

К. т. н. В. С. ЕРЕМЕНКО, В. М. МОКИЙЧУК

Украина, Киев, УкрНИИ аналитического приборостроения,  
Национальный авиационный университет  
E-mail: nau\_307@ukr.net

Дата поступления в редакцию  
11.05 2004 г.

Оппонент к. т. н. В. А. ЕРМИЛОВ  
(ОНПУ, г. Одесса)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ В СТАТИСТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ ИЗДЕЛИЙ МЕТОДОМ НИЗКОСКОРОСТНОГО УДАРА

*Полученные результаты могут быть использованы в различных областях, когда информативным параметром является форма импульсного сигнала.*

Надежность радиоэлектронной аппаратуры определяется не только качеством применяемых электронных компонентов, но и качеством материалов, в том числе композиционных. Особенно это существенно для аппаратуры, работающей при воздействии вибрации, ударов, повышенной температуры и влажности.

Одним из методов неразрушающего контроля, позволяющим определять наиболее опасные дефекты в композиционных материалах, а также изменение модуля упругости и коэффициента Пуассона, является метод низкоскоростного удара, исследованию информативных параметров которого и посвящена данная статья. Хотя экспериментальные данные, представленные в работе, получены на сотовых панелях, результаты статьи с успехом могут быть использованы при контроле физических параметров композиционных материалов, применяемых в радиотехнике.

В реальных условиях проведения диагностического эксперимента существенное влияние на его результат оказывают случайные составляющие погрешности измерения информативных параметров. Так, при диагностике методом низкоскоростного удара [1] случайные составляющие погрешности измерения параметров импульсов соударения определяются не только шумами датчика силы, согласующего усилителя и аналого-цифрового преобразователя, но и нестабильностью энергии ударного воздействия на объект диагностики, отклонением вектора силы удара от нормали к контролируемой поверхности, степенью шерохова-

тости поверхности изделия, а также рядом других факторов, учесть влияние которых достаточно сложно.

Исследования проводились с помощью методов статистического моделирования.

На первом этапе определялась функция, позволяющая описать ударные импульсы, полученные на реальных объектах типа сотовых панелей, с погрешностью аппроксимации не превышающей 1%. Ударные импульсы формировались воздействием бойка с кинетической энергией  $(2,5 \dots 5,0) \cdot 10^{-3}$  Дж на сотовые панели типа “углепластик—алюминиевая фольга—углепластик”, в которых моделировались дефекты в виде зон диаметром  $d$  10, 20 и 30 мм. Дефектом являлось отсутствие клеевого соединения между углепластиком и сотовым наполнителем.

При аппроксимации полученных импульсов силы ударного взаимодействия  $F(t)$  функциональной зависимостью [2]

$$F(t) \approx F_m \sin^2\left(\frac{\pi t}{\tau}\right) \quad (1)$$

(где  $F_m$  — амплитуда импульса,  $\tau$  — длительность импульса) не удалось получить приведенную среднеквадратическую погрешность менее 2%. Это вызвано тем, что реальные ударные импульсы имеют различную длительность и форму переднего и заднего фронтов, что обусловлено механическими процессами соударения. Данное различие особенно сказывается при ударах в дефектных зонах (рис. 1), имеющих большую податливость.

Поэтому для описания импульсов соударения предлагается использовать двучленную функциональную зависимость вида

$$F(t) \approx F_m \sin^2\left(\frac{2\pi t}{\tau}\right) \sigma\left(\frac{\tau}{4} - t\right) + F_m \sin\left(\frac{2\pi t}{\tau}\right) \left[ \sigma\left(t - \frac{\tau}{4}\right) - \sigma\left(t - \frac{\tau}{2}\right) \right], \quad (2)$$

где  $\sigma(t)$  — функция Хевисайда.

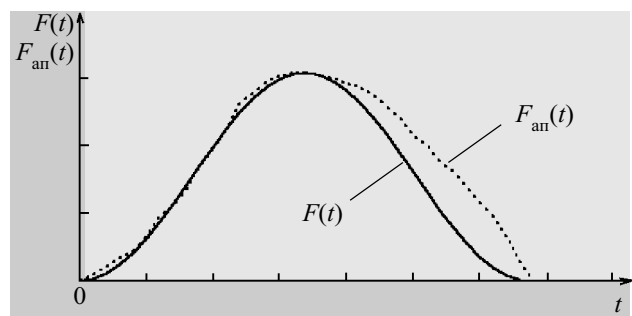


Рис. 1

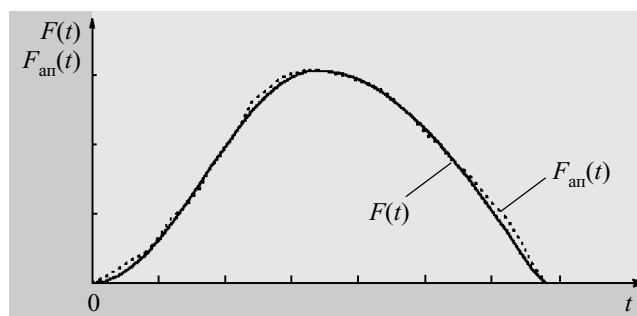


Рис. 2

Применение данной аппроксимирующей функции позволило получить приведенную среднеквадратическую погрешность менее 0,5% (рис. 2).

Приведенные среднеквадратические погрешности, полученные при аппроксимации импульсов соударения в различных зонах выражениями (1) и (2), представлены в таблице.

Вид аппроксимирующей функции	Среднеквадратическая погрешность			
	Бездефектная зона	d=10 мм	d=20 мм	d=30 мм
Выражение (1)	2,181	3,476	3,808	3,52
Выражение (2)	0,261	0,128	0,272	0,167

Как видно, предложенная функциональная зависимость позволила увеличить точность аппроксимации импульсов соударения практически на порядок.

Для проведения сравнительного анализа в модели импульсов соударения вводились случайные погрешности в виде аддитивного централизованного равномерного шума, причем случайным образом менялись не только амплитудные характеристики импульсов, но и временные. Для полученных таким образом моделей импульсов соударения рассчитывались коэффициенты разложений по дискретным ортогональным функциям Фурье, Лагерра, Чебышева и Кравчука [3].

Для разложения исходной функции  $f(x)$  по базисным функциям справедливо равенство Бесселя [4, с. 118]

$$\sum_k a_k^2 \leq \sum_{x \in X} f^2(x),$$

где  $a_k$  — коэффициенты разложения.

Данное неравенство можно преобразовать к следующему виду:

$$L(K) \sum_{x \in X} f^2(x) \leq \sum_k a_k^2, \quad (3)$$

где  $0 < L(K) < 1$  — долевая функция, которая показывает, какую часть энергии по отношению к общей энергии сигнала несут  $K$  коэффициентов разложения обобщенного ряда Фурье.

По величине  $L(K)$  можно определить точность, с которой  $K$  коэффициентов разложения обобщенного ряда аппроксимируют исходную функцию.

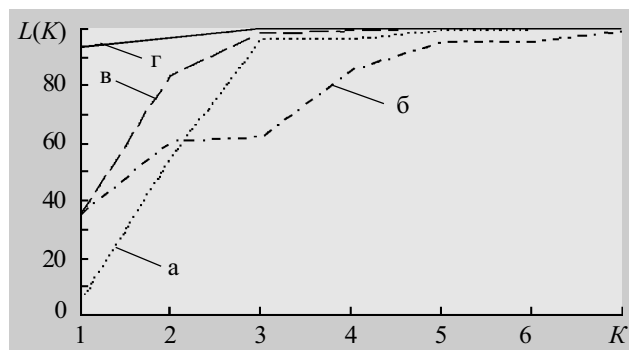


Рис. 3. Зависимость значений долевой функции  $L(K)$  от количества коэффициентов разложения:

$a$  — для разложения по функциям Лагерра;  $б$  — по функциям Чебышева;  $в$  — по функциям Фурье;  $г$  — по функциям Кравчука

Как показали расчеты, для обеспечения точности разложения импульсов не хуже 90% по всем приведенным выше ортогональным функциям достаточно пяти первых коэффициентов (рис. 3). По этим пяти коэффициентам и строились пространства диагностических признаков.

В качестве диагностического критерия использовался критерий Неймана–Пирсона для двухальтернативной ситуации (закрывающейся в наличии основной гипотезы  $H_0$  и конкурирующей гипотезы  $H_1$ ). Выбор данного критерия определялся тем, что он обладает максимальной мощностью, т. е. обеспечивает минимизацию вероятности ошибки второго рода  $\beta$  при заданном значении вероятности ошибки первого рода  $\alpha$  и фиксированном объеме выборки.

Критерий Неймана–Пирсона основан на выборе из множества допустимых значений отношения правдоподобия  $e^{\eta_n}$  некоторого порога  $C$ , для которого при заданном значении  $\alpha$ , фиксированном объеме выборки  $n$  и наименьшем значении  $\beta$  можно было бы сделать вывод о том, что имеет место гипотеза  $H_0$  при  $\eta_n \leq \ln C$  или  $H_1$  при  $\eta_n > \ln C$ .

В качестве критерия эффективности использовалось количество наблюдений, необходимое для принятия диагностического решения с вероятностью не менее 0,95 по пяти коэффициентам разложения ударных импульсов, для каждого вида базисных функций при заданных значениях случайной составляющей погрешности.

Чем ближе друг к другу находятся множества признаков  $\Theta_0$  и  $\Theta_1$ , тем больше необходимо проводить измерений диагностических параметров в исследуемой зоне. При наличии случайной составляющей погрешности увеличение точности требует увеличения количества экспериментов, по результатам которых определяется значение оценок параметров.

Необходимый объем выборки диагностических параметров  $n$  можно определить через квантили нормального распределения  $u_p$ , которые являются корнями уравнения [5, с. 105]

$$\Phi(u_p) = P_{\Theta} \{H_0\}, \quad (4)$$

где  $P_{\Theta} \{H_0\}$  — вероятность принятия гипотезы  $H_0$ , когда истинное значение параметра распределения равно  $\Theta$ :

$$P_{\Theta_0} \{H_0\} = P_{\Theta_0} \{\eta_n \leq \ln C\} = 1 - \alpha;$$

$$P_{\Theta_1} \{H_0\} = P_{\Theta_1} \{\eta_n \leq \ln C\} = \beta, \quad (5)$$

где  $\Theta_0$  — вектор оценок математических ожиданий диагностических параметров, соответствующий бездефектной зоне;

$\Theta_1$  — вектор оценок математических ожиданий диагностических параметров, соответствующий зоне с недопустимым дефектом.

С учетом  $u_{1-\alpha} = -u_{\alpha}$

$$n = \frac{(u_{\alpha} + u_{\beta})^2}{\kappa_2}, \quad (6)$$

где  $\kappa_2$  — дисперсия величины  $\eta_n$ ,  $\kappa_2 = (\Theta_1 - \Theta_0)^T M^{-1} (\Theta_1 - \Theta_0)$ ;

$()^T$  — оператор транспонирования;

$M^{-1}$  — обратная корреляционная матрица компонент вектора  $\Theta_0$ .

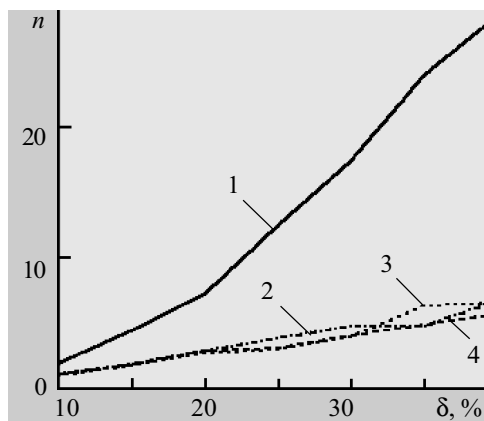


Рис. 4

Значения квантилей  $u_\alpha$  и  $u_\beta$  находятся по таблицам интеграла вероятности исходя из значений  $\alpha$  и  $\beta$ .

На рис. 4 приведены полученные экспериментальные зависимости количества наблюдений  $n$  от отношения среднеквадратического отклонения шума к амплитуде импульса соударения для диагностических признаков, полученных разложениями в базисах Фурье (1), Кравчука (2), Чебышева (3) и Лагерра (4).

Проведенные исследования показали, что применение в качестве диагностических признаков коэффициентов разложения ударных импульсов по функциям Чебышева, Кравчука и Лагерра имеет большую эффективность, чем коэффициенты базиса Фурье.

**Выводы**

Диагностические признаки, построенные на основе коэффициентов разложения ударных импульсов

по функциям Чебышева, Кравчука и Лагерра, менее подвержены влиянию помех и случайных погрешностей, чем признаки, построенные на основе коэффициентов разложения по тригонометрическому базису Фурье. Поэтому их использование более предпочтительно на некоторое улучшение алгоритмов расчета для построения множества информативных признаков при статистической диагностике изделий из композиционных материалов методом низкоскоростного удара.

Полученные результаты могут быть использованы не только при разработке методик контроля композитов методом низкоскоростного удара, но и в таких областях как обработка сигналов, диагностика и др., когда информативным параметром является форма импульсного сигнала.

**ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ**

1. Adams R. D., Cawley P. Low-velocity impact inspection of bonded structures / Proceedings of the International conference on structural adhesives in engineering.— Bristol.— 1986.— P. 139—142.
2. Ланге Ю. В., Устинов Е. Г. Акустические импульсы ударного возбуждения, их аналитическое представление и спектры // Дефектоскопия.— 1982.— № 10.— С. 81—87.
3. Еременко В. С., Еременко С. И. Повышение информативности контроля композиционных материалов методом низкоскоростного удара // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2003.— № 2.— С. 21—24.
4. Трахтман А. М. Введение в обобщенную спектральную теорию сигналов.— М.: Сов.радио, 1972.
5. Марченко Б. Г., Мыслович М. В. Вибродиагностика подшипниковых узлов электрических машин.— К.: Наукова думка, 1992.

**ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ**

III НАЦІОНАЛЬНА ВИСТАВКА ВИСОКИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА КОНКУРЕНТОСПРОМОЖНОЇ ПРОДУКЦІЇ

# УКРТЕХНОЛОГІЯ -2004

**1-3 грудня**

**КИЇВ**

ВИСТАВКОВИЙ ЗАЛ УКРІНТЕІ ГОРЬКОГО, 180 М. "ЛИБІДСЬКА"



**УкрІНТЕІ**  
**UkrISTEІ**

**ОРГАНІЗАТОРИ:**

Міністерство освіти і науки України  
Міністерство промислової політики України  
Київська міська державна адміністрація  
Український інститут науково-технічної і економічної інформації

**До демонстрації приймаються високі технології:**

- розроблені та впроваджені у виробництво;
- розроблені та рекомендовані до впровадження у виробництво;
- вироби та технології, за якими виконані наукові дослідження, що містять патенти або ноу-хау;
- конкурентоспроможна продукція, виготовлена на основі високіх технологій.

**Виставковий центр УкрІНТЕІ**

03680, м. Київ, вул. Горького, 180, кім. 111

Телефон: (044) 268-2388, 268-2311

Факс: (044) 268-2516, 268-2541

E-mail: [svn@uintei.kiev.ua](mailto:svn@uintei.kiev.ua), [market@uintei.kiev.ua](mailto:market@uintei.kiev.ua)

ГЕНЕРАЛЬНИЙ ІНФОРМАЦІЙНИЙ МЕДІА-ПАРТНЕР:



ІНФОРМАЦІЙНА ПІДТРИМКА:

