

МЕТОД ВИЯВЛЕННЯ СИГНАЛІВ ВИХРОСТРУМОВОЇ ДЕФЕКТОСКОПІЇ МАЛОЇ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОЇ РЕСУРСОЄМНОСТІ

М.О. Редька¹, Ю.В. Куц¹, О.Е. Левченко¹, О.Д. Близнюк²

¹Кафедра приладів та систем неруйнівного контролю КПІ ім. І. Сікорського. E-mail: y.kuts@ukr.net

²Науково-дослідна лабораторія технічної діагностики та неруйнівного контролю авіаційної техніки НАУ.
E-mail: nau_409@ukr.net

Запропоновано метод опрацювання сигналів вихрострумової дефектоскопії, що ґрунтується на визначенні числа нулів аналізованого сигналу в ковзному режимі. Метод відрізняється малою ресурсоємністю, має просту схематехнічну реалізацію і може бути використаний в автоматизованих системах вихрострумового неруйнівного контролю. Бібліогр. 13, табл. 1, рис. 4.

Ключові слова: вихрострумова дефектоскопія, автоматизований вихрострумовий контроль, виявлення сигналів

Вихрострумова дефектоскопія (ВСД) базується на взаємодії змінного електромагнітного поля з електропровідним об'єктом контролю (ОК) [1, 2]. Суттєвою ознакою ВСД є те, що вона реалізується за відсутності механічного контакту між вихрострумовим перетворювачем (ВСП) та ОК. Це дає змогу проводити ВСД в умовах руху ВСП відносно ОК зі значною швидкістю, що суттєво збільшує продуктивність контролю і розширює можливості його автоматизації. Такі фактори, як різноманітність технологічних процесів виготовлення виробів, умов їх експлуатації, поява нових матеріалів і необхідність виявлення дефектів в широкому діапазоні зміни їх розмірів та глибин залягання, викликає потребу в розробленні нових та удосконаленні існуючих методів та засобів ВСД.

Зазвичай сигнали ВСД формуються диференціальними ВСП [3] за умови повної (чи часткової) компенсації неінформативних для ВСД складових – напруги холостого ходу та внесеної напруги. Такі сигнали спостерігаються на фоні шумів за різного відношення сигнал/шум (с/ш).

Для виявлення сигналів від дефектів в адитивній суміші з шумом можуть бути використані різні відомі методи, зокрема оптимальної фільтрації сигналів [4], узгодженої фільтрації сигналів [5], застосування сигналів з різними видами модуляції і маніпуляції [6], кореляційного прийому сигналів [4, 5], спліт метод [7], метод вейвлет-аналізу [8] та ін. Реалізація потенційних можливостей більшої частини цих методів, по-перше, потребує знання копії корисного сигналу, по-друге, характеризується значною ресурсоємністю обчислень. Під ресурсоємністю обчислень розуміють апаратурні та часові витрати для їх реалізації.

Для ряду прикладних застосувань ВСД існує інша можливість виявлення сигналів від дефектів. Сигнали ВСП, як реалізації фізичних випад-

кових процесів, є функціями часу. Такі функції на кінцевому часі спостереження мають кінцеве число максимумів і мінімумів, отже і кінцеве число перетину (число нулів) знакозмінним сигналом нульового рівня [9]. Залежність статистичних характеристик числа нулів сигналу ВСП від відношення с/ш покладена в основу ідеї експрес-методу виявлення сигналів від дефектів у ВСД, запропонованого в роботі [10].

Метою дослідження є розвиток методу виявлення сигналів від дефектів, що ґрунтується на визначенні числа нулів аналізованого сигналу в ковзному режимі, порівняння ефективності та ресурсоємності цього методу з базовим. Розроблення методу опрацювання сигналів ВСД малої ресурсоємності дасть змогу використати їх в автоматизованих системах ВСД за значної швидкості сканування ОК.

Постановка задачі. Загальна схема формування сигналів ВСД у випадку використання трансформаторного диференціального ВСП наведена на рис. 1. Зазвичай такі перетворювачі збуджуються змінним електричним струмом синусоїдної форми частотою f . У випадку збалансованих вторинних обмоток, які включені диференціально, під час сканування ВСП на ділянці ОК з дефектом формується радіоімпульсний сигнал виду:

$$u_d(t, \vec{p}) = U(t, \vec{p}) \cos[2\pi ft - \varphi(t, \vec{p})] \quad (1)$$

де $U(t, \vec{p})$, $\varphi(t, \vec{p})$ – відповідно обвідна (амплітудно-часова характеристики сигналу (АХС)) та початкова фаза; $2\pi ft - \varphi(t, \vec{p})$ – фазо-часова або фазова характеристика сигналу (ФХС); \vec{p} – вектор параметрів дефекту (до прикладу глибина та розкриття тріщини, її довжина тощо) та параметрів системи «ВСП – ОК» (відстань між ВСП та ОК, орієнтація ВСП відносно дефекту, режим сканування тощо).

Типовий сигнал від дефекту у випадку проведення ВСД в динамічному режимі та за умови ком-

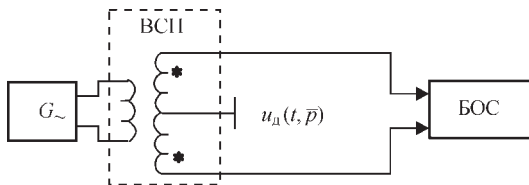


Рис. 1. Формування сигналу у вихрострумівому дефектоскопі з трансформаторним ВСП диференціального типу (БАС – блок опрацювання сигналів)

пенсації напруги холостого ходу та внесеної напруги представлено на рис. 2, а. Характеристики такого сигналу містять інформацію про дефекти досліджуваного об'єкту і підлягають подальшому вимірюванню і аналізу. Зазвичай такі сигнали спостерігаються на фоні шуму (рис. 2, б). Зі зменшенням розмірів дефектів та збільшенням глибини їх залягання зменшується і амплітуда інформаційної складової сигналу, відповідно зменшується відношення с/ш і ймовірність виявлення сигналів від дефектів. За відсутності повної компенсації напруги холостого ходу та внесеної напруги сигнал також містить гармонійну складову, наявну на всьому часі аналізу (рис. 2, в.). У більшості систем ВСП сигнали перетворюються на цифрові коди аналогово-цифровими перетворювачами (АЦП).

За базовий метод виявлення радіоімпульсних сигналів прийнято запропонований в [11] метод, що передбачає аналіз кругової статистики – результуючої довжини вектора (або скорочено г-статистики [12]), яка визначається за різницею фазових характеристик сигналів ВСП. Значення г-статистики отримують в результаті ковзного віконного опрацювання різниці $\Delta\Phi(t)$: ФХС $\Phi(t)$ суміші сигналу ВСП з шумом та ФХС сигналу-носія – $2\pi ft$, тобто різниці $\Delta\Phi(t) = \Phi(t) - 2\pi ft$. Поточні значення ФХС обчислюють через дискретне перетворення Гільберта (ДПГ) сигналу. В базовому методі віконна функція має фіксовану апертуру М. Про наявність сигналу дефекту судять за перевищенням г-статистикою порогового рівня. Обчислювальна складність цього методу обумовлена необхідністю реалізації алгоритмів ДПГ, обчислення ФХС та тригонометричних моментів від $\Delta\Phi(t)$.

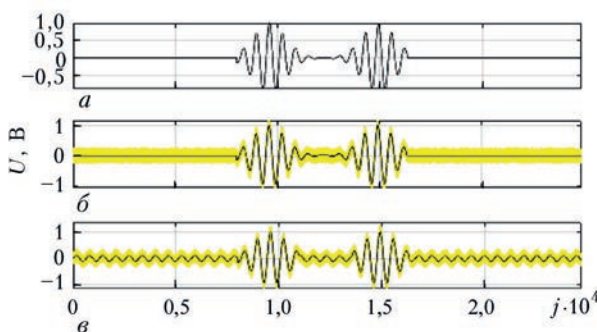


Рис. 2. Графіки сигналу ВСП за повної компенсації ВСП та відсутності шуму (а), сигналу ВСП за повної компенсації ВСП та наявності шуму (б) та графік сигналу за неповної компенсації ВСП з шумом (в)

Крім того, у випадку неповної компенсації неінформативних складових сигналу ВСП, можливе отримання некоректних результатів.

Згідно запропонованого методу виявлення сигналів ВСП проводиться за кількістю нулів процесу (без урахування їх знаку, тобто без урахування знаку похідної в момент перетину сигналом нульового рівня). В цьому випадку нуль процесу – це перетин осі абсцис знакозмінною функцією з нульовою постійною складовою. Кількість нулів шумового процесу має певні статистичні характеристики. У випадку аналізу адитивної суміші корисної складової сигналу (амплітудомодульованого гармонічного сигналу) та шуму дані характеристики змінюються. Ця властивість покладена в основу методу виявлення сигналів вихрострумівим неруйнівним контролем (ВСНК) на фоні шумів. Загальний алгоритм реалізації методу виявлення сигналів ВСП на фоні завод зображено на рис. 3.

Алгоритм отримання результуючого вектору нулів процесу $Z[j]$ для сигнально-шумової суміші описується наступним чином: на початку алгоритму запускається зовнішній цикл, який реалізує сканування сигналу віконною функцією. На кожній ітерації зовнішнього циклу запускається внутрішній цикл, який реалізує процес підрахунку кількості нулів процесу всередині віконної функції. На кожній ітерації внутрішнього циклу проводиться перемноження значення поточного та наступного відліків сигналу. Якщо знак добутку від'ємний, між даними відліками міститься нуль процесу. У випадку виявлення чергового нуля процесу значення $Z[j, m]$, де $m = 1 \dots M$ – номер відліку сигналу у вікні, збільшується на одиницю. Після завершення внутрішнього циклу відбу-

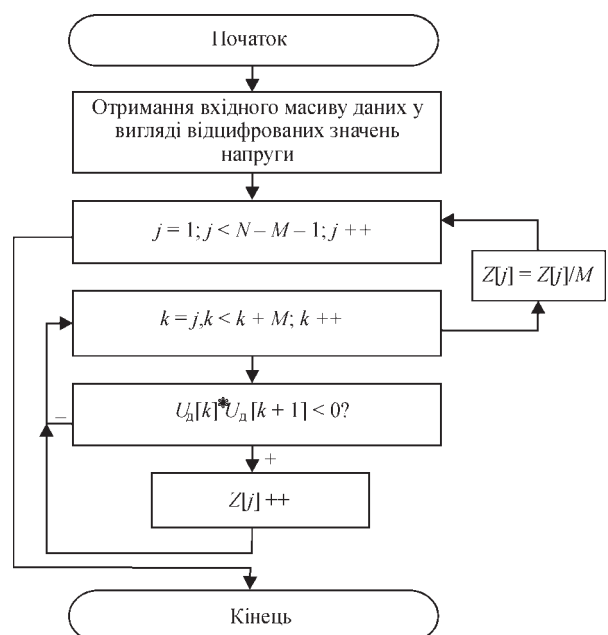


Рис. 3. Алгоритм реалізації методу виявлення сигналів ВСП на фоні шуму за кількістю нулів процесу

вається ділення отриманого результату $Z[j, M]$ на значення апертури віконної функції з метою нормування результуючого вектору: $Z[j] = Z[j, M]/M$.

Важливою частиною дослідження є доведення можливості використання запропонованого методу для виявлення сигналів ВСД та його переваги над базовим за ресурсоемністю.

Методика моделювання. Моделювання процесу виявлення сигналів ВСД радіоімпульсної форми на фоні шумів проводилося в програмному середовищі MATLAB. Модельний експеримент складався з наступних етапів:

1. Формування послідовностей радіоімпульсів з гармонічним сигналом-носієм, зображених на рис. 1. Для подальшої обробки було обрано модель сигнально-шумової суміші некомпенсованого ВСП.

2. Проведення віконного опрацювання сигнально-шумової суміші з визначенням кількості нулів процесу у вікні аналізу в ковзному режимі.

3. Аналіз вектору нулів процесу $Z[j]$.

4. Реалізація ДПГ сигналу некомпенсованого ВСП та с/ш суміші некомпенсованого ВСП.

5. Отримання ФХС сигналу та сигнально-шумової суміші та розрахунок їх різниці.

6. Проведення ковзного віконного опрацювання різниці ФХС з розрахунком значення вектору r -статистики.

7. Побудова векторів r -статистики та нулів процесу $Z[j]$.

8. Розрахунок ефективності методів виявлення сигналів ВСД на фоні шумів.

9. Оцінювання ресурсоемності методів виявлення сигналів ВСД на фоні шумів.

Параметри моделювання. Для модельного експерименту було обрано наступні параметри: частота гармонічного сигналу-носія $f = 1$ МГц; відношення с/ш = (1,2,5,10) для перевірки ефективності даних методів за різних відношень с/ш; частота дискретизації $F_d = 12,8$ МГц; обсяг вибірки $N = 25600$; апертура віконної функції $M = 256$, форма радіоімпульсів – гаусова, кількість імпульсів – 2.

Аналіз результатів моделювання. Перевірка ефективності методів виявлення сигналів ВСНК на фоні шумів проводилась шляхом розрахунку коефіцієнту ефективності $K_{\text{еф}}$, який для базового методу розраховується як $K_{\text{еф}} = r_A / r_{\text{ш}}$, де r_A – середнє амплітудне значення r -статистики на ділянках з корисною складовою сигналу, $r_{\text{ш}}$ – середнє значення r -статистики шуму, а для запропонованого методу – $K_{\text{еф}} = Z_n / Z_s$, де Z_s – середнє значення вектору нулів процесу на ділянках з корисною складовою сигналу, Z_n – середнє значення вектору нулів процесу на ділянках тільки з шумом. Графічне зображення векторів r -статистики

та нулів процесу, отриманих в ході моделювання за відношення с/ш = 2, зображено на рис. 4.

Значення розрахованих коефіцієнтів ефективності методів за різних відношень с/ш наведено в таблиці.

Результати модельного експерименту засвідчили, що у випадку менших відношень с/ш метод виявлення сигналів за визначенням вектору r -статистики є більш ефективним, проте за умови відсутності повної компенсації напруги холостого ходу та внесеної напруги в ВСП, при збільшенні відношення с/ш використання даного методу виявлення сигналів є неефективним. В свою чергу метод виявлення сигналів за кількістю нулів процесу має більшу ефективність за більших значень відношення с/ш.

Також в ході модельного експерименту проводилось оцінювання ресурсоемності даних методів, основною оцінкою якої був час, витрачений на проведення розрахунку результуючих векторів r -статистики та $Z[j]$.

Модельний експеримент проводився на персональному комп'ютері з наступними технічними характеристиками:

- тактова частота процесору – 3,9 ГГц;
- кількість ядер/потоків процесору – 6/12;
- об'єм оперативної пам'яті – 16 Гб;
- частота роботи оперативної пам'яті – 3,2 ГГц.

Розрахунок часу, необхідного для виконання алгоритмів виявлення сигналів кожного з методів, проводився шляхом використання функцій `tic` та `toc` вбудованого `Start stopwatch` таймера MATLAB. Час роботи алгоритму базового та запропонованого методів наведено в таблиці. Велика різниця

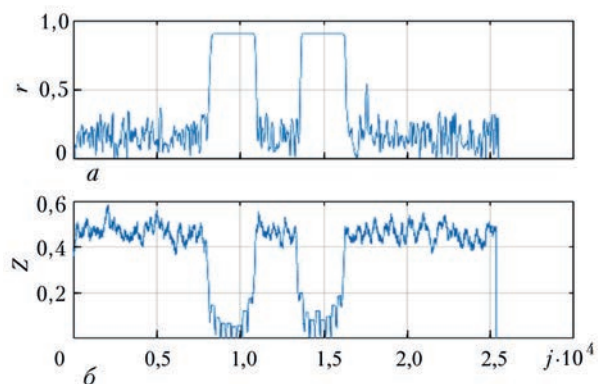


Рис. 4. Вектор r -статистики (а) та вектор нулів процесу $Z[j]$ (б)

Значення $K_{\text{еф}}$ та ресурсоемності методів виявлення сигналів ВСНК

с/ш	$K_{\text{еф}}$		Ресурсоемність, мс	
	Метод r -статистики	Метод нулів процесу	Метод r -статистики	Метод нулів процесу
1	6	4.5	650	58
2	6	6	600	70
5	1,1	6	564	48
10	1	8	649	54

в часі виконання алгоритмів базового та запропонованого методів виявлення сигналів обумовлена відсутністю необхідності використання додаткових бібліотек в запропонованому методі, в той час як базовий метод потребує проведення ДПГ, розгортку фазових характеристик сигналів тощо.

Розроблення методу опрацювання сигналів ВСД малої ресурсоемності дасть змогу забезпечити виявлення дефектів за значного темпу надходження даних без суттєвого зменшення ймовірності результатів контролю та спростить їх схемотехнічну реалізацію.

Висновки

Досліджено можливість виявлення сигналів ВСД, які спостерігаються на фоні шумів, за умови неповної компенсації ВСП, шляхом розрахунку вектору нулів процесу при виконному опрацюванні в ковзному режимі. Виконано порівняння за ефективністю запропонованого методу та базового методу, який передбачає аналіз векторів r-статистик, визначених за фазовою характеристикою сигналу. Запропонований метод вільний від ряду недоліків базового, головним з яких є висока ресурсоемність його реалізації. Показано, що коефіцієнт ефективності запропонованого методу дає змогу виявляти сигнали ВСД на фоні шумів за низьких значень c/ш.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на аналіз застосування розглянутого методу для виявлення сигналів ВСД в реальних автоматизованих системах ВСНК та оцінювання його ефективності.

Список літератури

1. Клюев В.В., Соснин Ф.Р., Ковалев А.В. и др. (2005). *Не разрушающий контроль и диагностика*. Справочник. Москва, Машиностроение.
2. (2004) *Nondestructive Testing Handbook*, Third Edition: Volume 5, Electromagnetic Testing. Satish S Udpa (technical editor), Patrick O'Moore (editor). ASNT.
3. Учанін В.М. (2013) *Накладні вихроструміві перетворювачі подвійного диференціювання*. Львів СПОЛОМ.
4. Качанов В.К., Мозговий О.В., Піголін 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.
5. Марченко Б.Г., Приймак М.В., Щербак Л.М. (2001) *Теоретичні основи аналізу стохастичних сигналів і шумів*. Навчальний посібник. Тернопіль, ТДТУ імені Івана Пулюя.

6. 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.
7. Соколов И.В. (2007) Сплит-способ ультразвукового контроля. *Дефектоскопия*, **12**, 3–17.
8. Тютякин А.В. (2012) О применении вейвлет-преобразования в спектральном анализе информативных сигналов систем неразрушающего контроля и диагностики. *Контроль. Диагностика*, **8**, 11–16.
9. Тихонов В.И. (1970) *Выбросы случайных процессов*. Москва, Наука.
10. Куц Ю.В., Редька М.О., Близняк О.Д. (2020) Метод виявлення сигналів вихрострумівого неруйнівного контролю на фоні шуму за кількістю нулів процесу. *VII Міжнарод. наук.-техн. конф. Метрологія, інформаційно-вимірвальні технології та системи МІВТС-2020*. Тези доповідей, 18-19 лютого 2020. Харків, сс. 71–72.
11. Куц Ю.В., Єременко В.С., Монченко О.В. та ін (2006) *Спосіб ультразвукового вимірювання товщини виробів. Патент на корисну модель № 35057 Україна*, МПК. G01B 17/02; опубл. 26.08.2008, Бюл. № 16.
12. Fisher N.I. (2000) *Statistical analysis of circular data*. Cambridge, Cambridge University Press.

References

1. Klyuev, V.V., Sosnin, F.R., Kovalyov, A.V. et al. (2005) *Non-destructive testing and diagnostics: Refer. book*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
2. (2004) *Nondestructive Testing Handbook*. 3rd Ed. Vol. 5: Electromagnetic testing. Ed. by Satish S Udpa, P. O'Moore. ASNT.
3. Uchanin, V.M. (2013) *Put-on eddy-current transducers of double differentiation*. Lviv, SPOLOM [in Ukrainian].
4. Kachanov, V.K. (1994) *Modern methods and means of ultrasonic testing using statistical processing of signals: Manual*. Ed. by V.P. Babak. Kyiv, IS DO [in Ukrainian].
5. Marchenko, B.G., Pryimak, M.V., Shcherbak, L.M. (2001) *Theoretical fundamentals of analysis of stochastic signals and noises: Manual*. Ternopil, TDTU [in Ukrainian].
6. Karpash, O.M., Ribitskii, I.V., Karpash, M.O. (2008) Substantiation of the possibility of using Barker codes to improve the sensitivity of ultrasonic contactless method of thickness measurement. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **2**, 31-35.
7. Sokolov, I.V. (2007) Split-method of ultrasonic testing. *Defektoskopiya*, **12**, 3-17 [in Russian].
8. Tyutyakin, A.V. (2012) On application of wavelet transformation in spectral analysis of informative signals of nondestructive testing and diagnostic systems. *Kontrol. Diagnostika*, **8**, 11-16 [in Russian].
9. Tikhonov, V.I. (1970) *Spikes of random processes*. Moscow, Nauka [in Russian].
10. Kuts, Yu.V., Eremenko, V.S., Monchenko, O.V. et al. (2006) *Method of ultrasonic measurement of product thickness. Ukraine pat. for utility model 35057, Int. Cl. G01B 17/02*. publ. 26.08.2008, Bull. 16 [in Ukrainian].
11. Fisher, N.I. (2000) *Statistical analysis of circular data*. Cambridge, Cambridge University Press.

METHOD TO DETECT SIGNALS OF EDDY CURRENT FLAW DETECTION WITH SMALL COMPUTER RESOURCE CAPACITY

M.O. Redka¹, Yu.V. Kuts², O.E. Levchenko¹, O.D. Bliznyuk²

¹Chair of NDT Instruments and Systems of I.Sikorsky KPI. E-mail: y.kuts@ukr.net

²Scientific-Technical Laboratory of Technical Diagnostics and Nondestructive Testing in Aeronautical Engineering of NAU. E-mail: nau_409@ukr.net

A method for processing the signals of eddy current flaw detection is proposed. It is based on determination of the number of zeros of the analyzed signal in the sliding mode. The method features low resources capability, has simple circuit implementation and can be used in automated systems of eddy current nondestructive testing. 13 Ref., 1 Tabl., 4 Fig.

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

Надійшла до редакції 26.06.2020