УДК 620.192

В. И. Крайний, О. Н. Будадин,
А. А. Бекаревич

ОПТИМИЗАЦИЯ МНОГОПАРАМЕТРОВОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ МАТЕРИАЛОВ, КОНСТРУКЦИЙ И ОБЪЕКТОВ

Рассмотрен системный подход к исследованию технического состояния материалов, конструкций и объектов с помощью методов неразрушающего контроля с использованием комплексирования измерительных устройств и проведения наблюдений во времени (накопления информации) для повышения качества и надежности обнаружения дефектов и повреждений.

E-mail: vladk5@yandex.ru

Ключевые слова: *многопараметровый, неразрушающий контроль, комплексирование, обнаружение дефектов, вероятность правильного обнаружения.*

Основными тенденциями обследования объектов в целях определения дефектов, повреждений и аномалий являются повышение точности определения дефектов, глубин обследования, усложнение решаемых задач. Наличие многих методов неразрушающего контроля (НК) не случайно: оно свидетельствует об отсутствии универсальных методов. Часто только рациональный выбор их комплексов позволяет достичь требуемого результата при НК.

Под комплексированием устройств НК понимается их объединение в комплексную систему, осуществляющую совместную обработку информации и обеспечивающую повышение точности, помехозащищенности и надежности.

Необходимость комплексирования методов обусловлена тем, что многие из них, во-первых, некорректны: малым изменениям сигналов от аномалий, дефектов и повреждений могут соответствовать большие изменения их физико-геометрических параметров. Эта закономерность известна как принцип эквивалентности [1]. Во-вторых, по мере увеличения глубины обнаружения дефектов уменьшается отношение значения сигнала к уровню помех. В результате, несмотря на совершенствование методов, отношение сигнал/помеха увеличивается мало. По этим причинам определение параметров дефектов оказывается затрудненным, неоднозначным и недостоверным. Для уменьшения некорректности необходимо применение ряда методов с разными физическими основами.

При одновременном использовании нескольких методов НК общая вероятность правильного обнаружения дефекта при взаимной независимости совместимых событий (операций контроля) может быть получена следующим образом [2]. Вероятность пропуска дефекта при совместном использовании l методов контроля определяют по формуле

$$1 - D_{\text{с}} = \prod_{i=1}^{l} (1 - D_i),$$

где $D_{\text{с}}$ — вероятность правильного обнаружения дефекта системой при совместном использовании l методов контроля; D_i — вероятность правильного обнаружения дефекта при использовании i-го метода контроля, $i = 1, ..., l$.

Отсюда можно получить вероятность правильного обнаружения дефекта системой при совместном использовании l методов контроля:

$$D_{\text{с}} = 1 - \prod_{i=1}^{l} (1 - D_i).$$

Комплексирование устройств НК можно классифицировать на два вида:

1) по информации на входе устройств;

2) по информации на выходе устройств.

При комплексировании по информации на входе устройств система комплексирования синтезируется на основе обработки сигналов, полученных в зоне дефекта. Информация представляет собой векторный процесс на входе устройств. Такой подход позволяет получать максимальное количество информации из наблюдаемого процесса.

При комплексировании по информации на выходе устройств используется векторный процесс на выходе устройств после обработки. Такая система синтезируется с учетом ограничений, накладываемых использованием конкретных устройств, качество обработки информации в этом случае может быть ниже, чем в первом случае. Тем не менее, комплексирование по информации на выходе устройств целесообразно, так как позволяет синтезировать оптимальную или квазиоптимальную систему с учетом тех устройств, которые изготавливаются или уже имеются в наличии.

Общую задачу комплексирования устройств в целях обнаружения дефектов можно сформулировать следующим образом. Пусть имеется l разных устройств, выполняющих обнаружение одного и того же дефекта. Рассмотрим задачу их оптимального комплексирования в двух вариантах: по информации на входе и выходе этих устройств.

При комплексировании по информации на входе наблюдаемый процесс y_{it} в интервале времени $0 \le t \le T$ можно задать в общем виде:

$$y_{it} = \vartheta s_{it} + \eta_{it} + \xi_{it};\ \vartheta = 0,1;\ i = 1, ..., l,$$

где $s_{it}, \eta_{it}, \xi_{it}$ — полезный сигнал, внешняя помеха и собственный шум i-го устройства соответственно. Поскольку устройства в общем случае имеют разные физические принципы работы, то все сигналы на входах устройств будут различными, даже если они получены от одного дефекта, при этом некоторые сигналы могут отсутствовать, $s_{jt} = 0,\ 0 \le t \le T,$ если соответствующие устройства не обнаружили дефект.

Если распределения вероятностей сигналов, помех и шумов известны, то задача обнаружения сводится к проверке гипотезы $\vartheta = 1$ при альтернативе $\vartheta = 0.$ Оптимальное решение находится по критерию отношения правдоподобия

$$\Lambda(y) \equiv \frac{w(y\,|\,1)}{w(y\,|\,0)} \ge h,$$

где $w(y\,|\,1)$ и $w(y\,|\,0)$ — плотности распределения вероятности наблюдаемой реализации у случайного процесса при наличии и отсутствии дефекта соответственно.

При использовании критерия Неймана — Пирсона порог h определяется заданной вероятностью ложной тревоги (ошибки второго рода).

Однако такая система может оказаться сложной, так как ее реализация связана с передачей между устройствами и обработкой в ПК или вычислителе большого объема информации.

Гораздо проще реализуется система во втором случае — с комплексированием информации на выходе устройств. При этом каждое из устройств решает задачу обнаружения дефекта независимо друг от друга, а комплексирование осуществляется путем совместной обработки выходных данных устройств, т. е. результатов их решений о наличии или об отсутствии дефекта. Решение по-прежнему принимается на основе использования отношения правдоподобия, с той разницей, что для его вычисления используются не сигналы (например, отраженные) от дефектов как в предыдущем случае, а решения устройств.

Пусть i-е устройство (i = 1, …, l), реализующее некоторую решающую функцию $\delta_i(\cdot),$ в результате наблюдения на отрезке времени [0, T] процесса y_{it} принимает решение $\delta_i(y_{i0}^{\mathrm{T}}) = 1$ о наличии сигнала и решение $\delta_i(y_{i0}^{\text{т}}) = 0$ об его отсутствии с вероятностями правильного обнаружения D_i и ложной тревоги F_i.

Для повышения качества и надежности обнаружения дефектов и повреждений объектов при низком отношении сигнал—шум (малый размер дефекта, большая глубина его расположения) необходимо использовать наблюдения (накопление информации) во времени. В этом случае на выходах устройств имеем случайный вектор $\delta_1, ..., \delta_l$, компоненты которого принимают значения 0 или 1 с вероятностями

$$P(\delta_i = 1 \mid \vartheta = 1) = D_i,\ P(\delta_i = 0 \mid \vartheta = 1) = 1 - D_i;$$
$$P(\delta_i = 1 \mid \vartheta = 0) = F_i,\ P(\delta_i = 0 \mid \vartheta = 0) = 1 - F_i. \qquad (1)$$

По критерию отношения правдоподобия по наблюдениям $\delta_1, ..., \delta_l$ выносится решение d_1 о наличии дефекта или d_0 об его отсутствии в соответствии с правилом

$$\Lambda_l \equiv \frac{P(\delta_1, ..., \delta_l \mid \vartheta = 1)}{P(\delta_1, ..., \delta_l \mid \vartheta = 0)} \geq h_l.$$

Конкретизируя отношение правдоподобия Λ_l с учетом (1) и статистической независимости δ_l по i можно получить [3]:

$$\sum_{i=1}^{l} \delta_i \ln\left[\frac{D_i(1 - F_i)}{F_i(1 - D_i)}\right] \geq h. \qquad (2)$$

Этот алгоритм дает решение задачи оптимального комплексирования измерительных устройств с использованием их выходной информации. Согласно (2) решения $\delta_i = 1$, формируемые устройствами, суммируются с весами $\mu_i = \ln[D_i(1 - F_i) / F_i(1 - D_i)]$.

Если вероятности правильного обнаружения и ложной тревоги измерительных устройств одинаковы, т. е. $D_i = D$, $F_i = F$, $i = 1, ..., l$, то весовые коэффициенты становятся одинаковыми $\mu_i = \mu$ и их можно опустить без потери оптимальности. Порог h выбирается по вероятности ложной тревоги $F_{\text{с}}$ (ошибке 2-го рода), заданной для системы измерительных устройств (критерий Неймана — Пирсона). Синтезированная система по принципу действия аналогична бинарному накопителю, подсчитывающему число единиц и сравнивающему накопленную величину с пороговой. Величина (2) в этом случае имеет биноминальное распределение вероятностей. Характеристики обнаружения системы D_c, F_c рассчитываются аналогично характеристикам одного устройства [3]:

$$D_{\text{с}} = \sum_{m=h}^{l} C_l^m D^m (1-D)^{l-m},$$

где C_l^m — число сочетаний из l по m, $C_l^m = l!/[m!(l-m)!]$; порог h — наибольшее целое число, удовлетворяющее неравенству

$$F_{\text{с}} \le \sum_{m=h}^{l} C_l^m F^m (1-F)^{l-m}.$$

Как показано в работе [3], в результате описанного комплексирования l устройств отношение сигнал—шум на входе увеличивается по сравнению с отношением сигнал—шум на выходе одного устройства (для устройств с оптимальной обработкой сигналов в l раз, если все устройства одинаковы). При этом уменьшаются ошибки измерения параметров дефектов, что приводит к повышению качества и достоверности их оценки комплексной системой измерительных устройств.

На практике при комплексировании могут применяться различные способы обработки информации, некоторые из которых кратко описаны ниже [1] .

Сравнительную эффективность выявления дефектов теми или иными физическими методами можно получить с помощью математического и физического моделирования. Проведя расчет сигналов, полученных от дефектов для разных методов, можно найти сравнительные характеристики, например, через показатель контрастности (γ):

$$\gamma = (A_{\max} - A_{\text{ср}}) / \sigma_{\text{фон}}, \tag{3}$$

где

$$A_{\text{ср}} = \sum_{i=1}^{n} A_i / n; \quad \sigma_{\text{фон}} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (A_i - A_{\text{ср}})^2 / n}.$$

Здесь A_i, $A_{\text{ср}}$ и $A_{\max}$ — соответственно амплитуда измеренного сигнала при обследовании объекта в любой его точке, средняя по изучаемому участку с n точками наблюдений и максимальный сигнал над центром дефекта; $\sigma_{\text{фон}}$ — фоновое стандартное среднеквадратическое отклонение, характеризующее уровень помех и точность измерений.

При выявлении дефектов руководствуются правилом «трех сигм и трех точек». Согласно этому правилу, обнаружение дефектов считается надежным, если они по амплитуде превышают $3\sigma_{\text{фон}}$, а по протяженности прослеживаются более чем в трех соседних точках наблюдения. Показателем надежности обнаружения дефекта является γm, где m — ширина зоны дефекта на уровне $3\sigma_{\text{фон}}$.

Более универсальной характеристикой эффективности метода является энергетическое отношение аномалия/помеха

$$\gamma_{\text{э}} = \sum_{i=1}^{n} A_i^2 / \sigma_{\text{фон}}^2 = A_{\text{ср}}^2 n / \sigma_{\text{фон}}^2, \tag{4}$$

где $\sigma_{\text{фон}}^2$ — общая дисперсия, зависящая от уровня помех и точности измерений.

В целом эффективность того или иного метода определяется природой физического процесса, наличием экранирующих включений с резко контрастными свойствами, а также неоднородностью среды, создающей помехи, интенсивностью помех, влияющих на величину $\sigma_{\text{фон}}$ и другими факторами.

Задача в общем плане сводится к математическому или физическому моделированию прямых и обратных задач для разных классов физических моделей. Наиболее распространенным классом являются одномерные модели, в которых физические свойства меняются в одном направлении, например, по глубине. Это типично для однослойных или многослойных объектов. Основными инструментальными методами изучения таких объектов являются: тепловизионные, с помощью ультразвуковых, электромагнитных, акустических, упругих волн и др.

Для оценки связи между параметрами дефектов того или иного вида, наблюдаемых с использованием разных методов НК, для l методов можно рассчитать коэффициент линейной корреляции r_{xy}:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^{l} (x_i - x_{\text{ср}})(y_i - y_{\text{ср}})}{l \sigma_x \sigma_y}, \tag{5}$$

где $x_{\text{ср}} = \sum_{i=1}^{l} x_i / l, \quad \sigma_x = \sqrt{\dfrac{\sum_{i=1}^{l} (x_i - x_{\text{ср}})^2}{l}}.$

Аналогичным образом рассчитываются значения $y_{\text{ср}}$ и σ_y. При $0{,}7 < r_{xy} < 1$ связи между разными физическими полями устойчивы и обусловлены одним и тем же дефектом. При $r_{xy} < 0{,}5$ можно говорить о слабых связях или об их отсутствии, что свидетельствует, например, о какой-то аномалии в обследуемом объекте.

Для анализа количественных признаков дефектов можно использовать коэффициенты контрастности γ_k (3) и $\gamma_{эk}$ (4), где k — номер метода. Повысить надежность выделения дефектов комплексом методов (k = 1, 2, 3, ..., l) можно, например, с помощью функции комплексного показателя (ФКП):

$$\text{ФКП} = \sum_{k=1}^{l} C_k |\gamma_k|,$$

где l — число методов в комплексе; $|\gamma_k|$ — абсолютное значение коэффициента контрастности; C_k — эвристический весовой коэффициент, устанавливаемый на основе общих теоретических или практических представлений. На графиках ФКП максимумы соответствуют положениям центров самых достоверных дефектов.

Для выделения труднообнаруживаемых (малых, глубокорасположенных) дефектов можно использовать различные методы: распознавание образов, дискриминантный, кластерный, факторный и др. Сущность их сводится к изучению сигналов, полученных от известных дефектов на этапах обучения. При исследовании применяют математические методы оценки признаков таких дефектов. При проведении обследования объекта эти признаки используют при распознавании обнаруженных аномалий, которые могут быть потенциальными дефектами.

Количественная интерпретация данных может быть пометодной и совместной. Пометодная интерпретация комплексных данных сводится к определению характеристик дефектов обследуемых объектов путем решения обратных задач для разных методов. Совместное решение обратных задач для нескольких методов реализуется методом многомерной статистики, например, получения уравнения многомерной регрессии. Для этого по результатам наблюдений рассчитывают те или иные физические и геометрические параметры y_i, выражаемые численно. Для тех же объектов определяют физические параметры x_i, получаемые наиболее точно, т. е. на которые принцип эквивалентности действует наименьшим образом. В ходе обработки результатов измерений на этапе обучения используют формулу многомерной линейной регрессии:

$$y_i = a_0 + \sum_{i=1}^{l} a_i x_i, \tag{6}$$

где

$$a_0 = y_{j\text{ср}} - \sum_{i=1}^{l} a_i x_{i\text{ср}}; \quad a_i = b_i \frac{\sigma_{yj}}{\sigma_{xi}}.$$

Здесь y_j — параметр, определяемый по l методам $x_1, x_2, ..., x_i, ..., x_l$; a_0 — свободный член; a_i — коэффициенты регрессии; значения $x_{i\text{ср}}, y_{j\text{ср}}, \sigma_{xi}, \sigma_{yj}$ рассчитывают по формуле (5); b_i — вспомогательные коэффициенты, получаемые при решении системы линейных уравнений множественной регрессии; r_{lj} — множественный коэффициент корреляции $r_{lj} = \sqrt{\sum_{i=1}^{l} b_i r_{iy}}$; r_{iy} — коэффициент парной корреляции между y_j и x_i (5).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хмелевской В. К. Геофизические методы исследования земной коры: В 3 кн. Кн.1. – Дубна: Международный ун-т природы, общества и человека «Дубна», 1997. – 276 с.
2. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. В 3 кн. Кн. 1. – М.: Сов. радио, 1965. – 752 с.
3. Сосулин Ю. Г. Теоретические основы радиолокации и радионавигации. – М.: Радио и связь, 1992. – 304 с.

Статья поступила в редакцию 07.09.2012