

ЗАСТОСУВАННЯ ПЕРЕТВОРЕННЯ ГІЛЬБЕРТА ДЛЯ АНАЛІЗУ СИГНАЛІВ АВТОМАТИЗОВАНОГО ВИХРОСТРУМОВОГО КОНТРОЛЮ

Частина 2. Отримання вторинних діагностичних ознак та приклади реалізації

Ю.В. Куц¹, В.М. Учанін², Ю.Ю. Лисенко¹, В.Ф. Петрик¹, О.Е. Левченко¹, Г.А. Богдан¹

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

E-mail: y.kuts@ukr.net

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

E-mail: vuchanin@gmail.com

У першій частині статті було показано, що дискретне перетворення Гільберта сигналів вихрострумowego контролю дає змогу отримувати вибірки дискретних характеристик цих сигналів. У другій частині розглядається використання цих даних для отримання детермінованих і статистичних характеристик – законів модуляції амплітуди та фази сигналів і кругових статистик, які отримують з різниці фазових характеристик сигналів. Стаття присвячена дослідженню застосування фазових методів обробки сигналів вихрострумowych перетворювачів, що ґрунтуються на комбінації дискретного перетворення Гільберта та методів детермінованого і статистичного вимірювання фази. Наведено приклади використання вторинних діагностичних ознак, отриманих за фазовою характеристикою сигналів, для вирішення задач автоматизованого вихрострумowego контролю. Розроблено експериментальну діагностичну систему вихрострумowego контролю, яка використовує частоту власних коливань сигналу перетворювача в якості інформативного параметру. Запропонована система передбачає використання перетворювачів в коливальному режимі як абсолютного типу, так і перетворювачів подвійного диференціювання. Наведено аналіз експериментальних результатів та отримані за запропонованою методикою залежності при виявленні дефектів та визначенні товщини діелектричного покриття. Бібліогр.10, табл. 1, рис. 11.

Ключові слова: вихрострумований неруйнівний контроль, дискретне перетворення Гільберта, фазова характеристика сигналу

У першій частині статті [1] було розглянуто особливості та переваги методології опрацювання сигналів вихрострумowego контролю, яка ґрунтується на використанні дискретного перетворення Гільберта (ДПГ). Перелік розглянутих питань включав: моделі формування сигналів вихрострумowego контролю (ВСК), особливості використання ДПГ для аналізу сигналів ВСК, структурно-логічну схему формування та опрацювання сигналів ВСК з використанням ДПГ, алгоритми отримання дискретних амплітудної та фазової характеристик сигналів вихрострумowych перетворювачів (ВСП). Було також відзначено, що ДПГ дає змогу отримувати більші обсяги вимірювальної інформації про об'єкти контролю (ОК) у цифровій формі та на цій основі виконувати пошук нових ознак сигналів ВСП та їх зв'язків (функціональних та кореляційних) з параметрами та характеристиками ОК. У наведеному в ч. 1 поданні процесу формування та опрацювання сигналів ВСК [1, рис. 3] ці завдання складають зміст третинного етапу опрацювання сигналів ВСП.

На сьогоднішній день в практиці ВСК в якості носіїв інформації про ОК використовують безпосередньо амплітуду, фазу та частоту сигналів

ВСП [2, 3]. Відповідно методи ВСК – амплітудний, фазовий, амплітудно-фазовий та частотний – найчастіше використовують для вимірювання чи контролю одного параметра (наприклад, електропровідності, товщини покриття, товщини шару металу тощо) та заглушення дії іншого перешкоджаючого фактора (найчастіше коливань зазору між ВСП і ОК). У таких випадках вдається досить легко встановити зв'язок між параметрами сигналу ВСП та параметрами ОК [4]. У складніших завданнях контролю така залежність може бути прихована.

Пошук нових інформаційних ознак сигналів ВСП дозволить розширити науково-технічну базу проектування та розробити нові інтелектуальні засоби ВСК, що створить перспективу представлення функціональної чи кореляційної залежності між параметрами сигналу ВСП та параметрами ОК не лише з фазою чи амплітудою сигналу, а за їх вторинними характеристиками. У такому випадку підвищити ймовірність контролю можна не за однією характеристикою, а за сукупністю характерних ознак, як детермінованих, так і статистичних, тобто за рахунок повнішого використання інформаційного ресурсу сигналу. Використання

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>, Петрик В.Ф. – <https://orcid.org/0000-0003-2301-0722>, Богдан Г.А. – <https://orcid.org/0000-0001-6745-1509>
© Ю.В. Куц, В.М. Учанін, Ю.Ю. Лисенко, В.Ф. Петрик, О.Е. Левченко, Г.А. Богдан, 2021

тільки амплітуди та фази сигналів ВСП орієнтоване більше на виконання ручного контролю та має певні обмеження на застосування в автоматизованих системах ВСК. Крім того, збільшення інформаційних ознак сигналів ВСП актуалізує пошук нових розв'язань задач багатопараметричного ВСК та способів коректного тлумачення результатів контролю. На підтвердження цього можна привести висновок, зроблений в роботі [5]: не дивлячись на те, що за більш ніж 100-річну історію розвитку ВСК в цій галузі зроблено дуже багато, найцікавіші або найперспективніші відкриття та події нас чекають попереду. Автори цієї роботи вважають, що новий поступ розвитку вихрострумового методу можливий шляхом розроблення складніших методів та алгоритмів обробки сигналів ВСП у поєднанні з новітніми досягненнями електроніки, комп'ютерних технологій та засобів моделювання та обробки сигналів.

Історично так склалось, що амплітудні методи опрацювання сигналів ВСК, які мають простішу апаратну реалізацію та тлумачення, на відміну від фазових були розвинуті краще. Характерними ознаками, що отримують з амплітудних характеристик, є мінімальне та максимальне значення, пікове відхилення, розмах, середнє квадратичне значення, спектральна функція імпульсу, кореляційна функція тощо. Мета статті – дослідження можливостей фазових методів опрацювання сигналів ВСП, які ґрунтуються на поєднанні ДПГ та методів детермінованої та статистичної фазометрії, та використання інформаційних ознак, що отримують за фазовою характеристикою сигналів (ФХС).

1. Постановка задачі. Нехай трансформаторний ВСП збуджується гармонічним сигналом $u_o(t) = U \cos(2\pi ft)$, $t \in T_o$, де U, f – амплітуда та частота сигналу; T_o – часовий інтервал існування сигналу. Вихідний сигнал ВСП відповідає моделі:

$$u(t, p_{ок}, p_d) = U(t, p_{ок}, p_d) \times \cos[2\pi ft - \varphi(t, p_{ок}, p_d)] + u_{ш}(t), t \in T_o, \quad (1)$$

де $U(\cdot)$, $\varphi(\cdot)$ – відповідно амплітудна характеристика (обвідна) та початкова фаза сигналу; $p_{ок}$, p_d – вектори параметрів ОК та дефекту (в подальших викладках для спрощення ці аргументи не вказані); $u_{ш}(t)$ – реалізація Гауссового шумового процесу з нульовим математичним сподіванням та дисперсією σ^2 . Для сигналів $u_o(t)$, $u(t)$ існує перетворення Фур'є. Після аналого-цифрового перетворення ці сигнали представляються вибірками $\{u[j], j = \overline{1, J}\}$, $\{u_o[j], j = \overline{1, J}\}$, де $J = \text{int}(T_o/T_d)$ – обсяг вибірки.

Необхідно розглянути особливості отримання фазової характеристики сигналу ВСП та визначення на її основі вторинних інформаційних ознак для застосування в засобах автоматизованого ВСК, а також навести ряд прикладів їх застосування у ВСК.

2. Методологія отримання дискретної фазової характеристики сигналів ВСП. Методологія отримання та аналізу ФХС ґрунтується на сукупності таких складових: ДПГ, яке дає змогу отримати вибірки фазових (а також частотних та амплітудних) характеристик сигналів для їх наступного аналізу; детермінованого аналізу фазових даних, що дає змогу отримати вторинні детерміновані ознаки, та методів статистичного аналізу фазових даних, що дає можливість отримати ряд кругових статистик (рис. 1).

Реалізацію цієї методології ілюструє її структурно-логічна схема, представлена на рис. 2.

Вибірки сигналів $\{u[j], j = \overline{1, J}\}$, $\{u_o[j], j = \overline{1, J}\}$ проходять безпосередньо та через модулі ДПГ,



Рис. 1. Графічне представлення складових методології отримання та аналізу ФХС

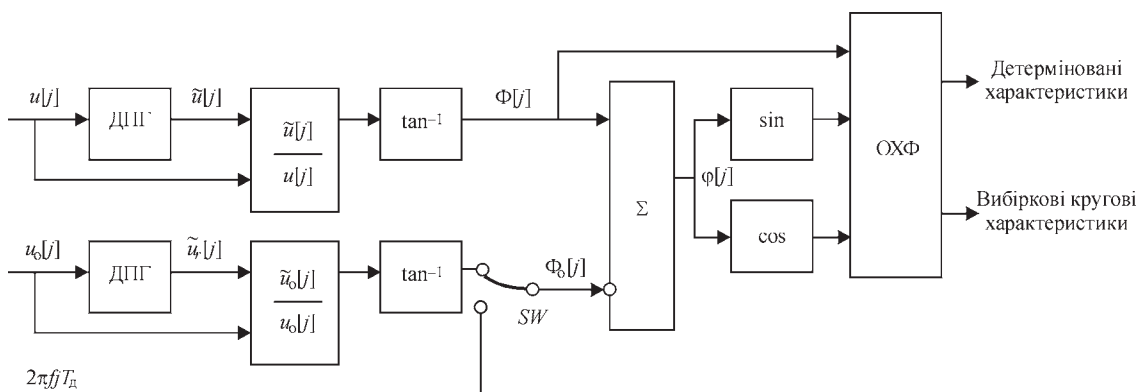


Рис. 2. Структурно-логічна схема реалізації методології отримання дискретних ФХС та вторинних інформаційних ознак на її основі

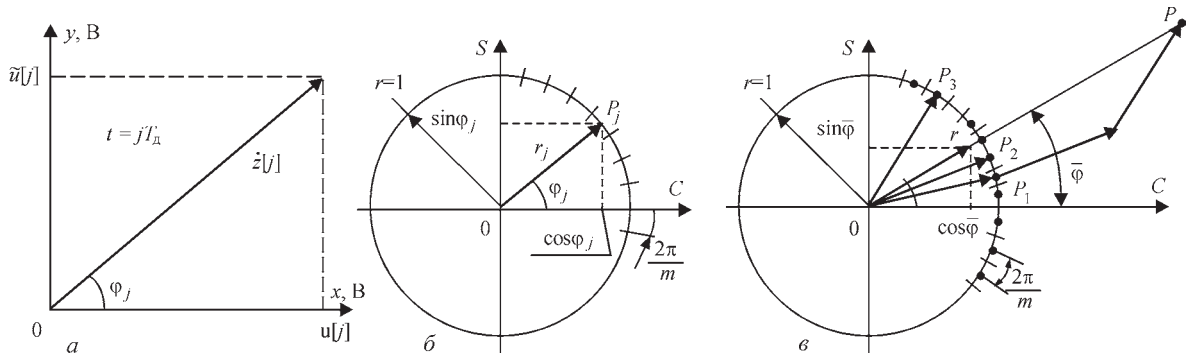


Рис. 3. Графічне представлення процесу опрацювання дискретної ФХС: а – визначення поточного значення $\varphi_j = \Phi[j] \bmod 2\pi$; б – представлення φ_j на одиничному колі; в – підсумовування фазових даних на колі для вибірки обсягу $M = 3$

які формують вибірки Гільберт-образів цих сигналів $\{\hat{u}[j], j = 1, J\}$ на пристрої ділення. Останні обчислюють значення $\{\hat{u}[j]/u[j], j = 1, J\}$ та $\{\hat{u}_o[j]/u_o[j], j = 1, J\}$. Блоки \tan^{-1} реалізують функцію отримання розгорнутої дискретної ФХС [1]. Канал визначення дискретної розгорнутої фази $\{\Phi_o[j], j = 1, J\}$ сигналу збудження ВСП може бути замінений на схемі рис. 2 власне на дискретну фазову характеристику цього сигналу, якщо така є в наявності. Ця можливість існує, наприклад, у випадку цифрового формування сигналу збудження. Переключення різних режимів отримання вибірки $\{\Phi_o[j], j = 1, J\}$ здійснюється за допомогою перемикача SW. Блок Σ забезпечує отримання різниці дискретних ФХС $\varphi[j] = \Phi[j] - \Phi_o[j], j = 1, J$ [1]. Інформаційні ознаки формує обчислювач характеристик фази (ОХФ), на вхід якого надходять вибірки $\{\Phi[j], j = 1, J\}$, а також $\{\sin \varphi[j], j = 1, J\}$ та $\{\cos \varphi[j], j = 1, J\}$. Останні отримують відповідно в блоках «sin» та «cos». Графічне представлення цих процесів дає рис. 3.

На рис. 3, а представлено зображення в Декартових координатах значень $\hat{u}[j]$ та $u[j]$ в момент часу $t = jT_d$ та показане утворення та можливість визначення поточного значення фази сигналу $\varphi_j = \Phi[j] \bmod 2\pi$ в радіанах через обернені тригонометричні функції від $\hat{u}[j]$ та $u[j]$. На рис. 3, а вектор $z[j] = u[j] + i\hat{u}[j]$ – це дискретний аналог аналітичного сигналу ($i = \sqrt{-1}$). Кожному оберту $z[j]$ відповідає збільшення фази сигналу на 2π . Зазвичай приймається умова, що позитивному відліку фази відповідає обертання $z[j]$ в напрямку проти ходу стрілки годинника. Безперервне спостереження за фазою сигналу $z[j]$ дає змогу отримати розгорнуту дискретну фазу $\Phi[j]$ аналізованого сигналу $u[j]$.

На рис. 3, б показано відображення значення φ_j на колі радіуса $r = 1$ (одиничному колі), якому відповідає точка кола P_j . Зручність такого відображення полягає в тому, що Декартові координати точки P_j визначаються як $(\cos \varphi_j, \sin \varphi_j)$. У випадку застосування цифрового способу вимірювання все коло розбивається на m інтервалів величиною $2\pi/m$.

На рис. 3, в наведено графічне представлення процесу усереднення фазових даних на одиничному колі. Результируючий вектор $\mathbf{r} = |\mathbf{r}| \cdot e^{i\bar{\varphi}}$ містить інформацію як про середню фазу $\bar{\varphi}$, так і про розкид окремих відліків фази відносно $\bar{\varphi}$. Зі збільшенням розкиду зменшується значення $|\mathbf{r}|$.

Одиничне коло як область представлення напрямків на площині використовується в статистичному аналізі кутових даних. Спорідненість математичних об'єктів кутових та фазових вимірювань та однакові одиниці вимірювання цих величин дає підстави для використання методів статистичного аналізу випадкових кутів на площині [6, 7] в аналізі результатів фазових вимірювань.

3. Отримання вторинних інформаційних ознак з дискретних ФХС. У практиці ВСК довгий час найбільш уживаними були інформаційні ознаки, що отримувались за амплітудою сигналів – функція амплітудної модуляції сигналу, амплітуда сигналу, точки перетину сигналом певного рівня тощо [2, 3]. Такий підхід не вимагав застосування складних технічних рішень.

Чому ми звернули увагу на використання фазової характеристики? Відповідь на це питання міститься у особливостях фази сигналу, а саме:

- фаза є неенергетичним параметром сигналу;
- фаза сигналу як інформаційний параметр стійка до впливу шумів;
- природною мірою фази є величина 2π , яка не залежить від амплітуди сигналу;
- значення 2π може бути відтворено обчислювальними методами з високою точністю незалежно від місця та часу проведення експериментів.

Застосування ДПГ дає змогу більш повно використати інформаційний ресурс ФХС і визначити з неї ряд вторинних детермінованих та статистичних інформаційних ознак. Перелік найбільш характерних з них наведено на рис. 4.

Що стосується детермінованих характеристик, то їх більша частина отримується за алгоритмами, наведеними у ч. 1:

- нерозгорнута фаза сигналу – формула (8) за виключенням оператора \mathbf{L} ;
- розгорнута фаза сигналу – формула (8);

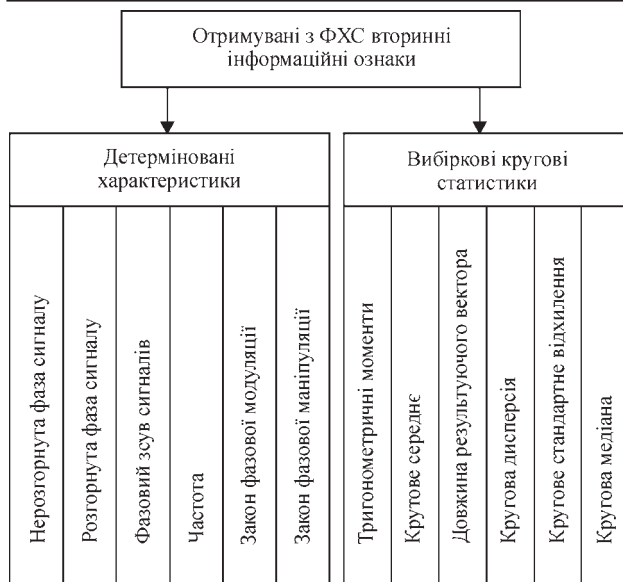


Рис. 4. Найхарактерніші вторинні детерміновані та статистичні інформаційні ознаки сигналів ВСП, які можуть бути отримані з їх ФХС

• фазовий зсув сигналів, закони фазової модуляції та маніпуляції – формула (9).

У ряді завдань ВСК актуальним є вимірювання миттєвої частоти сигналів. Якщо відношення $c/\text{ш} \gg 1$, миттєва частота в дискретні моменти часу може бути визначена безпосередньо з дискретної розгорнутої фази за рівнянням:

$$f[j, \bar{p}] = \frac{\Phi[j, \bar{p}] - \Phi[j-1, \bar{p}]}{2\pi T_d}, \quad 1 \leq j \leq J-1 \quad (2)$$

Якщо сигнал ВСК є гармонічним, його миттєва фаза описується лінійною функцією. Графік такої функції наведено на рис. 5, а, де ϕ_0 – початкова фаза сигналу.

Якщо сигнал ВСП синусоїдної форми спостерігається на фоні шуму, з метою підвищення точності визначення його частоти може бути виконано за трендом фазової характеристики, що отримують методами регресійного аналізу [8, 9].

У разі нелінійної функціональної залежності фази від часу, навіть у межах одного сигнального циклу, її визначення необхідно узгодити із самим визначенням частоти: для циклічних процесів частота визначається як кількість циклів за одиницю

часу. Запропоновано визначати «миттєву» частоту як обернену до поточного значення періоду T величину, тобто як $f = T^{-1}$, а період визначати за стабільною мірою фази 2π , що відповідає одному періоду сигналу $u(t)$. Метод полягає у ковзному обробленні ФХС вікном з апертурою 2π та визначенні інтервалів часу, впродовж яких фаза змінюється на величину 2π :

$$T(t_2) = \lim_{\Phi(t_2) - \Phi(t_1) \rightarrow 2\pi} (t_2 - t_1) \quad (3)$$

За дії шумів більш стійкими вторинними ознаками є статистичні ознаки. Якщо методи статистичного аналізу амплітудних характеристик сигналів широко відомі та мають багато технічних застосувань, то методи статистичного опрацювання фазових характеристик сигналів ще не набули належного поширення в технологіях ВСК.

За умови дії шумів, що супроводжують процес отримання сигналів ВСП, значення фазових зсувів сигналів $\phi[j, \bar{p}]$ [1] треба розглядати як реалізації випадкової кутової величини. Отже до них можуть бути застосовані методи статистичного аналізу результатів кутових спостережень і відповідні статистики. Загальні питання цього розділу математичної статистики викладено в [6, 7]. В цих роботах розглянуто різні аспекти статистичного аналізу кутових даних: основні поняття та кругові моделі, вибіркові кругові статистики, фундаментальні теореми для розподілених на колі кутів, розподіли ймовірності випадкових кутів тощо.

Для статистичного аналізу результатів фазових вимірювань природним є використання так званих кругових статистик – вибіркового кругового середнього, вибіркової кругової дисперсії, результуючої довжини вектора (r -статистики) та ін. Оскільки ці статистики ще не набули достатнього поширення в практиці ВСК, нижче викладено їх стислий огляд.

Вхідними даними для отримання вибірових кругових статистик є вибірка фазових зсувів сигналів $(\phi_1, \dots, \phi_j, \dots, \phi_M)$, $\phi_j \in [0, 2\pi)$ обсягу M . Ця вибірка розглядається як реалізація вектора випадкових фазових зсувів, всі елементи якого мають однакову безперервну щільність розподілу

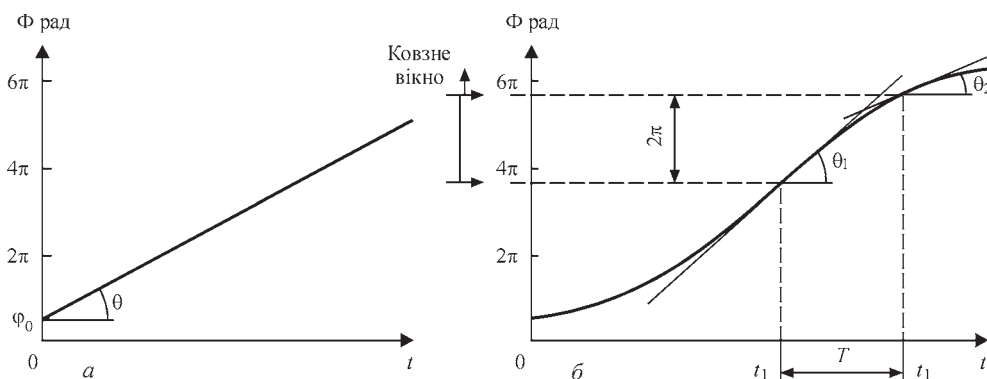


Рис. 5. Визначення миттєвої частоти за лінійною (а) та нелінійною (б) ФХС

Вибіркові кругові статистики, отримані з вибірки обсягу M

Найменування статистичної характеристики	Зміст, математичний запис
Вибіркове кругове середнє статистики кутів	$\bar{\varphi} = \arctg(S/C) + 0,5\pi\{2 - (\text{sign } S) \times [1 + \text{sign } C]\}$ $C = M^{-1} \sum_{j=1}^M \cos \varphi_j, S = M^{-1} \sum_{j=1}^M \sin \varphi_j$
Вибіркова середня довжина результуючого вектора (r-статистика)	$r = f_1(\alpha) = \sqrt{S^2 + C^2}$
Вибіркова кругова дисперсія статистики кутів	$V = 1 - r$
Кругове стандартне відхилення статистики кутів	$\sigma = \sqrt{-2 \ln(1 - V)}; V = 1 - \exp(-0,5\sigma^2)$
Вибіркова кругова медіана статистики кутів	Це кут, якому відповідає точка кола P, для якої діаметр PQ ділить значення вибірки кутів навпіл, і в околі P спостерігається максимальна концентрація значень вибірки
Вибіркова мода статистики кутів	Це кут, якому відповідає точка кола і в околі якої спостерігається максимальна концентрація значень статистики

ймовірностей $p(x)$. Для такої вибірки розглядаються наступні вибіркові кругові характеристики.

Вибірковий тригонометричний момент порядку u і відносно напрямку $\alpha \in [0, 2\pi)$ (або відносно певної початкової фази):

$$f_u(\alpha) = M^{-1} \sum_{j=1}^M e^{iu(\varphi_j - \alpha)} = a_u(\alpha) + ib_u(\alpha) = r_u(\alpha) e^{im_u(\alpha)}, \quad (4)$$

де $r_u(\alpha)$, $m_u(\alpha)$ – відповідно модуль та аргумент $f_u(\alpha)$; u – ціле число.

Функція (4) є комплексно значною. Послідовність вибіркових тригонометричних моментів утворює вибіркову характеристичну функцію.

Вибіркові косинусний та синусний моменти порядку u і відносно напрямку $\alpha \in [0, 2\pi)$

$$a_u(\alpha) = M^{-1} \sum_{j=1}^M \cos[u(\varphi_j - \alpha)],$$

$$b_u(\alpha) = M^{-1} \sum_{j=1}^M \sin[u(\varphi_j - \alpha)] \quad (5)$$

Найменування та зміст інших важливих для ВСК вибіркових кругових статистик наведено в таблиці.

Дві перші з наведених в таблиці характеристик отримують з вибіркового тригонометричного моменту першого порядку: $\bar{\varphi} = \arg(f_1(0))$, а $r = |f_1(\alpha)|$, де $\alpha \in [0, 2\pi]$.

Ці та інші характеристики можуть бути використані як для пошуку нових діагностичних ознак (features extraction), так і в якості вхідних даних для класифікаторів дефектів, зокрема, на основі нейронних мереж. Нижче наведено приклади використання вторинних діагностичних ознак, визначених з використанням ФХС стосовно імпульсного ВСНК у коливальному режимі.

4. Приклади використання отриманих з ФХС вторинних діагностичних ознак у ВСК.

4.1. Імпульсна вихрострумова дефектоскопія з коливальним режимом роботи ВСП.

Експериментальні дослідження було проведено з використанням стандартних зразків ВСО-1, ВСО-2 та ВСП подвійного диференціювання з імпульсним збудженням. На рис. 6, а приведено стенд діагностичної системи ВСК експериментального макету. Зразки мали вигляд пластин товщиною 5 мм, довжиною 100 мм, шириною 30 мм (рис. 6, б). ВСО-1 зі сталі марки Ст.20, а ВСО-2 – з алюмінієвого сплаву Д16. На одній з поверхонь обох зразків

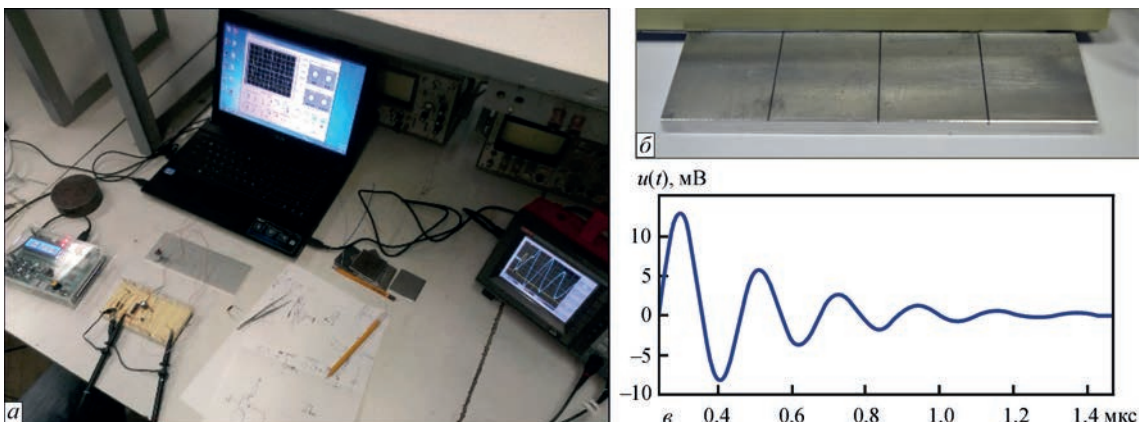


Рис. 6. Експериментальні дослідження імпульсної вихрострумової дефектоскопії: а – діагностична система ВСК; б – об’єкт дослідження; в – фрагмент сигналу ВСП

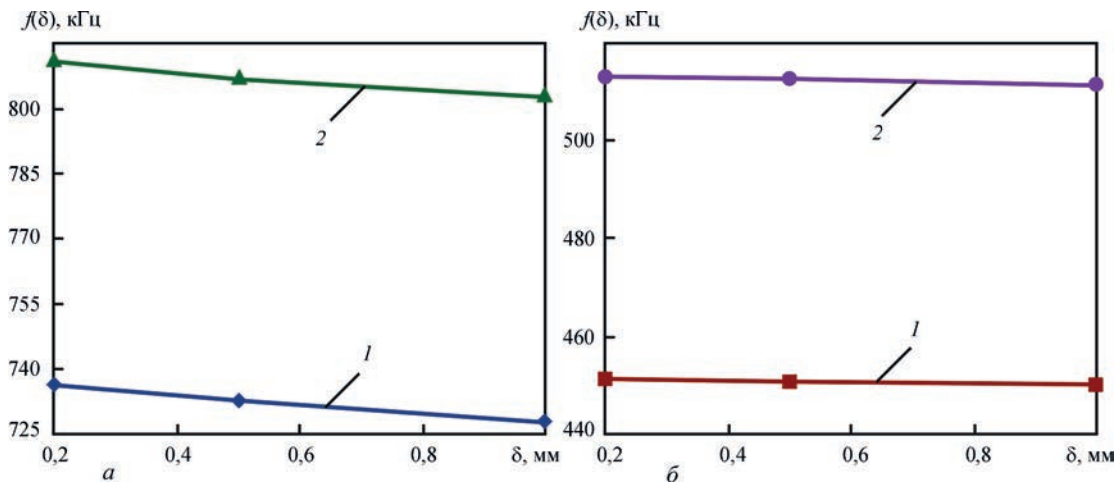


Рис. 7. Залежності частоти сигналу ВСП від глибини тріщини в різних матеріалах: 1 – зразок VCO-1; 2 – зразок VCO-2

з рівним інтервалом знаходились три штучні дефекти, що імітують поверхневі тріщини, з розкритвом 0,2 мм глибиною $\delta = \{0,2; 0,5; 1,0\}$ мм. Шорсткість робочої поверхні не перевищувала 1,6 мкм. Фрагмент вихідного сигналу ВСП наведено на рис. 6, в.

У процесі обробки та аналізу інформаційних сигналів ВСП оцінювались частота власних коливань сигналу ВСП та її зміна в залежності від глибини тріщини δ . Результати визначення зміни частоти власних коливань сигналу ВСП з імпульсним збудженням як функції від глибини тріщини в ОК приведені на рис. 7. Зразку VCO-1 відповідають залежності $f(\delta)$ у випадку, коли початкова частота власних коливань сигналу ВСП дорівнює 667 кГц та 434 кГц на рис. 7, а, б (крива 1) відповідно. Зразку VCO-2 – крива 2 на рис. 7, а для частоти 787 кГц та рис. 7, б – 507 кГц. З аналізу цих графіків видно, що залежність $f(\delta)$ наближена до лінійної та має тенденцію до зменшення зі збільшенням δ . У цьому випадку чутливість до δ покращується зі збільшенням частоти сигналу ВСП: для зразка VCO-2 чутливість становить $S_f(f = 787 \text{ кГц}) = 83,6 \text{ Гц/мм}$ та $S_f(f = 507 \text{ кГц}) = 28,8 \text{ Гц/мм}$.

4.2. Визначення товщини шару діелектричного покриття на електропровідній основі. Для експериментальних досліджень в якості ОК використовувались пластини з алюмінію Д16, бронзи БрО7Ф0.2 та сталі Ст-30 (питома електропровідність $\gamma_{\text{ал}} = 4,87 \cdot 10^7 \text{ См/м}$, $\gamma_{\text{бр}} = 2,75 \cdot 10^7 \text{ См/м}$, $\gamma_{\text{ст}} = 1,45 \cdot 10^6 \text{ См/м}$). Метою дослідження було виявлення та аналіз впливу різної товщини h діелектричного покриття ОК із зазначених матеріалів на такий інформативний параметр інформаційного сигналу ВСП, як частота.

Збуджуюча котушка ($W_1 = 80$) накладного ВСП отримувала імпульсний сигнал від генератора струму (сила струму $I = 5 \text{ мА}$, період повторювання $T_n = 125 \cdot 10^{-6} \text{ с}$, тривалість $\tau = 62,4 \cdot 10^{-6} \text{ с}$). Сигнал вимірювальної котушки ($W_2 = 420$) ВСП підсилювався та оцифровувався, в результаті чого отримувались вибірки сигналу $u[j]$, $j = 1, \dots, 10000$.

Дискретизація сигналу виконувалася з періодом $T_d = 4 \cdot 10^{-9} \text{ с}$. На рис. 8 наведено зображення розробленого лабораторного стенду.

На рис. 9 (крива 1 – зразок з сталі, крива 2 – з бронзи, крива 3 – з алюмінію) наведено графіки функцій $f(h)$, що показують залежність частоти власних коливань сигналу ВСП від зміни товщини покриття на різних матеріалах ОК. Приведені експериментальні криві свідчать про можливість використання цього інформативного параметру для оцінювання товщини покриття в досліджуваних умовах тільки для немагнітних матеріалів (див.

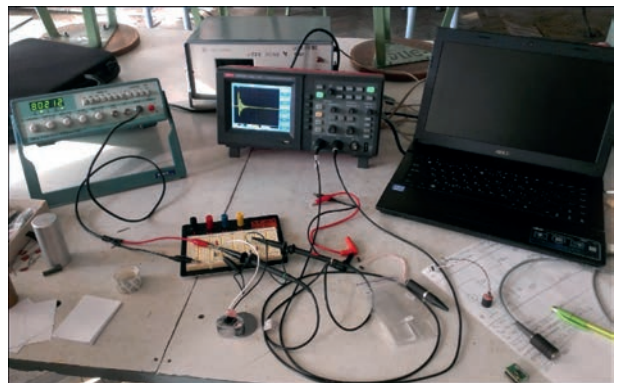


Рис. 8. Експериментальний стенд системи імпульсного ВСК

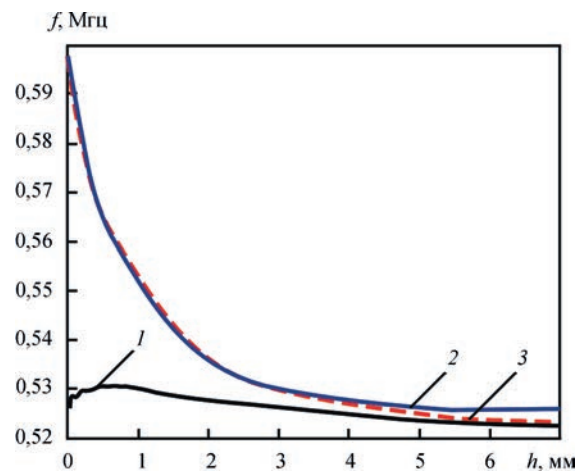


Рис. 9. Залежності частоти від товщини покриття для різних матеріалів ОК

криві для бронзи та алюмінію). У цьому випадку чутливість до товщини покриття збільшується зі зменшенням її величини.

4.3. Оцінювання параметрів об'єктів циліндричної форми з електропровідних немагнітних матеріалів. Експерименти проводились на зразках циліндричної форми з електропровідних немагнітних матеріалів. В якості ОК було використано дві серії циліндричних зразків з алюмінію Д16 та бронзи БрО7Ф0.2 (питома електропровідність відповідно $\gamma_{ал} = 4,87 \cdot 10^7$ См/м, $\gamma_{бр} = 2,75 \cdot 10^7$ См/м) з діаметрами 34...35 мм (рис. 10).

Для досліджень використано прохідний перетворювач трансформаторного типу з кількістю витків збуджуючої котушки $W_1 = 176$ та виміральної – $W_2 = 870$. На ВСП подавався імпульсний сигнал з генератора амплітудою 15 В, періодом повторення $T_n = 10^{-2}$ с та тривалістю $\tau = 10^{-3}$ с. Параметром оцінювання був діаметр d зразків.

На рис. 11 представлено графік залежності $f(d)$ для алюмінієвих (крива 1) і бронзових (крива 2) зразків, а також наведено їх лінійні тренди (криві 3 і 4 відповідно). Аналіз цих залежностей вказує на те, що зміна діаметра зразків призводить до зміни частоти сигналу ВСП, яка має наближений до лінійного характер.

Аналіз залежностей свідчить про можливість використання частоти власних коливань сигналу ВСП в якості інформативного параметру для сортування матеріалів за електропровідністю, а також

його використання для оцінювання значень діаметру ОК за умови відповідного калібрування системи імпульсного вихрострумовевого контролю.

Висновки

Використання методики опрацювання сигналів ВСК на основі поєднання ДПГ та методів детермінованої та статистичної фазометрії дає змогу включити в технологію ВСК нові інформаційні ознаки, які отримують з фазової характеристики сигналів ВСП.

Запропонована методологія обробки сигналів ВСП може підвищити завадостійкість ВСК, що дозволить збільшити його достовірність. Крім того, отримані з фазової характеристики сигналів вторинні ознаки є зручнішими для використання з огляду можливостей автоматизації ВСК, на відміну від представлення результатів контролю у вигляді годографів.

Проведені експериментальні дослідження показали можливість використання отриманих з ФХС вторинних діагностичних ознак в задачах дефектоскопії, контролю діаметру об'єктів з електропровідних немагнітних матеріалів, оцінювання товщини діелектричного покриття на електропровідній основі.

Подальше дослідження буде спрямовано на виділення з сигналу ВСП нових інформаційних ознак та аналіз їх кореляційних зв'язків з характеристиками ОК, а також на дослідження переваг запропонованої методології порівняно з традиційними підходами.

Дана робота виконана в рамках договору про співпрацю між КПІ ім. Ігоря Сікорського та Фізико-механічним інститутом ім. Г.В. Карпенка НАН України.

Список літератури

1. Куц Ю.В., Учанін В.М., Лисенко Ю.Ю., Левченко О.Е. (2021) Застосування перетворення Гільберта для аналізу сигналів автоматизованого вихрострумовевого контролю. Частина 1. Теоретичні аспекти використання перетворення Гільберта у вихрострумове контролі. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, 3, 7–13. DOI: doi: <https://doi.org/10.37434/tdnk2021.03.01>
2. 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.
3. Клюев В.В., Соснин Ф.Р., Ковалев А.В. и др. (2005) *Неразрушающий контроль и диагностика: справочник*. Москва, Машиностроение.
4. Тетерко А.Я., Назарчук, З.Т. (2004) *Селективна вихрострумовева дефектоскопія*. Львів, НАН України, ФМІ ім. Г.В. Карпенка.
5. Upda, S., Upda, L. (2004) *Eddy current testing—Are we at the limits? Proc. of 16th World Conference on Non-Destructive Testing, Canada, Montreal, August/September 2004* (<http://www.ndt.net>).
6. Mardia, K.V., Jupp, P.E. (2000) *Directional Statistics*. England, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester.
7. Fisher, N.I. (2000) *Statistical Analysis of Circular Data*. England, Cambridge University Press.



Рис 10. Об'єкт дослідження

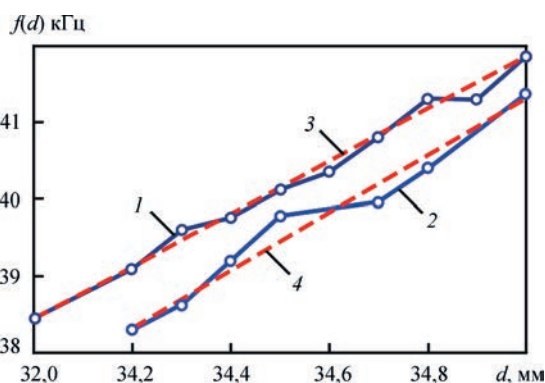


Рис. 11. Залежності частоти власних коливань від діаметра ОК

8. Cameron, S. (2005) *Making Regression Analysis More Useful, Econometrics*. Maidenhead, McGraw Hill Higher Education.
9. Дрейпер Н., Сміт Г. (2016) *Прикладний регресійний аналіз: 3-є видання. Вид-во «Вільямс»*.
10. Lysenko, I., Eremenko, V., Kuts, Y. 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>
3. Klyuev, V.V., Sosnin, F.R., Kovalev, A.V. et al. (2005) *Non-destructive testing and diagnostics: Refer. book*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
4. Teterko, A.Ya., Nazarchuk, Z.T. (2004) *Selective eddy current flaw detection*. Lviv, PMI [in Ukrainian].
5. Udpa, S., Udpa, L. (2004) Eddy current testing – Are we at the limits? In: *Proc. of 16th World Conf. on Non-Destructive Testing, Canada, Montreal, August/September 2004* (<http://www.ndt.net>).
6. Mardia, K.V., Jupp, P.E. (2000) *Directional Statistics, England: John Wiley & Sons, Ltd, Chichester*.
7. Fisher, N.I. (2000) *Statistical Analysis of Circular Data*. England: Cambridge University Press.
8. Cameron, S. (2005) *Making Regression Analysis More Useful, Econometrics*. Maidenhead: McGraw Hill Higher Education.
9. Draper, N., Smith, G. (2016) *Applied regression analysis. 3rd Ed*. Moscow, Williams [in Russian].
10. Lysenko, I., Eremenko, V., Kuts, Y., 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>

References

1. Kuts, Yu.V., Uchanin, V.M., Lysenko, Yu.Yu., Levchenko, O.E. (2021) Application of Hilbert transform for analysis of signals of automated eddy current inspection. Pt 1: Theoretical aspects of Hilbert transformation application at eddy current inspection. *Tekh. Diahnost. ta Neruiniv. Kontrol*, **3**, 7–13 [in Ukrainian] doi: <https://doi.org/10.37434/tdnk2021.03.01>
2. (1986) *Nondestructive Testing Handbook. Vol. 4: Electromagnetic Testing (Eddy current, Flux Leakage and Microwave Nondestructive Testing)*. Ed. by R.C. McMaster, P. McIntire, 2nd ed. USA: American Society for NDT.

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

Part 2. Deriving secondary diagnostic features and examples of realization

Yu.V. Kuts¹, V.M. Uchanin², Yu.Yu. Lysenko¹, V.F. Petryk¹, O.E. Levchenko¹, G.A. Bogdan¹

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

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

In the first part of the paper it was shown that the discrete Hilbert transform of eddy current control signals allows obtaining samples of discrete characteristics of these signals. The second part deals with application of these data to derive the deterministic and statistical characteristics – the laws of modulation of the amplitude and phase of the signals and round robin statistics, obtained from the difference in phase characteristics of the signals. The paper is devoted to investigations of application of phase methods of processing signals of eddy current transducers, which are based on a combination of discrete Hilbert transform and methods of deterministic and statistical measurement of the phase. The paper gives examples of application of secondary diagnostic features, derived by phase characteristic of the signals to solve the problems of automated eddy current control. An experimental diagnostic system of eddy current control was developed, which uses the frequency of natural oscillations of the transducer signal as an information parameter. The proposed system envisages transducer application in the oscillation mode, both of absolute type and double differentiation transducers. Analysis of experimental results is given and dependencies were derived by the proposed procedure at defect detection and determination of the thicknesses of the dielectric coating. 10 Ref., 1 Tabl., 11 Fig.

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

Надійшла до редакції 08.11.2021

XI МІЖНАРОДНА КОНФЕРЕНЦІЯ

Математичне моделювання та інформаційні технології в зварюванні та споріднених процесах

12–16 вересня 2022 р., Одеса, готель «Аркадія»

Голова програмного комітету академік І.В. Кривцун



Національна академія наук України
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України
Міжнародна Асоціація «Зварювання»

Для участі в конференції необхідно заповнити реєстраційну картку і разом з тезами доповіді направити її в Оргкомітет до 19 серпня 2022 р. До початку конференції будуть видані тези доповідей.

Збірники праць десяти попередніх конференцій «Математичне моделювання та інформаційні технології в зварюванні та споріднених процесах» знаходяться у відкритому доступі на сайті: <https://patonpublishinghouse.com/ukr/proceedings/mmw>

Контрольні дати

Надання заявок на участь та тез доповідей	до 19.08.2022 р.
Розсилка другого інформаційного повідомлення та підтвердження участі	до 05.09.2022 р.
Оплата реєстраційного внеску	до 12.09.2022 р.

Оргкомітет

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України
вул. Казимира Малевича 11,
м. Київ, 03150, Україна
тел./факс: (38044) 200-82-77, 205-22-26
E-mail: journal@paton.kiev.ua
<http://pwi-scientists.com/ukr/mmi2022>

