

В.С. Хандецький, В.В. Герасимов

## ВПЛИВ ВІКОННИХ ФУНКЦІЙ НА РОЗПІЗНАВАННЯ СИГНАЛІВ В ДЕФЕКТОСКОПІЇ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ

*Досліджено вплив віконних функцій при спектральних перетвореннях у дефектоскопії композитних матеріалів на розрізняюваність сигналів. Застосування віконної функції Гауса приводить до підвищення чутливості спектрального методу ідентифікації до коротких поверхневих тріщин на фоні шуму.*

*Ключові слова: віконна функція Хемінга, віконна функція Гауса, вихорострумний датчик, поверхнева тріщина, інформаційний параметр ідентифікації.*

**Постановка проблеми.** Композиційні матеріали знайшли широке застосування у сучасному машинобудуванні, насамперед в ракетоталітакобудуванні завдяки їх унікальним фізико-механічним властивостям. Серед них матеріали з вуглецевими армуючими волокнами займають особливе місце [1]. Неметалеві композити з вуглецевими армуючими волокнами відрізняє мала питома електрична провідність, зміни цієї величини в об'ємі та на поверхні матеріалу внаслідок неконтрольованих змін коефіцієнту армування та температури в ході технологічного процесу виготовлення виробів, наявність значної шорсткості поверхні. Ці обставини обумовлюють появу значної випадкової компоненти в сигналах дефектоскопії, що формуються при скануванні поверхні виробів з цих матеріалів. Одним з найбільш небезпечних дефектів у виробках з вуглепластиків є поверхневі тріщини, які можуть утворюватися внаслідок температурних градієнтів під час виготовлення виробів, а також механічних навантажень при їх експлуатації.

Властивості композитних матеріалів обмежують вибір фізичних методів їх неруйнівного контролю, наприклад, оптичні та радіохвильові методи контролю не застосовуються при дефектоскопії тріщин. Одним з найбільш перспективних методів для дефектоскопії по-

верхневих тріщин в таких композитах є метод вихорострумової дефектоскопії, який відрізняється безконтактністю вимірювань [2]. Вдосконалення вихорострумових методів неруйнівного контролю є можливим на базі широкого застосування комп'ютерних методів обробки вимірюваних сигналів. Застосування методів спектрального аналізу до сигналів, які виміряні за допомогою вихорострумового датчика може підвищити ефективність розв'язку задачі виявлення дефекту типу «тріщина» на фоні структурного шуму, який обумовлений текстурою самого вуглепластика, та відрізнити його від заважаючого сигналу відводу-перекосу датчика відносно поверхні композиту.

Для розв'язку цієї задачі нами використовується ідентифікаційний параметр, що формується як відношення суми амплітуд спектральних компонент, які належать визначеному діапазону, до суми всіх спектральних компонент, що є значущими для даного типу дефекту [3]. Спектральні компоненти розраховуються за допомогою дискретного перетворення Фур'є.

**Метою даної роботи** є дослідження впливу віконних функцій при спектральних перетвореннях в процесі дефектоскопії композитних матеріалів на розрізнюваність сигналів дефектів і заважаючого фактору, викривлених впливом високоінтенсивного шуму.

**Аналіз останніх публікацій.** Ґрунтуючись на результатах досліджень сигналу відхилення накладного вихорострумового датчика від нормалі до поверхні композитного матеріалу [4] і моделі модуляційного сигналу поверхневої тріщини [5], проводиться спектральний аналіз наступних сигналів: різниці експонент

$$s_1(x) = e^{-b^2 t^2} - ke^{-2b^2 t^2}, \quad (1)$$

який описує сигнал від поверхневої тріщини, і параболоїди

$$s_2(x) = ct^2 + d, \quad (2)$$

що відповідає сигналу перекосу/відводу вихорострумового датчика відносно поверхні композита.

Ця робота є подальшим розвитком роботи [3], яка передбачає використання спектру сигналів (1) і (2) для їхньої ідентифікації, тобто поділу сигналів від тріщини і сигналів відводу/перекосу датчика на фоні шуму. В даній роботі проводиться дослідження впливу віконних функцій при спектральних перетвореннях на якість ідентифіка-

ції сигналів від поверхневої тріщини та сигналів перекосу/відводу датчика ВСП, що знаходяться під впливом шуму, виникаючим при скануванні шорсткої поверхні композиту.

**Основна частина.** Вихідні дані та алгоритми обробки сигналів в основному були такі ж, як і в роботі [3]. До цього проводилися дослідження, результатом яких була здатність відрізнити сигнал дефекту від сигналу псевдодефекту (відвід/перекіс датчика) з однаковими амплітудами при адитивному впливі гаусовського шуму. У даному випадку необхідно дослідити та оцінити вплив застосування віконних функцій на здатність розрізнення сигналів (1) та (2).

Розглянемо сигнали тріщини і відводу/перекосу датчика без шуму з однаковою амплітудою, що дорівнює 1. Сімейство модуляційних імпульсів (сигналів тріщин), показаних на рис. 1а, характеризує тріщини різної глибини і довжини. Так модуляційний імпульс гаусівського типу є характерним для тріщин з помітними розмірами. У той же час двогорбий імпульс з максимальною величиною провалу є характерним для дефектів малої, у порівнянні з діаметром датчика, довжини.

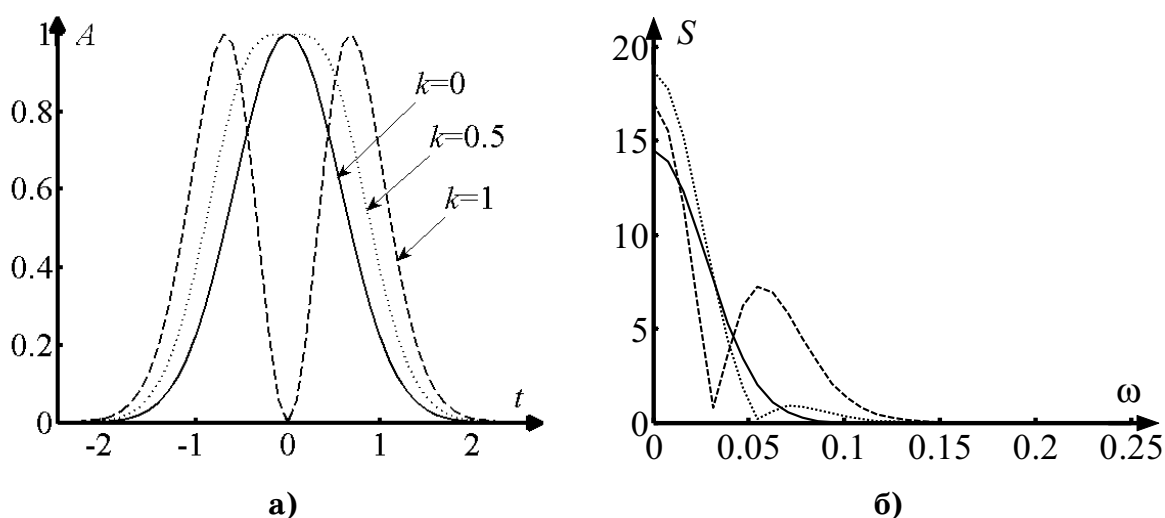


Рисунок 1 — Модуляційні імпульси тріщини і відповідні спектри:

$$s_1(t, 0) \text{ —}, s_1(t, 0.5) \text{ --}, s_1(t, 1) \text{ - -}$$

Аналіз спектрів модуляційних імпульсів тріщин різної довжини (рис. 1б) показав доцільність їх використання для визначення ідентифікаційного коефіцієнту, який характеризує розподіл потужності сигналів в діапазоні частот 0-0.1 (віднормованих на частоту дискретизації). Параметр (коефіцієнт) ідентифікації  $K_h$  є відношенням суми

амплітуд гармонік з 6-ї до 14-ї (перший боковий пелюсток) до суми гармонік з 1-ї до 14-ї (діапазон частот 0-0.1) [3]. Спектр заважаючого сигналу (псевдодефекту) в значній мірі є подібним до спектру модуляційного імпульсу з  $k = 0$ .

Дослідимо вплив віконних функцій на значення параметру ідентифікації  $K_h$ . Для цього виконаємо швидке перетворення Фур'є для сигналу дефекту при різних  $k$  та при різних рівнях шуму із застосуванням віконної функції та без неї.

Враховуючи визначення параметру ідентифікації, доцільно застосовувати вікно, використання якого приводить до незначного розширення головного пелюстка та достатньо ефективного зменшення амплітуди бокових пелюстків за межами визначеного діапазону частот. У спектрах модуляційних імпульсів амплітуди бокових пелюстків, які вже не використовуються для визначення параметру ідентифікації, становлять близько -16 дБ від амплітуди основного пелюстка. Для дослідження було обрано настроюване достатньо універсальне вікно Гауса, характеристики якого залежать від параметру  $\alpha$  [6, 7]:

$$w(k) = e^{-\frac{1}{2} \left( \alpha \frac{k-1-n/2}{n/2} \right)^2}, \quad (3)$$

де  $n$  — довжина вікна,  $k$  — поточна точка вікна. При  $\alpha = 1$  таке вікно забезпечує зменшення амплітуди бокових пелюстків близько -17 дБ і незначне розширення головного пелюстка. Для досліджень було обрано саме таке значення  $\alpha$ .

Для порівняння було обрано вікно Хемінга, яке при дещо більшому розширенні головного пелюстка забезпечує значно більше зменшення амплітуди бокових пелюстків до -42 дБ і має помірне значення максимальної похибки дискретизації [8]. Описується вікно Хемінга наступною формулою:

$$w(n) = 0,54 + 0,46 \cos\left(2\pi \frac{k-1}{n-1}\right). \quad (4)$$

Результати дослідження впливу вищевказаних віконних функцій за наявності шуму на значення параметру ідентифікації наведені на рис. 2. У якості шуму було обрано гаусівський шум, для якого значення стандартного відхилення  $\sigma$  поступово збільшувалось від 0 до 1. Кожний експеримент повторювався 1000 разів.

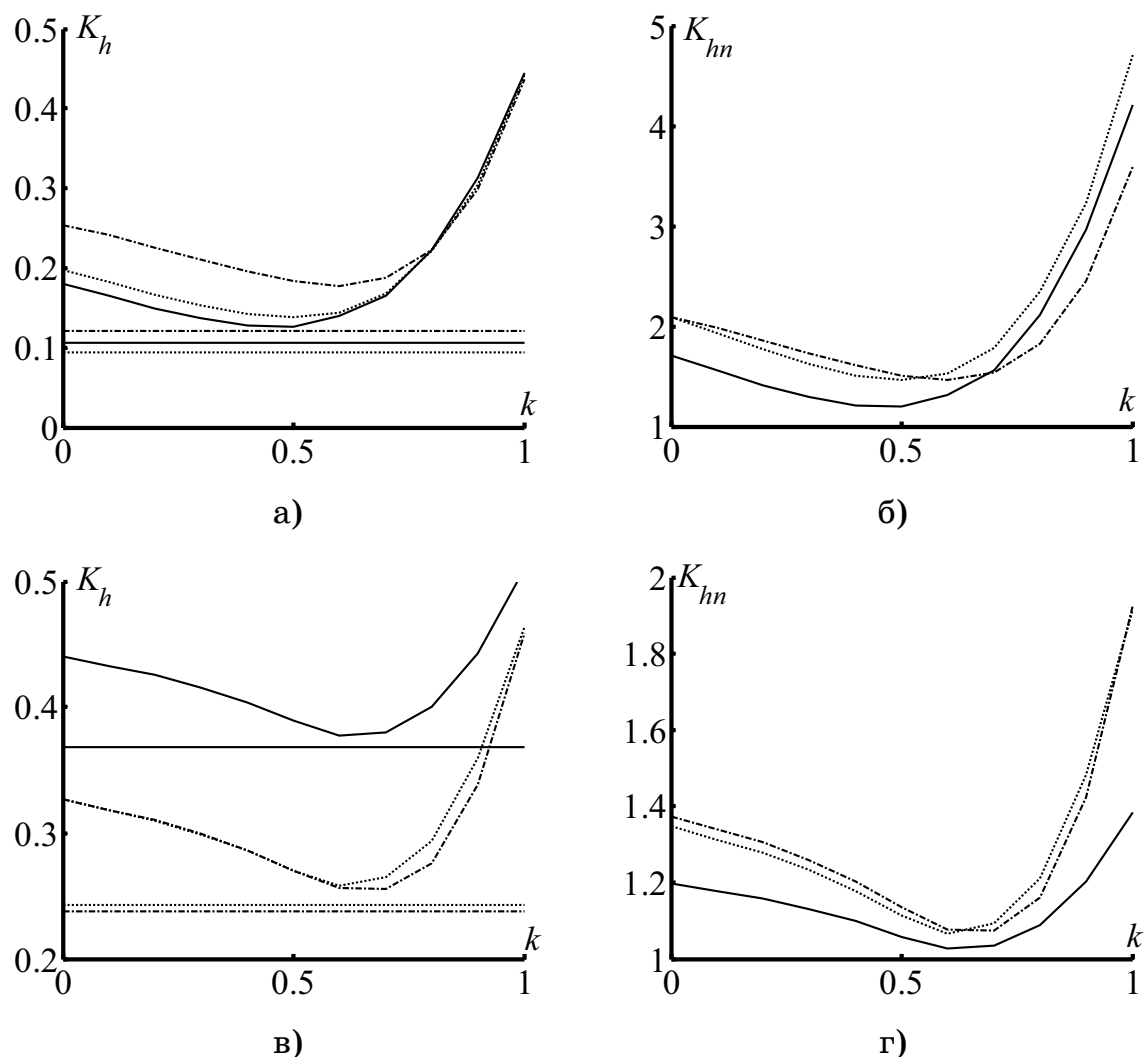


Рисунок 2 — Залежність параметру ідентифікації від параметру  $k$ , що характеризує форму модуляційного імпульсу тріщини, при  $\sigma = 0$  (а, б),  $\sigma = 0.5$  (в, г): — сигнали без віконних функцій; - - вікно Гауса; - — вікно Хемінга

На рис. 2а і 2в константні лінії відповідають сигналу  $s_2$  (2), не константні — відповідно сигналу  $s_1$  (1). На рис. 2б, г для порівняння ефективності віконних функцій значення параметру ідентифікації  $K_h$  для сигналу  $s_1$  були віднормовані на відповідні значення цього коефіцієнту для сигналу  $s_2$  (відводу/перекоосу датчика).

Аналіз отриманих результатів показує, що застосування віконної обробки в цілому покращує розрізнюваність сигналів  $s_1$  та  $s_2$ , особливо у випадку коротких тріщин ( $k \rightarrow 1$ ). Тільки при малих рівнях шуму і при  $k \rightarrow 1$  застосування вікна Хемінга дещо погіршує ситуа-

цію. В інших випадках застосування віконних функцій приводить до покращення результатів.

Крім цього застосування віконної обробки значно зменшує ріст параметру  $K_h$  з ростом інтенсивності шуму. Так, при збільшенні стандартного відхилення шуму з 0 до 0.5 без віконної обробки параметр ідентифікації  $K_h$  для сигналу відводу/перекоосу збільшується приблизно з 0.11 до 0.37, тобто приблизно в 3.5 рази. Після обробки з використанням вікна Хемінга цей параметр з 0.12 зростає лише до 0.24, тобто приблизно в 2 рази, і відповідно для вікна Гауса — з 0.09 до 0.24, тобто приблизно в 2.5 рази. При цьому слід зауважити, що значніше відносне збільшення досліджуваного параметру зі збільшенням рівня шуму для вікна Гауса пояснюється тим, що за відсутності шуму (початкове значення) цей параметр має менше значення, ніж для вікна Хемінга. При подальшому збільшенні рівня шуму ідентифікаційний параметр  $K_h$  для сигналу відводу/перекоосу для вікна Гауса збільшується дещо швидше і при стандартному відхиленні шуму  $\sigma = 1$  має значення 0.37 проти 0.35 для вікна Хемінга. Такий же вплив віконної обробки на параметр  $K_h$  спостерігається для сигналу поверхневої тріщини.

Спробуємо вирішити зворотну задачу — за значенням ідентифікаційного параметру визначити тип сигналу. Наприклад, значення  $K_h \approx 0.4$  за відсутності шуму зі значною вірогідністю відповідає сигналу короткої поверхневої тріщини (рис. 2а). При рівні шуму  $\sigma = 0.5$  без віконної обробки це значення  $K_h$  може уже з певною вірогідністю відповідати як сигналу поверхневої тріщини, так і сигналу відводу/перекоосу (рис. 2в). При застосуванні будь-якої з досліджуваних віконних функцій для перетворення Фур'є при рівні шуму  $\sigma = 0.5$  таке значення  $K_h$  для сигналу/відводу перекоосу практично неможливе (рис. 2в) і з великою вірогідністю відповідає поверхневій тріщині. Таким чином, застосування віконної функції під час перетворення Фур'є дозволяє стабілізувати значення  $K_h$  при коливаннях рівня шуму і зменшити залежність  $K_h$  від амплітуди шуму.

Остання властивість віконної функції стає ще більш важливою, якщо взяти до уваги критичне значення параметру ідентифікації, яке обчислюється за відсутності будь-якого сигналу, тобто для одного шуму. Без віконної обробки це критичне значення дорівнює  $K_{hu} = 0.6475$ , з віконною обробкою (вікно Хемінга) —  $K_{hu} = 0.6548$ . За

умови однакової амплітуди всіх гармонік шуму (білий шум) теоретичне граничне значення  $K_{hu} = 0.643$ . З рис. 2а і 2в видно, що зі збільшенням рівня шуму (від 0 до 0.5) значення ідентифікаційного параметру  $K_h$  для сигналу поверхневої тріщини починає збільшуватись і при  $\sigma = 1$  досягає значення  $K_h = 0.58$  (такий рівень шуму на рисунках не представлено). Якщо обчислювати спектр сигналу з віконною функцією, ідентифікаційний параметр при  $\sigma = 1$  досягає значення  $K_h = 0.51$ . Враховуючи, що  $K_h \approx 0.65$  відповідає чистому шуму, приходимо до висновку, що використання віконної функції підвищує вірогідність виявлення коротких тріщин на фоні значного шуму.

Зведену інформацію по впливу віконних функцій при виконанні перетворення Фур'є представлено на рис. 3. Найтемніша область відповідає значенню віднормованого ідентифікаційного параметру  $K_{hn}$  в діапазоні від 1 до 1.1 для сигналу  $s_1$  (для сигналу  $s_2$  цей параметр дорівнює 1). Чим яскравіша область, тим краще будуть розрізнятися сигнали поверхневих тріщин та відводу/перекоосу. З наведеного рисунку видно, що без віконних функцій найтемніша область займає майже половину площі діаграми ( $\sim 38\%$ ) (рис. 3а). Після використання вікна Гауса зона найгіршої розрізняваності займає менше чверті діаграми ( $\sim 16\%$ ) (рис. 3б). Застосування вікна Хемінга дає приблизно такі ж результати.

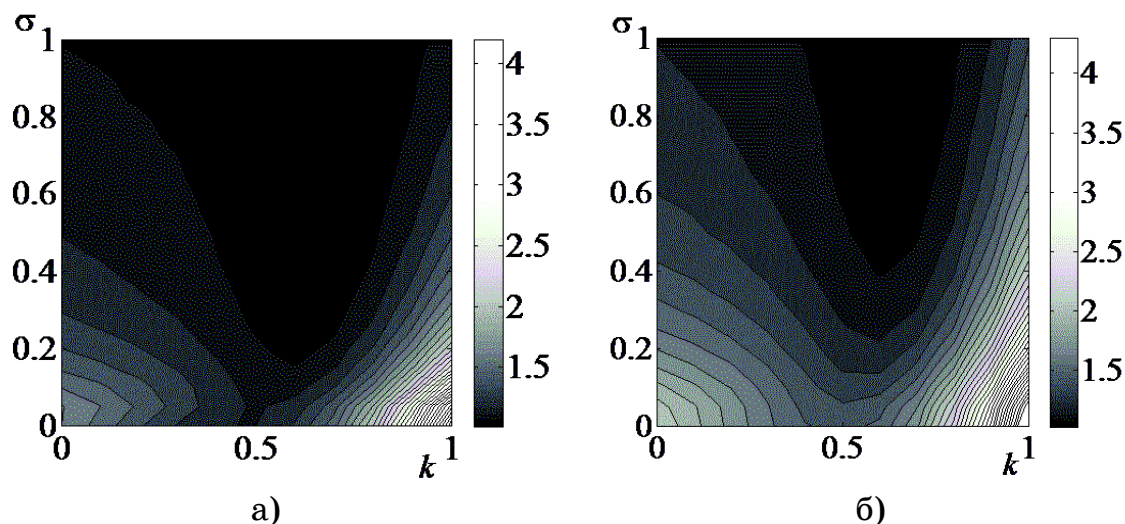


Рисунок 3 — Залежність нормованого параметру ідентифікації від форми модуляційного імпульсу ( $k$ ) та рівня шуму ( $\sigma$ ):

а) без віконної функції; б) з вікном Гауса

**Висновки.** Було досліджено вплив віконних функцій при виконанні перетворення Фур'є на розрізняюваність сигналів поверхневих тріщин та відводу/перекосу вихорострумового датчика. Застосування віконної обробки приводить до:

- покращення розрізняюваності сигналів коротких поверхневих тріщин від сигналів відводу/перекосу датчика на фоні шуму;
- зменшення впливу рівня шуму на значення параметру ідентифікації  $K_h$  і, відповідно, до підвищення чутливості до коротких поверхневих тріщин на фоні шуму.

Слід відзначити, що вікно Гауса при обраному параметрі  $\alpha = 1$ , незначних рівнях шуму і  $k \rightarrow 1$  показало кращі результати, ніж вікно Хемінга. При більших рівнях шуму для забезпечення хороших результатів потрібно параметр  $\alpha$  зменшити до значення близько 0.4, при якому характеристики вікна Гауса приблизно відповідають вікну Хемінга [7]. В цілому вікно Гауса краще підходить для задач спектральної ідентифікації сигналів дефектів завдяки адаптації до рівня шуму за допомогою параметра  $\alpha$ .

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Джур Е. А., Вдовин С. И, Кучма Л. Д. – Технология производства космических ракет: Учебник. – Днепропетровск: Изд-во ДГУ, 1992. – 184 с.
2. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий. Справочник. 2 книги. Кн. 2/Под ред. В. В. Ключева. – М.: Машиностроение, 1986.- 352 с.
3. Хандецкий В. С., Герасимов В. В. Спектральная идентификация сигналов в дефектоскопии композитов с использованием теории статистических испытаний. // Вісник Дніпропетр. ун-ту. Фізика. Радіоелектроніка. 2003. Вип. 10. С. 128-132.
4. Герасимов В. В., Герасимова О. Л. Исследование сигнала перекоса вихре-токового датчика // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. — Вип. 5 (16). — Дніпропетровськ, 2001. — с. 39-41.
5. Беда П. И. Исследование сигналов накладного датчика в зависимости от изменения размеров и расположения дефектов типа трещин. // Дефектоскопия. 1970. № 1. С. 62-67.
6. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов. — СПб.: БХВ-Петербург, 2011. — 768 с.
7. Теория и практика цифровой обработки сигналов. Спектральный анализ на ограниченном интервале времени. Оконные функции [Электронный ресурс] — <http://www.dsplib.ru/content/win/win.html>
8. Бабак В. П., Хандецкий В. С., Шрюфер Е. Обробка сигналів. — Київ: "Либідь", 1999. — 495 с.