

Система неруйнівного контролю композиційних матеріалів авіаційних конструкцій

Антон Переїденко, Василь Роганьков, Євгеній Суслов

Кафедра інформаційно-вимірювальних систем, Національний авіаційний університет, УКРАЇНА, м.Київ, просп.Космонавта Комарова, 1, E-mail: apereedenko@gmail.com

Abstract – This report is devoted to realization system of the automatic NDT of composite materials using the Gilbert transform for detection signals' informative parameters.

Ключові слова – composite materials, nondestructive testing, Gilbert transform, system of the automatic NDT, programming environment LabVIEW 8.5.

I. Вступ

Останніми роками в авіаційній промисловості широкого поширення набули композиційні матеріали. Якщо раніше частка композитів по відношенню до інших конструкційних матеріалів, що використовуються в літальних апаратах була порівняно невелика: з них виконувалися лише окремі елементи планера, то зараз вона наближається до 40% для літаків важкої і 80-90% для малої і надмалої авіації. Таке широке розповсюдження подібних матеріалів привело до необхідності розробки досконаліших методів контролю. Необхідно відзначити, що композит через значні відмінності характеристик його складових має широку номенклатуру можливих дефектів, часто індивідуальну, для кожної з можливих композицій.

Теоретична основа, а також фізичні принципи більшості вживаних сьогодні методик контролю композитів розроблялися в 60-80 роки, коли засоби обробки не дозволяли виконувати комплексний аналіз сигналу із застосуванням різних математичних перетворень. Це привело до того, що основними інформативними параметрами сигналу вибиралися ті, реєстрація яких викликала менше всього ускладнень, а саме: амплітуда при імпульсному збудженні датчика і фаза при безперервному.

Сучасні обчислювальні системи, пристрої збору і обробки сигналів дозволяють реалізувати алгоритми аналізу високої складності, що дає можливість виділяти з інформативних сигналів більшу кількість параметрів, які надалі можна застосовувати як інформативні, підвищуючи тим самим достовірність контролю.

Таким чином, задача розробки і впровадження нових методик обробки інформаційних сигналів датчиків систем неруйнівного контролю є достатньо актуальною.

Дана доповідь присвячена реалізації системи неруйнівного контролю композиційних матеріалів авіаційних конструкцій із застосуванням технологій фірми National Instruments.

II. Основна частина

На сьогоднішній день одним з основних методів експрес контролю є імпедансний. Метод заснований на впливі дефекту багаточислової конструкції на її механічний імпеданс. Механічним імпедансом Z називають комплексне відношення гармонійної (синусоїдальною) збуджуючої сили, що діє на по-

верхні або в точці механічної системи до середньої коливальної швидкості v у напрямі сили: $Z = \frac{F}{v}$.

Механічний імпеданс є комплексною величиною і має активну R і реактивну X складові. Активна складова імпедансу характеризує невідворотні втрати. Останні обумовлені поглинанням в матеріалі системи, втратами енергії в навантаженні і елементах кріплення, а також випромінюванням пружних хвиль в навколишнє середовище. Реактивна складова імпедансу характеризує кінетичну і потенційну енергію, що запасастся і віддається реактивними елементами системи. Реактивними елементами системи є інерційність і пружність. Інерційність пов'язана з накопиченням кінетичної енергії рухомою масою, пружність - з потенційною енергією пружного елемента.

Метод дозволяє виявляти непростежування, розшарування, порушення цілісності сотового заповнювача, а також ряд інших дефектів, що призводять до зміни фізико-математичних характеристик матеріалів. Основними інформативними характеристиками сигналу є, залежно від типу збудження перетворювача, амплітуда або фаза.

Подібний підхід може призвести до значного обмеження числа можливих інформаційних ознак, що свідчать про наявність дефекту. Інформативними параметрами для імпедансного методу, також, можуть бути енергія сигналу, кумулятивна і миттєва фази, частота несучої сигналу. З цього можна зробити висновок, що актуальною залишається задача дослідження методів обробки інформаційних сигналів, які дозволяють виділити частотне і фазове зміщення. Одним з таких методів є перетворення Гільберта.

Система контролю реалізована на базі платформи cDAQ, ключовим елементом якої є 8-слотове шасі cDAQ 9172 з пропускною здатністю до 3,2 Мб/с.

Зв'язок з комп'ютером здійснюється через інтерфейс USB 2.0, що дає можливість використовувати систему як в стаціонарному, так і в мобільному режимах.

До складу системи аналізу сигналу також входять:

- 4-х канальний аналого-цифровий перетворювач NI 9215 (динамічний діапазон $\pm 10V$, розрядність 16 біт, частота дискретизації 100кГц/канал);

- 4-х канальний цифро-аналоговий перетворювач NI 9263 (динамічний діапазон $\pm 10V$, розрядність 16 біт, частота дискретизації 100кГц/канал);

- набір стандартних імпедансних датчиків (Суміщений датчик механічного імпедансу ПАДИ8-с, роздільно-суміщений датчик імпедансу РС-1).

В якості середовища розробки був використаний програмний комплекс LabVIEW 8.5. Програмування в середовищі LabVIEW 8.5 відбувається графічно з використанням мови G, тобто відсутній звичайний

текстовий опис алгоритму на мові програмування високого рівня. Інженеру досить скласти блок-схему алгоритму і внести її до програми.

Система є апаратно-програмним комплексом для виділення та обробки інформативних характеристик сигналів датчиків механічного імпедансу. Середовище LabVIEW дозволило використовувати перетворення Гільберта без істотного ускладнення структури програмного забезпечення.

Функціональна схема системи показана на рис. 1.

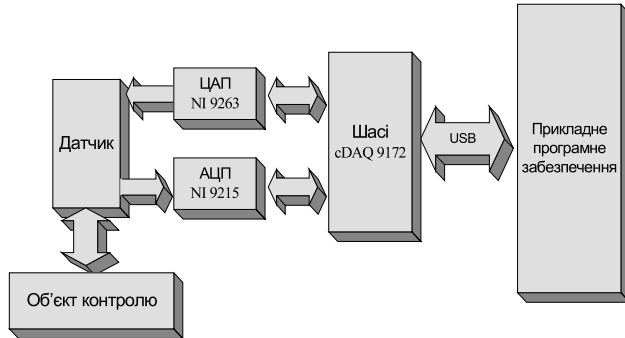


Рис. 1. Функціональна схема системи

В процесі роботи системи з цифро-аналогового перетворювача поступає сигнал збудження датчика імпедансу. Датчик після контакту з об'єктом контролю видає на виході первинний сигнал, який поступає на вхід аналого-цифрового перетворювача, де здійснюється його перетворення у цифровий вигляд. Далі сигнал з аналого-цифрового перетворювача через шасі cDAQ 9172 та інтерфейс USB 2.0 передається до персонального комп'ютера, де з використанням спеціального прикладного програмного забезпечення виконується його подальша обробка і аналіз.

Перетворення Гільберта дійсного сигналу $X(t)$ визначеного у всій часовій області $t \in (-\infty, \infty)$ - це дійсний сигнал

$$\tilde{X}(t) = H[X(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{X(\tau)}{\pi(t-\tau)} d\tau. \quad (1)$$

Сума дійсного сигналу і його гільберт-образу $\tilde{X}(t)$ утворює комплексний аналітичний сигнал

$$Z(t) = X(t) + j\tilde{X}(t). \quad (2)$$

Даний комплексний сигнал можна представити в полярних координатах

$$Z(t) = A(t) \cdot \exp[jQ(t)] \quad (3)$$

де $A(t)$ і $Q(t)$ відповідно, модуль, і аргумент аналітичного сигналу.

Функція $A(t)$ описує обвідну початкового сигналу, а функція $Q(t)$ задає миттєву фазу даного сигналу залежно від часу. Отже, обвідну сигналу, миттєву фазу і миттєву частоту можна визначити наступними співвідношеннями:

$$A(t) = \sqrt{X^2(t) + \tilde{X}^2(t)} \quad (4)$$

$$Q(t) = \arctg \left[\frac{\tilde{X}(t)}{X(t)} \right] \quad (5)$$

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{dQ(t)}{dt} \quad (6)$$

Таким чином, завдяки застосуванню перетворення Гільберта досить просто визначаються обвідна, миттєва фаза і миттєва частота початкового імпульсного сигналу $X(t)$.

Миттєва фаза у виразі (5) визначена на інтервалі $[-\pi/2, \pi/2]$, тому для розрахунку фазової характеристики на інтервалі $[0, 2\pi]$ дане рівняння необхідно перетворити до наступного вигляду

$$Q(t) = \arctg \left[\frac{\tilde{X}(t)}{X(t)} \right] + \frac{\pi}{2} [2 - \text{sign}\tilde{X}(t)(1 + \text{sign}X(t))] \quad (7)$$

Структура програмного забезпечення системи приведена на рис. 2.

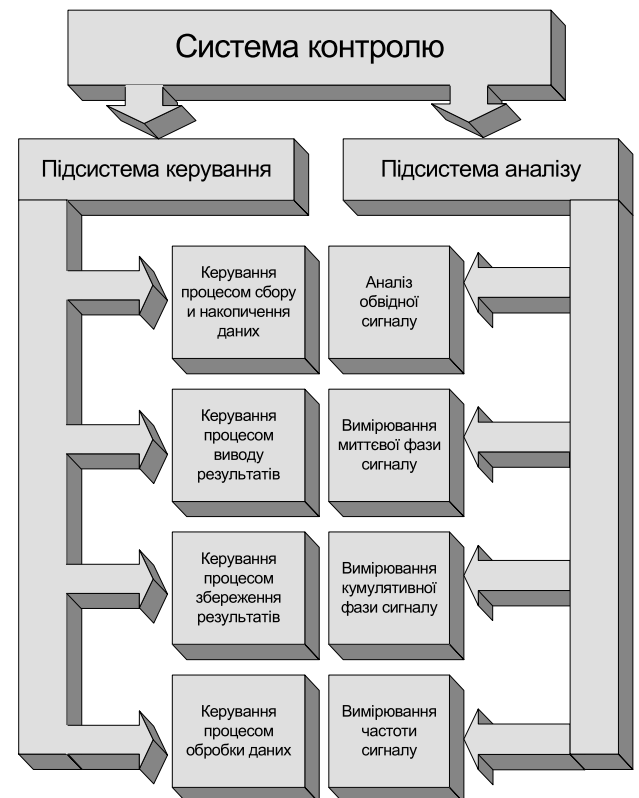


Рис. 2. Структура програмного забезпечення.

Для генерування зондуєчого сигналу був розроблений спеціальний програмний генератор послідовностей радіоімпульсів.

Програмний код генератора сигналів складається з наступних модулів:

- керування параметрами модулюючого і модульованого сигналів;
- генерування одиничного імпульсу;
- формування періодичної послідовності із заданою частотою повторення на основі одиничного згенерованого імпульсу;
- модуляції сигналів;
- виводу і відображення згенерованої періодичної послідовності радіоімпульсів.

Програмний код вузла генератора зонduючого сигналу, що відповідає за генерацію послідовності імпульсів необхідної форми, приведений на рис. 3.

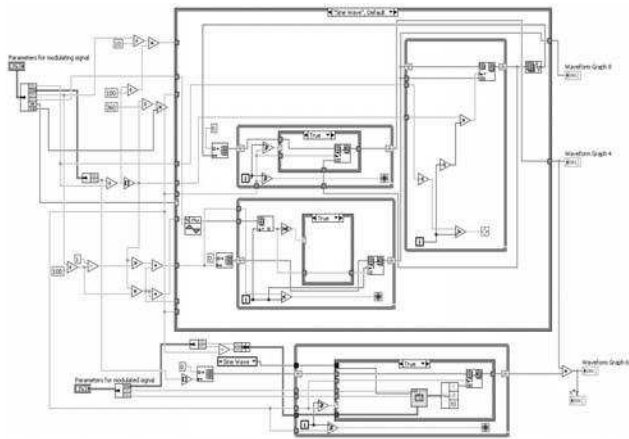


Рис. 3. Фрагмент коду програми генератора сигналу

Генератор дозволяє формувати послідовності імпульсів трикутної і прямокутної форм, напівхвилі синусоїди, а також гаусового радіоімпульсу. Перелік початкових видів обвідних радіоімпульсних сигналів може бути розширений залежно від поставлених завдань без внесення істотних змін в основну структуру програмного коду генератора сигналів.

Основний програмний код системи неруйнівного контролю композиційних матеріалів авіаційних конструкцій представлений на рис. 4.

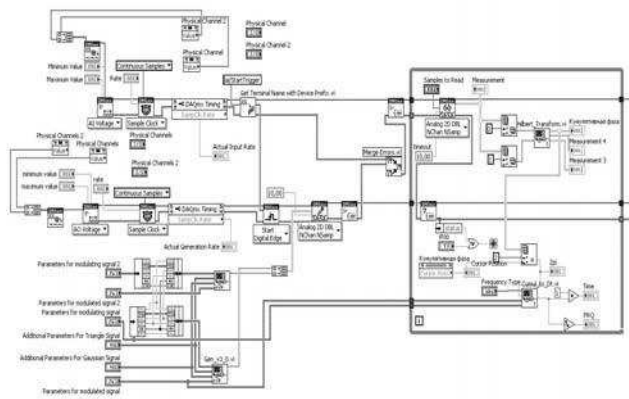


Рис. 4. Код основної програми

Для точної фіксації початкових точок зонduючого і прийнятого сигналів була реалізована синхронізація модулів цифро-аналогового і аналого-цифрового перетворювачів за допомогою внутрішніх ліній. В якості процедури запуску цифро-аналогового перетворювача використовується тік, що позначає початок циклу заповнення буфера аналого-цифрового перетворювача.

Масив миттєвих значень прийнятих сигналів поступає на вхід підпрограми, що реалізує перетворення Гільберта. Функція *Hilbert.vi* що повертає Гільберт-образ сигналу присутня в стандартному наборі математичних операторів програмного пакету LabVIEW. Для отримання кумулятивної і миттєвої фаз, а також частоти сигналу застосовуються модулі, що реалізо-

вують перетворення (5), (7) і (6) відповідно, також інформацію про зміну характеристик матеріалу дає часова затримка між прийнятими радіоімпульсами, яка визначається за формулою:

$$\Delta t(t) = \frac{Q_1(t) - Q_2(t)}{2\pi} \cdot T \quad (8)$$

Розроблена система дозволяє візуалізувати зонduючий і прийнятий сигнали, визначити частоту несучої, а також миттєві і кумулятивні фази сигналів. Похибки вимірювань при визначенні фазового зсуву складають $0,2^\circ$, а при визначенні частоти несучої радіоімпульсних сигналів – порядку 1,5 Гц.

На рис. 5,6 представлені результати роботи системи при визначенні кумулятивних фаз зонduючого і прийнятого сигналів, а також їх різниці.

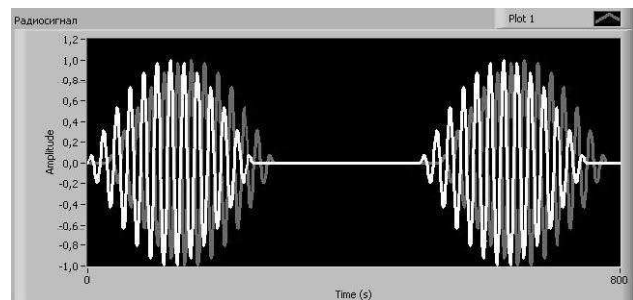


Рис. 5. Зонduючий та прийнятий сигнали

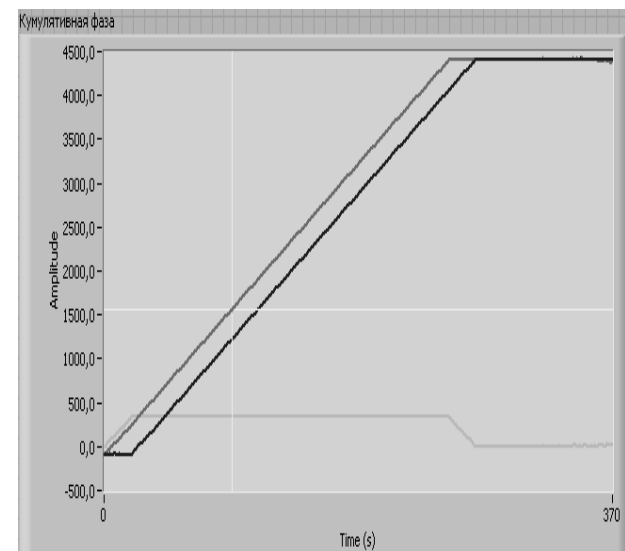


Рис. 6. Визначення кумулятивних фазових зсувів

Перетворення Гільберта, також, дозволяє виділяти обвідну сигналу (рис. 7) як безінерційний детектор, тобто без спотворення спектральних характеристик. Обвідна може бути надалі використана при оцінці інтегральних характеристик радіоімпульсу, які також можуть розглядатися як інформативні параметри.

При зміні фізико-механічних характеристик матеріалу спостерігається зміна несучої частоти інформаційного сигналу імпульсного датчика механічного імпедансу. Аналіз цього відхилення заснований на спектральній оцінці, наприклад за допомогою перетворення Фур'є, і представляється доволі складним,

оскільки імпульс реакції має малу тривалість, що призводить до зменшення роздільної здатності по частоті. Перетворення Гільбетра, у свою чергу, дозволяє обчислити інтегральну частоту радіоімпульсу незалежно від його тривалості.

В результаті проведеної роботи було створено систему неруйнівного контролю, що дозволяє виділяти обвідну сигналу, миттєву і кумулятивну фази, частоту, а також часовий і фазовий зсув між радіоімпульсами.

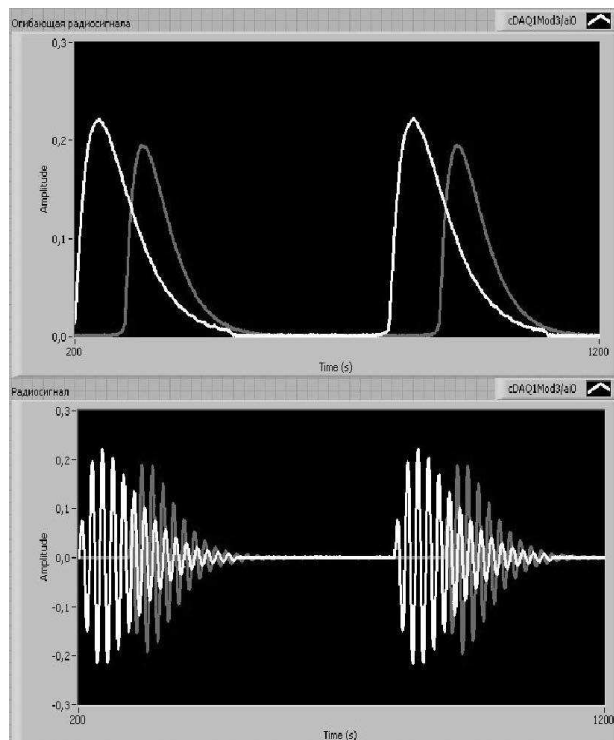


Рис. 7. Визначення огинаючої сигналу

Інтерфейс системи неруйнівного контролю композиційних матеріалів представлений на рис. 8.

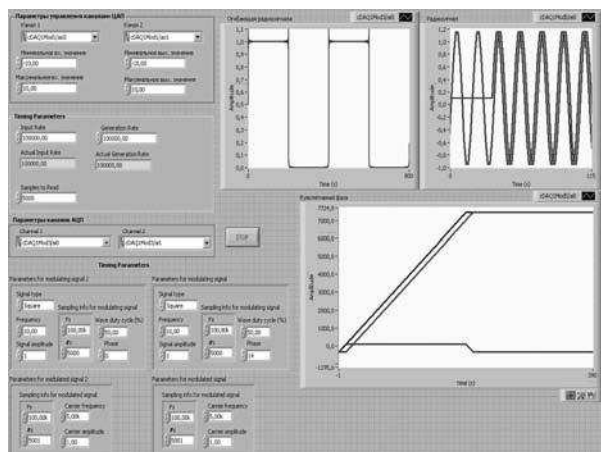


Рис. 8. Інтерфейс системи неруйнівного контролю

За допомогою розробленої системи можна визначити наступні типи дефектів:

- невірний тип волокна;
- пористість, порожнистість;
- низькі властивості в'язучої речовини;

- дезорієнтація волокон;
- неправильне укладення;
- чужорідні вclusions;
- наскрізні тріщини;
- розшарування;
- пошкодження сотового заповнювача.

Висновок

На даному етапі система застосовується для відладки описаного вище методу виділення обвідної, миттєвої, кумулятивної фази, частотного і часового зсуву сигналів ультразвукових датчиків, а також роздільно-сумішених датчиків механічного імпедансу. Надалі вона може бути використана як повноцінна система неруйнівного контролю стану композиційних матеріалів.

Також представлена система успішно застосовується в учбовому і дослідницькому процесі з тематики неруйнівного контролю в науково-дослідній лабораторії на кафедрі інформаційно-вимірвальних систем Національного авіаційного університету.

References

- [1] Еременко В.С., Овсянкин А.М., Бохенко А.В. Повышение информативности акустического контроля конструкций из полимерных композиционных материалов. Физические методы и способы контроля сред, материалов, и изделий (серия); вып. 11: «Электромагнитный, ультразвуковой и оптический неразрушающий контроль» Львів: ФМІ ім. Г.В.Карпенка НАНУ, 2006. С. 56 - 59.
- [2] Еременко В.С. Суслов Е.Ф. Овсянкин А.М. Использование преобразования Гильберта для анализа сигналов импульсных импедансных дефектоскопов. Физические методы и способы контроля сред, материалов, и изделий (серия); вып. 12: «Электромагнитный, ультразвуковой и оптический неразрушающий контроль» Львів: ФМІ ім. Г.В.Карпенка НАНУ, 2007. С. 69 - 73.
- [3] Суранов А.Я., Labview 8.20: Справочник по функциям. – М.: ДМК пресс, 2007. - 536 с.
- [4] Евдокимов Ю.К., Линдваль В.Р., Щербаков Г.И. LabVIEW для радиоинженера: от виртуальной модели до реального прибора. Практическое руководство для работы в программной среде LabVIEW. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 400 с.
- [5] И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 3: Ультразвуковой контроль – М.: Машиностроение, 2004. – 864 с.
- [6] Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных: Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 540 с., ил.
- [7] Bendat J.S., The Hilbert transform and applications to correlation measurements, Bruel and Kjaer, Denmark, 1985
- [8] Thrane N., The Hilbert transform, Bruel and Kjaer Technical Review, No.3, 1984