DOI 10.37882/2223-2966.2023.05.40

ДИАГНОСТИРОВАНИЕ НЕПРЕРЫВНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ МЕТОДОМ ПРОБНЫХ ОТКЛОНЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ

DIAGNOSIS OF CONTINUOUS DYNAMICAL SYSTEMS BY THE METHOD OF TRIAL DEVIATIONS OF MODEL PARAMETERS

S.V. Shalobanov
S.S. Shalobanov

Summary: A method for searching for defects in a continuous dynamic system with a depth up to a dynamic block or a block parameter based on trial deviations of its model parameters using normalized diagnostic features is considered.

Keywords: dynamic systems, trial deviations of parameters, normalized features of the model.

Шалобанов Сергей Викторович
д.т.н, профессор, Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск
shalobanov@mail.ru
Шалобанов Сергей Сергеевич
к.т.н, доцент, Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск
shalobanov_ne@mail.ru

Аннотация: рассматривается метод поиска дефектов в непрерывной динамической системе с глубиной до динамического блока либо параметра блока на основе пробных отклонений параметров её модели с использованием нормированных диагностических признаков.

Ключевые слова: динамические системы, пробные отклонения параметров, нормированные признаки модели.

Введение

Адекватное описание проявления некоторых дефектов часто требует изменения структуры динамической модели одного или нескольких блоков объекта диагностирования (ОД). Использование диагностических признаков в виде параметров модели неизменной структуры может приводить к ошибкам диагностирования. Для устранения этого источника ошибок целесообразно строить диагностические признаки по блочному принципу. При этом, как показано в работах [1, 2], для вычисления диагностических признаков можно применять модель структурной чувствительности. 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 [2]. Сложность получения модели чувствительности ограничивает применение подобных алгоритмов и может являться дополнительным источником ошибок при диагностировании. В работе рассматривается подход, позволяющий упростить получение информации о модели структурной чувствительности. Рассматриваются нормированные диагностические признаки структурных дефектов, позволяющие проводить сравнение результатов диагностирования в различных режимах.

Постановка задачи

В качестве ОД рассматривается непрерывный динамический объект, состоящий из *n* линейных динамических элементов (ДЭ), номинальные передаточные функции которых $W_{o1},\dots,W_{on}$ известны.

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

Примем гипотезу о возможности появления в ОД только одиночных дефектов и синтезируем алгоритм поиска одиночных дефектов с использованием интегральных преобразований реакций ОД, номинальной модели и модели при наличии пробных отклонений параметров ДЭ.

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 позволяет перейти от обработки временных функций к анализу численных значений их функционалов [1, 3, 4].

Для каждого динамического элемента с номером *i* вычисляется диагностический признак по формуле:

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

где $\Delta F(\alpha_l) = \left(\Delta F_1(\alpha_l), \Delta F_2(\alpha_l), \ldots, \Delta F_k(\alpha_l)\right)^T$ — вектор изображений для вещественных значений переменной Лапласа α_l отклонений временных характеристик объекта в k контрольных точках;

$V_{ji}(\alpha_l) = \dfrac{\partial F_j(\alpha_l)}{\partial W_i(\alpha_l)}$ — структурная чувствительность для j-ой контрольной точки, i-го динамического элемента и l-го значения переменной Лапласа α_l.

По минимуму значения диагностического признака (2) выносят решение о наличии дефекта в динамическом элементе.

Произведем нормирование значений коэффициентов структурной чувствительности по всем контрольным точкам:

$$\hat{V}_{ji}(\alpha_l) = \frac{V_{ji}(\alpha_l)}{\sqrt{\sum_{j=1}^{k}V_{ji}^2(\alpha_l)}}. \quad (3)$$

Подставляя эти значения в выражение (2), получим:

$$J_i = \sum_{l=1}^{n}\sum_{j=1}^{k}\left[\Delta F(\alpha_l)\right]^2 - \sum_{l=1}^{n}\left[\sum_{j=1}^{k}\hat{V}_{ji}(\alpha_l)\cdot\Delta F_j(\alpha_l)\right]^2. \quad (4)$$

Коэффициенты структурной чувствительности (3) могут рассматриваться как координаты вектора $\hat{V}_i$ единичной длины в k-мерном пространстве:

$$\hat{V}_i(\alpha_l) = \left(\hat{V}_{1i}(\alpha_l), \hat{V}_{2i}(\alpha_l), \ldots, \hat{V}_{ki}(\alpha_l)\right)^T,$$

а отклонение изображений реакций объекта — как вектор в пространстве той же размерности с координатами:

$$\Delta F(\alpha_l) = \left(\Delta F_1(\alpha_l), \Delta F_2(\alpha_l), \ldots, \Delta F_k(\alpha_l)\right)^T.$$

Тогда формула (4) с учетом введенных векторов запишется в виде:

$$J_i = \sum_{l=1}^{n}\left\{\Delta F^T(\alpha_l)\cdot\Delta F^T(\alpha_l) - \left[\Delta F^T(\alpha_l)\cdot\hat{V}_1(\alpha_l)\right]^2\right\}, \quad (5)$$

где $\Delta F^T(\alpha_l)\cdot\hat{V}_1(\alpha_l)$ — скалярное произведение вектора отклонений динамической характеристики ОД на нормированный вектор структурной чувствительности по i-му динамическому элементу.

По определению скалярного произведения:

$$\Delta F^T(\alpha_l)\cdot\hat{V}_i(\alpha_l) = \left|\Delta F(\alpha_l)\right|\cdot\left|\hat{V}_i(\alpha_l)\right|\cdot\cos\varphi(\alpha_l),$$

где $|\cdot|$ — означает длину вектора;

$\varphi(\alpha_l)$ — угол в k-мерном пространстве между этими векторами.

Если направление векторов $\Delta F(\alpha_l)$ и $\hat{V}_i(\alpha_l)$ для всех α_l совпадают или противоположны, то $\cos\varphi(\alpha_l) = \pm 1$ и $\Delta F(\alpha_l)\cdot\hat{V}_i(\alpha_l) = \pm\left|\Delta F(\alpha_l)\right|$, подставляя эти значения в формулу (5), получим:

$$J_i = \sum_{l=1}^{n}\left[\left(\left|\Delta F(\alpha_l)\right|\right)^2 - \left(\left|\Delta F(\alpha_l)\right|\right)^2\right] = 0.$$

Таким образом, в терминах векторной интерпретации поиск одиночного структурного дефекта заключается в подборе такого индекса i , для которого совокупность нормированных векторов $\hat{V}_i(\alpha_l)$, $l = 1,...,n$ в k-мерном пространстве, в наибольшей степени попарно совпадает или противоположна с направлениями соответствующих векторов $\Delta F(\alpha_l)$, $l = 1,...,n$ деформации динамических характеристик ОД.

Поскольку для элементов векторов ΔF и V справедливо неравенство Коши-Буняковского:

$$\left(\sum_{j=1}^{n}a_i\cdot b_i\right)^2 \le \left(\sum_{j=1}^{n}a_i^2\right)\cdot\left(\sum_{j=1}^{n}b_i^2\right),$$

то диагностические признаки могут принимать только неотрицательные значения.

Диагностические признаки одиночных одиночных структурных дефектов вида (4) принимают численные значения, которые зависят как от степени отклонения частотных характеристик, так и от свойств модели чувствительности и могут принимать в общем случае любые неотрицательные значения. Для практических целей удобно иметь диагностические признаки, область значений которых была бы ограничена, в частности, интервалом [0,1], где крайние значения могли бы интерпретироваться как однозначное наличие (отсутствие) дефекта, а промежуточные значения — как вероятность наличия дефекта. Приведение диагностических признаков к единой шкале открывает возможности для сравнительного анализа условий и результатов диагностирования различных объектов диагностирования в терминах количественной различимости дефектов.

Возможность получения таких нормированных диагностических признаков дает векторная их интерпретация, рассмотренная выше. Идея нормировки признака заключается в приведении векторов деформации динамических характеристик к единичной длине.

Сформируем нормированный диагностический признак путем деления каждого слагаемого выражения (4) на величину $n\sum_{j=1}^{k}\Delta F_j^2(\alpha_l)$:

$$J_i = \frac{1}{n}\sum_{l=1}^{n}\left\{1-\left[\sum_{j=1}^{k}\hat{V}_{ji}(\alpha_l)\cdot\Delta\hat{F}_j(\alpha_l)\right]^2\right\}, \qquad (6)$$

где $\Delta\hat{F}_j(\alpha_l)$ — элементы нормированного вектора деформации динамической характеристики ОД.

Используя векторную интерпретацию выражения (6), запишем его в следующем виде

$$J_i = \frac{1}{n}\sum_{l=1}^{n}\left[1-\cos^2\varphi_i(\alpha_l)\right] = \frac{1}{n}\sum_{l=1}^{n}\sin^2\varphi_i(\alpha_l)$$

где $\varphi_i(\alpha_l)$ — угол между векторами единичной длины отклонений динамической характеристики ОД и структурной чувствительности для i-го динамического элемента и параметра интегрального преобразования α_l.

Таким образом, нормированный диагностический признак (6) представляет собой среднее значение квадратов синусов углов, образованных в k-мерном пространстве нормированными векторами структурной чувствительности динамического элемента и деформации интегрального преобразования динамической характеристики объекта диагностирования, полученными для различных параметров интегрального преобразования.

Получение модели структурной чувствительности является отдельной, достаточно сложной задачей. Для уменьшения объема требуемых вычислений при получении диагностических признаков заменим в выражении (6) нормированные векторы $\hat{V}_i(\alpha_l)$ интегральных преобразований модели структурной чувствительности на нормированные векторы $\Delta\hat{P}_i(\alpha_l)$ деформаций интегральных преобразований динамических характеристик модели, полученные в результате пробных отклонений параметров соответствующих блоков:

$$J_i = \frac{1}{n}\sum_{l=1}^{n}\left\{1-\left[\sum_{j=1}^{k}\Delta\hat{P}_{ji}(\alpha_l)\cdot\Delta\hat{F}_j(\alpha_l)\right]^2\right\}. \qquad (7)$$

Выражение (7) позволяет получить значения нормированного диагностического признака, представляющего собой среднее значение квадрата синуса угла, образованного вектором реальной деформации интегральной оценки динамической характеристики, обусловленной наличием дефекта в объекте, и вектором деформации интегральной оценки динамической характеристики, полученной в результате пробного отклонения параметров блока объекта. Пробное отклонение блока, минимизирующее значение диагностического признака (7), указывает на наличие дефекта в этом блоке.

Пример применения метода

Проиллюстрируем применение описанного подхода для диагностирования объекта, структурная схема которого представлена на рис.1.

Передаточные функции динамических элементов:

$$W_1 = \frac{k_1(T_1p+1)}{p};\, W_2 = \frac{k_2}{T_2p+1};\, W_3 = \frac{k_3}{T_3p+1},$$

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 трех контрольных точек и модели чувствительности: J_1=0; J_2=0.186; J_3=0.018. Минимальное значение признака J_1 однозначно указывает на наличие дефекта в первом блоке, а разность между третьим и первым признаками может количественно характеризовать фактическую различимость этого дефекта. Тот же дефект, найденный путем получения пробных отклонений на величину 10 % и вычислений по формуле (7), дает следующие значения диагностических признаков: J_1=0; J_2=0.78; J_3=0.074. Анализ значений диагностических признаков показывает, что значения второго и третьего признака, полученные при использовании пробных отклонений, больше, чем при использовании модели чувствительности. Это позволяет сделать вывод, что фактическая различимость дефекта первого блока выше при использовании второго алгоритма. Различимости дефектов второго и третьего блоков при поиске их с использованием пробных отклонений также не хуже, чем при использовании модели чувствительности.

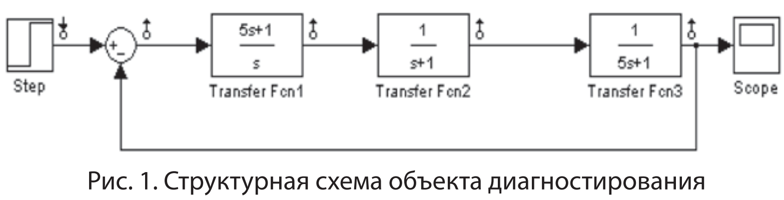

Рис. 1. Структурная схема объекта диагностирования

Выводы

Нормированные диагностические признаки позволяют сравнивать результаты поиска дефектов в различных режимах и количественно определять фактическую различимость дефектов. Предложенный метод поиска дефектов позволяет перейти от анализа функций к анализу численных значений их функционалов, уменьшить требуемый объем вычислений и обеспечить характеристики различимости дефектов не хуже, чем метод, использующим модель чувствительности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шалобанов С.В. Диагностирование динамических объектов методом интегральных преобразований сигналов / Информационные и управляющие системы: Сборник научных трудов / Под ред. В.В. Воронина — Хабаровск: Изд.-во Хабар. Гос. Техн. Ун-та, 2003. С. 30–33.
2. Шалобанов С.В. Структурные методы поиска одиночных дефектов в динамических системах / Изв. вузов. Приборостроение. 2000. № 4. С. 7–13.
3. Патент России 2136033. Способ контроля динамического блока в составе системы управления и устройство для его осуществления / Шалобанов С.В. — № 98115937/09(017487); заявл. 17.08.98; опубл. 27.08.99, бюл. № 24.
4. Шалобанов С.В. Поиск дефектов в динамических системах методом интегральных преобразований сигналов / Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2005. № 1. С. 59–68.