ЛИТЕРАТУРА

1. *Биргер И.А.* Техническая диагностика. М.: Машиностроение, 1978.
2. *Адаменко В.А., Дубровин В.И., Жеманюк П.Д., Субботин С.А.* Диагностика лопаток авиадвигателей по спектрам свободных затухающих колебаний после ударного возбуждения // Автоматика-2000. Міжнародна конференція з автоматичного управління, Львів. Праці у 7 т. Т. 5. Державний НДІ інформаційної інфраструктури, 2000. С. 7-13.
3. *Дубровин В.И., Субботин С.А.* Алгоритм нейросетевого отбора признаков // Матеріали міжнарод. конф. з автоматичного управління "Автоматика-2001". Одеса: ОДПУ, 2001. Т.2. С. 88-89.
4. Нейроинформатика /*А.Н. Горбань, В.Л. Дунин-Барковский, А.Н. Кирдин* и др. Новосибирск: Наука, Сиб. изд. фирма РАН, 1998.
5. *Дубровин В.И., Морщавка С.В., Пиза Д. М., Субботин С.А.* Распознавание растений по результатам дистанционного зондирования на основе многослойных нейронных сетей // Математичні машини і системи. 2000. № 2-3. С. 113-119.
6. *Дубровин В.И., Субботин С.А.* Индивидуальное прогнозирование надежности изделий электронной техники на основе нейронных сетей // Труды VII Всероссийской конф. “Нейрокомпьютеры и их применение” НКП-2001 с междунар. участием. М.: ИПУ РАН, 2001. С. 228-231.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Е.Л. Ереминым.

УДК 681.518.5

© 2002 г. **С.В. Шалобанов,** д-р техн. наук
(Хабаровский государственный технический университет)

ПОИСК ОДИНОЧНЫХ ДЕФЕКТОВ В ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ МЕТОДОМ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ СИГНАЛОВ

Рассматривается алгоритм поиска дефектов линейных динамических систем с глубиной до динамического блока на основе модели структурной чувствительности и интегральных преобразований сигналов.

Введение

В качестве объекта диагностирования (ОД) рассматривается динамическая система, состоящая из n линейных динамических элементов (ДЭ), номинальные передаточные функции которых $W_{o1}, ..., W_{on}$ известны.

Одиночный структурный дефект определим как такое изменение технического состояния ОД, которое приводит к произвольному изменению ΔW_i всего оператора W_i одного из *n* динамических элементов.

В работе [1] рассмотрены алгоритмы поиска одиночных дефектов с глубиной до динамического блока, позволяющие снизить размерность решаемой задачи и полнее учесть специфику проявления реального дефекта: изменение сразу нескольких параметров либо вида передаточной функции блока. Применение этих алгоритмов осложняется необходимостью определения полной модели структурной чувствительности, что является достаточно сложной вычислительной задачей. Ниже рассматривается метод поиска структурных дефектов, позволяющий использовать как полную, так и упрощенную модель структурной чувствительности. Определена процедура получения упрощенной модели чувствительности, эквивалентной в отношении значений диагностических признаков.

Примем гипотезу о возможности появления в ОД только одиночных дефектов и синтезируем алгоритм поиска одиночных дефектов с использованием интегральных преобразований реакций ОД и модели структурной чувствительности.

Метод поиска дефектов

Для получения диагностических признаков динамических элементов будем использовать преобразования по Лапласу временных функций

$$F_i(p) = L\{F_i(t)\} = \int_0^\infty F_i(t) \cdot e^{-pt} dt; \;\; i = \overline{1,k}, \tag{1}$$

в области вещественных значений переменной Лапласа $p = \alpha$ в интервале $0 \le \alpha \le \infty$. Использование преобразования Лапласа позволяет перейти от обработки временных функций к анализу численных значений их функционалов [2].

Предварительно сделаем несколько замечаний о существовании и точности определения изображений сигналов объекта $F_i(p), \quad i = \overline{1,k}$.

На практике нахождение оценок изображений вида (1) сводится к интегрированию временных функций с весом $e^{-\alpha t}$ на конечном интервале времени $[0, T_K]$:

$$\overline{F_i}(\alpha) = \int_0^{T_k} F_i(t) \cdot e^{-\alpha t} dt; \;\; i = \overline{1,k}. \tag{2}$$

Погрешности определения этих оценок, вызванные заменой бесконечного интервала интегрирования на конечный, определяются соотношениями

$$\Delta_i(\alpha) = F_i(\alpha) - \overline{F}_i(\alpha) = \int_{T_k}^{\infty} F_i(t) \cdot e^{-\alpha t} dt; \;\; i = \overline{1,k} \tag{3}$$

и зависят от величины параметра α и поведения функций $F_i(t), \;\; i = \overline{1,k}$.

Далее будем предполагать, что выполняются достаточные условия существования преобразований Лапласа сигналов ОД $F_i(t), \;\; i = \overline{1,k}$ [3]:

$$|F_i(t)| \le h_i \cdot e^{b_i t}, \;\; i = \overline{1,k}, \tag{4}$$

где $b_i < \alpha$, $h_i > 0$.

Учитывая условия (4), можно оценить модуль абсолютной погрешности $\Delta_i(\alpha)$:

$$|\Delta_i(\alpha)| \le \int_{T_k}^{\infty} h_i \cdot e^{b_i t} \cdot e^{-\alpha t} \cdot dt = h_i \cdot \int_{T_k}^{\infty} e^{-c_i t} dt = \frac{h_i}{c_i} \cdot e^{-c_i T_k} \tag{5}$$

где $c_i = \alpha - b_i > 0$.

Таким образом, модуль абсолютной погрешности растет с уменьшением параметра c_i, представляющего разность переменной Лапласа α и показателя роста b_i сигнала $F_i(t)$.

При ограниченных задающих воздействиях на входе устойчивого ОД можно принять $b_i = 0$ и $|F_i(t)| \le h_i, \;\; i = \overline{1,k}$, тогда

$$|\Delta_i(\alpha)| \le \frac{h_i}{\alpha} \cdot e^{-\alpha T_k}. \tag{6}$$

При задании параметра α в величинах, кратных обратным значениям интервала контроля $\alpha = {}^{q}\!/_{T_k}$, оценка погрешности примет вид

$$|\Delta_i(\alpha)| \le \frac{h_i \cdot T_k}{q} \cdot e^{-q}.$$

При выборе, например, параметра преобразования Лапласа $\alpha = 5/T_k$ имеем оценку погрешности $|\Delta_i(\alpha)| \le 0.0014 \cdot h_i \cdot T_k$.

Таким образом, параметр α для ограниченных сигналов необходимо выбирать с учетом их области изменения и определения, т.е. с учетом площади окна, в котором задан интегрируемый сигнал.

Алгоритм диагностирования реализуется путем выполнения следующих операций.

Предварительно определяют время контроля $T_K \ge T_{ПП}$, где $T_{ПП}$ – время переходного процесса объекта. Время переходного процесса оценивают для номинальных значений параметров ОД.

На вход динамического объекта и его эталонную временную модель подают тестовое воздействие (единичное ступенчатое, линейно возрастающее, прямоугольное импульсное и т.д.). Принципиальных ограничений на вид входного тестового воздействия предлагаемый способ не предусматривает.

Регистрируют реакцию объекта и эталонной модели в k контрольных точках и определяют отклонения временных характеристик объекта от номинальных $\Delta F_i(t)$, i=1, 2, ..., k на интервале $t \in [0, T_K]$.

В качестве диагностического признака наличия дефекта в i-м динамическом элементе используют интегральную меру следующего вида:

$$J_i = \sum_{j=1}^{m} Q_i^T(\alpha_j) \cdot Q_i(\alpha_j), \tag{7}$$

где $Q_i(\alpha_j) = \Delta F(\alpha_j) - V_i(\alpha_j) \cdot \Delta W_i(\alpha_j)$; m – число значений переменной Лапласа; $\Delta F(\alpha_j) = (\Delta F_1(\alpha_j), \Delta F_2(\alpha_j), \ldots, \Delta F_k(\alpha_j))^T$ – вектор изображений для вещественных значений переменной Лапласа α_j отклонений временных характеристик объекта в k контрольных точках;

$$V_i(\alpha_\mathrm{j}) = \left(\frac{\partial F_1(\alpha_\mathrm{j})}{\partial W_i(\alpha_\mathrm{j})}, \frac{\partial F_2(\alpha_\mathrm{j})}{\partial W_i(\alpha_\mathrm{j})}, \ldots, \frac{\partial F_k(\alpha_\mathrm{j})}{\partial W_i(\alpha_\mathrm{j})} \right)^T,$$

$V_i(\alpha_j)$ – структурная чувствительность (чувствительность оценок изображений временных характеристик объекта к изменению передаточной функции i-го динамического элемента);
$\Delta W_i(\alpha_\mathrm{j})$ – отклонение передаточной функции i-го динамического элемента от номинального значения.

Модель структурной чувствительности может быть получена путем последовательного соединения двух одинаковых моделей объекта, когда выходом первой модели является входной сигнал i-го динамического элемента, а вход второй модели организуется на выходе i-го динамического элемента [1].

Чтобы диагностический признак (7) не зависел от неизвестного и искомого на этапе поиска дефектов отклонения $\Delta W_i(\alpha_j)$, выразим это отклонение из системы уравнений:

$$V_i(\alpha_j) \cdot \Delta W_i(\alpha_j) = \Delta F(\alpha_j). \tag{8}$$

Умножение левой и правой частей выражения (8) слева на $V_i^T(\alpha_j)$ позволяет выразить скаляр $\Delta W_i(\alpha_\mathrm{j})$ в виде

$$\Delta W_i(\alpha_j) = \frac{V_i(\alpha_j)^T \cdot \Delta F(\alpha_j)}{V_i(\alpha_j)^T \cdot V_i(\alpha_j)}. \tag{9}$$

Подставляя выражение (9) в формулу (7) и производя эквивалентные преобразования, получим:

$$J_i = \sum_{l=1}^{m}\sum_{j=1}^{k} \Delta F_j^2(\alpha_l) - \sum_{l=1}^{m} \frac{\left[\sum_{j=1}^{k} V_{ji}(\alpha_l)\cdot \Delta F_j(\alpha_l)\right]^2}{\sum_{j=1}^{k} V_{ji}^{\ 2}(\alpha_l)}, \quad V_{ji}(\alpha_l) = \frac{\partial\, F_j(\alpha_l)}{\partial\, W_i(\alpha_l)} \qquad (10)$$

где $V_{ji}(\alpha_l)$ – структурная чувствительность изображения временной характеристики в j-й контрольной точке для i-го динамического элемента и l-го значения переменной Лапласа α_l.

Операции по реализации предлагаемого алгоритма, направленные на определение диагностических признаков ДЭ по формуле (10) для m=1, иллюстрируются функциональной схемой устройства поиска структурных дефектов, представленной на рис.1.

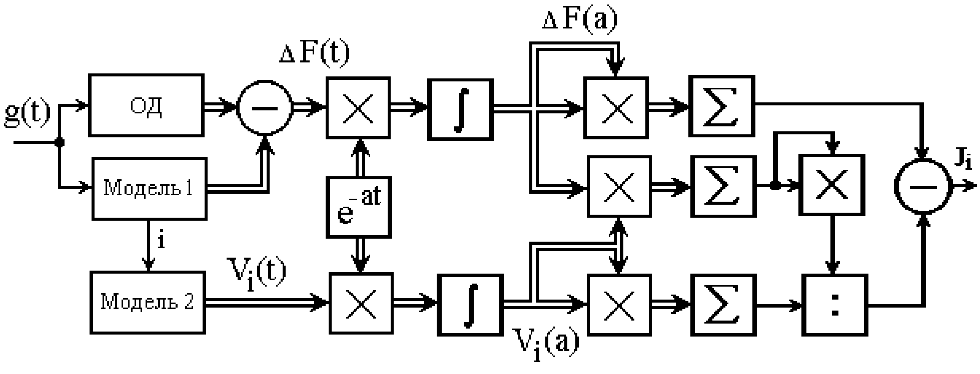

Рис.1. Функциональная схема устройства поиска структурных дефектов с использованием интегральных преобразований сигналов

По минимуму значения диагностического признака выносят решение о наличии дефекта в динамическом элементе.

Диагностическая модель чувствительности

Помимо представленного на рис. 1 способа получения оценок изображений сигналов модели $F_i(t)$ и функций структурной чувствительности $V_{ij}(t)$ путем их интегрирования с весом $e^{-\alpha t}$, возможен аналитический способ их получения путем использования структурно-матричной модели [1]. Сохраняя обозначения, принятые в этой работе и осуществляя подстановку $p=\alpha$ в формулу для передаточной функции ОД, получаем выражение для вычисления оценок передаточных функций ОД относительно всех выходных сигналов

$$\Phi(\alpha) = C\cdot\left[W(\alpha)^{-1} - A\right]^{-1} B + H\,. \qquad (11)$$

Вектор оценок изображений сигналов модели $F_м(\alpha)$ получим, умножая вектор (11) на изображение входного сигнала $G(\alpha)$

$$F_м(\alpha) = \Phi(\alpha)\cdot G(\alpha)\,.$$

Дифференцирование выражения (11) по аргументу $W_i(\alpha)$ позволяет получить формулу для вектора структурных чувствительностей

$$V_i(\alpha) = \frac{\partial \Phi(\alpha)}{\partial W_i(\alpha)} = C \cdot (W(\alpha)^{-1} - A)^{-1} W_i'(\alpha)(W(\alpha)^{-1} - A)^{-1} B, \qquad (12)$$

где $W_i'(\alpha)$ – (n x n) – матрица с единственным ненулевым элементом $-1/W_i^2(\alpha)$, стоящим на пересечении i-го столбца и i-й строки.

Таким образом, использование структурно-матричной модели позволяет формализовать вычисление вектора номинальных значений передаточных функций и векторов структурных чувствительностей. При этом используется информация о топологии ОД (матрицы A, C, H, B) и структуре передаточных функций (матрица $W(\alpha)$). Вычисления являются одноразовыми для конкретного объекта и позволяют обеспечить экономию аппаратных затрат на реализацию метода в виде уменьшения числа интеграторов и множительных устройств и отсутствия первой и второй аналоговых моделей объекта.

Два одиночных структурных дефекта i и j эквивалентны, если выполняется соотношение для векторов их структурной чувствительности

$$V_j(\alpha_l) = f(\alpha_l) \cdot V_i(\alpha_l), \quad \forall \alpha_l, \quad l = \overline{1,m}, \qquad (13)$$

где $f(\alpha)$ – скалярная функция.

Справедливость этого утверждения проверяется подстановкой векторов чувствительности (13) в формулу (10), после чего получаем $J_i = J_j$, что и означает эквивалентность дефектов.

Поскольку имеет место условие эквивалентности дефектов (13), векторы структурной чувствительности можно сокращать на общие множители их элементов. Анализ выражения (12) показывает, что таким общим множителем для всех элементов вектора структурной чувствительности (для всех контрольных точек ОД) является величина, определяемая выражением $W'_i(\alpha)(W(\alpha)^{-1}-A)^{-1}B$, которая представляет собой оценку передаточной функции первой модели (см. рис.1) структурной модели чувствительности относительно выхода i-го ДЭ, умноженной на величину $1/W^2(\alpha)$. После сокращения получим эквивалентный в смысле результатов поиска одиночных структурных дефектов вектор структурной чувствительности i-го динамического элемента

$$V_i^D(\alpha) = C \cdot (W(\alpha)^{-1} - A)^{-1} E_i, \qquad (14)$$

где $E_i = (0,\ldots,0,1,0,\ldots,0)^T$ – вектор-столбец с единственным ненулевым единичным элементом в i-й строке.

Структурные чувствительности $V_i^D(\alpha)$ представляют собой оценки передаточных функций объекта от входа i-го динамического элемента до рассматриваемых выходов. Дальнейшее эквивалентное в отношении значений диагностических признаков (10) упрощение проведем, учитывая, что обратная матрица может быть получена путем деления всех элементов присоединенной к ней матрицы на определитель обращаемой. Устраняя определитель как общий множитель в формуле (14), получаем:

$$V_i^D(\alpha) = C \cdot adj\left(W(\alpha)^{-1} - A\right) \cdot E_i\,, \qquad (15)$$

где *adj*(.) – оператор получения присоединенной матрицы.

Дальнейшее упрощение модели структурной чувствительности возможно с учетом конкретных топологических свойств объекта диагностирования.

Определение. Диагностической моделью чувствительности назовем упрощенную модель чувствительности объекта диагностирования, используемую для вычисления диагностических признаков и эквивалентную полной модели чувствительности в отношении значений этих признаков.

Таким образом, диагностическая модель чувствительности может быть получена в структурно-матричном виде – формула (15).

В качестве иллюстрации рассмотрим векторы диагностических моделей чувствительности некоторых соединений динамических элементов.

Для последовательного соединения двух ДЭ (в порядке возрастания их индексов):

$$V_1^D(\alpha) = (1, W_2(\alpha)); \qquad V_2^D(\alpha) = (0, 1)\,.$$

Для параллельного соединения двух ДЭ:

$$V_1^D(\alpha) = (1, 0); \qquad V_2^D(\alpha) = (0, 1)\,.$$

Для соединения двух ДЭ в виде отрицательной обратной связи (в цепи обратной связи – второй ДЭ):

$$V_1^D(\alpha) = (1, W_2(\alpha)); \qquad V_2^D(\alpha) = (-W_1(\alpha), 1)\,.$$

Наличие единичных элементов в векторах чувствительности указывает на их минимальный вид.

Иллюстративный пример

Рассмотрим применение описанного алгоритма для диагностирования объекта, структурная схема которого представлена на рис.2.

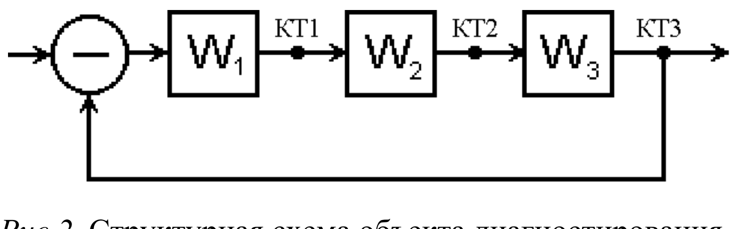

Рис.2. Структурная схема объекта диагностирования.

Передаточные функции динамических элементов:

$$W_1 = \frac{k_1(T_1 p + 1)}{p}; \; W_2 = \frac{k_2}{T_2 p + 1}; \; W_3 = \frac{k_3}{T_3 p + 1},$$

номинальные параметры: T_1=5 с; K_1=1; K_2=1; T_2=1 с; K_3=1; T_3=5 с. При поиске одиночного дефекта в виде отклонения постоянной времени T_1=4 с в первом звене путем подачи ступенчатого тестового входного сигнала единичной амплитуды и интегрального преобразования сигналов по Лапласу для параметра α = 0.5 и $T_к$=10 с получены значения диагностических признаков при использовании контрольных точек *КТ*2 и *КТ*3: J_1=0; J_2=0; J_3=0.017. Ненулевое значение третьего диагностического признака указывает на отсутствие дефекта в третьем блоке, равные и нулевые значения первого и второго признаков указывают на наличие дефекта в одном из этих блоков. При введении дополнительной контрольной точки на выходе первого блока получаем значения диагностических признаков: $J_1=0;$ J_2=0.186; J_3=0.018. Минимальное значение признака J_1 однозначно указывает на наличие дефекта в первом блоке. Применение рассмотренного метода диагностирования позволяет реализовать условный алгоритм поиска дефектов, когда вначале назначается минимальное количество контрольных точек (в рассмотренном примере – две). Определяется группа блоков, в которой содержится дефект (в рассмотренном примере – первый и второй блоки). Назначается контрольная точка внутри этой группы блоков для локализации дефекта.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Шалобанов С.В.* Структурные методы поиска одиночных дефектов в динамических системах/ Изв. вузов. Приборостроение. 2000. № 4. С. 7 – 13.
2. Патент РФ №2136033. Способ контроля динамического блока в составе системы управления и устройство для его осуществления /*С.В. Шалобанов.* Б.И. № 24.
3. *Корн Г., Корн Т.* Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1974.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Чье Ен Уном.