фазову характеристики за допомогою застосування перетворення Гільберта. Запропоновано використання експоненційної апроксимації для амплітудної характеристики та лінійного тренду для фазової характеристики сигналу вихрострумowego перетворювача для підвищення точності визначення інформативних параметрів цього сигналу.

Проведено аналіз похибок визначення частоти власних коливань та коефіцієнта загасання сигналу вихрострумowego перетворювача, який дозволив визначити умови отримання мінімальної похибки визначення цих інформативних параметрів сигналу та визначити оптимальний час аналізу, що суттєво впливає на результати контролю в умовах впливу завад і шумів.

Ключові слова: імпульсний вихрострумовой неруйнівний контроль, частота власних коливань, коефіцієнта загасання, амплітудна та фазова характеристики сигналу.

АННОТАЦИЯ

Лысенко Ю.Ю. Информационно-диагностическая система импульсного вихретокового неразрушающего контроля изделий машиностроения. - На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 - приборы и методы контроля и определения состава веществ. Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», МОН Украины, Киев, 2017.

Диссертация посвящена разработке информационно - диагностической системы импульсного вихретокового неразрушающего контроля изделий машиностроения, разработке метода и созданию новых средств импульсного ВСНК, поиску и обоснованию новых для вихретокового контроля информативных параметров сигналов вихретокового преобразователя и исследованию их связей с параметрами объекта контроля.

В работе проведен анализ существующих средств импульсного вихретокового контроля, методов обработки информационных сигналов и используемых при этом информативных параметров. Показано, что использование характерных точек сигнала преобразователя в импульсном режиме возбуждения в условиях воздействия шумов и помех приводит к существенной погрешности результатов измерения и дает ограниченную оценку состояния объекта контроля. Анализ процессов в цепях вихретокового преобразователя в импульсном режиме возбуждения позволил предложить использование в качестве информативных параметров сигналов преобразователя его собственной частоты и декремент. Получена математическая модель процессов вихретокового преобразователя, которая позволяет проводить оценку взаимосвязи информативных параметров сигналов преобразователя с параметрами и характеристиками объекта контроля.

Разработана методика анализа и обработки информативных параметров сигналов вихретокового преобразователя в импульсном режиме возбуждения, в основе которой лежит определение предложенных информативных параметров этих сигналов через их амплитудную и фазовую характеристики посредством применения преобразования Гильберта. Предложено использование экспоненциальной аппроксимации для амплитудной характеристики и линейного тренда для фазовой характеристики сигнала вихретокового преобразователя для повышения точности определения информативных параметров этого сигнала. Для оценки эффективности предложенных методов повышения точности определения характеристик сигналов преобразователя проведено моделирование по определению предложенных информативных параметров сигнала в условиях воздействия помех, которое показало, что использование трендов характеристик сигналов повышает точность определения декремента и частоты собственных колебаний сигнала преобразователя в несколько раз.

Проведен анализ погрешностей определения частоты собственных колебаний и декремента сигнала вихретокового преобразователя, который позволил определить условия получения минимальной погрешности определения этих информативных параметров сигнала и определить оптимальное время для его анализа, что существенно влияет на результаты контроля в условиях воздействия помех и шумов.

В работе разработана информационно-диагностическая система импульсного вихретокового неразрушающего контроля, реализующая разработанную методику анализа и обработки информативных параметров сигналов преобразователя, на базе которой проведено экспериментальное

исследование предложенного метода импульсного вихретокового контроля на сериях образцов (плоской и цилиндрической формы), что подтвердило возможность использования новых параметров сигналов ВСП – собственной частоты и декремента сигнала в задачах ВСНК.

Ключевые слова: импульсный вихретоковый неразрушающий контроль, частота собственных колебаний, декремент, амплитудная и фазовая характеристики сигнала

ABSTRACT

Lysenko I. Information - diagnostic system of pulsed eddy current nondestructive testing for mechanical engineering products. – A manuscript.

Dissertation in support of candidature for a technical sciences degree on specialty 05.11.13 – Devices and Methods for Testing and Materials Structure Determination. – The National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2017.

The dissertation is devoted to the development of the information-diagnostic system of pulsed eddy current nondestructive control for mechanical engineering products. In this work, the processes in the circuits of the eddy current transducer in the pulsed excitation mode were analyzed and the conditions for the occurrence of damped harmonic oscillations were determined. It allowed proposing the use of signal's natural oscillation frequency and decrement as informative parameters of the eddy current transducer signal.

The method of analysis and processing of the signal informational parameters of the eddy current transducer in the pulse excitation mode was developed in the work. The method is based on the determination of the signals proposed informational parameters through their amplitude and phase characteristics by using the Hilbert transformation. The use of exponential approximation for the amplitude characteristic and the linear trend for the phase characteristic of the eddy current transducer signal to increase the accuracy of the determination of the signal informational parameters is proposed.

The determination errors of the natural oscillation frequency and decrement of the eddy current transducer signal were analyzed. It allowed determining the conditions for obtaining the minimum error of the determination of signal informative parameters and determining the eddy current transducer signal analysis optimal time, which significantly affects the testing results in the conditions of noise influence.

Keywords: pulsed eddy-current nondestructive testing, natural oscillation frequency, decrement, amplitude and phase characteristics of signal.