

## СПОСОБ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИМПЕДАНСНОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ

А. Г. ПРОТАСОВ

*Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт"*

Изучены способы повышения информативности импедансного метода неразрушающего контроля. Проанализированы статистические методы обработки информативных сигналов с целью улучшения достоверности контроля. Для статистической обработки данных, полученных с помощью импедансного дефектоскопа, предложено использовать процедуру последовательного анализа Вальда, которая позволяет более точно определить координаты границы дефекта в сотовой структуре.

**Ключевые слова:** *импедансный метод контроля, метод Вальда.*

Композиционные материалы широко применяют в авиационной отрасли для изготовления элементов конструкций самолетов. В процессе эксплуатации они находятся под воздействием многих факторов, вызывающих появление дефектов и изменение механических характеристик изделий. Непредвиденные механические нагрузки влияют на состояние композиционных материалов (разрушение волокна, расслоения, разрушение матрицы элемента и др.) Из-за высоких требований, предъявляемых к авиационной технике, необходим неразрушающий контроль (НК) элементов конструкций как на этапе производства, так и при эксплуатации. Поэтому сегодня актуальным является совершенствование существующих методов контроля, чтобы повысить достоверность полученных результатов.

Здесь эффективный импедансный метод, основанный на оценке механического импеданса изделия. Он относится к акустическим методам НК и предназначен для выявления дефектов клееных и паяных соединений между сравнительно тонкой внешней обшивкой и элементами жесткости в виде специального пенопласта или сотовых структур, а также дефектов типа расслоений и непроклеев в металлических покрытиях и изделиях из слоистых пластиков [1, 2].

Импедансный метод, который базируется на применении изгибных колебаний, предложен и описан ранее [3–5] и является одним из основных в НК для проверки сэндвич-панелей с сотовым заполнением, многослойных конструкций, выполненных из композиционных материалов, металлов и других материалов [6]. Он основан на различиях механических импедансов дефектных и качественных зон объектов контроля. В процессе контроля механический импеданс оценивают на поверхности изделия в зонах возбуждения изгибных колебаний, после чего изменения импеданса преобразуют в соответствующие изменения электрического сигнала, который обрабатывают в электрическом блоке дефектоскопа. Результирующее значение отображается на индикаторе и используется для подачи сигнала про наличие дефекта в случае отклонения информативного параметра от установленных пределов.

Наиболее распространен импульсный вариант этого контроля [7], что прежде всего связано с возможностью создания компактных дефектоскопов, которые не

требуют источников питания большой мощности, чтобы генерировать сравнительно высокие напряжения возбуждения преобразователей, как при использовании непрерывного возбуждения. Следует подчеркнуть, что название “импульсный” относится не к импедансу, а к способу возбуждения преобразователя дефектоскопа. Также отметим, что при НК импедансным методом изделий из полимерных композиционных материалов трудно обнаружить глубоко залегающие дефекты (10...15 mm или половина толщины сотовой панели), т.е. выявить повреждения внутренней обшивки при контроле с внешней стороны проблематично [2].

Цель данной статьи – расширить его возможности путем использования статистических методов обработки информативных сигналов, чтобы повысить достоверность контроля.

**Методы испытаний.** Для исследований выбрали отдельно-совмещенный преобразователь, состоящий из пьезоэлемента прямоугольной формы с электродами на боковых сторонах и пассивных накладок. Для повышения чувствительности базу преобразователя уменьшили, размещая контактные наконечники на заомленных концах накладок.

Излучающий вибратор соединен с генератором импульсов, а принимающий – с усилителем дефектоскопа. Изменение импеданса влияет на амплитуду и фазу принятых сигналов. Несущая частота сигнала 18...30 kHz. Преимущество таких преобразователей перед совмещенными – большая глубина выявления дефектов (до 15...20 mm в пластиках), что объясняется механизмом воздействия контактной упругости. Однако такая схема имеет недостаток, так как невозможно выявлять дефекты, длина которых меньше базы преобразователя.

Преобразователи взаимодействуют с объектом контроля через наконечники со сферическими контакторами, прижимающимися к изделию с постоянной силой. Поэтому нет необходимости в контактной жидкости, которая обязательна для ультразвуковых дефектоскопов. Подобные типы контакта отличаются маленькой площадью контактной зоны, что исключает направленность колебаний в зоне излучения и их прием, а также обеспечивает контактную гибкость.

При увеличении глубины залегания механический импеданс дефекта возрастает, а следовательно, уменьшается эквивалентная выявляемая площадь, т.е. полученные в результате контроля границы дефекта несколько смещены по сравнению с действительными. Это смещение можно корректировать, изменяя браковочный уровень информативного параметра или, что более эффективно, применяя соответствующие статистические процедуры, например, последовательный анализ Вальда [8]. Этот метод, в отличие от других статистических методов (например, Байеса), не ограничивает количество измерений при контроле, определяемое необходимостью принятия решения с некоторой степенью риска. Здесь отношения вероятностей (отношения правдоподобия) определяют последовательно.

Допустим, что объект  $K^*$  имеет признак  $K_1$  (в нашем случае это значение амплитуды импедансного дефектоскопа при наличии дефекта), причем он при диагнозе  $D_2$  (наличие дефекта) встречается чаще, чем при диагнозе  $D_1$  (его отсутствие). При этом, если

$$\frac{P(K_1/D_2)}{P(K_1/D_1)} > A, \text{ то } K^* \in D_2,$$

где  $A$  – верхняя граница принятия решения.

Когда признак  $K_1$  значительно чаще встречается при диагнозе  $D_1$ , принимается решение

$$\frac{P(K_1/D_2)}{P(K_1/D_1)} < B, \quad K^* \in D_1,$$

где  $B$  – нижняя граница его принятия.

Отношение вероятностей  $B < \frac{P(K_1/D_2)}{P(K_1/D_1)} < A$  называют отношением правдоподобия. Если в результате первой проверки это условие выполняется, то необходима следующая проверка. Тогда

$$B < \frac{P(K_1/D_2)}{P(K_1/D_1)} \cdot \frac{P(K_2/D_2)}{P(K_2/D_1)} < A,$$

где  $K_2$  – признак, соответствующий амплитуде импедансного дефектоскопа при отсутствии дефекта.

Расчеты повторяют до тех пор, пока значение отношения не выйдет за одну из указанных границ ( $A$  или  $B$ ). Границы рассчитывают, исходя из вероятностей ошибок первого  $\alpha$  и второго  $\beta$  рода, которые считают заданными:

$$\frac{1-\beta}{\alpha} \geq A, \quad B \geq \frac{\beta}{1-\alpha}. \quad (1)$$

В практических расчетах можно принимать  $\alpha = \beta = 0,05 \dots 0,1$ .

**Результаты и их обсуждение.** Исследовали сотовые панели с искусственными дефектами типа отслоение внутренней обшивки от сотового заполнителя. Состояние панели контролировали импедансным методом со стороны внешней обшивки из материала ЭЛУР-П-0,1 толщиной 1 mm. В качестве сотового заполнителя использовали материал ПСП-1-2,5-45 толщиной 15 mm (рис. 1). Схема расположения дефекта в образце представлена на рис. 2.

Примітка [P1]: Рис. 1

Примітка [P2]: Рис.2

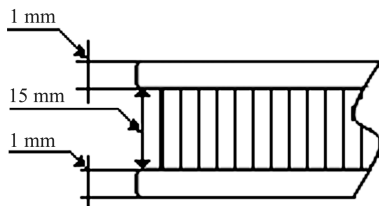


Рис. 1. Fig. 1.

Рис. 1. Схема бокового сечения сотовой панели.

Fig. 1. A chart of the lateral cross-section of a cellular panel.

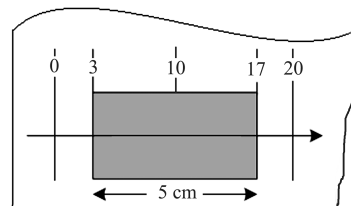


Рис. 2. Fig. 2.

Рис. 2. Фрагмент образца с дефектом (вид сверху).

Fig. 2. A specimen fragment with a defect (view from above).

В процессе контроля панель сканировали вдоль дефекта в направлении, указанном стрелкой. Зона дефекта и прилегающие к нему участки условно разделили линиями с расстоянием  $\sim 3,5$  mm. На пронумерованных линиях измеряли информативный параметр – амплитуду импульса импедансного дефектоскопа (табл. 1). Кроме того, дополнительно многократно ( $n = 50$ ) измеряли амплитуду импульсов в заведомо бездефектной зоне (линия 1) и по центру дефекта (линия 10), средние значения полученных результатов 0,34 и 0,45 V с соответствующими стандартными отклонениями 0,05 и 0,07 V.

Примітка [P3]: Табл.1

**Таблица 1. Результаты измерений амплитуды импульса импедансного дефектоскопа в области дефекта**

№ линии	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Амплитуда, V	0,34	0,35	0,37	0,39	0,40	0,42	0,44	0,44	0,45	0,45

Аппроксимировали законы распределения вероятности полученных результатов измерения для дефектного и бездефектного участков контролируемого объекта (рис. 3). Вертикальная линия определяет вероятность ошибки второго рода при  $\beta = 0,05$ . Гипотезу о том, что вероятности полученных данных распределены по нормальному закону, проверяли с помощью составного критерия для доверительной вероятности 0,95.

Примітка [P4]: Рис.3

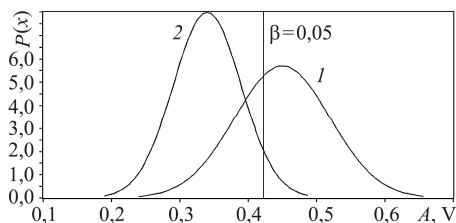


Рис. 3. Распределение вероятностей полученных результатов для дефектного (1) и бездефектного (2) участков контролируемого объекта.

Fig. 3. Probability distribution of the obtained results for defective (1) and defectless (2) sites of the testing object.

Таким образом, при определении размеров дефекта, чтобы обеспечить ошибку не более 5%, необходимо в качестве браковочного уровня выбрать значение амплитуды на уровне 0,44 V, что соответствует линии сканирования 7 (табл. 1). Тогда найденная по экспериментальным данным граница дефекта смещается относительно действительной на 14 mm (с учетом того, что расстояние между линиями 3,5 mm). Для более точной оценки использовали последовательный анализ Вальда. Известно, что для бездефектного участка математическое ожидание наличия дефекта  $\mu_1 = 0,34$ , а для дефектного –  $\mu_2 = 0,44$ . Среднеквадратические отклонения данных контроля для этих участков составляют  $\sigma_1 = 0,05$  и  $\sigma_2 = 0,07$ . Определяли границы дефекта по результатам нескольких измерений. Принимали  $\alpha = \beta = 0,05$ . После первого измерения вычисляли соотношение

$$\frac{f(x_1/D_2)}{f(x_1/D_1)} = \frac{\exp\left[-\frac{(x_1 - \mu_2)^2}{2\sigma_2^2}\right]}{\exp\left[-\frac{(x_1 - \mu_1)^2}{2\sigma_1^2}\right]} = \exp\left\{\frac{1}{2}\left[\frac{(x_1 - \mu_1)^2}{\sigma_1^2} - \frac{(x_1 - \mu_2)^2}{\sigma_2^2}\right]\right\}, \quad (2)$$

и после  $n$ -го определяли логарифм отношения правдоподобия:

$$L = \ln \frac{f(x_1/D_2) \dots f(x_n/D_2)}{f(x_1/D_1) \dots f(x_n/D_1)} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left[ \frac{(x_i - \mu_1)^2}{\sigma_1^2} - \frac{(x_i - \mu_2)^2}{\sigma_2^2} \right]. \quad (3)$$

Если  $L$  лежит в пределах  $\ln B < L < \ln A$ , то для определения дефектности материала информации недостаточно. В случае выхода этого отношения за указанные пределы можно говорить о наличии в объекте дефекта. Сканируем объект на линии 5 условной градации, которая расположена в зоне дефекта. Полученные значения информативного параметра заносим в табл. 2.

Примітка [P5]: Табл.2

Таблица 2. Результаты измерений амплитуды импульса импедансного дефектоскопа на линии 5 условной градации

№ измерения	1	2	3	4	5	6
Амплитуда, V	0,40	0,36	0,41	0,42	0,39	0,42

В соответствии с условиями (1) рассчитывали границы принятия решений:

$$A \leq \frac{1-\beta}{\alpha} = \frac{1-0,05}{0,05} = 19, \quad \ln A = 2,94, \quad B \geq \frac{\beta}{1-\alpha} = \frac{0,05}{1-0,05} = 0,0526, \quad \ln B = -2,94.$$

Таким образом, границы для принятия решения о наличии или отсутствии в

объекте дефектной области находятся в пределах  $2,94 < L < -2,94$ . Результаты расчетов значения  $L$  по формуле (3) представлены в виде графика на рис. 4. Выявили, что уже при пятом измерении результат статистики Вальда превысил верхний установленный уровень, соответствующий 95% вероятности, что позволило сделать вывод о том, что эта линия сканирования лежит в дефектной области. Смещение при определении границы дефектной зоны в этом случае уменьшилось на 7 мм.

#### ВЫВОДЫ

С помощью статистической обработки данных можно расширить возможности импедансного метода неразрушающего контроля. Применяя, в частности, последовательный анализ Вальда, можно более точно определить координаты границы дефекта в сотовой структуре. К перспективным направлениям можно отнести исследование возможностей применения статистической обработки результатов для повышения информативности методов контроля конструкций авиатехники, выполненных из многослойных клееных материалов на основе углепластиков и слоистых пластиков.

**РЕЗЮМЕ.** Вивчено способи підвищення інформативності імпедансного метода неруйнівного контролю. Проаналізовано статистичні методи обробки інформативних сигналів для поліпшення вірогідності контролю. Для статистичної обробки даних, отриманих за допомогою імпедансного дефектоскопа, запропонована процедура послідовного аналізу Вальда, яка дасть можливість точніше визначити межі дефекту у стільниковій структурі.

**SUMMARY.** The ways of the improvement of informativity of the impedance method of nondestructive testing are studied. The application of the statistical methods for information signal processing in order to improve reliability of testing is analyzed. It is proposed to use the procedure of the Wald sequential analysis for statistical processing of the data obtained by an impedance flaw gauge. The result of the mentioned procedure is the possibility to get a more accurate value of the defect boundary coordinates in a cellular construction.

1. Ланге Ю. В. Акустические низкочастотные методы неразрушающего контроля многослойных конструкций. – М.: Машиностроение, 1991. – 272 с.
2. Азаров Н. Т., Сырбу В. Н. Контроль клееных сотовых конструкций самолетов импедансным дефектоскопом ДАМИ-С // В мире неразрушающего контроля. – 2003. – № 3. – С. 16–29.
3. Ланге Ю. В. Низкочастотные акустические методы и средства НК многослойных конструкций // Контроль. Диагностика. – 1999. – № 5. – С. 20–21.
4. Cawley P. The sensitivity of the mechanical impedance method of nondestructive testing // NDT Int. – 1987. – 20, № 4. – P. 209–215.
5. Єременко В. С., Самойліченко О. В., Суслов Є. Ф. Методи оцінювання законів розподілу інформативних ознак для імпедансної дефектоскопії // Вісник інж. академії. – 2012. – № 2. – С. 256–261.
6. Протасов А. Г., Юрченко О. С. Влияние параметров сотовой конструкции на выявляемость дефектов при контроле импедансным методом // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2006. – № 3. – С. 48–51.
7. Ланге Ю. В. Импульсный вариант акустического импедансного метода неразрушающего контроля // Дефектоскопия. – 1987. – № 26. – С. 13–19.
8. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 816 с.

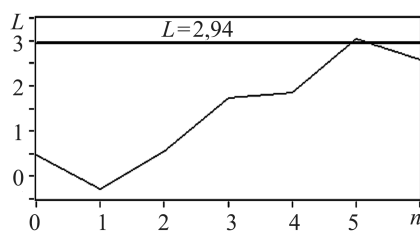


Рис. 4. Изменение статистики Вальда ( $L$ ) в зависимости от результата измерения ( $n$ ).

Fig. 4. The diagram of the Wald statistic change ( $L$ ), depending on the measuring result ( $n$ ).

Получено 19.01.2015