

ЗАСТОСУВАННЯ ФАЗОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИГНАЛУ В АВТОМАТИЗОВАНІЙ ВИХРОСТРУМОВІЙ ДЕФЕКТОКОПІЇ

М.О. Редька¹, Ю.В. Куц¹, Є.В. Шаповалов², В.М. Учанін³, Ю.Ю. Лисенко¹, О.Д. Близнюк⁴

¹НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37.
E-mail: y.kuts@ukr.net

²ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича 11. E-mail: gera2000@ukr.net

³Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України. 79060, м. Львів, вул. Наукова, 5.
E-mail: vuchanin@gmail.com

⁴Науково-дослідна лабораторія технічної діагностики та неруйнівного контролю авіаційної техніки НАУ. 03058, м. Київ, просп. Гузара Любомира, 1. E-mail: nau_409@ukr.net

У статті проведено модельні та експериментальні дослідження фазових методів виявлення сигналів вихрострумової дефектоскопії, які спостерігаються на фоні шумів. Розглянуто та проведено тестування двох методів виявлення сигналів. Перший ґрунтується на визначенні кількості нулів аналізованого сигналу в ковзному режимі і має низьку обчислювальну ресурсомісткість та просту схемотехнічну реалізацію. Другий метод базується на аналізі результуючої довжини вектора (r-статистики), отриманої з фазової характеристики аналізованого сигналу за її мультिवіконного ковзного опрацювання, який відрізняється високою достовірністю виявлення сигналу. Проведено перевірку ефективності цих методів в системі автоматизованої вихрострумової дефектоскопії. Бібліогр. 18, табл. 2, рис. 9.

Ключові слова: вихрострумова дефектоскопія, автоматизований вихрострумований контроль, виявлення сигналів, фазовий метод

Вступ. В основу вихрострумової дефектоскопії (ВСД) покладено взаємодію змінного електромагнітного поля з електропровідним об'єктом контролю (ОК) [1, 2]. Особливістю ВСД є відсутність механічного контакту між ОК та вихрострумівим перетворювачем (ВСП), що дає змогу реалізовувати ВСД в автоматичному режимі за умови руху ВСП відносно поверхні ОК зі значною швидкістю. Прагнення щодо скорочення часу контролю, виявлення в автоматичному режимі дефектів малих розмірів на значній глибині під поверхнею ОК, тобто за малих рівнів сигналів, потребує подальшого удосконалення методів виявлення та аналізу сигналів ВСД.

У більшості сучасних вихрострумівих дефектоскопів (ВД) універсального типу вихідний сигнал ВСП, за його збудження синусоїдним струмом, модулюється на робочій (несучій) частоті під час сканування зони дефекту додатковим сигналом, амплітуда і фаза якого визначаються параметрами дефекту – його розмірами, глибиною залягання тощо. У процесі наступної процедури демодуляції виділяють сигнал від дефекту, який, зазвичай, спостерігають і аналізують у комплексній площині на екрані дефектоскопа. Спектр пов'язаного з дефектом сигналу суттєво залежить від швидкості сканування ОК і, в меншій мірі, – від параметрів дефекту та напрямку сканування.

Перед скануванням поверхні ОК зазвичай реалізують процедуру компенсації небалансу ВСП шляхом встановлення його на бездефектну частину зразка, електрофізичні параметри якого відповідають параметрам ОК, або використовують бездефектну частину ОК. Незбалансовану частину вихідного сигналу ВСП можна також заглушити використанням фільтра високих частот, що також реалізовано у більшості стандартних ВД. Параметри такого фільтра вибирають таким чином, щоб постійна або повільно змінювана складова сигналу була повністю заглушена, а сигнал від дефекту після процедури демодуляції формувався без спотворень. Електронні шуми частково заглушують за допомогою фільтра низьких частот. Частота зрізу фільтрів суттєво залежить від швидкості сканування поверхні ОК [3]. Суттєвим недоліком стандартної процедури обробки сигналів ВСП є низька швидкість її реалізації, що обмежує можливість використання універсальних ВД у системах автоматизованої ВСД великогабаритних ОК високої продуктивності.

У цілому можна констатувати, що отримання та дослідження сигналів від дефектів відбувається за дії значних завад і шумів. У роботі [3] зазначено, що неінформативні складові сигналу у ВСД обумовлені такими факторами: 1 – особливостями ОК; 2 – режимом контролю; 3 – шумами, що су-

Куц Ю.В. – <https://orcid.org/0000-0002-8493-9474>, Учанін В.М. – <https://orcid.org/0000-0001-9664-2101>,

Лисенко Ю.Ю. – <https://orcid.org/0000-0001-9110-6684>

© М.О. Редька, Ю.В. Куц, Є.В. Шаповалов, В.М. Учанін, Ю.Ю. Лисенко, О.Д. Близнюк, 2022

проводжують роботу електронних схем та виникають під впливом зовнішніх електромагнітних полів. Дія завод перших двох груп компенсується за рахунок удосконалення конструкцій ВСП, способів перетворення параметрів ОК у параметри сигналів ВСП та методик контролю. Вплив факторів третьої групи призводить до зменшення відношення сигнал/шум (с/ш), яке варіюється у значному діапазоні в залежності від розмірів дефектів, їх заглиблення у підповерхневий шар матеріалу ОК та орієнтації відносно ВСП.

Електричні шуми не можуть бути заглушені диференціальним включенням котушок ВСП чи іншими способами, ефективними для зменшення впливу дії завод перших двох груп. Тому виявлення сигналів ВСП від дефектів за низького відношення с/ш потребує застосування спеціальних методів обробки сигналів, які розроблялись раніше для використання в радіотехнічних системах різного призначення [4, 5].

Виявлення сигналів ВСП на фоні шуму може проводитись з використанням одного або декількох відомих методів: оптимальної фільтрації сигналів [6], узгодженої фільтрації сигналів [7], застосування сигналів з різними видами модуляції і маніпуляції [8, 9], кореляційного прийому сигналів [6, 7], методу вейвлет-аналізу [10] тощо. Більшість цих методів характеризується значною обчислювальною ресурсомісткістю та необхідністю знання копії корисного сигналу. Відмінність реальних сигналів ВСП від їх теоретичних моделей суттєво зменшує ефективність цих методів щодо виявлення сигналів ВСП за низького відношення с/ш.

Перелічені вище методи виявлення сигналів базуються на аналізі амплітудних характеристик досліджуваних сигналів. Існує інша можливість виявлення сигналів від дефектів, яка ґрунтується на використанні особливостей фазової характеристики сигналу (ФХС). У цілому фаза сигналу i , відповідно, фазовий та фазово-амплітудний методи широко використовуються у вихрострумовому контролі, зокрема для вимірювання електропровідності металів та сплавів [1, 2], реалізації селективної ВСП [11] та ін. Але інформаційний ресурс фази сигналу може бути використаний і для розв'язання завдань виявлення сигналів ВСП на фоні шуму.

У загальному випадку сигнали ВСП розглядаються як адитивна суміш одиночних радіоімпульсів – обмежених в часі синусоїдних сигналів з модульованою амплітудою та фазою, та шуму. Такі сигнали на фінітних інтервалах часу спостереження мають кінцеве число екстремумів та число нулів (перетинів нульового рівня) з відповідними статистичними характеристиками [12]. У роботі

[13] розглянуто метод виявлення сигналів від дефектів для ВСП, в основу якого покладено вплив відношення с/ш на статистичні характеристики числа нулів сигналу (далі «метод нулів»). У роботі [14] запропоновано фазовий метод виявлення сигналів, що передбачає аналіз кругової статистики – результуючої довжини вектора (або скорочено r -статистики, далі «метод r -статистики»). В основу методу покладено залежність r -статистики від дисперсії значень ФХС на кінцевих інтервалах часу. Метод запропонований для ультразвукової товщинометрії, але може бути використаний і в аналізі сигналів автоматизованої ВСП, яка в свою чергу залежить від відношення с/ш.

Метою дослідження є перевірка ефективності та порівняльний аналіз фазових методів виявлення сигналів ВСП, які виключають процедуру демодуляції вихідного сигналу ВСП та придатні для використання у високопродуктивних автоматизованих системах ВСП.

Постановка задачі. У системі ВСП використовується трансформаторний ВСП диференціального типу. Узагальнена схема його підключення до генератора гармонічних коливань (Γ) частотою f та блоку опрацювання сигналів (БОС) разом з блоком прийняття рішення (БПР) наведено на рис. 1.

Під час дослідження ВСП рухається по поверхні ОК Q зі швидкістю v . Просторове положення ВСП визначається в декартовій системі координат автоматизованого засобу ВСП вектором координат точок поверхні виробу $r = (x, y, z) \in Q$. ВСП формує сигнал $u_d(t, p, r)$ як функцію аргументів: часу t , вектору координат r контрольованої точки поверхні та вектору p параметрів дефекту (до прикладу глибина та розкрив тріщини, її довжина тощо) та параметрів системи «ВСП – ОК» (відстань між ВСП та ОК, орієнтація ВСП відносно дефекту, режим сканування тощо). За межами ділянки поверхні ОК з дефектом сигнал $u_d(t, p, r)$ дорівнює нулю, а в межах цієї ділянки – відмінний від нуля і уявляє собою модульований за амплітудою та фазою радіоімпульсний сигнал з частотою сигналу-носія f . Цей сигнал спостерігається на фоні адитивного шуму $u_{\text{ш}}(t)$, що утворюється внаслідок дії багатьох факторів – шумів електронних компонентів системи, електромагнітних наведень і т. і. За цих умов несуперечливою є гіпотеза про те, що $u_{\text{ш}}(t)$ є реалізацією гаусового випадкового процесу з нульовим математичним сподіванням та дисперсією σ^2 . Рішення щодо наявності/відсутності дефекту формується в БПР. Необхідно провести модельні та експериментальні дослідження ефективності виявлення сигналів від дефектів за методом нулів та методом r -статистики в системі автоматизованої ВСП.

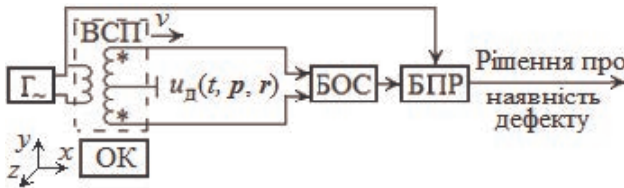


Рис. 1. Формування сигналу у вимірювальному каналі автоматизованої системи ВСД з трансформаторним ВСП диференціального типу

Розгляд поставленої задачі почнемо з аналізу моделі сигналу ВСД та змісту і особливостей реалізації методу нулів та методу r -статистики.

Модель сигналів ВСД. За умови повної компенсації вимірювальних обмоток диференціального ВСП модель сигналу ВСД під час сканування поверхні ОК має наступний загальний вид:

$$u(t, p, r) = u_d(t, p, r) + u_{\text{ш}}(t) = U_d(t, p, r) \cos(2\pi ft - \varphi_d(t, p, r)) I(t, r) + u_{\text{ш}}(t), t \in T_a, r \in Q, \quad (1)$$

де $U_d(t, p, r)$, $\varphi_d(t, p, r)$ – відповідно обвідна (амплітудно-часова характеристика сигналу, АХС) і початкова фаза; $\Phi_d(t, p, r) = 2\pi ft - \varphi_d(t, p, r)$ – фазо-часова або фазова характеристика сигналу (ФХС) трансформаторного диференціального ВСП; $u_{\text{ш}}(t)$ – шумова компонента сигналу; $T_a \gg f^{-1}$ – час аналізу; $I(t, r)$ – індикаторна функція:

$$I(t, r) = \begin{cases} 1, & t \in T_a, r \in Q, \\ 0, & t \notin T_a \text{ або } r \notin Q, \end{cases} \quad (2)$$

де Q_d – область поверхні ОК з дефектом, $Q_d \subset Q$.

Інформаційна складова $u_d(t, p, r)$ сигналу (1), за якою власне визначається факт наявності дефекту, належить до класу синусоїдних сигналів з локально зосередженими збуреннями інформативних параметрів – амплітуди та фази.

У випадку неповної компенсації диференціального ВСП в праву частину моделі (1) додається ще одна складова, когерентна сигналу збудження, але з амплітудою, набагато меншою за амплітудне значення $U_d(t, p, r)$.

У цілому у випадку $r \in Q_d$ сигнал (1) є нестационарним. Проте за відносно невеликої швидкості сканування v допустимим є наступне спрощення. Процес вимірювання параметрів сигналів ВСП у цифрових системах відбувається дискретно в часі на скінченній множині точок простору $g \in [1, G]$. На схемі рис. 1 дискретизація сигналу відбувається в БОС з періодом $T_d \ll f^{-1}$. Кожне окреме вимірювання виконується на інтервалі часу T_g , $f^{-1} < T_g \ll T_d$. Після перетворення в цифрову форму дискретний аналог сигналу (1) для фіксованого значення g представляється моделлю:

$$u[j, p_g, r_g] = u_a[j, p_g, r_g] + u_o[j], \quad g \in [1, G], \\ j \in [1, J], \quad J = [T_a / T_d]^+, \quad (3)$$

де $[\cdot]^+$ – позначення цілої частини числа.

На кожному інтервалі часу T_g значення компонент вектора p можна вважати незмінними, а сигнал (1) – локально стаціонарним, параметри якого (амплітуда і початкова фаза) лишаються незмінними впродовж T_g . Таке припущення суттєво спрощує аналіз сигналу ВСП.

Модель (3) є базовою для аналізу та опрацювання сигналів в автоматизованих системах ВСД. Для моделі (3) існує дискретне перетворення Гільберта з оператором H_d , що дає змогу отримати Гільберт-образ сигналу (3) – $\tilde{u}[j, p_g, r_g] = H_d(u[j, p_g, r_g])$, та його амплітудну та фазову характеристики. АХС визначається за формулою:

$$U[j] = \sqrt{u^2[j] + \tilde{u}^2[j]}. \quad (4)$$

У (4) і далі для спрощення запису аналітичних виразів аргументи p_g, r_g не наведені.

Значення ФХС (розгорнутої функції) визначається в такій послідовності: спочатку обчислюється частина ФХС за модулем 2π , тобто

$$\varphi[j] = (\Phi[j]) \bmod 2\pi = \arctg \frac{\tilde{u}[j]}{u[j]} + \frac{\pi}{2} \{2 - \text{sign } \tilde{u}[j](1 + \text{sign } u[j])\}, \quad (5)$$

де sign – знакова функція, а потім виконується розгортання ФХС в часі за виразом:

$$\Phi[j] = \varphi[j] + 2\pi g(\varphi[j]), \quad (6)$$

де $g(\varphi[j])$ – ступінчаста функція, значення якої збільшується на одиницю щоразу, коли $\varphi[j]$ змінюється від значення в околі 2π до значення в околі нуля.

Загальна характеристика методу виявлення сигналів від дефектів на основі підрахунку числа нулів сигналу (метод нулів). У статті [13] розглянуто метод виявлення сигналів ВСД, що ґрунтується на підрахунку кількості нулів процесу за певний час спостереження T_c у ковзному режимі. Було зазначено, що середня кількість нулів Z шумового процесу має певні статистичні характеристики, які змінюються у випадку аналізу адитивної суміші радіосигналу з гармонічним сигналом-носієм та шумом. Ця властивість покладена в основу методу виявлення сигналів ВСД на фоні шуму. Графічну інтерпретацію методу дає рис. 2, на якому позначено: a – реалізація аналізованого сигналу, b – ковзне вікно відбору даних апертурою M , v – графік отриманої функції $Z^*[j] = Z[j, M] / M$ – нормованої за апертурою M кількості нулів $Z[j, M]$.

Важливо зазначити, що моменти появи нулів процесу відповідають моментам зміни фази (6) на величину π , тому поточне значення середньої

кількості нулів аналітично можна представити в такий спосіб:

$$Z[j] = \left[\frac{\Phi[j+k] - \Phi[j]}{\pi} \right]^+, \quad j = \overline{1, J-M}, \quad (7)$$

$$M = \left[\frac{T_c}{T_d} \right]^+.$$

Рішення про наявність дефекту приймається у випадку зменшення значення $Z[j]$ нижче певного порогу Π , тобто якщо $Z[j] < \Pi$. Питання вибору рівня Π ґрунтується на додатковому аналізі помилок контролю першого і другого роду.

Враховуючи вище наведене, спосіб нулів можна віднести до класу фазових методів виявлення сигналів на фоні шуму. У випадку підрахунку нулів тільки за додатної похідної (тобто підрахунку числа цілих фазових циклів сигналу) у формулі (7) в знаменнику додається коефіцієнт 2.

Звичайно, цей метод не може конкурувати з більшістю відомих методів виявлення сигналів на фоні шумів, але він може виявитись конкурентоспроможним у багатоканальних системах (декілька десятків/сотень ВСП) систем ВСД, оскільки процедура визначення $Z^*[j]$ просто реалізується засобами цифрової техніки і потребує використання лише компараторів сигналів та лічильників імпульсів, тобто можлива за мінімальних апаратурних витрат.

Загальна характеристика методу г-статистики. Теоретичні питання змісту та отримання статистики «результуючої довжини вектора» в експериментах з випадковими кутами на площині наведені у роботах [15, 16], а прикладні аспекти отримання r -статистики за фазовою характеристикою сигналів ВСК – в [17].

Цей метод ґрунтується на аналізі r -статистики, отриманої з різниці фазових характеристик сигналів ВСП та сигналу-носія: $\phi[j] = (\Phi[j] - 2\pi f T_d) \bmod 2\pi$. Ця статистика обрана з огляду на те, що вона, по-перше, є інваріантною до початкової фази сигналу, по-друге, областю її значень є інтервал $(0, 1]$, що зручно для її аналізу.

Метод реалізується наступним чином. За результатами оброблення сигналів (3) отримують вибірку $\Psi = \{\phi[j], j = \overline{1, J}, \phi[j] \in [0, 2\pi)\}$ різ-

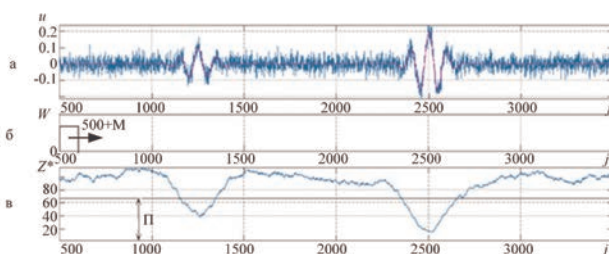


Рис. 2. Графічне представлення процесу виявлення сигналів ВСД на фоні шуму за методом нулів

ниць фазових характеристик сигналів. Поточні значення r -статистики обчислюються в ковзному режимі, під час руху прямокутного вікна з апертурою M відносно вибірки Ψ . На кожному кроці аналізу визначається поточне значення r -статистики згідно виразу:

$$r[j, M] = \frac{1}{M} \sqrt{\left(\sum_{k=j-M/2}^{j+M/2} \cos \phi[k] \right)^2 + \left(\sum_{k=j-M/2}^{j+M/2} \sin \phi[k] \right)^2}, \quad (8)$$

$$j \in \left[\frac{M}{2}, J - \frac{M}{2} + 1 \right],$$

У формулі (8) вважається, що M – парне число.

Вид функції $r[j, M]$ для зображеного на рис. 2, а сигналу ВСД наведено на рис. 3.

Рішення про наявність дефекту приймається за виконання умови $r[j] > \Pi$. Удосконалення цього методу з метою підвищення достовірності виявлення сигналів ВСД виконано за рахунок мультивіконного опрацювання фазових характеристик сигналів ВСД з подальшим формуванням статистики виду:

$$R[j] = \prod_{s=1}^S r[j, M_s], \quad (9)$$

де $r[j, M_s]$ – r -статистика, отримана з використанням віконної функції апертурою M_s , S – кількість вікон.

Обчислювальна складність цього методу обумовлена необхідністю реалізації алгоритмів дискретного перетворення Гільберта (ДПГ), обчислення ФХС та тригонометричних функцій. Крім того, у випадку неповної компенсації неінформативних складових сигналу ВСП можливе отримання некоректних результатів.

З метою перевірки можливості застосування запропонованих методів виявлення сигналів ВСД було виконано як модельні експерименти, так і їх дослідження на реальних сигналах ВСП, отриманих в роботизованій системі ВСД [18].

Моделювання та порівняльний аналіз методів виявлення сигналів ВСД. Для перевірки можливостей виявлення сигналів ВСД на фоні шуму розглянутими вище методами та порівняння їх ефективності було запропоновано коефіцієнти ефективності $K_{\text{еф}}$. Для методу r -статистики $K_{\text{еф}} = r_A / \bar{r}_{\text{ш}}$, де r_A – амплітудне значення r -статистики на ділянках з корисною складовою сигналу, $\bar{r}_{\text{ш}}$ – середнє значення r -статистики шуму. Для методу нулів процесу – $K_{\text{еф}} = Z^*_{\text{ш}} / Z^*_c$, де Z^*_c – максимальне нормоване значення вектору нулів процесу на ділянках з корисною складовою сигналу, $Z^*_{\text{ш}}$ – середнє нормоване значення векто-

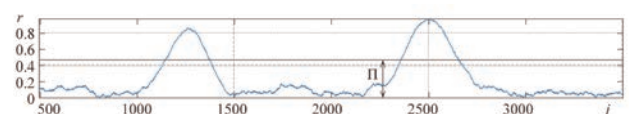


Рис. 3. Графік функції $r[j, M]$ визначеної для сигналу на рис. 2, а

ру нулів процесу на ділянках з шумом. Для базового амплітудного методу виявлення сигналів – $K_{\text{еф}} = U_C / U_{\text{ш}}$, де U_C – амплітудне значення напруги сигналу ВСП на дефектних ділянках ОК, $U_{\text{ш}}$ – середній рівень напруги шуму на виході ВСП на бездефектних ділянках ОК.

Суттєву перешкоду для безпомилкового виявлення дефектів ОК становить наявність в аналізованому сигналі некомпенсованої складової від сигналу збудження, тому значну увагу приділено питанню заглушення цієї складової.

Модельний експеримент складався з наступних етапів:

1. Розрахунок реалізації сигналу ВСП з неповною компенсацією ВСП та наявністю шумової компоненти.
2. Виконання ДПГ суміші сигналу з шумом.
3. Розрахунок ФХС моделі та сигналу-носія та визначення їх різниці.
4. Створення сигналу компенсації з використанням отриманих ФХС та додаткова компенсація неінформативних складових досліджуваного сигналу.
5. Визначення обвідної сигналу для виконання порівняльного аналізу фазових та амплітудного методів виявлення сигналів ВСП на фоні шуму.
6. Ковзне віконне опрацювання різниці ФХС вікнами різної аперттури та отримання векторів r -статистики.
7. Ковзне опрацювання сигналу ВСП та визначення кількості нулів процесу для віконних функцій з різними аперттурами.
8. Реалізація мультівіконного опрацювання векторів r -статистики.
9. Оцінювання ефективності розглянутих методів виявлення сигналів ВСП.

У проведеному експерименті було задано наступні параметри моделі: $f = 10$ кГц; відношення $c/\text{ш} = 2$; $F_d = 128$ кГц; обсяг вибірки $J = 25600$; аперттура віконної функції $M = 256$; обвідна радіоімпульсів – гаусова; кількість радіоімпульсів – 2. Усі експерименти проводились на персональному комп'ютері з наступними характеристиками: тактова частота процесору – 3,9 ГГц, кількість ядер/потоків процесору – 6/12, обсяг оперативної пам'яті – 16 Гб, частота роботи оперативної пам'яті – 3,2 ГГц.

На рис. 4, 5 зображено результати модельного експерименту з виявлення сигналів ВСП відповідно від неповністю та повністю скомпенсованого ВСП, де: *a* – досліджуваний сигнал; *б* – розрахована обвідна досліджуваного сигналу; *в* – вектор r -статистики у випадку $M = 150$; *г* – вектор r -статистики, отриманий з використанням мультівіконного опрацювання; *д* – вектор нулів процесу, отриманий віконною функцією з апертурою 150; *е* – вектор нулів процесу у випадку $M = 150$.

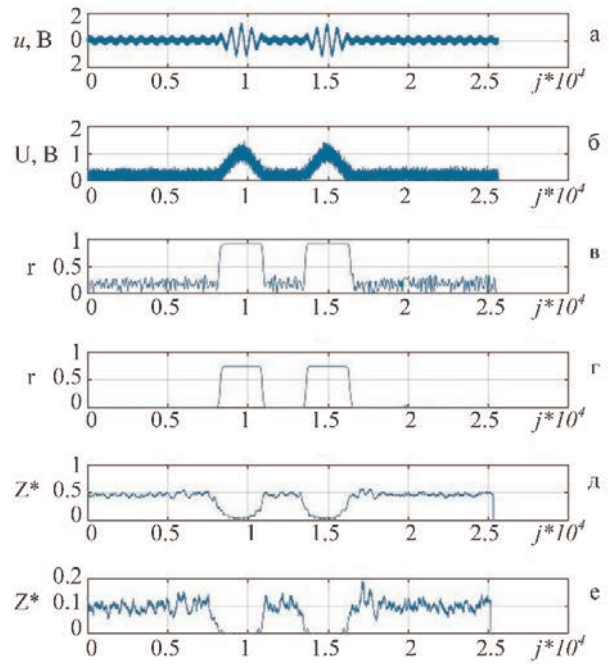


Рис. 4. Результати модельного експерименту з виявлення сигналів ВСП за неповної компенсації ВСП

За виконаною серією модельних експериментів обсягом 200 встановлено, що удосконалення методу r -статистик дало змогу підвищити достовірність виявлення сигналів ВСП за відношення $c/\text{ш} = 1$ на $\sim 15\%$.

Одним із завдань дослідження було оцінювання та порівняння запропонованих методів за ефективністю та ресурсомісткістю, яка оцінювалась за сумарним часом програмної реалізації кожного із запропонованих методів. У табл. 1 наведено зна-

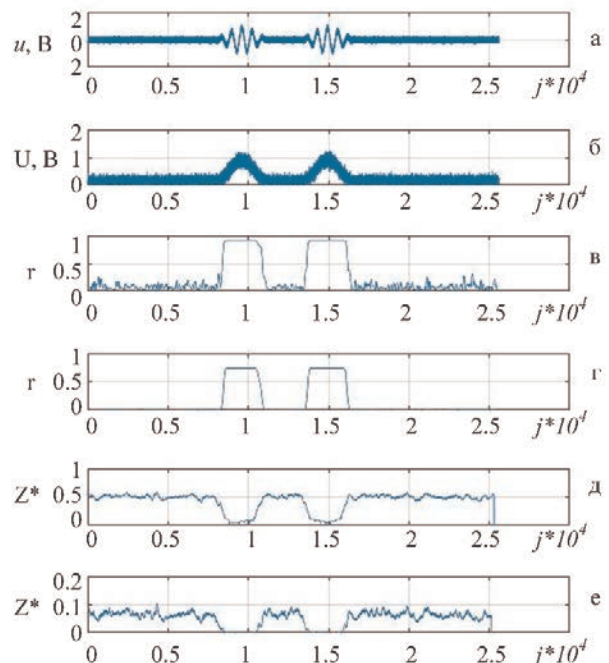


Рис. 5. Результати модельного експерименту з виявлення сигналів ВСП за повної компенсації ВСП

Таблиця 1. Значення коефіцієнтів ефективності та часових витрат

Назва методу	Апертура вікна	$K_{\text{эф}}$	Час програмної реалізації методу, с
Амплітудний метод без компенсації ВСП	-	2,6	0,002
Амплітудний метод з компенсацією ВСП	-	3	0,017
Метод r -статистики без компенсації ВСП	150	3	0,228
Метод r -статистики з компенсацією ВСП	150	6	0,243
Метод нулів процесу без компенсації ВСП	150	4,5	0,045
Метод нулів процесу з компенсацією ВСП	150	6,2	0,06
Метод r -статистики без компенсації ВСП ($M_1/M_2/M_3$)	Мультивіконне 150/300/450	55	1,586
Метод r -статистики з компенсацією ВСП ($M_1/M_2/M_3$)	Мультивіконне 150/300/450	70	1,601
Метод нулів процесу без компенсації ВСП ($M_1/M_2/M_3$)	Мультивіконне 150/300/450	16	0.2554
Метод нулів процесу з компенсацією ВСП ($M_1/M_2/M_3$)	Мультивіконне 150/300/450	60	0.2704

чення коефіцієнтів ефективності та часових витрат на реалізацію кожного з методів.

Отримані дані дають підстави зробити наступні висновки:

- Компенсація ВСП дає змогу збільшити ефективність фазових методів виявлення сигналів, в той час як ефективність базового методу змінюється не значно.
- Компенсація не має значного впливу на загальну ресурсомісткість запропонованих методів.
- Мультивіконне опрацювання сигналів дає змогу значно збільшити ефективність запропонованих методів.
- Мультивіконне опрацювання сигналів значно збільшує загальну ресурсомісткість запропонованих методів.

Збільшення ресурсомісткості методів виявлення сигналів ВСП за використання мультивіконного опрацювання обумовлене багатократною реалізацією методів виявлення сигналів за різних значень апертури віконної функції. Збільшення апертури віконної функції прямо пропорційно збільшує час реалізації методу.

Виявлення сигналів ВСП в автоматизованій системі ВСП. У роботі [18] розглянуто структуру роботизованої системи вихрострумове контролю, на якій виконувались експериментальні дослідження тестових зразків. Структуру вимірювального каналу системи показано на рис. 6, а, загальний вигляд роботизованої частини системи з лазерно-телевізійним сенсором (ЛТС) під час визначення координат точок поверхні плунжера – на рис. 6, б.

Дана система реалізує режим контролю, який складається з двох етапів:

1. Ідентифікація геометричної моделі (визначення координат точок поверхні) ОК за допомогою ЛТС.
2. Реалізація ВСК тестового зразка в автоматичному режимі, в ході якого з ВСП зчитувались значення напруги та передавались на ПК по кана-

лу інтерфейсу Ethernet; оброблення сигналів ВСП та візуалізація результатів контролю у ПК.

Під час експериментальних досліджень використано ВСП подвійного диференціювання типу МДФ 1502 [3] на робочій частоті 2 кГц. Сканування проводили шляхом зигзагоподібного руху ВСП вздовж дефекту. Дослідницький зразок – пластина сплаву алюмінію марки Д16АТВ завтовшки 20 мм, відстань між ВСП та ОК – 1,5 мм зі штучним дефектом типу підповерхневої тріщини завширшки 1,5 мм та заглибленої на 2,2 мм. Характеристики руху ВСП: швидкість руху – 52 мм/с; число проходів ВСП над дефектом – 6. Графік отриманого сигналу наведено на рис. 7.

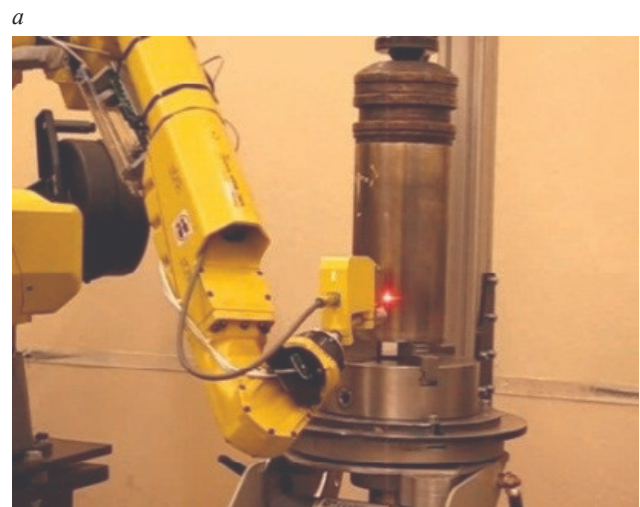
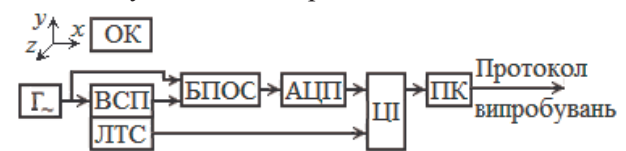


Рис. 6. Роботизована система вихрострумове контролю: а – структурна схема вимірювального каналу роботизованої системи ВСК, б – загальний вигляд промислового робота з ЛТС під час сканування поверхні ОК, Г – генератор; БПОС – блок попереднього опрацювання сигналів; АЦП – аналогово-цифровий перетворювач; ЦІ – цифровий інтерфейс; ПК – персональний комп’ютер

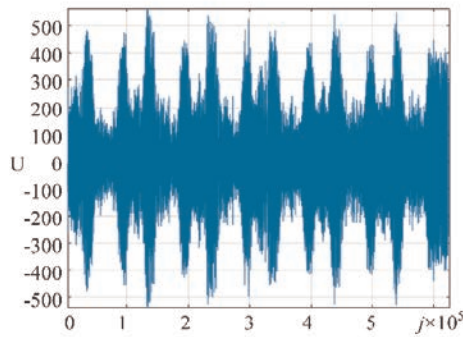


Рис. 7. Вихідний сигнал ВСП на робочій (несучій) частоті за шестикратного проходження зони дефекту

За результатами експерименту отримано вибірку значень сигналу обсягом $J = 624000$. Нижче в якості прикладу наведено результати опрацювання частини реалізації в межах точок $j_1 = 3,7 \times 10^5$ та $j_2 = 4,7 \times 10^5$.

У ході досліджень було обрано наступні параметри опрацювання: амплітуда сигналу компенсації (в умовних одиницях) $U_k = 130$, рівень шумової складової $U_{ш} = 170$, апертура віконної функції визначення вектору нулів процесу – 150, апертури віконних функцій визначення векторів r -статистик $M = 300, 400, 600$, апертури віконних функцій визначення кількості нулів процесу $M = 150, 300, 450$. Результати експерименту з виявлення сигналів ВСД запропонованими методами зображено на рис. 8, 9, де: *a* – сигнал ВСП; *b* – обвідна сигналу ВСП; *в* – вектор r -статистики, отриманий віконною функцією з $M = 150$; *г* – вектор r -статистики, отриманий з використанням мультивіконного опрацювання ФХС; *д* – вектор нулів процесу, отриманий віконною функцією з $M = 150$; *е* – вектор нулів процесу, отриманий використанням мультивіконного опрацювання ФХС.

На рис. 8, *a* та 9, *a* виділено три ділянки: 1, 3 – ділянки, в межах яких знаходяться сигнали від дефекту, 2 – ділянка сигналу зі збільшеною амплітудою некомпенсованості складової сигналу ВСП, яка може бути ідентифікована як дефект. З рис. 8, *в*, *г*, та рис. 9, *в*, *г* видно, що за умови недостатньої компенсації спостерігається зниження ефективності методу r -статистики внаслідок збільшеної ймовірності виникнення помилки першого роду – прийняття гіпотези про наявність дефекту за його відсутності. Додаткова часткова компенсація сигналу дає змогу підвищити ефективність методу. Для методу нулів такої часткової компенсації недостатньо для підвищення його ефективності.

Результати порівняльного аналізу розглянутих методів виявлення сигналів ВСП від дефектів за коефіцієнтом ефективності та часом реалізації методів наведено в табл. 2.

Наведені в табл. 2 дані свідчать про наступне:

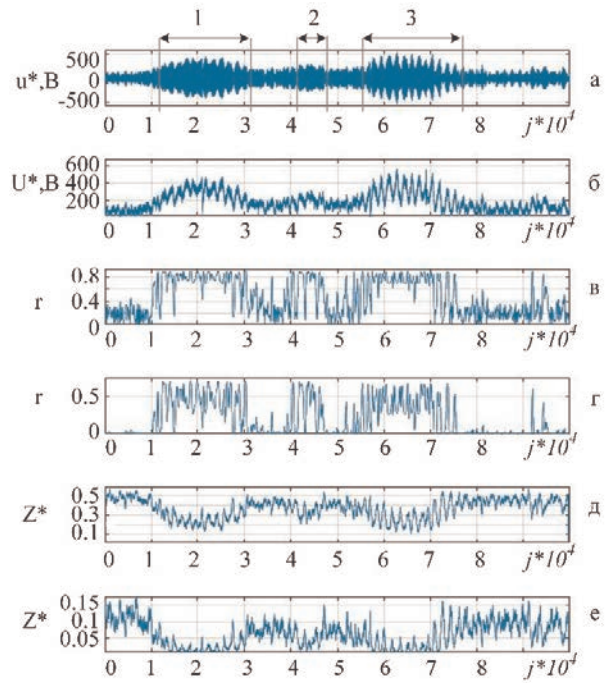


Рис. 8. Результати експерименту з виявлення сигналів ВСД запропонованими методами без компенсації ВСП

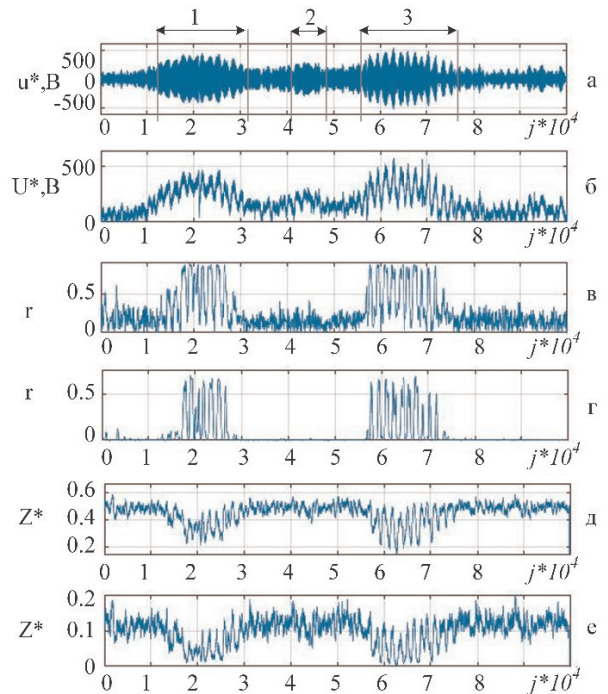


Рис. 9. Результати експерименту з виявлення сигналів ВСД запропонованими методами з компенсацією ВСП

- Метод r -статистик дає змогу забезпечити високу ефективність за умови часткової компенсації ВСП.

- Мультивіконне опрацювання значно збільшує ефективність методу r -статистик.

- Метод r -статистик має значно вищу ресурсомісткість порівняно з методом нулів.

- Метод нулів процесу має невисоку ефективність за умови неповної компенсації ВСП. Для до-

Таблиця 2. Порівняльний аналіз методів виявлення сигналів ВСП

Назва методу	Апертура вікна	$K_{\text{эф}}$	Час програмної реалізації методу, с
Амплітудний метод без компенсації ВСП	-	1,6	0,004
Амплітудний метод з компенсацією ВСП	-	1,67	0,024
Метод r -статистики без компенсації ВСП	300	1,6	2,01
Метод r -статистики з компенсацією ВСП	300	4	2,03
Метод нулів процесу без компенсації ВСП	150	1,6	0,125
Метод нулів процесу з компенсацією ВСП	150	1,67	0,145
Метод r -статистики без компенсації ВСП	Мультивіконне 300/400/600	2,27	4,4
Метод r -статистики з компенсацією ВСП ($M_1/M_2/M_3$)	Мультивіконне 300/400/600	19	4,42
Метод нулів процесу без компенсації ВСП ($M_1/M_2/M_3$)	Мультивіконне 150/300/450	2,67	0,706
Метод нулів процесу з компенсацією ВСП ($M_1/M_2/M_3$)	Мультивіконне 150/300/450	3,25	0,726

сягнення високої ефективності методу необхідно забезпечити значну або повну компенсацію ВСП.

Дослідження виконувалось в рамках тристоронньої угоди між ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського» та Фізико-механічним інститутом ім. Г.В. Карпенка НАН України.

Висновки

Для розробки високопродуктивних автоматизованих систем вихрострумове контролю актуальним є створення ефективних методів виявлення сигналів від дефектів на фоні шуму. Збільшення продуктивності контролю вимагає, зокрема, дослідження нових підходів щодо обробки вихідних сигналів ВСП, які б не передбачали традиційної процедури його демодуляції.

Під час сканування об'єктів з дефектами ВСП диференціального типу виникають сигнали з частотою збудження та локально зосередженими модуляціями їх амплітуди і фази. Аргументами таких сигналів є час, просторові координати ВСП і фізико-механічні характеристики та параметри контрольованих матеріалів та виробів. Запропоновано модель сигналів ВСП, відмінністю якої є використання індикаторної функції з областю визначення в часі та просторі.

Досліджено методи виявлення сигналів ВСП на основі визначення середнього числа нулів сигналу та r -статистики в одновіконному та мультивіконному варіантах реалізації, наведено методики реалізації цих методів. Для порівняння ефективності цих методів запропоновано використовувати коефіцієнт ефективності як відношення значень кількості нулів сигналу, або r -статистики, або амплітуди сигналу на ділянках з сигналом від дефекту та на ділянках з шумовим сигналом.

Модельними експериментами підтверджено, що амплітудний метод виявлення сигналів ВСП має найнижчий коефіцієнт ефективності (2,6), проте потребує найменшого часу програмної ре-

алізації. Збільшення ефективності запропонованих методів порівняно з амплітудним від 2 до 27 разів відбувається за рахунок значного збільшення часу програмної реалізації – від 30 до 800 разів.

Запропоновано удосконалення методу r -статистики за рахунок мультивіконного опрацювання фазових характеристик сигналів ВСП, що дало змогу підвищити достовірність виявлення сигналів ВСП за відношення $c/\sigma = 1$ на $\sim 15\%$.

Список літератури

1. Клюев В.В., Соснин Ф.Р., Ковалев А.В. и др. (2005) *Не разрушающий контроль и диагностика*: справочник. Москва, Машиностроение.
2. Udpa, S, O'Moore, P. (2004) *Nondestructive Testing Handbook. Vol. 5: Electromagnetic Testing*. 3rd edn. USA, American Society for NDT.
3. Учанин В.М. (2013) *Накладні вихрострумові перетворювачі подвійного диференціювання*. Львів, СПОЛОМ.
4. Акимов П.С., Евстратов Ф.Ф., Захаров С.И., Колосков А.А. (1989) *Обнаружение сигналов*. Москва, Радио и связь.
5. Пестряков В.Б. (1968) *Фазовые радиотехнические системы (основы статистической теории)*. Москва, Советское радио.
6. Качанов В. К., Мозговой О.В., Пітолін О.І. та ін. (1994) *Сучасні методи та засоби ультразвукового контролю з використанням статистичної обробки сигналів*. Навч. посібник. Бабак В.П. (ред.). Київ, ІС ДО.
7. Марченко Б.Г., Приймак М.В., Щербак Л.М. (2001) *Теоретичні основи аналізу стохастичних сигналів і шумів*. Навчальний посібник. Тернопіль, ТДТУ імені Івана Пулюя.
8. Качанов В.К., Соколов И.В. (2007) Особенности применения сложномодулированных сигналов в ультразвуковой дефектоскопии. *Дефектоскопия*, **12**, 18–42.
9. Карпаш О.М., Рибіцький І.В., Карпаш М.О. (2008) Обґрунтування можливості використання кодів Баркера для підвищення чутливості ультразвукового безконтактного способу вимірювання товщини. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **2**, 31–35.
10. Тютякин А.В. (2012) О применении вейвлет-преобразования в спектральном анализе информативных сигналов систем неразрушающего контроля и диагностики. *Контроль. Диагностика*, **8**, 11–16.
11. Тетерко А.Я., Назарчук З.Т. (2004) *Селективна вихрострумова дефектоскопія*. Львів, НАН України, ФМІ ім. Г.В. Карпенка.
12. Тихонов В.И. (1970) *Выбросы случайных процессов*. Москва, Наука. Главн. ред. физ.-мат. лит.

13. Редька М.О., Куц Ю.В., Левченко О.Е., Близнак О.Д. (2020) Метод виявлення сигналів вихрострумової дефектоскопії малої обчислювальної ресурсоемності. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, **2**, 22–25. <https://doi.org/10.37434/tdnk2020.02.03>
14. Куц Ю.В., Єременко В.С., Монченко О.В. та ін. (2006) Спосіб ультразвукового вимірювання товщини виробів. Україна. Пат. № 35057 G01B 17/02.
15. Mardia, K.V., Jupp, P.E. (2000) *Directional Statistics*, England: John Willey & Sons, Ltd, Chichester.
16. Fisher, N.I. (2000) *Statistical analysis of circular data*. Cambridge: Cambridge University Press.
17. Куц Ю.В., Учанін В.М., Лисенко Ю.Ю. та ін. (2021) Застосування перетворення Гільберта для аналізу сигналів автоматизованого вихрострумового контролю. Ч.2. Отримання вторинних діагностичних ознак та приклади реалізації. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, **4**, 11–18. <https://doi.org/10.37434/tdnk2021.04.01>
18. Долиненко В.В., Шаповалов Є.В., Скуба Т.Г. та ін. (2017) Роботизована система неруйнівного вихрострумового контролю виробів зі складною геометрією. *Автоматическая сварка*, **5-6**, 60–67. <https://doi.org/10.15407/as2017.06.10>
19. *the statistical processing of signals: Handbook*. Ed.by V.P. Babak. Kyiv, IS DO [in Ukrainian].
20. Marchenko, B.G., Pryjmak, M.V., Shcherbak, L.M. (2001) *Theoretical fundamentals of analysis of stochastic signals and noises: Manual*. Ternopil, TDTU [in Ukrainian].
21. Kachanov, V.K., Sokolov, I.V. (2007) Peculiarities of application of complex modulated signals in ultrasonic flaw detection. *Defektoskopiya*, **12**, 18–42 [in Russian].
22. Karpash, O.M., Rybitsky, I.V., Karpash, M.O. (2008) Substantiation of possibility for application of Barker codes in improvement of sensitivity contactless ultrasonic measurement of thickness. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **2**, 31–35 [in Russian].
23. Tyutyakin, A.V. (2012) On application of wavelet-transform in spectral analysis of informative signals of non-destructive testing and diagnostics systems. *Kontrol. Diagnostika*, **8**, 11–16 [in Russian].
24. Teterko, A.Ya., Nazarchuk, Z.T. (2004) *Selective eddy current flaw detection*. Lviv, PMI [in Ukrainian].
25. Tikhonov, V.I. (1970) *Random process outliers*. Moscow, Nauka [in Russian].
26. Redka, M.O., Kuts, Yu.V., Levchenko, O.E., Bliznyuk, O.D. (2020) Method to detect signals of eddy current flaw detection with small computer resource capacity. *Tekh. Diahnost. ta Neruiniv. Kontrol*, **2**, 22–25 [in Russian]. <https://doi.org/10.37434/tdnk2020.02.03>
27. Kuts, Yu.V., Eremenko, V.S., Monchenko, O.V. et al. (2006) *Method of ultrasonic measurement of thickness of products*. Ukraine Pat. 35057 G01B 17/02 [in Ukrainian].
28. Mardia, K.V., Jupp, P.E. (2000) *Directional Directional Statistics*, England: John Willey & Sons, Ltd, Chichester.
29. Fisher, N.I. (2000) *Statistical analysis of circular data*. Cambridge: Cambridge University Press.
30. Kuts, Yu.V., Uchanin, V.M., Lysenko, Yu.Yu. et al. (2021) Application of Hilbert transform for analysis of signals of automated eddy current inspection. Pt. 2: Deriving secondary diagnostic features and examples of realization. *Tekh. Diahnost. ta Neruiniv. Kontrol*, **4**, 11–18. <https://doi.org/10.37434/tdnk2021.04.01> [in Ukrainian].
31. Dolinenko, V.V., Shapovalov, E.V., Skuba, T.G. et al. (2017) Robotic system of non-destructive eddy-current testing of complex geometry products. *The Paton Welding J.*, **5-6**, 60–77. <https://doi.org/10.15407/as2017.06.10>

References

APPLICATION OF PHASE CHARACTERISTICS OF THE SIGNAL IN AUTOMATED EDDY CURRENT FLAW DETECTION

M.O. Redka¹, Yu.V. Kutz¹, E.V. Shapovalov², V.M. Uchanin³, Yu.Yu. Lysenko¹, O.D. Bliznyuk⁴

¹National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». 37 Peremohy Ave., 03056, Kyiv, Ukraine.

E-mail: y.kuts@ukr.net

²E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU. 11 Kazymyr Malevych str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: inpat59@ukr.net

³G.V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of NASU. 5 Naukova str., 79060, Lviv. E-mail: vuchanin@gmail.com

⁴Research Laboratory of Technical Diagnostics and Nondestructive Testing of Aeronautical Engineering of NAU.

1 Guzar Lyubomyr Ave., 03058, Kyiv, Ukraine. E-mail: nau_409@ukr.net

The paper describes model and experimental studies of phase methods for detection of signals at eddy current flaw detection, observed against a noise background. Testing two methods for signal detection was considered and performed. The first is based on determination of the number of zeroes of the analyzed signal in the sliding mode, and has a low computational resource intensity and simple circuit design. The second method is based on analysis of the resultant vector length (r-statistics) derived from phase characteristic of analyzed signal at its multi-window sliding processing, which features a high reliability of the detected signal. The effectiveness of these methods was checked in the system of automated eddy current flaw detection. Ref. 18, Tabl. 2, Fig. 9.

Keywords: eddy current flaw detection, automated eddy current testing, signal detection, phase method

Надійшла до редакції 17.01.2022