

## РОБОТИЗОВАНА СИСТЕМА НЕРУЙНІВНОГО ВИХРОСТРУМОВОГО КОНТРОЛЮ ВИРОБІВ ЗІ СКЛАДНОЮ ГЕОМЕТРІЄЮ

В. В. ДОЛИНЕНКО<sup>1</sup>, Є. В. ШАПОВАЛОВ<sup>1</sup>, Т. Г. СКУБА<sup>1</sup>, В. О. КОЛЯДА<sup>1</sup>, Ю. В. КУЦ<sup>2</sup>,  
Р. М. ГАЛАГАН<sup>2</sup>, В. В. КАРПІНСЬКИЙ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України. 03680, г. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37.

Виконано аналіз сучасного стану розробки автоматизованих та автоматичних систем вихрострумowego неруйнівного контролю виробів зі складною геометрією. Показано необхідність створення адаптивних роботизованих систем, в яких оператор безпосередньо не задіяний в процесі виконання контролю. Виконано обґрунтування необхідності впровадження нової ефективної методології оброблення сигналів вихрових струмів, в якій використовується теорія дискретного перетворення Гільберта у поєднанні із методами теорії статистичної обробки сигналів. Запропоновано структурну схему роботизованого комплексу автоматичного контролю, що складається з промислового робота-маніпулятора, координатного столу з декількома ступенями свободи та пристроєм фіксації об'єкту контролю, автоматизованої станції з набором вихрострумowych перетворювачів різних типів, блоку датчиків технічного зору, персонального комп'ютера та електронного блоку управління і оброблення вихрострумowych сигналів. Бібліогр. 12, рис. 7.

*Ключові слова:* автоматичний вихрострумовой неруйнівний контроль, адаптивний роботизований комплекс, датчик технічного зору, амплітудна та фазова характеристики вихрострумowego сигналу

**Актуальність проблеми.** В структурі високотехнологічних виробництв на їх різних етапах чинне місце належить операціям контролю якості виробів, які ґрунтуються на використанні методів неруйнівного контролю (НК) [1, 2]. Підвищення конкурентоспроможності та надійності продукції значною мірою залежить від темпів впровадження нових конструкційних матеріалів та компонентів, прогресивних технологічних процесів, останніх досягнень фундаментальних і прикладних наук. За таких умов розробники нової продукції повинні в своїй роботі спиратись на інноваційні методи і засоби контролю якості, орієнтовані на перспективні матеріали з покращеними характеристиками та параметрами. Такі засоби повинні акумулювати новітні досягнення з різних галузей знань — фізики, математики, техніки, електроніки, комп'ютерної інженерії тощо. Це повною мірою стосується і вихрострумowego контролю (ВСК), який є надзвичайно інформативним, і в той же час достатньо складний з огляду на отримання корисної інформації і виділення діагностичних ознак, особливо коли виріб має складну геометрію.

Незважаючи на впровадження сучасних схемотехнічних рішень, досягнень обчислювальної техніки та інформаційно-вимірювальних технологій, значна частина засобів контролю орієнтована на «ручний» спосіб сканування поверхні об'єктів контролю (ОК). Наявність людського чинника призводить до підвищення суб'єктивності контро-

лю, зниження ймовірності прийняття правильних діагностичних рішень. Тому на практиці, навіть за наявності досконалих методик контролю, ручний спосіб не гарантує високої якості контролю. Наявність у технологічному ланцюгу контролю людини-оператора значно підвищує вірогідність отримання помилкових рішень, що не дозволяє реалізувати у повному обсязі високі потенціальні можливості засобів НК.

Таким чином, необхідність підвищення продуктивності та достовірності результатів ВСК виробів зі складною геометрією потребує створення автоматичних систем контролю, в яких, цілком очевидно, будуть використані нові підходи, як до методики контролю, так і до математичного забезпечення дефектоскопа. Базовими передумовами при цьому є наявність таких особливостей ВСК, як: необхідність забезпечення відсутності механічного контакту між ОК та вихрострумowym датчиком (ВСД); використання таких конструкцій ВСД, що мають невеликі розміри; стабільність характеристик ВСД, як в діапазоні робочих температур, так і в часі. Одним з найбільш перспективних напрямків реалізації автоматичного ВСК є розроблення роботизованих систем неруйнівного контролю.

**Аналіз існуючих рішень і постановка завдання.** Одним з основних збурень, що може значно впливати на результати автоматичного ВСК, є зміна величини зазору між перетворюва-

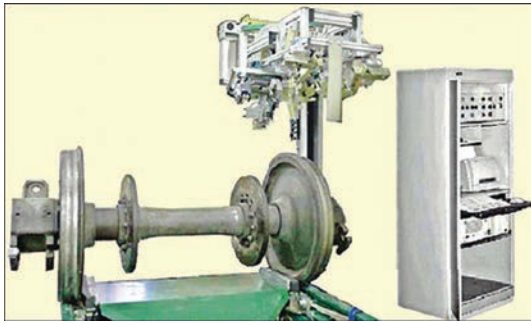


Рис. 1. Автоматизований модуль системи ВСК колісних пар залізничних вагонів «PELENG-AUTOMAT»

чем і ОК. У випадку роботизованого контролю такий зазор визначається:

- шорсткістю поверхні ОК;
- точністю переміщення вихрострумowego датчика ВСД по заданій траєкторії;
- точністю апроксимації комп'ютерної геометричної моделі ОК;
- точністю засобів технічного зору (лазерно-триангуляційного відеосенсора), що використовується на етапі адаптації до конкретного зразка ОК [3].

Попередні розрахунки показують, що неконтрольована зміна величини зазору в процесі роботизованого вихрострумowego контролю габаритних ОК може досягати  $\pm 0,5$  мм. Це збурення може бути суттєво зменшено при використанні ВСД зі спеціальним пружинним кріпленням, що забезпечує притискання ВСД до поверхні ОК, але при цьому збільшується час контролю. При використанні ВСД зі звичайним способом кріплення компенсацію збурення від зміни величини зазору повинно виконуватись спеціальним модулем математичного забезпечення роботизованої системи ВСК.

Розробленню автоматичних систем НК передували механізовані та напівавтоматичні систе-



Рис. 2. Механізована система ВСК труб

ми, що певний час задовольняли потреби промисловості. В такі системах застосовувались не дуже складні лінійні маніпулятори, які забезпечували достатню точність позиціонування [4]. Наприклад, для НК колісних пар вагонів застосовувався автоматизований комплекс «PELENG-AUTOMAT» (фірми «АЛТЕК», Росія), до складу якого входить модуль ВСК всієї поверхні колеса і гальмівного диска (рис. 1). Механізована система ВСК труб середнього діаметру (від 1,75 до 38") на основі ChainXY-сканера від фірми «Olympus» представлена на рис. 2. Застосування таких систем обмежується контролем деталей простої форм (пластин, труб тощо).

Більшу гнучкість та продуктивність мають системи контролю з антропоморфними роботами-маніпуляторами, що мають шість і більше ступенів свободи [5–7]. Такі системи використовуються там, де потрібно забезпечити високу продуктивність, або виконувати контроль виробів зі складною геометрією.

Роботизовані системи НК можна умовно поділити на два класи: адаптивні і неадаптивні. Неадаптивні системи використовують для НК деталей



Рис. 3. Система роботизованого ВСК деталей зі складною геометрією «EloScan-system»: а — процес контролю; б — процес налаштування датчика (I — станція обслуговування датчиків)

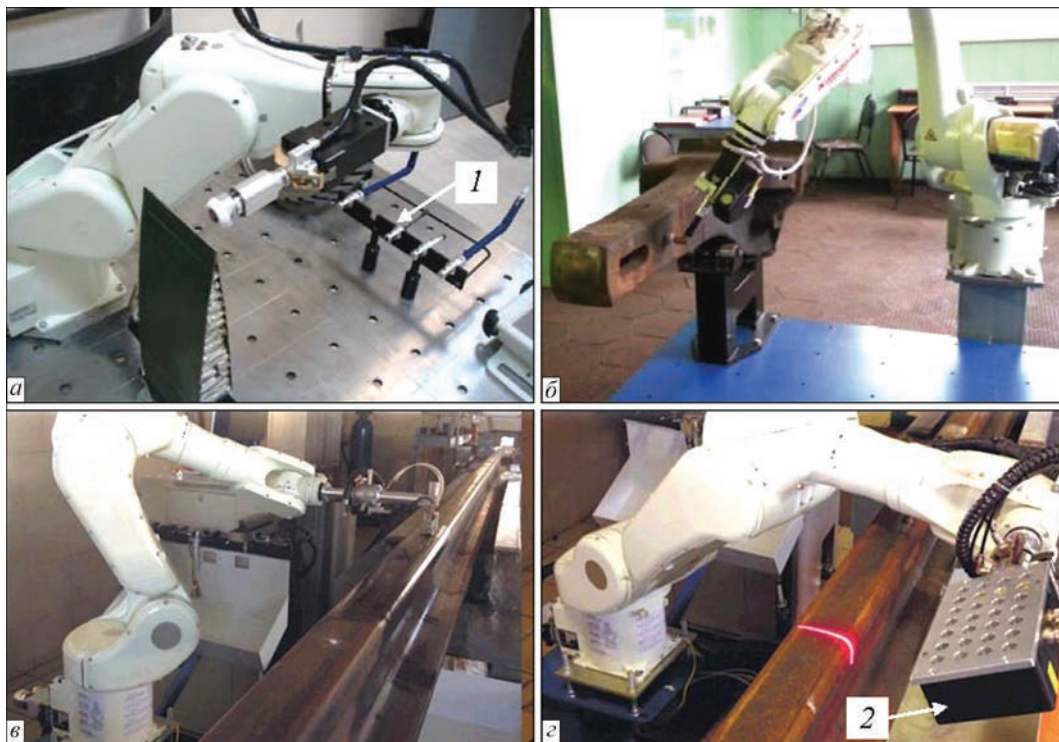


Рис. 4. Системи НК типу «Робоскоп VTM-3000» для ВСК: *a* — елементів крила літака; *б* — залізничного автозчепного пристрою; *в* — рейки залізничної колії; *г* — геометрії рейки (*1* — станція обслуговування датчиків; *2* — лазерно-телевізійний відеосенсор)

та виробів з нескладною геометрією. Основним критерієм якості функціонування таких систем є їх продуктивність. Ці системи призначені в основному для контролю невеликих деталей з незначною шорсткістю поверхні. Як приклад такого типу систем на рис. 3, *a* представлено роботизовану систему неруйнівного ВСК «EloScan-system», яка призначена, головним чином, для перевірки симетричних обертаючих компонентів в літакобудуванні. Точність позиціонування ОК забезпечується як високою точністю виготовлення контрольованої деталі, так і використанням спеціального маніпулятора виробу типу «токарний патрон». Система має станцію обслуговування датчиків (рис. 3, *б*), що дозволяє в процесі ВСК швидко змінювати їх і оперативно переналагоджуватися для контролю виробів з різною геометрією в залежності від завдання та виду поверхні зони контролю.

Адаптивні роботизовані системи застосовуються у випадках, коли необхідно виконувати НК габаритних деталей та виробів зі складною геометрією. Основним критерієм якості функціонування таких систем є високий рівень вірогідності виявлення дефектів за заданого рівня продуктивності контролю. До складу систем може входити лазерно-телевізійний відеосенсор, ефективна робота якого забезпечується розсіяним відбиттям лазерного світла від контрольованих поверхонь. Представниками цього класу систем є роботизовані комплекси неруйнівного ВСК типу

«Робоскоп VTM-3000» (фірма «WorldNDT», Росія) [8], що показані на рис. 4.

До складу цих систем входять два антропоморфні роботи, лазерно-телевізійний відеосенсор і станція обслуговування вихрострумів датчиків. Лазерно-телевізійний відеосенсор може використовуватися як в комплексі з ВСК для первинного вимірювання розмірів ОК або адаптації до реальних розмірів конкретного ОК, так і самостійно — як інструмент визначення і контролю геометричних параметрів виробу (рис. 4, *г*).

Використання того чи іншого типу відеосенсора залежить як від необхідної точності вимірювань, так і від геометрії ОК. Для контролю габаритних виробів з плоскими поверхнями можна використовувати відеосенсор з більшим триангуляційним кутом. Відеосенсор з меншим триангуляційним кутом має значно менші габарити, тому його доцільно використовувати за наявності в геометрії ОК вузьких зон та значних заглибин.

Ефективне функціонування роботизованої системи ВСК пов'язано з правильним вибором вихрострумів перетворювачів (ВСП) з певного набору датчиків, необхідних для регламентного контролю виробу [9]. Для кожного типу ОК конструкції ВСП визначаються їх призначенням, умовами застосування, діапазоном частот струму збудження та іншими факторами. Розміри котушок ВСП обмежені знизу кількома міліметрами в діаметрі, а маса ВСП — десятками грамів (без ура-

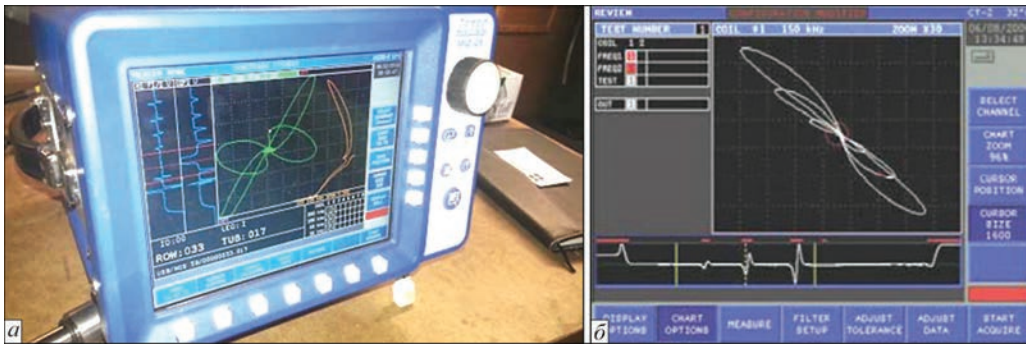


Рис. 5. Графічні зображення результатів неруйнівного ВСК в системах ручного сканування: а — переносна система; б — стаціонарна комп'ютерна система

хування вузлів закріплення і переміщення ВСП та елементів інтерфейсу).

Окремо слід зупинитись на засобах ВСК. На сьогодні ринок насичений приладами різного призначення, в тому числі вихрострумівими дефектоскопами, що мають високі технічні характеристики. За умов ручного сканування достовірність результатів ВСК значною мірою залежить від підготовки, досвіду і емоційного стану оператора-дефектоскопіста. Проте їх використання в роботизованих системах НК обмежено декількома факторами. По-перше, відомі вихрострумові дефектоскопи від самого початку орієнтовані на роботу з оператором, який приймає рішення за візуальним сигналом у виді годографа (рис. 5). Здебільшого такий годограф і передається до зовнішніх пристроїв, що створює певні незручності для використання таких сигналів в автоматизованих системах. Зрозуміло, що в роботизованій

системі ВСК використання годографів є дуже обмеженим.

По-друге, такі прилади для розробника роботизованих систем НК являють собою «чорні скриньки» — процес вибору режиму контролю, калібрування, алгоритми опрацювання експериментальних даних в цілому «прихований» від користувача, що ускладнює інтеграцію таких пристроїв в системи автоматизованого контролю.

По-третє, обробка сигналів ВСП ґрунтується на аналізі амплітудних характеристик сигналів. Використання фазових методів має допоміжний характер і може бути спрямовано, наприклад, на підвищення селективності контролю [9]. В той же час аналіз фазових характеристик сигналів ВСП, включаючи їх статистичне опрацювання та визначення кругових статистик [10], дозволяє виділити додаткові діагностичні ознаки, що створює передумови для розширення функціональних

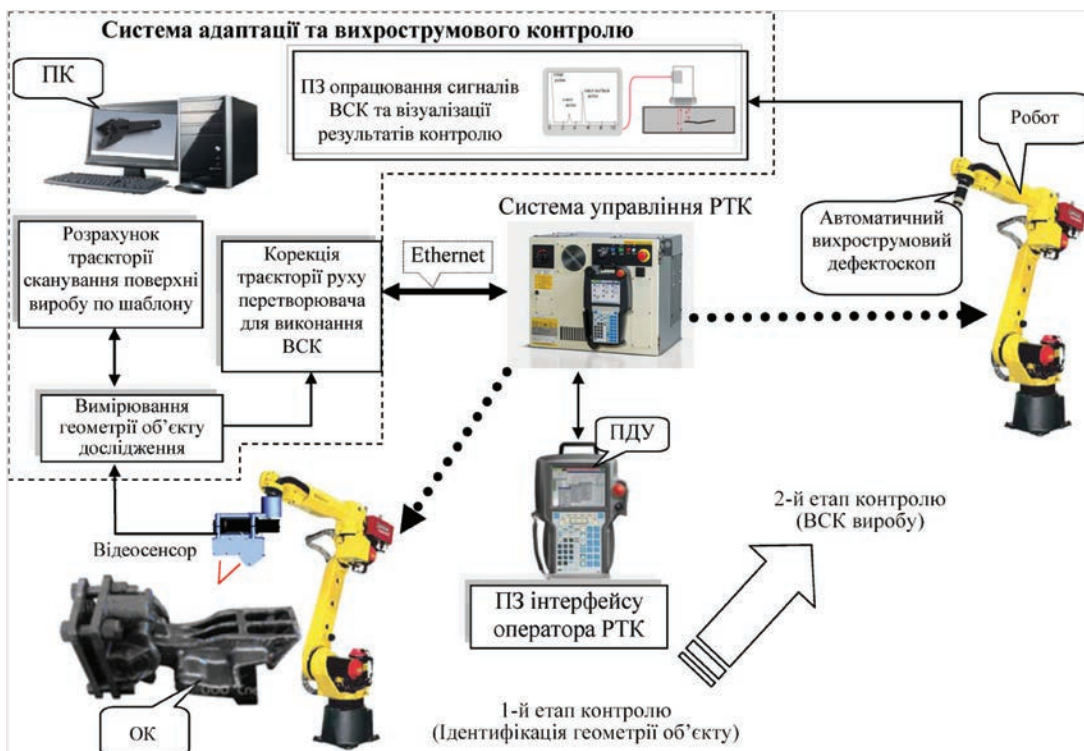


Рис. 6. Структурна схема роботизованої адаптивної системи неруйнівного ВСК: ПДУ — пульт дистанційного управління; ПЗ — програмне забезпечення; РТК — робототехнологічний комплекс

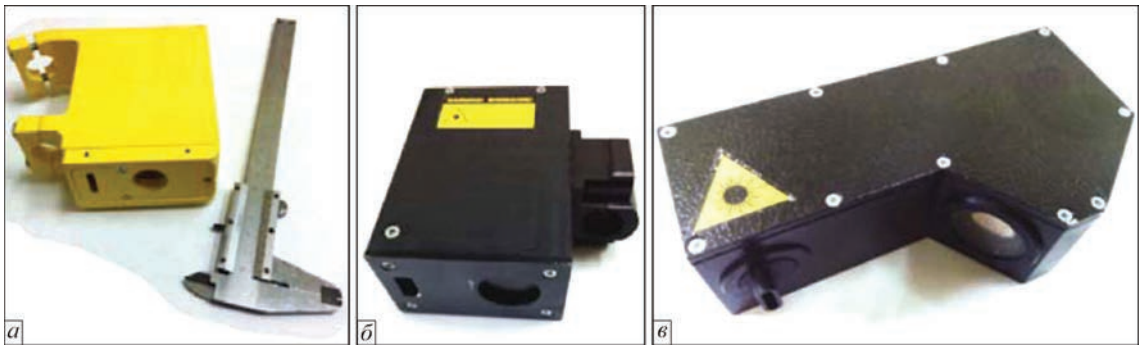


Рис. 7. Лазерно-телевізійні відеосенсори для роботизованих систем НК з триангуляційними кутами: а — 15; б — 20; в — 40°

можливостей ВСК, підвищення роздільної здатності вихрострумової дефектоскопії, введення в практику ВСК нових характеристик.

Таким чином, за результатами виконаного аналізу завдання даної роботи сформульовано наступним чином: необхідно обґрунтувати загальну структуру роботизованої системи ВСК виробів зі складною геометрією і запропонувати методологію опрацювання сигналів ВСП для такої системи з можливістю формування діагностичних ознак як з амплітудних, так і з фазових характеристик сигналів з широким залученням статистичних методів їх опрацювання.

**Запропоноване технічне рішення.** Виходячи із виконаного аналізу відомих технічних рішень можна стверджувати, що до складу типового роботизованого комплексу НК повинні включатись: робот-маніпулятор, координатний стіл з декількома ступенями свободи, автоматизована станція з набором перетворювачів різних типів, пристрій фіксації ОК, засоби технічного зору, персональний комп'ютер, електронний блок управління і оброблення сигналів.

На основі вище викладеного запропоновано наступну структуру роботизованої адаптивної системи ВСК, що зображена на рис. 6 (на схемі не показано станцію обслуговування ВСП та модуль позиціонування ОК).

Роботизована система неруйнівного ВСК передбачає двоетапний режим контролю. На першому етапі виконується ідентифікації геометричної моделі об'єкту контролю ОК за допомогою лазерно-телевізійного відеосенсора — датчика технічного зору. Такі відеосенсори є важливими елементами адаптації роботизованих систем неруйнівного ВСК до різних ОК. На даний час не існує універсальних датчиків технічного зору, тому такі засоби адаптації потребують розробки під конкретну задачу. В ІЕЗ ім. Є. О. Патона розроблено ряд моделей лазерно-телевізійних відеосенсорів, що можуть використовуватись для ідентифікації геометричної форми ОК в автоматичних системах НК. На рис. 7 показано ряд таких відеосенсорів, що відрізняються як габаритами, так і величиною триангуляційного кута.

Адаптивність системи реалізується за рахунок:

- алгоритму сканування поверхні ОК і фіксації результатів вимірювань, отриманих за допомогою лазерно-триангуляційного відеосенсора;
- алгоритму уточнення ключових параметрів геометричної моделі ОК;
- алгоритму розрахунку траєкторії сканування поверхні виробу ВСП по заданому шаблону;
- алгоритму розрахунку поправок для системи управління роботом для всієї траєкторії сканування.

Друга фаза контролю призначена, власне, для виконання ВСК виробу. Такий контроль виконується в автоматичному режимі. Операції калібрування, зміни типу ВСП та переналадження режиму роботи ВСП виконуються без участі оператора. В процесі управління траєкторією робота математичне забезпечення ПК формує поправки в систему управління робото-технологічним комплексом (РТК). Ці поправки надходять в реальному часі по каналу інтерфейсу Ethernet і призводять до корекції траєкторії сканування, що забезпечує максимальну чутливість ВСП та запобігає виникненню зіткнень його з поверхнею ОК. На цьому ж етапі включається в роботу математичний модуль оброблення сигналу ВСП та візуалізації результатів контролю. Рішення про ступінь дефектності контрольованої ділянки виробу формується за результатами аналізу визначених діагностичних ознак.

В роботизованій системі НК передбачається можливість виконання оператором певних дій, які пов'язані з операціями встановлення та знаття ОК з маніпулятора виробу. Для цього передбачено пульт дистанційного управління (ПДУ) та спеціальне програмне забезпечення, що реалізує інтерактивну взаємодію в системі оператор – РТК.

Характерною особливістю математичного та програмного забезпечення роботизованої системи ВСК є реалізація парадигми адаптивності та універсальності технологічного процесу контролю. Це досягається не тільки за рахунок можливості зміни ВСП з метою адаптації до геометрії ОК та завдань контролю, але й за рахунок наступних спеціальних функціональних характеристик:

- визначення координат підготовленого до контролю ОК у тривимірній системі координат;
- виконання сканування поверхні ОК за заданою програмою;
- обчислення амплітудної характеристики сигналу ВСП;
- обчислення фазової та частотної характеристик сигналу ВСП;
- статистичного опрацювання характеристик сигналів ВСП та інших даних;
- обчислення та аналіз спектрів сигналів ВСП;
- програмне управління параметрами сигналу збудження ВСП та режимами роботи вимірювального каналу системи;
- формування діагностичних рішень щодо визначення дефектності ОК та інтерактивна взаємодія з технологом-дефектоскопістом за результатами аналізу сигналів ВСП та ін.

Таким чином, запропонована структура роботизованої системи неруйнівного ВСК дозволяє реалізувати парадигму адаптивного неруйнівного контролю виробів зі складною.

Реалізація концепції повної автоматизації ВСК вимагає більш загального підходу до опрацювання сигналів ВСК і формування полів інформативних ознак у зв'язаній з ОК системі координат.

Найчастіше збудження ВСП здійснюють гармонічними струмами виду

$$i_0(t) = I_0 \cos(2\pi f_0 t \pm \varphi_0), \quad t \in (-\infty, \infty), \quad (1)$$

де  $t$  — поточний час;  $I_0 > 0$  — амплітуда сигналу збудження;  $\varphi_0 \in [0, 2\pi)$  — початкова фаза;  $f_0 > 0$  — частота.

Вихідний сигнал існує у вигляді напруги синусоїдальної форми, що спостерігається на фоні адитивних шумів  $n(t)$ . Локалізація неоднорідностей ОК у просторі під час сканування ВСП поверхні ОК в роботизованих системах ВСК призводить до локальних в часі і просторі змін (збурень) параметрів сигналів. Тому в загальному випадку аргументами сигналів ВСП є не тільки час  $t$ , але й вектор параметрів  $\bar{p}_r$  системи «ВСП – ОК» і просторові декартові координати  $r = \{x, y, z\}$  точок поверхні ОК:

$$u(t, \bar{p}_r, r) = U(t, \bar{p}_r, r) \times \cos(2\pi f_0 t - \varphi(t, \bar{p}_r, r)) + n(t), \quad t \in T_a, \quad (2)$$

де  $T_a$  — повний час аналізу всього ОК.

Перша, інформаційна складова сигналу (2) належить до класу синусоїдальних сигналів з локально зосередженими збуреннями інформативних параметрів. Просторові координати обмежені сукупністю значень  $\{x_{\min} \dots x_{\max}, y_{\min} \dots y_{\max}, z_{\min} \dots z_{\max}\}$ , що визначаються технічними характеристиками робота-маніпулятора. Області значень складових

вектора параметрів  $\bar{p}_r$  також обмежені і визначаються фізичними параметрами та характеристиками матеріалу ОК та геометричними характеристиками системи «ВСП – ОК».

Шумова складова  $n(t)$  сигналу (2) утворюється внаслідок дії багатьох факторів — шумів електронних компонентів системи, електромагнітних наведень, механічних вібрації і т. і. Зазвичай несуперечливим є обґрунтування  $n(t)$  як реалізації гауссового випадкового процесу з нульовим математичним сподіванням та дисперсією  $\sigma^2$ .

На всьому інтервалі аналізу сигнал (2) є нестационарним. Проте умови реалізації процесу контролю допускають наступне спрощення. Процес вимірювання параметрів сигналів ВСП в цифрових системах відбувається дискретно у часі на скінченній множині точок простору  $r_g = \{x_g, y_g, z_g, g \in [1, G]\}$ . Кожне окреме вимірювання виконується на інтервалі часу  $T_g, T < T_g \ll T_a$ . Така умова має місце з огляду на відносно невелику швидкість сканування, чи навіть можливість виконувати вимірювання після зупинки ВСП у наступній  $g$ -тій точці. Тому на відповідному інтервалі часу  $T_g$  сигнал  $u(t, \bar{p}_g, r_g), t \in T_g$  можна вважати локально стаціонарним, параметри якого, амплітуда і початкова фаза, лишаються незмінними впродовж  $T_g$ . Таке припущення дозволяє суттєво спростити аналіз сигналу ВСП.

В сучасних системах ВСК обробка сигналів ВСП виконується у цифровій формі, що передбачає дискретизацію сигналів у часі з кроком  $T_d \ll 1/f$ . Дискретний аналог сигналу (2) представляється як

$$u[j, \bar{p}_g, r_g] = U[j, \bar{p}_g, r_g] \times \cos[2\pi f_0 j - \varphi[j, \bar{p}_g, r_g]] + n[j], \quad (3)$$

$$g \in [1, G], j \in [1, T_a/T_d],$$

Для моделі (3) існує дискретне перетворення Гільберта. Ця модель є базовою для обробки сигналів у роботизованих системах ВСК.

З точки зору загального алгоритму обробки сигналів ВСП у роботизованих системах контролю умовно можна розділити на три етапи: первинний (формування та опрацювання аналогового сигналу), вторинний (опрацювання цифрового сигналу та його дискретних характеристик) та третинний (візуалізація результатів контролю та їх статистичне опрацювання).

Перший етап виконується за традиційною схемою [9], яка передбачає формування сигналів збудження ВСП (1) та управління їх параметрами, програмне підсилення сигналів ВСП (2), компенсацію (за необхідності) сигналу небалансу, аналого-цифрове перетворення сигналів.

Другий етап обробки вихрострумового сигналу призначено для здобуття корисної інформації відносно дефектності контрольованої поверхні і формування діагностичних ознак.

Загальна концепція опрацювання сигналів ВСП ґрунтується на поєднанні дискретного перетворення Гільберта [10, 11], зі статистичними методами обробки характеристик сигналів [12]. Для отримання оцінок параметрів сигналів, що є неперервними у реальному часі, застосування алгоритму «ковзного середнього» з подвійним вікном є найбільш ефективним.

Перше вікно  $W_1[j_k]$  з апертурою  $k$  забезпечує формування поточної вибірки з послідовності (3). Для цієї вибірки обчислюється дискретний гільберт-образ

$$u_H[j_k, \bar{p}_g, r_g] = \mathbf{H}\{u[j_k, \bar{p}_g, r_g]\}, j_k = \overline{j, j+k}, \quad (4)$$

де  $\mathbf{H}\{\cdot\}$  — оператор дискретного перетворення Гільберта.

Послідовності (3) ставиться у відповідність її комплексно значуща аналітична версія  $u[j_k, \bar{p}_g, r_g] + iu_H[j_k, \bar{p}_g, r_g]$ , де  $i = \sqrt{-1}$ , для якої доступні визначенню такі характеристики:

а) дискретна амплітудна характеристика

$$A[j_k, \bar{p}_g, r_g] = \sqrt{u^2[j_k, \bar{p}_g, r_g] + u_H^2[j_k, \bar{p}_g, r_g]}; \quad (5)$$

б) дискретна фазова характеристика

$$\Phi[j_k, \bar{p}_g, r_g] = \arctg \frac{u_H[j_k, \bar{p}_g, r_g]}{u[j_k, \bar{p}_g, r_g]} + \frac{\pi}{2} \left\{ 2 - \text{sign } u_H[j_k, \bar{p}_g, r_g] \left( 1 + \text{sign } u[j_k, \bar{p}_g, r_g] \right) \right\} + 2\pi \mathbf{L} \left[ u[j_k, \bar{p}_g, r_g], u_H[j_k, \bar{p}_g, r_g] \right], \quad (6)$$

де  $\text{sign}$  — знакова функція;  $\mathbf{L}$  — оператор розгортання фазової характеристики за межі інтервалу  $[0, 2\pi)$ ;

в) дискретна частотна характеристика

$$f[j] = \frac{\Phi[j_k, \bar{p}_g, r_g] - \Phi[j_k - 1, \bar{p}_g, r_g]}{2\pi T_d}; \quad (6)$$

г) різниця дискретних фазових характеристик двох послідовностей, наприклад,  $u_1[j_k, \bar{p}_g, r_g]$  (визначена для вимірювального сигналу) і  $u_2[j_k]$  (визначена для опорного сигналу)

$$\Delta\Phi[j_k, \bar{p}_g, r_g] = \Phi_1[j_k, \bar{p}_g, r_g] - \Phi_2[j_k]. \quad (7)$$

Друге вікно  $W_2[j_m]$  з апертурою  $m \ll k$  забезпечує відбір поточних значень дискретних характеристик сигналів, зокрема за послідовністю (7) визначаються нові для ВСК кругові статистичні характеристики [11]: кругове вибіркоче середнє,

дисперсія, довжина результуючого вектора, медіана, мода та ін.

Етап третинного опрацювання передбачає документування та архівацію результатів контролю, класифікацію дефектів, статистичне опрацювання результатів контролю серій однотипних виробів чи їх фрагментів, побудови і візуалізації полів діагностичних ознак у зв'язаній з ОК системі координат і т. і.

**Обговорення отриманих результатів.** Поєднання промислових роботів-маніпуляторів з приладами ВСК в рамках єдиних діагностичних комплексів НК має наступні переваги для дефектоскопії:

- повна автоматизація процесу ВСК та підвищення його продуктивності;
- можливість стабілізації зазору між поверхнею ОК та ВСП;
- підвищення об'єктивності та вірогідності контролю за рахунок усунення людського чинника на всіх стадіях контролю від формування сигналів ВСП до прийняття діагностичних рішень;
- можливість представлення результатів контролю на 3D моделях та отримання відповідних дефектограм (документування результатів контролю);
- можливість прив'язки результатів контролю до точок поверхні виробу в одній системі просторових координат;
- висока точність та повторюваність позиціонування ВСП;
- можливість повторного контролю (або контролю різних однотипних виробів) в точках з незмінними просторовими координатами, що необхідно, наприклад, для реалізації багатопараметричного ВСК;
- можливість адаптації та швидкого переналагоджування комплексу до різних типів ВСП, геометрії ОК та задач контролю.

Розширення можливостей цифрової обробки сигналів ВСП на основі поєднання дискретного перетворення Гільберта та статистичних методів оцінювання характеристик сигналів дозволить підвищити чутливість та вірогідність контролю за рахунок використання нових для ВСК кругових статистик, які визначаються через фазові характеристики сигналів ВСП.

Таким чином, роботизація процесів ВСК дозволяє не тільки збільшити продуктивність неруйнівного контролю, але й підвищити його якісні характеристики.

## Висновки

1. Поєднання можливостей сучасних роботів-маніпуляторів, методів цифрової обробки сигналів і статистичних методів опрацювання результатів вимірювань дозволяє створити

сучасну роботизовану систему ВСК з покращеними технічними характеристиками та якісно новими можливостями, що забезпечують автоматичний неруйнівний контроль виробів зі складною геометрією.

2. Запропоновано ефективну методологію обробки сигналів ВСП, основою якої є використання дискретного перетворення Гільберта у поєднанні із статистичними методами опрацювання характеристик сигналів.

3. Запропонована структура роботизованої системи автоматичного неруйнівного контролю, що дозволяє досягти високих показників продуктивності та достовірності результатів НК виробів зі складною геометрією.

### Список літератури

1. Ключев В. В. (ред.) (2003). *Неразрушающий контроль*. Справочник: в 7 т. Москва, Машиностроение, Т. 2.
2. ДСТУ EN 12084:2005. *Неруйнівний контроль. Контроль вихрострумівий. Загальні вимоги і рекомендації*.
3. Лобанов Л. М., Шаповалов Е. В., Коляда В. А. (2014). Применение современных информационных технологий для решения задач автоматизации технологических процессов. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 4, 52–56.
4. Schwabe M., Maurer A., Koch R. (2010). *Ultrasonic Testing Machines with Robot Mechanics – A New Approach to CFRP Component Testing*. 2nd International Symposium on NDT in Aerospace, Germany.
5. Louviot P., Tachattahte A., Garnier D. (2012). *Robotised UT Transmission NDT of Composite Complex Shaped Parts*. 4th International Symposium on NDT in Aerospace, Berlin (Germany).
6. Попов Е. П., Письменный Г. В. (1990). *Основы робототехники*. Москва, Высшая школа.
7. Юревич Е. И. (2005). *Основы робототехники*. 2-е изд., перераб. и доп., Санкт-Петербург, БВХ-Петербург.
8. Сляднева Н. А. (2008). «РОБОСКОП ВТ-3000» Роботизированный комплекс вихретокового контроля. *Диагностические приборы. Средства и технологии неразрушающего контроля*, 1, 31.
9. Учанін В. М. (2013). *Накладні вихрострумівий перетворювачі подвійного диференціювання*. Львів, СПОЛОН.
10. Тетерко А. Я., Назарчук З. Т. (2004). *Селективна вихрострумівий дефектоскопія*. Львів, Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка НАН України.

11. Куц Ю. В., Щербак Л. М. (2009). *Статистична фазометрія*. Тернопіль, Вид-во Тернопіл. технічного ун-ту імені Івана Пулюя.
12. Бендат Дж., Пирсол А. (1989). *Прикладной анализ случайных данных*. Москва, Мир.

В. В. Долиненко<sup>1</sup>, Е. В. Шаповалов<sup>1</sup>,  
Т. Г. Скуба<sup>1</sup>, В. А. Коляда<sup>1</sup>, Ю. В. Куц<sup>1</sup>,  
Р. М. Галаган<sup>1</sup>, В. В. Карпинский<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины.  
03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11.

E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского».  
03056, г. Киев, просп. Победы, 37.

### РОБОТИЗОВАНА СИСТЕМА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО ВИХРЕТОКОВОГО КОНТРОЛЯ ИЗДЕЛИЙ СО СЛОЖНОЙ ГЕОМЕТРИЕЙ

Выполнен анализ современного состояния разработки автоматизированных и автоматических систем вихретокового неразрушающего контроля изделий со сложной геометрией. Показана необходимость создания адаптивных роботизированных систем, в которых оператор непосредственно не задействован в процессе выполнения контроля. Выполнено обоснование необходимости внедрения новой эффективной методологии обработки сигналов вихревых токов, в которой используется теория дискретного преобразования Гильберта в сочетании с методами теории статистической обработки сигналов. Предложена структурная схема роботизированного комплекса автоматического контроля, который состоит из промышленного робота-манипулятора, координатного стола с несколькими степенями свободы и устройством фиксации объекта контроля, автоматизированной станции с набором вихретоковых преобразователей различных типов, блока датчиков технического зрения, персонального компьютера и электронного блока управления и обработки вихретоковых сигналов. Библиогр. 12, рис. 7.

**Ключевые слова:** автоматический неразрушающий вихретоковый контроль, адаптивный робототехнический комплекс, амплитудная и фазовая характеристики вихретокового сигнала

Надійшла до редакції 19.04.2017

### НОВАЯ КНИГА

Спеціальні способи зварювання: підручник / І. В. Кривцун, В. В. Квасницький, С. Ю. Максимов, Г. В. Єрмолаєв, за заг. ред. академіка НАН України, д-ра техн. наук, професора Б. Є. Патона. – Миколаїв: НУК, 2017. – 348 с.

Викладено спеціальні способи зварювання у твердому стані, плавленням із використанням висококонцентрованих джерел енергії та гібридних технологій, зварювання та споріднених технологій під водою, в космосі і медицині. Широко використано досвід і розробки авторів та сучасні досягнення наукових організацій і підприємств. Призначено для студентів технічних університетів, що вивчають зварювання та споріднені процеси і технології, а також може бути корисним магістрантам, дипломникам, аспірантам, інженерно-технічним працівникам машинобудування та інших галузей.

По питанню придбання підручника звертатись до редакції журналу «Автоматическая сварка».

