

# ЗАСТОСУВАННЯ ПЕРЕТВОРЕННЯ ГІЛЬБЕРТА ДЛЯ АНАЛІЗУ СИГНАЛІВ АВТОМАТИЗОВАНОГО ВИХРОСТРУМОВОГО КОНТРОЛЮ

## Частина 1. Теоретичні аспекти використання перетворення Гільберта у вихрострумівому контролі

**Ю.В. Куц<sup>1</sup>, В.М. Учанін<sup>2</sup>, Ю.Ю. Лисенко<sup>1</sup>, О.Е. Левченко<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37.

E-mail: [y.kuts@ukr.net](mailto:y.kuts@ukr.net)

<sup>2</sup>Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України. 79060, м. Львів, вул. Наукова, 5.

E-mail: [vuchanin@gmail.com](mailto:vuchanin@gmail.com)

Розглянуто методологію опрацювання сигналів вихрострумівому контролю, яка ґрунтується на використанні дискретного перетворення Гільберта та отриманих моделей формування сигналів, розкрито перспективи використання цього перетворення для контролю у статичному та сканувальному режимах. Показано можливість використання дискретного перетворення Гільберта для визначення дискретних амплітудних і фазових характеристик сигналу вихрострумівому перетворювача з метою пошуку нових детермінованих та статистичних характеристик та ознак, що корелюють з різними характеристиками та параметрами об'єкта контролю. Бібліогр. 25, табл. 1, рис. 5.

*Ключові слова:* вихрострумівий неруйнівний контроль, вихрострумівий перетворювач, дискретне перетворення Гільберта, дискретна фазова характеристика сигналу

Вихрострумівий контроль (ВСК) має певні переваги порівняно з іншими методами неруйнівного контролю (НК) через високу інформативність, яка пов'язана з чутливістю до низки параметрів об'єкта контролю (ОК), можливість його реалізації за відсутності безпосереднього контакту вихрострумівому перетворювача (ВСП) з поверхнею ОК, високу продуктивність НК та можливість повної або часткової автоматизації операцій контролю [1, 2]. Ефективність ВСК значною мірою залежить від методів опрацювання сигналів ВСП, математичного та алгоритмічно-програмного забезпечення процесу виділення корисної інформації про досліджувані параметри ОК. В перших приладах ВСК для реалізації різних методів виділення корисної інформації – амплітудного, фазового та методу проєкцій – використовувались відповідно амплітудні, фазові та синхронні детектори. До їх складу входять нелінійні елементи та інерційні ланцюги (зокрема, фільтри низької частоти) з частото-залежними елементами, наявність яких призводить до додаткових нелінійних спотворень. Тому перші засоби ВСК були орієнтовані на роботу на одній або декількох фіксованих робочих частотах в статичному (квазістатичному) [3, 4] або модуляційному [4, 5] режимах. Пізніше операції детектування виконувались за допомогою алгоритмів цифрової обробки сигналів, виді-

лення їх квадратурних компонент та розроблення методів інтерпретації годографів сигналів ВСП у комплексній площині [2–4]. З часом було запропоновано низку нових для ВСК методів обробки сигналів ВСП, серед яких успішно розвиваються, зокрема, методи що ґрунтуються на використанні нейромережових технологій [6–8], вейвлет-перетворень [9–10], принципів томографії для тривимірної реконструкції дефектів [11] тощо. Набувають розвитку також методи обробки сигналів ВСП, які збуджуються імпульсним сигналом [12–14]. До кола перспективних методів обробки сигналів ВСП відносяться методи, в основу яких покладено дискретне перетворення Гільберта (ДПГ), які вже використовуються у НК та вимірювальній техніці [15–20]. Проте у ВСК цей метод ще не набув широкого застосування і відповідні методологічні підходи ще не розроблено.

Метою статті є аналіз особливостей обробки сигналів в автоматизованих засобах ВСК на основі аналізу їх фазових і амплітудних характеристик, отриманих за допомогою ДПГ. Розглянуто два варіанти отримання інформації про ОК. Перший можна назвати статичним (або точковим), коли ВСП встановлюють у визначених процедурою контролю точках на поверхні ОК для вимірювання його параметрів. Такий контроль проводять, наприклад, вихрострумівими вимірювачами

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>, Левченко О.Е. – <https://orcid.org/0000-0002-3914-1818>

© Ю.В. Куц, В.М. Учанін, Ю.Ю. Лисенко, О.Е. Левченко, 2021

електропровідності [21] або вихрострумівими товщиномірами [22]. Інший варіант використовують переважно для вихрострумової дефектоскопії, де контроль реалізують механічним скануванням поверхні ОК [23]. За такого контролю характерною є модуляція сигналу ВСП на робочій частоті під час пересування ВСП через зону дефекту з наступною демодуляцією для виділення складових сигналу, пов'язаних з дефектом. Очевидно, що за сканувального ВСК вихідний сигнал залежатиме від швидкості сканування поверхні ОК на відміну від статичного варіанту контролю.

**1. Формування інформаційних сигналів ВСК.** В основу обґрунтування методів та алгоритмів опрацювання інформаційних сигналів ВСК покладено загальні принципи формування сигналів в системі «ВСП–ОК» та їх моделі.

В процесі взаємодії ОК з електромагнітним полем відбувається перенесення інформації про властивості ОК та його матеріалу на параметри та характеристики сигналів ВСК, внаслідок чого вони (функціонально чи кореляційно) стають залежними від параметрів ОК. В цілому на параметри та характеристики сигналів ВСП чинять вплив різні фактори – тип ВСП, форма сигналу збудження, його частота, характеристики матеріалу ОК та його геометрична форма, проміжок (зазор) між ВСП і ОК, розміри і розташування дефектів в ОК, режим контролю тощо. Для спрощення аналізу процесу формування сигналів конкретизуємо певні складові системи. В цій роботі розглядатимемо інформаційні сигнали ВСП трансформаторного типу, який збуджується гармонічною напругою.

*1.1. Модель формування сигналів ВСП у статичному режимі.* Процес формування сигналу ВСП у статичному режимі проілюстровано схематично на рис. 1.

Вихідний сигнал містить чотири складових: напругу холостого ходу  $u_0(t)$ , внесену напругу  $u_{вн}(t, P_{ок})$ , викликану наведеними в ОК вихровими струмами, складову напруги  $u_d(t, p_d)$ , викликану перерозподілом вихрових струмів в ОК внаслідок наявних дефектів, та шумову складову  $n(t)$ , що найчастіше обґрунтовується як реалізація гауссового випадкового процесу з нульовим математичним сподіванням і дисперсією  $\sigma^2$ .

Напруга  $u_{вн}(t, P_{ок})$  формується верхньою гілкою моделі на рис. 1. Коефіцієнт передачі ПН1 ( $k_1 < 1$ ) та фазовий зсув у  $\Phi 1$  ( $-\pi/2 < \varphi < \pi/2$ ) змінюються

під впливом множини параметрів системи ВСП–ОК (електропровідності та магнітної проникності матеріалу ОК, проміжку між ВСП і ОК, форми та геометричних розмірів ОК тощо), які відображені в моделі вектором  $p_{ок}$ . Аналогічно цьому відбувається формування складової  $u_d(t, p_d)$  у третій гілці моделі, що залежить від вектора  $p_d$ . Останній утворений множиною параметрів і характеристик дефекту, до числа яких входять розміри дефектної області ОК, її розташування (з виходом на поверхню чи у приповерхневому шарі), глибина тріщини, її орієнтація відносно ВСП тощо. Для елементів цієї гілки коефіцієнт передачі ПН2  $k_2 \ll k_1$ , а фазовий зсув у  $\Phi 2$  може змінюватись в інтервалі значень  $-\pi/2 < \varphi < \pi/2$ .

Складова  $u_0(t)$  залежить від ряду технологічних параметрів ВСП та його конструктивних особливостей і не залежить від характеристик і параметрів ОК. Ця складова не містить інформації про параметри і характеристики ОК, проте має найбільший рівень і найбільше маскує вплив вихрових струмів ОК на амплітуду і фазу вихідного сигналу. Зазначені вище три складові вихідного сигналу ВСП, у разі збудження ВСП гармонічним сигналом, в загальному виді представляються виразом

$$u(t, p_{ок}, p_d) = u_0(t) + u_{вн}(t, p_{ок}) + u_d(t, p_d) = U(p_{ок}, p_d) \cos [2\pi ft - \varphi(p_{ок}, p_d)]. \quad (1)$$

Механізм маскування інформаційних складових сигналу (1) пояснює наступний приклад. Розглянемо суму двох гармонічних функцій:  $\sin(2\pi ft)$ , що не містить корисної інформації, та  $A_i \sin(2\pi ft + \varphi_i)$ ,  $A_i \ll 1$ , амплітуда і початкова фаза якої є носіями певної інформації. З курсу тригонометрії відомо, що

$$\sin(2\pi ft) + A_i \sin(2\pi ft + \varphi_i) = A \sin(2\pi ft + \varphi), \quad (2)$$

де  $A = \sqrt{1 + A_i^2 + 2A_i \cos \varphi_i}$ ,  $\varphi = \arctg \frac{A_i \sin \varphi_i}{1 + A_i \cos \varphi_i}$  (3)

Для отримання кількісних оцінок покладемо у (3)  $\varphi_i = 0$ ,  $A_i = 0,1$ . Тоді, до прикладу, зменшення  $A_i$  у двічі приводить до зменшення  $A$  всього на  $\sim 4,5\%$ . Суттєво зменшується і діапазон зміни початкової фази: для значення  $A_i = 0,1$  маємо

$$\varphi = \arctg \frac{0,1 \sin \varphi_i}{1 + 0,1 \cos \varphi_i} \ll \varphi_i, \quad (4)$$

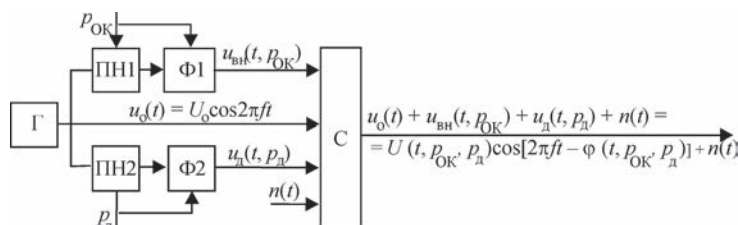


Рис. 1. Модель процесу формування сигналів ВСП у статичному режимі, де:  $\Gamma$  – генератор напруги холостого ходу з робочою частотою  $f$  та амплітудою  $U_0$ ; ПН – подільник напруги;  $\Phi$  – фазообертач; С – суматор

Отже інтервалу значень  $\varphi_i \in (0, 90^\circ)$  відповідає інтервал  $\varphi_i \in (0, 5,71^\circ)$ , тобто майже у 16 разів менший.

Для підвищення чутливості засобів ВСК до параметрів ОК вдаються до вилучення з розгляду неінформативних складових сигналу, що досягається різними шляхами. До прикладу у вихрострумовій дефектоскопії компенсація значної частини складових  $u_0(t)$  та  $u_{\text{вн}}(t, p_{\text{ок}})$  може відбуватись за рахунок диференціального включення вимірювальних навоїв ВСП; інший варіант зменшення впливу неінформативних компонент сигналу полягає у створенні компенсаційної напруги протифазної до цих складових, тобто  $u_{\text{к}}(t) = u_0(t) + u_{\text{вн}}(t, p_{\text{ок}})$ , що реалізується для фіксованих значень вектора  $p_{\text{ок}}$ . Для інших задач ВСК можливий випадок компенсації тільки напруги холостого ходу, тоді обирають  $u_{\text{к}}(t) = -u_0(t)$ .

1.2. *Модель формування сигналів ВСП в режимі сканування.* Процес формування сигналу ВСП у режимі сканування ОК проілюстровано схематично на рис. 2.

У цьому випадку швидкість взаємного руху ВСП і ОК  $v \neq 0$ , тому локалізовані у просторі варіації параметрів системи ВСП-ОК трансформуються у змінювані в часі амплітуду і початкову фазу сигналу. Вихідний сигнал ВСП (без прив'язки до координат контрольованої ділянки ОК) у загальному виді можна представити формулою

$$u(t, p_{\text{ок}}, p_{\text{д}}) = u_0(t) + u_{\text{вн}}(t, p_{\text{ок}}) + u_{\text{д}}(t, p_{\text{д}}) = U(t, p_{\text{ок}}, p_{\text{д}}) \cos [2\pi ft - \varphi(t, p_{\text{ок}}, p_{\text{д}})] \quad (5)$$

Оскільки у виразі (5) на відміну від (1) амплітуда і початкова фаза залежать від часу  $t$ , то їх необхідно розглядати не як параметри, а як амплітудо-часову і фазо-часову функції (характеристики). Отже сигнал (5) уявляє гармонічний сигнал-носії робочої частоти зі складною амплітудною і фазовою модуляціями. Це враховано введенням в модель на рис. 2 амплітудних (АМ) і фазових (ФМ) модуляторів.

Для обґрунтування способів опрацювання таких сигналів важливо оцінити верхню частоту  $f_m$  в спектрі  $U(t, p_{\text{ок}}, p_{\text{д}})$  та  $\varphi(t, p_{\text{ок}}, p_{\text{д}})$ , яка в першу чергу залежить від швидкості сканування  $v$ . До прикладу, якщо  $v = 4$  см/с, використовується ВСП диференціального типу з відстанню між осердями з вимірювальними навоями  $\Lambda = 4$  мм, то можна вважати, що у першому наближенні характеристики сигналу (5) від поверхневої тріщини з розкритвом  $l \ll \Lambda$  змінюються з частотою  $f_T = v/\Lambda = 10$  Гц. Отже ширина смуги частот, в яких зосереджено

спектри  $U(t, p_{\text{ок}}, p_{\text{д}})$  та  $\varphi(t, p_{\text{ок}}, p_{\text{д}})$ , значно менша за робочу частоту  $f$ .

Сигнали ВСК виду (1) та (5) відносяться до класу вузькосмугових, аргументами яких є час, частота та фізико-механічні характеристики та параметри контрольованих матеріалів та об'єктів. Інформаційні сигнали зазвичай спостерігаються на фоні значного адитивного шуму різного походження, який суттєво обмежує чутливість і достовірність контролю. В моделях сигналів ВСК на рис. 1, 2 шумова складова врахована компонентою  $n(t)$ . Вплив шумової складової  $n(t)$ , за низького відношення сигнал/шум  $c/\text{ш} = U(p_{\text{ок}}, p_{\text{д}})/\sigma$ , зменшується за рахунок включення в структуру засобів ВСК частотних фільтрів або за рахунок застосування спеціальних методів опрацювання сигналів, до прикладу синхронних детекторів.

2. **Перспективи використання ДПГ для аналізу сигналів ВСК.** Перетворення Гільберта знакозмінних числових функцій  $u(x) \in L_2$  добре відоме в математиці як інтегральне перетворення з ядром  $1/\pi x$  [20–23]. В якості аргументу  $x$  найчастіше виступає час  $t$ . Це перетворення дає змогу однозначно визначати характеристики таких функцій: амплітудну  $A(t)$ , фазову  $\Phi(t)$  та частотну  $F(t)$ . Його дискретна реалізація у вигляді ДПГ є одним з ефективних методів цифрового опрацювання сигналів у часовій області. Цей метод широко використовується в різних технічних застосуваннях. Незважаючи на те, що проблематиці обробки сигналів ВСК в цілому було приділено значну увагу, питання використання ДПГ для ВСК ще не достатньо повно висвітлені. Розглянемо основні переваги використання алгоритмів обробки сигналів ВСК на основі ДПГ для ВСК. Це:

- висока інформативність через можливість аналізувати всю інформацію, пов'язану з інтегральним впливом параметрів ОК  $p_{\text{ок}}$  та  $p_{\text{д}}$  на характеристики сигнал ВСП на відміну від застосування перетворення Фур'є, коли цей вплив розподіляється між різними частотними компонентами спектру;
- можливість отримати дискретні амплітудну, фазову та частотну характеристики сигналів ВСК як часові функції, задані часовими рядами з кінцевою кількістю вибірок, що надає нові можливості для удосконалення методології обробки сигналів ВСК;
- можливість отримати вибірки характеристик сигналу ВСП значних обсягів, що створює передумови для більш коректного використання ста-

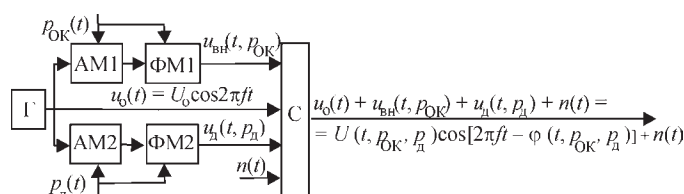


Рис. 2. Модель процесу формування сигналів ВСП в режимі сканування ОК, де: АМ1 і АМ2 – амплітудні модулятори реальної і уявної складових сигналу відповідно; ФМ1 і ФМ2 – фазові модулятори реальної і уявної складових сигналу відповідно

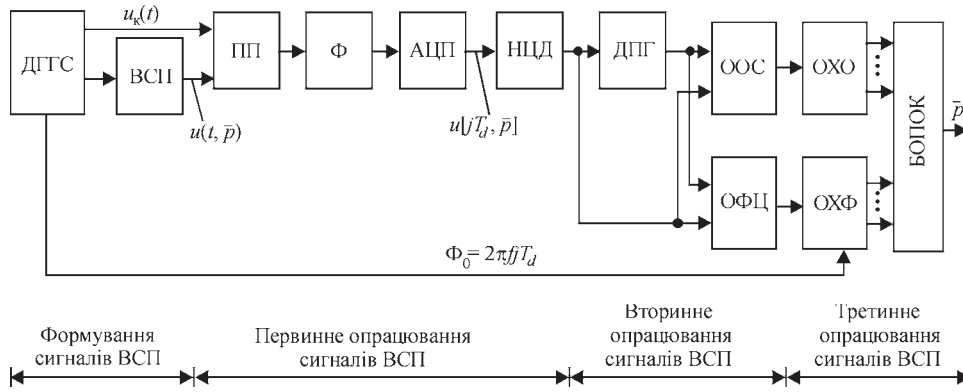


Рис. 3. Структурно-логічна схема формування та опрацювання сигналів ВСК з використанням ДПГ, де ДГГС – двофазний генератор гармонічних сигналів; ПП – підсумовуючий підсилювач; Ф – фільтр; АЦП – аналого-цифровий перетворювач; НЦД – накопичувач цифрових даних; ДПГ – дискретний перетворювач Гільберта; ООС та ОФЦ – обчислювачі обвідної та фази сигналу відповідно; ОХО та ОФХ – обчислювачі характеристик обвідної та фази відповідно; БОПОК – блок оцінювання параметрів ОК

тистичних методів опрацювання амплітудної та фазової характеристик;

- можливість синхронно обчислювати амплітудну та фазову характеристики сигналу ВСП для спільного їх використання для виділення нових інформаційних ознак, що можуть бути ефективними для визначення параметрів та характеристик ОК в різних завданнях ВСК;

- можливість визначати зміни параметрів сигналів ВСП навіть на інтервалах часу, співмірних з періодом сигналу-носія;

- застосування математичного апарату ДПГ до результатів фізичних експериментів дає змогу врахувати той факт, що вихідні сигнали ВСП мають розмірність (найчастіше вольти). Їх можна представити добутком числової функції  $u(t)$  на одиницю вимірювання  $[U]$  відповідної фізичної величини  $U$ .

Оскільки ДПГ має властивість лінійності, а модуль комплексного коефіцієнта перетворювача Гільберта дорівнює одиниці, формування Гільберт-образу сигналів  $\tilde{u}(t)$   $[U]$  відбувається без спотворення міри, за допомогою якої вимірюються значення  $\tilde{u}(t)$   $[U]$ . Нижче в таблиці наведено узагальнені відомості щодо вимірюваних характеристик сигналів, які отримують через ДПГ, їх розмірності та необхідності використання фізичних мір величин.

Отже у випадку застосування ДПГ до сигналів ВСП, які мають розмірність, можна констатувати наступне:

- формування Гільберт-образу сигналів та визначення їх амплітудної характеристики відбувається без спотворення міри, яка використовується для вимірювання сигналу ВСП;
- значення фазової характеристики в радіанах є величиною з розмірністю одиниця, яка визнача-

ється через відношення двох величин одного роду –  $\tilde{u}(t)$   $[U]$  та  $u(t)$   $[U]$  без будь-якого використання окремої міри фазового зсуву сигналів;

- оцінювання значень частотної характеристики з функції  $\Phi(t)$  в Герцах вимагає використання додаткової міри часу.

- можливість мінімізації аналогової частини схеми опрацювання сигналів за рахунок розширення цифрової обробки, що збільшує гнучкість систем ВСК та можливість їх оновлення за рахунок вдосконалення програмного забезпечення.

**3. Зміст та завдання формування та опрацювання сигналів ВСК за допомогою ДПГ.** Узагальнена схема отримання та опрацювання сигналів ВСК з використанням ДПГ подана на рис. 3.

Формування сигналів ВСП виконується наступним чином. ДГГС формує синусоїдний сигнал живлення ВСП робочої частоти  $f$ . ВСП через електромагнітне поле взаємодіє з ОК і формує сигнал ВСП  $u(t, \bar{p})$ . Аргументами цього сигналу є не тільки час  $t$ , але й вектор  $\bar{p} = \bar{p}_{ок} + \bar{p}_д$  параметрів ОК та його можливих дефектів. Це відображує той факт, що щільність вихрових струмів в ОК залежить від електрофізичних характеристик матеріалу ОК, параметрів дефектів, геометричних розмірів ОК тощо. Приклад сигналу ВСП диференціального типу, отриманий в системі ВСК під час сканування поверхні ОК з штучним дефектом у вигляді отвору діаметром 1 мм завглибшки 1,5 мм, наведено на рис. 4 [24].

Наведений на рис. 4 приклад є характерним для сканувальних систем ВСК. Аналіз сигналів такого типу за їх вибірками не завжди дає змогу отримати інформацію, необхідну для формування достовірних висновків щодо якості ОК. Більш конструктивним, на наш погляд, є підхід, що ґрунтується на аналізі характеристик таких сигналів – амплітудної, фазової та частотної. Ці характеристики можуть бути отримані на основі ДПГ. Розглянемо детальніше методологію такої обробки сигналів ВСП, яка виконується у три етапи (рис. 3). На першому етапі сигнал  $u(t, \bar{p})$

**Характеристики сигналів, які отримують через ДПГ**

Функція	Розмірність	Наявність фізичної міри
$u(t)$ $[U]$ , $\tilde{u}(t)$ $[U]$ , $A(t)$ $[U]$	В чи А	міра величини $U$
$\Phi(t)$	радіан	-
$F(t)$	Гц	міра часу $t$

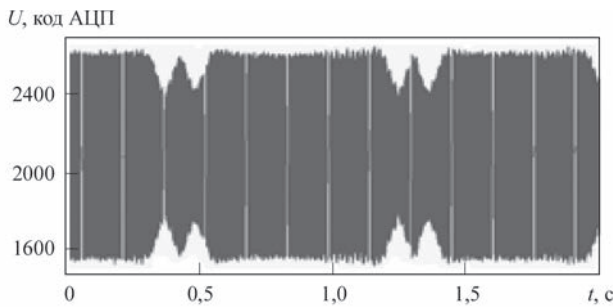


Рис. 4. Фрагмент сигналу ВСП, отриманий в системі ВСК

спочатку додається до сигналу компенсації  $u_k(t)$  в підсумовуючому підсилювачі ПП. Сигнал  $u_k(t)$  формується ДГГС, який забезпечує можливість регулювання його амплітуди і фази. Таке регулювання необхідне для компенсації неінформативної складової сигналу ВСП залежно від задачі і умов контролю. Фільтр  $\Phi$  – це фільтр низьких частот, який використовується перед АЦП для обмеження частотної смуги пропускання сигналу у відповідності з теоремою відліків Найквіста-Шеннона. Його частота зрізу дорівнює половині частоти дискретизації АЦП, тобто  $0,5F_d$ .

Отримувану вибірку цифрового сигналу, що акумулюється у блоці НЦД, можна записати у вигляді:

$$u[j, \bar{p}] = U[j, \bar{p}] \cdot \cos(\Phi[j, \bar{p}]), \quad j = \overline{1, J}, \quad (6)$$

де  $J$  – обсяг вибірки;  $j$  – номер відліку у вибірці.

З виразу (6) видно, що характеристики ТО впливають на дискретні амплітудну  $U[j, \bar{p}]$  та фазову  $\Phi[j, \bar{p}]$  характеристики сигналу ВСП. Хоча взаємозв'язок характеристик ОК з характеристиками сигналу ВСП у явній формі в більшості випадків встановити неможливо, функції амплітуди та фази є носіями інформації про властивості ОК.

Вторинне опрацювання сигналів ВСП включає виконання дискретного перетворення Гільберта сигналів та обчислення їх обвідної та фази, що виконується відповідно блоками ДПГ, ООС та ОФС. ДПГ реалізує оператор  $\mathbf{H}_d$  і забезпечує отримання Гільберт-образу вибірки  $u[j, \bar{p}]$ :  $\tilde{u}[j] = \mathbf{H}_d(u[j])$ ,  $j = \overline{1, J}$ .

Значення дискретних амплітудної та фазової характеристики сигналу для всіх точок вибірки обчислюються в блоках ООС та ОФС за алгоритмами відповідно до [25]:

$$U[j, \bar{p}] = \sqrt{u^2[n] + \tilde{u}^2[j, \bar{p}]}, \quad (7)$$

$$\Phi[j, \bar{p}] = \arctan \frac{\tilde{u}[j, \bar{p}]}{u[j, \bar{p}]} + \frac{\pi}{2} \{ 2 - \text{sign} \tilde{u}[j, \bar{p}] (1 + \text{sign} u[j, \bar{p}]) \} + L(\tilde{u}[j, \bar{p}], u[j, \bar{p}]), \quad (8)$$

де  $L$  – оператор розгортання фазової характеристики сигналу за межі інтервалу  $[0; 2\pi)$ .

ДПГ дає можливість отримати вибірки амплітудної та фазової функцій з частотою  $F_d \gg f$ . Це, по-перше, дає змогу відслідкувати динаміку зміни характеристик сигналу ВСП навіть протягом його періоду, по-друге, застосувати відповідні детерміновані та статистичні методи опрацювання цих функцій.

Третинне опрацювання сигналів ВСП виконується блоками ОХО, ОХФ та БОПОК. Цей етап спрямований на отримання вторинних детермінованих і статистичних характеристик з послідовностей  $U[j, \bar{p}]$  та  $\Phi[j, \bar{p}]$ . Це можуть бути функція амплітудної модуляції сигналу, її параметри, індекс модуляції, функція фазової модуляції, яка визначається як різниця фазових характеристик сигналу ВСП та сигналу збудження

$$\varphi[j, \bar{p}] = \Phi[j, \bar{p}] - 2\pi f T_d \quad (9)$$

та інші.

Основним завданням БОПОК є формування оцінки одного або декількох параметрів ОК залежно від потреб випробування. Тобто він має відокремити інформацію про певну досліджувану властивість ОК. Мова йде про операцію виділення із сигналу ВСП інформаційних ознак, яка в англійській літературі має назву «feature extraction». Вона полягає у виділенні з інформаційного сигналу тільки тих його характеристик, які стосуються досліджуваного параметра ОК з метою встановлення зв'язку (функціонального чи кореляційного) між ними. В цілому, визначення амплітудної і фазової функцій сигналу ВСП окремо одна від одної дає змогу збільшити кількість вхідних аргументів (інформаційних ознак) і забезпечує на цій основі більш широкі можливості для вдосконалення алгоритмів виявлення діагностичних ознак.

Фактично БОПОК має наближено розв'язати обернену задачу вимірювання. У загальному розумінні обернена задача – це тип задачі для визначення параметрів моделі чи об'єкта на основі отриманих на їх виходах даних чи сигналів. Схематично сутність оберненої задачі ВСК зображено на рис. 5.

В загальній постановці проблема розв'язання обернених задач не має рішення. Однак у деяких частинних випадках існує можливість стабілізації частини характеристик та параметрів ОК або обґрунтування оцінки тільки одного або двох його параметрів. У таких випадках можуть бути використані окремі методики розв'язання оберненої задачі вимірювання. Такі методики та алгоритми можуть бути отримані, наприклад, на основі виявлених функціональних чи кореляційних залежностей між характеристиками сигналу та характеристиками ОК, на основі нейромережевих технологій тощо.

Якщо первинна обробка сигналу ВСП виконується за допомогою аналогової технології, то вторинна обробка сигналів ВСП і третинна обробка даних реалізуються в дискретному варіанті. Це забезпечує суттєву гнучкість систем ВСК та можливість їх оновлення за рахунок вдосконалення

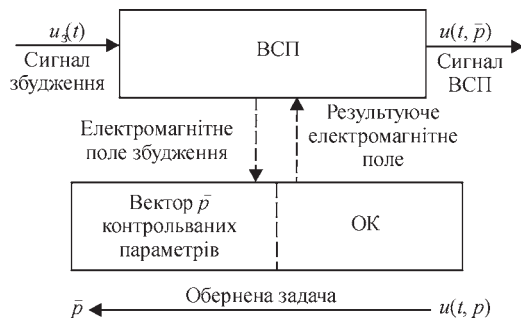


Рис. 5. Схематичне подання процесу розв'язання оберненої задачі ВСК

програмного забезпечення. Крім того, мінімізація обробки аналогового сигналу допомагає зменшити його нелінійні спотворення, що важливо для підвищення надійності та достовірності ВСК.

### Висновки

1. Розроблена на основі ДПГ методологія опрацювання сигналів ВСК дає змогу отримувати дискретні амплітудні, фазові і частотні характеристики сигналів ВСК, які задані часовими рядами, і аналізувати локалізовані в часі модуляції характеристик сигналів ВСК (навіть в межах періоду сигналу-носія), які утворюються під час сканування ОК з неоднорідними структурою, фізико-механічними та геометричними характеристиками.

2. Розглянуто узагальнені моделі процесу формування сигналів ВСП в статичному режимі та режимі сканування ОК, який використовується в засобах автоматизованого ВСК.

3. Розглянуто структурно-логічну схему формування та опрацювання сигналів ВСК з використанням ДПГ, в якій виділено та уточнено зміст первинного, вторинного та третинного етапів опрацювання сигналів ВСК.

4. З'ясовано, що ДПГ для ВСК має певні переваги, які дають змогу:

4.1. отримувати більші обсяги інформації про ОК у цифровій формі і на цій основі розширювати науково-технічну базу проектування та розроблення нових інтелектуальних засобів ВСК з покращеними технічними характеристиками;

4.2. синхронно обчислювати амплітудну та фазову характеристики сигналу ВСП і на цій основі розширити можливості для пошуку нових ознак для контролю та оцінювання параметрів і характеристик ОК;

4.3. за рахунок властивості лінійності ДПГ виконувати перетворення сигналів ВСП без спотворення міри величин, в яких вимірюються ці сигнали;

4.4. мінімізувати аналогову частину опрацювання сигналів за рахунок розширення цифрової обробки, що забезпечує значну гнучкість систем ВСК та можливість їх поліпшення за рахунок модернізації програмного забезпечення.

Використання цих переваг ДПГ відкриває нові перспективи для удосконалення методології обробки сигналів ВСК.

### Список літератури

1. McMaster, R.C., McIntire, P. (1986) *Nondestructive Testing Handbook. Vol. 4: Electromagnetic Testing (Eddy current, Flux leakage and Microwave Nondestructive Testing)*. 2nd edn. USA: American Society for NDT.
2. Учанін В.М. (2013) *Накладні вихрострумкові перетворювачі подвійного диференціювання*. Львів, СПОЛЮМ.
3. Uchanin, V. (2020) Detection of the fatigue cracks initiated near the rivet holes by eddy current inspection techniques. *Transactions on Aerospace Research*, **1**(258), 47–58. DOI: <https://doi.org/10.2478/tar-2020-0010>
4. Hochschild, R. (1960) Modulation analysis – a new instrument technique in eddy current testing. *Nondestructive Testing*, **5**, 323–325.
5. Aks'onova, S., Lyubchenko, A., Uchanin, V. et al. (2005) Detection of defects in the tubes of refrigerators of locomotive diesel engines by the eddy current method. *Materials Science*, **41**(5), 406–409. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-005-0178-7>
6. Udpa, L. and Udpa, S.S. (1990) Eddy current defect characterization using neural networks. *Materials Evaluation*, **48**(4), 342–347. DOI: [https://doi.org/10.1016/0308-9126\(90\)90883-P](https://doi.org/10.1016/0308-9126(90)90883-P)
7. Abdalla, A., Faraj, M., Samsuri, F. et al. (2019) Challenges in improving the performance of eddy current testing: Review. *Measurement and Control*, **52**(1-2), 46–64. DOI: <https://doi.org/10.1177/0020294018801382>
8. Єременко В.С., Переїденко А.В. та Монченко О.В. (2012) Застосування нейромережевих технологій у системах неруйнівного контролю. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **1**, 35–41.
9. Balakrishnan, S., Cacciola, M., Udpa, L. et al. (2012) Development of image fusion methodology using discrete wavelet transform for eddy current images. *NDT&E International*, **51**, 51–57. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2012.06.006>
10. Grman, J., Ravas, R., Syrova, L. (2001) Application of wavelet transformation in eddy current testing. *Measurement Science Review*, **1**(1), 21–24. DOI: <https://doi.org/10.1109/IMTC.2001.928846>
11. Вертій О.О., Учанін В.М. (2021) Тривимірна візуалізація виявлених дефектів методами вихрострумової обчислювальної томографії. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, **2**, 7–13. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2021.02.01>
12. Tian, G.Y., Sophian, A. (2005) Defect classification using a new feature for pulsed eddy current sensors. *NDT&E International*, **38**, 77–82. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2004.06.001>
13. Kuts, Y., Lysenko, Y., Dugin, A. et al. (2016) Analysis of an eddy-current transducer with impulsive excitation in the nondestructive testing of cylindrical objects. *Materials Science*, **52**(3), 431–437. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-016-9975-4>
14. Lysenko, I., Eremenko, V., Kuts, Yu. et al. (2020) Advanced signal processing methods for inspection of aircraft structural materials. *Transactions on Aerospace Research*, **2**(259), 27–35. DOI: <https://doi.org/10.2478/tar-2020-0008>
15. Сул ов Є.Ф., Єременко В.С., Протасов А.Г., Павленко Ж.О. (2016) Використання перетворення Гільберта для отримання додаткових інформативних ознак при імпульсному імпедансному контролі композиційних матеріалів. *Наукові Вісти НТУУ «КПІ»*, **1**, 117–123. DOI: <https://doi.org/10.20535/1810-0546.2016.1.59042>
16. Eremenko, V., Suslov, E., Protasov, A., Lysenko, I. (2016) Using Hilbert transform for signal processing in mechanical impedance analysis. *19th World Conference on Non-Destructive Testing. Germany, 13–17 June*. Available at: <https://www.ndt.net/search/docs.php?id=19783> (Accessed: 12 August 2021).
17. Javorskyj, I., Yuzefovych, R., Matsko, I., Kurapov, P. (2021) Hilbert transform of a periodically non-stationary random signal: Low-frequency modulation. *Digital Signal Processing*, **116**(103113). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dsp.2021.103113>.
18. Куц Ю.В., Щербак Л.М. (2004) Застосування перетворення Гільберта у фазометрії. *Технологические системы*, **2**, 50–55.
19. Лайонс Р. (2006) *Цифровая обработка сигналов*. 2-е изд. Москва, Бином-Пресс.
20. Куц Ю.В., Лысенко Ю.Ю. (2011) Применение преобразования Гильберта для анализа сигналов вихретоковой дефектоскопии. *Научные Известия на НТСМ*, **121**, 22–24.

21. Учанін В.М., Осташ О.П., Бичков С.А. та ін. (2021) Вихрострумний моніторинг деградації алюмінієвих сплавів під час тривалої експлуатації авіаційної техніки. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, **1**, 3–10. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2021.01.01>
22. Teterko, A., Uchanin, V., Gutnik, V. (2014) Improvement of the accuracy of eddy-current testing of the electric conductivity of materials and the thickness of dielectric coatings of the shells. *Materials Science*, **6**, 857–865. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-014-9684-9>.
23. Учанін В.М. (2018) Пропозиції щодо вдосконалення класифікації вихрострумних перетворювачів. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **2**, 68–74. DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/tdnk2018.02.10>
24. Долиненко В.В., Куц Ю.В., Шаповалов Є.В. та ін. (2017) Роботизована система неруйнівного вихрострумного контролю виробів зі складною геометрією. *Автоматическая сварка*, **5-6**(764), 60–67. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2017.06.10>
25. Куц Ю.В., Щербак Л.М. (2009) *Статистична фазометрія*. Тернопіль, Вид-во Терн. держ. техн. ун-ту ім. Івана Пулюя.
11. Vertiy, O.O., Uchanin, V.N. (2021) Three-dimensional visualization of the detected defects by eddy current computing tomography. *Tekh. Diahnost. ta Neruiniv. Kontrol*, **2**, 7–13 [in Ukrainian]. doi: <https://doi.org/10.37434/tdnk2021.02.01>
12. Tian, G.Y., Sophian, A. (2005) Defect classification using a new feature for pulsed eddy current sensors. *NDT&E Int.*, **38**, 77–82. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2004.06.001>
13. Kuts, Y., Lysenko, Y., Dugin, A. et al. (2016) Analysis of an eddy-current transducer with impulsive excitation in the non-destructive testing of cylindrical objects. *Mater. Sci.*, **52**(3), 431–437. doi: <https://doi.org/10.1007/s11003-016-9975-4>
14. Lysenko, I., Eremenko, V., Kuts, Yu., Protasov, A., Uchanin, V. (2020) Advanced signal processing methods for inspection of aircraft structural materials. *Transact. on Aerospace Research*, **2**(259), 27–35. doi: <https://doi.org/10.2478/tar-2020-0008>
15. Zhulov, E.F., Eremenko, V.S., Protasov, A.G., Pavlenko, S.O. (2016) Application of Hilbert transform for obtaining additional informative characteristics at pulsed impedance control of composite materials. *Naukovi Visti NTUU KPI*, **1**, 117–123 [in Ukrainian]. doi: <https://doi.org/10.20535/1810-0546.2016.1.59042>
16. Eremenko, V., Suslov, E., Protasov, A., Lysenko, I. (2016) Using Hilbert transform for signal processing in mechanical impedance analysis. In: *Proc. of 19<sup>th</sup> World Conf. on Non-Destructive Testing* (Germany, 13–17 June). <https://www.ndt.net/search/docs.php3?id=19783>
17. Javorskyj, I., Yuzefovych, R., Matsko, I., Kurapov, P. (2021) Hilbert transform of a periodically non-stationary random signal: Low-frequency modulation. *Digital Signal Processing*, **116**(103113). doi: <https://doi.org/10.1016/j.dsp.2021.103113>
18. Kuts, Yu.V., Shcherbak, L.M. (2004) Application of Hilbert transform in phasometry. *Tekhnologicheskie Sistemy*, **2**, 50–55 [in Ukrainian].
19. Lyons, R. (2006) *Digital signal processing. 2<sup>nd</sup> Ed. Moscow, Binom-Press* [in Russian].
20. Kuts, Yu.V., Lysenko, Yu.Yu. (2011) Application of Hilbert transform for analysis of eddy current detection signals. *Nauchnye Izvestiya na NTSM*, **121**, 22–24 [in Russian].
21. Uchanin, V.M., Ostash, O.P., Bychkov, S.A. et al. (2021) Eddy current monitoring of aluminium alloy degradation during long-term operation of aircraft. *Tekh. Diahnost. ta Neruiniv. Kontrol*, **1**, 3–10 [in Ukrainian]. doi: <https://doi.org/10.37434/tdnk2021.01.01>
22. Teterko, A., Uchanin, V. and Gutnik, V. Improvement of the accuracy of eddy-current testing of the electric conductivity of materials and the thickness of dielectric coatings of the shells. *Mater. Sci.*, **6**, 857–865. doi: <https://doi.org/10.1007/s11003-014-9684-9>
23. Uchanin, V.M. (2018) Propositions on improvement of the classification of eddy current transducers. *Tekh. Diahnost. i Nerazrush. Kontrol*, **2**, 68–74 [in Ukrainian]. doi: <http://dx.doi.org/10.15407/tdnk2018.02.10>
24. Dolinenko, V.V., Kuts, Yu.V., Shapovalov, E.V. et al. (2017) Robotic system of non-destructive eddy-current testing of complex geometry products. *The Paton Welding J.*, **5-6**(764), 60–67. doi: <https://doi.org/10.15407/as2017.06.10>
25. Kuts, Yu.V., Shcherbak, L.M. (2009) *Statistical phasometry*. Ternopil. Vyd-vo DTU [in Ukrainian].

References

APPLICATION OF HILBERT TRANSFORM FOR ANALYSIS OF SIGNALS OF AUTOMATED EDDY CURRENT INSPECTION

Part 1. Theoretical aspects of Hilbert transformation application at eddy current inspection

Yu.V. Kuts<sup>1</sup>, V.M. Uchanin<sup>2</sup>, Yu.Yu. Lysenko<sup>1</sup>, O.E. Levchenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». 37 Peremohy Ave., 03056, Kyiv, E-mail: y.kuts@ukr.net

<sup>2</sup>G.V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of NASU. 5 Naukova Str., 79060, Lviv, Ukraine. E-mail: vuchanin@gmail.com

A methodology of processing signals of eddy current inspection is considered, which is based on application of discrete Hilbert transform and obtained models of signal formation, prospects of application of this transformation in the static and scanning modes were opened. The possibility is shown of application of discrete Hilbert transform for determination of discrete amplitude and phase characteristics of the signal from eddy current transducer, in order to search for new deterministic and statistic characteristics, which correlate with different characteristics and parameters of the object of control. 25 Ref., 1 Tabl, 5 Fig.

Keywords: eddy current nondestructive testing, eddy current transducer, discrete Hilbert transform, discrete phase characteristic of the signal