ВЕСТНИК ТОГУ. 2005. № 1

УДК 681.518.5

ПОИСК ДЕФЕКТОВ В ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ МЕТОДОМ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ СИГНАЛОВ

Шалобанов С. В. – проректор по учебной работе д-р техн. наук, проф. кафедры «Автоматика и системотехника» (ТОГУ)

Рассматривается алгоритм поиска дефектов линейных динамических систем с глубиной до динамического блока на основе модели структурной чувствительности и интегральных преобразований сигналов. Вводится понятие диагностической модели чувствительности и рассматриваются принципы ее построения.

The paper deals with the algorithm of search for linear dynamic system defects with the dynamic block depth on the basis of structural sensority model and integral signal transformations. We introduce the notion of the diagnostic sensority model and analyze the principles of its construction.

Введение и постановка задачи

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, с. 7-13] 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 структурных 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

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

в области вещественных значений переменной Лапласа $p=\alpha$ в интервале $0 \le \alpha \le \infty$. Использование преобразования Лапласа при диагностировании позволяет перейти от обработки временных функций к анализу численных значений их функционалов [2–8].

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

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

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

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

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

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

Везде далее будем предполагать, что выполняются достаточные условия существования преобразований Лапласа сигналов ОД $F_i(t)$, $i=\overline{1,k}$ [9]:

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

где $b_i < \alpha$; $h_i > 0$.

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

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

где $c_i = \alpha - b_i > 0$.

Таким образом, модуль абсолютной погрешности растет с уменьшением параметра c_i, представляющего собой 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 $\left|F_i(t)\right| \le h_i$, $i=\overline{1,k}$, тогда

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

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

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

При выборе, например, параметра преобразования Лапласа $\alpha = {}^{5}\!/_{T_k}$ имеем оценку погрешности $\left|\Delta_i(\alpha)\right| \le 0{,}0014 \cdot h_i \cdot T_k$.

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

Алгоритм диагностирования реализуется путем выполнения следующих операций:

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

2. На входы динамического объекта и его эталонной времен модели подают тестовое воздействие (единичное ступенчатое, линей возрастающее, прямоугольное импульсное и т.д.). Принципиальн ограничений на вид входного тестового воздействия предлагаем способ не предусматривает.

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

4. В качестве диагностического признака наличия дефекта в i динамическом элементе используют интегральную меру следующе вида:

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

где $Q_i(\alpha_j) = \Delta F(\alpha_j) - V_i(\alpha_j) \cdot \Delta W_i(\alpha_j)$; m – число значений переменной Л пласа, для которых находятся изображения сигнало $\Delta F(\alpha_j) = (\Delta F_1(\alpha_j), \Delta F_2(\alpha_j), ..., \Delta F_k(\alpha_j))^T$ – вектор изображений для в щественных значений переменной Лапласа α_j отклонений временны характеристик объекта в k контрольных точка: $V_i(\alpha_j) = \left(\frac{\partial F_1(\alpha_j)}{\partial W_i(\alpha_j)}, \frac{\partial F_2(\alpha_j)}{\partial W_i(\alpha_j)}, ..., \frac{\partial F_k(\alpha_j)}{\partial W_i(\alpha_j)} \right)^T$ – структурная чувствительност (чувствительность оценок изображений временных характеристи объекта к изменению передаточной функции i-го динамического эле мента); $\Delta W_i(\alpha_j)$ – отклонение передаточной функции i-го динамиче ского элемента от номинального значения.

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

Для того чтобы диагностический признак (7) не зависел от неиз вестного 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 выражения (8) слева на $V_i^T(\alpha_j)$ позволяет выразить скаляр $\Delta W_i(\alpha_j)$:

$$V_i(\alpha_j)^T\cdot V_i(\alpha_j)\cdot \Delta W_i(\alpha_j)=V_i(\alpha_j)^T\cdot \Delta F(\alpha_j)$$

или

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

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

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

где $V_{ji}(\alpha_l)=\dfrac{\partial F_j(\alpha_l)}{\partial W_i(\alpha_l)}$ – 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.

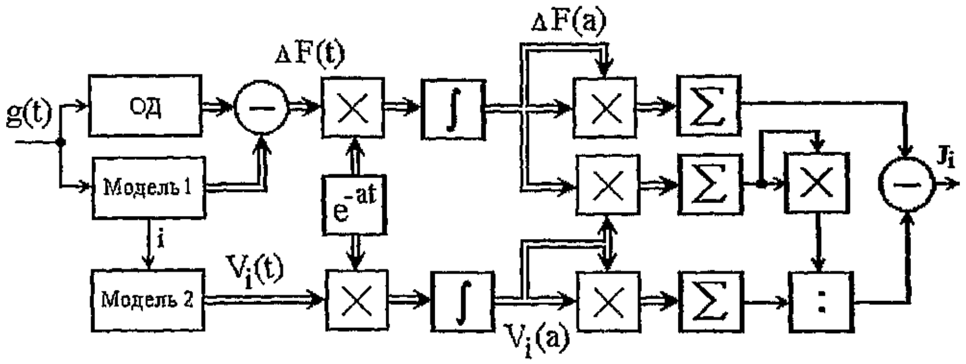

Рис. 1. Функциональная схема устройства поиска структурных дефектов с использованием интегральных преобразований сигналов

5. По минимуму значения диагностического признака вынос: решение о наличии дефекта в динамическом элементе.

Диагностическая модель чувствительности

Помимо представленного на рис. 1 способа получения оценок из‹ бражений сигналов модели $F_i(t)$ и функций структурной чувствител: ности $V_{ij}(t)$ путем их интегрирования с весом $e^{-\alpha t}$, возможен анали тический способ их получения путем использования структурн‹ матричной модели [1]. Сохраняя обозначения, принятые в этой работ‹ и осуществляя подстановку $p=\alpha$ в формулу для передаточной фунı ции ОД, получаем выражение для вычисления оценок передаточны 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 $F_M(\alpha)$ получим умножая вектор (11) на изображение входного сигнала $G(\alpha)$:

$$F_M(\alpha)=\Phi(\alpha)\cdot G(\alpha).$$

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 $W_i'(\alpha)$ -(nxn)–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 аналоговой модели объекта.

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

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

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

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

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 ления всех элементов присоединенной к ней матрицы на определит обращаемой. Устраняя определитель как общий множитель в форм (14), получаем

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

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

Дальнейшее упрощение модели структурной чувствительнос возможно с учетом конкретных топологических свойств объекта диа ностирования.

Дадим следующее определение.

Определение. Диагностической моделью чувствительности наз вем упрощенную модель чувствительности объекта диагностировани используемую для вычисления диагностических признаков и экви лентную полной модели чувствительности в отношении значений эти признаков.

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

В качестве иллюстрации рассмотрим векторы диагностически моделей чувствительности некоторых соединений динамических эле ментов.

Для последовательного соединения двух ДЭ (в порядке возраста ния 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.

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

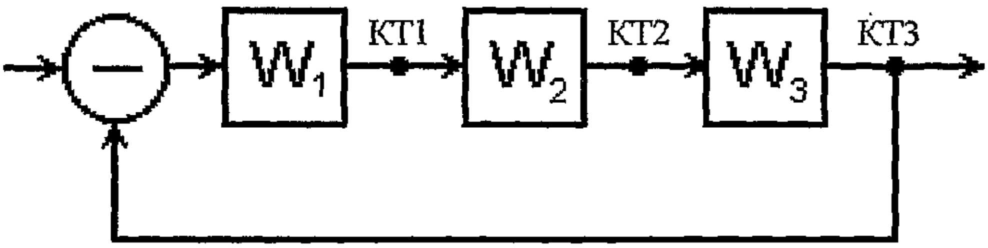

Рис. 2. Структурная схема объекта диагностирования

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 значения параметров: $T_1=5$ *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 $\alpha = 0{,}5$ и $T_к=10$ *с* получены значения диагностических признаков при использовании контрольных точек *КТ2* и *КТ3*: $J_1=0$; $J_2=0$; $J_3=0{,}017$. Ненулевое значение третьего диагностического признака указывает на отсутствие дефекта в третьем блоке, равные и нулевые значения первого и второго признака 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.

Библиографические ссылки

1. *Шалобанов С. В.* Структурные методы поиска одиночных дефектов в динамических системах // Приборостроение. 2000. № 4. (Изв. высш. учеб. заведений).
2. Пат. 2110828 РФ. Способ диагностирования апериодических звеньев и устройство для его осуществления / С. В. Шалобанов (РФ).
3. Пат. 2138072 РФ. Способ диагностирования динамического объекта с обратной связью и устройство для его осуществления / С. В. Шалобанов (РФ).
4. Пат. 2136033 РФ. пособ контроля динамического блока в составе системы управления и устройство для его осуществления / С. В. Шалобанов (РФ).
5. Пат. 2159458 РФ. Способ контроля динамического блока в составе системы управления и устройство для его осуществления / С. В. Шалобанов (РФ).
6. Пат. 2156494 РФ. Способ контроля параметров звеньев системы управления и устройство для его осуществления / С. В. Шалобанов (РФ).
7. Пат. 2173873 РФ. Устройство для контроля параметров звеньев системы управления / С. В. Шалобанов (РФ).
8. Пат. 2199776 РФ. Способ поиска неисправного блока в динамической системе / С. В. Шалобанов, В. В. Бобышев (РФ).
9. *Корн Г., Корн Т.* Справочник по математике для научных работников и инженеров. М., 1974.