



УДК 681.518.5

© С. В. Шалобанов, С. С. Шалобанов, 2011

ДИАГНОСТИРОВАНИЕ НЕПРЕРЫВНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ МЕТОДОМ ТОПОЛОГИЧЕСКИХ СВЯЗЕЙ

Шалобанов С. В. – д-р техн. наук, проф., проректор по учебной работе, e-mail: shalobanov@mail.ru; *Шалобанов С. С.* – асп., преп. кафедры «Электротехника и электроника», e-mail: shalobanov_ne@mail.ru (ТОГУ).

Рассматривается метод поиска дефектов в непрерывной динамической системе с глубиной до динамического блока на основе матрицы топологических связей с использованием нормированных диагностических признаков. Такой подход упрощает реализацию алгоритма, особенно при диагностировании нелинейных объектов. Применение матрицы топологических связей позволяет уменьшить аппаратные или программные затраты, связанные с реализацией пробных отклонений параметров модели или функций чувствительности и упрощения алгоритма вычисления диагностических признаков. Приводятся результаты реализации алгоритма, показывающие его эффективность и обеспечение высокой различимости дефектов.

The work considers the fault location technique for a continuous dynamical system with depth to dynamical block based on matrix of topological constraints with the use of normalized diagnostic signs. This approach simplifies the implementation of the algorithm, especially in the diagnosis of non-linear objects. The use of topological constraints matrix can reduce the hardware or software costs associated with the implementation of trial deviations of model parameters or functions of sensitivity and simplification of the prediction algorithm of diagnostic signs. The results of the implementation of the algorithm showing its effectiveness and ensuring high distinction of the defects are given.

Ключевые слова: объект диагностирования, матрица топологических связей, интегральное преобразование, нормированный диагностический признак, различимость дефектов.

Постановка задачи

В качестве объекта диагностирования (ОД) рассматривается непрерывный динамический объект, состоящий из динамических элементов (ДЭ), номинальные операторы которых W_{o1}, \dots, 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 динамических элементов.

Синтезируем алгоритм поиска дефектов с использованием: интегральных преобразований реакций ОД, номинальной модели и матрицы топологических связей ДЭ.

Алгоритм поиска дефектов

Алгоритм поиска дефектов основан на определении интегральных оценок отклонений сигналов номинальной модели от сигналов объекта диагностирования [1–3]:

$$\begin{cases} \Delta F_j(t) = F_{mj}(t) - F_{oj}(t), \\ \Delta F_j(\alpha) = L\{\Delta F_j(t)\} = \int_0^{T_k} \Delta F_j(t) \cdot e^{-\alpha t} dt, \quad j = \overline{1, k}, \end{cases} \quad (1)$$

где: j – номер контрольной точки, $F_{mj}(t)$ – сигнал модели в j – контрольной точке, $F_{oj}(t)$ – сигнал объекта в j – контрольной точке, T_k – время контроля объекта диагностирования, α – параметр интегрального преобразования, k – число контрольных точек.

В процессе диагностирования вычисляются также элементы топологических связей каждого блока, входящего в состав системы для каждой контрольной точки:

$$P_{ji}, \quad j = 1, 2, K, k; \quad i = 1, 2, K, m, \quad (2)$$

где: i – номер блока, P_{ji} – элементы топологических связей каждого блока для j – контрольной точки i – блока, m – число блоков.

Элементы P_{ji} определяют из множества значений $\{-1, 0, 1\}$, значение -1 определяют, если знак передачи сигнала от выхода i -го блока до j -й контрольной точки отрицательный, значение 0 определяют, если передача сигнала от выхода i -го блока до j -й контрольной точки отсутствует, значение 1 определяют, если знак передачи сигнала от выхода i -го блока до j -й контрольной точки положительный. Элементы топологических связей P_{ji} используют вместо изменений интегральных оценок сигналов модели, полученных для функции чувствительности [1] или для пробных отклонений параметров блоков для всех контрольных точек [2, 3].

Выражения (1) и (2) позволяют вычислить элементы векторов ΔF и P , размерность которых определяется количеством контрольных точек. Для по-



лучения нормированных диагностических признаков элементы вектора ΔF и P пронормируем по формулам:

$$\Delta \hat{F}_j(\alpha) = \frac{\Delta F_j(\alpha)}{\sqrt{\sum_{l=1}^k \Delta F_l^2(\alpha)}}, \quad (3)$$

$$\hat{P}_{ji} = \frac{P_{ji}}{\sqrt{\sum_{l=1}^k P_{li}^2}}, \quad (4)$$

где: l – номер контрольной точки объекта диагностирования.

Элементы полученных нормированных векторов (3) и (4) используются для вычислений диагностических признаков по формуле:

$$J_i = 1 - \left[\sum_{j=1}^k \hat{P}_{ji} \cdot \Delta \hat{F}_j(\alpha) \right]^2, \quad i = \overline{1, m}. \quad (5)$$

Вектор топологических связей, минимизирующий значение диагностического признака (5), указывает на наличие дефекта в этом блоке. Функциональная схема устройства, реализующего вычисление диагностического признака наличия структурного дефекта с использованием интегрального преобразования сигналов, приведена на рис. 1.

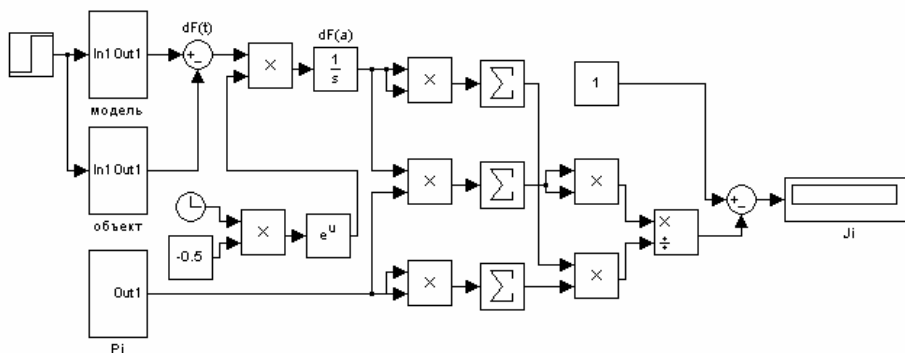


Рис. 1. Функциональная схема устройства поиска структурного дефекта методом матрицы топологических связей

Поскольку диагностические признаки лежат в фиксированном интервале значений $[0, 1]$, различимость двух дефектов может оцениваться как разность значений соответствующих признаков.

Таким образом, точные изменения интегральных оценок сигналов модели для всех контрольных точек, полученные для функции чувствительности или пробных отклонений параметров блоков, которые использовались для

поиска дефектов в [1–4], заменяются в рассматриваемом алгоритме на элементы из множества $\{-1, 0, 1\}$, которые несут информацию о соотношении их знаков. Такой приближенный подход позволяет упростить алгоритм диагностирования. Поскольку диагностический признак в [2, 3] представляет собой квадрат синуса угла между вектором изменений интегральных оценок сигналов контролируемой системы и вектором интегральных оценок деформаций сигналов, полученных для пробных отклонений параметров блоков, погрешность замены точных значений интегральных оценок деформаций сигналов, полученных для пробных отклонений параметров блоков на значения из множества $\{-1, 0, 1\}$, можно пояснить рисунком, на котором для случая двух контрольных точек в объекте показаны возможные направления векторов топологических связей (см. рис. 2). Поскольку свойство диагностического признака, используемого в [1–4], как и в рассматриваемой статье, таково, что противоположные направления векторов пробных отклонений (и топологических связей) дают одинаковые значения этого признака, то максимальная погрешность, вызванная заменой векторов пробных отклонений на векторы топологических связей, выраженная в угловых единицах, равна $\frac{\pi}{4}$.

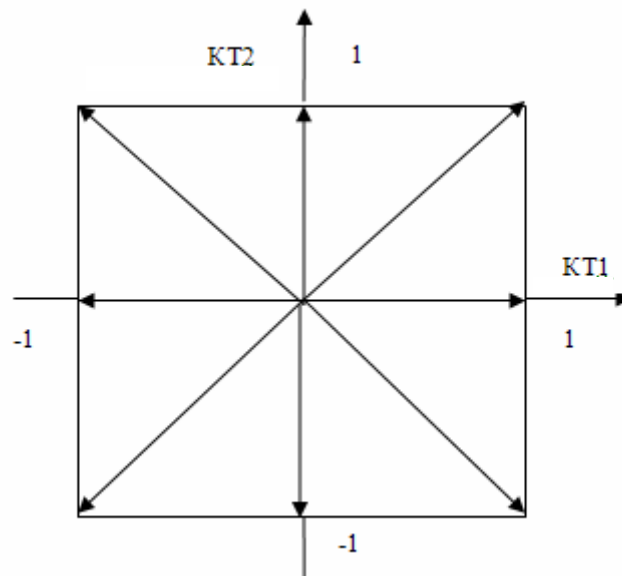


Рис. 2. Возможные направления векторов топологических связей

Пример применения метода

Проиллюстрируем применение описанного подхода для диагностирования линейного непрерывного объекта, структурная схема которого представлена на рис. 3.

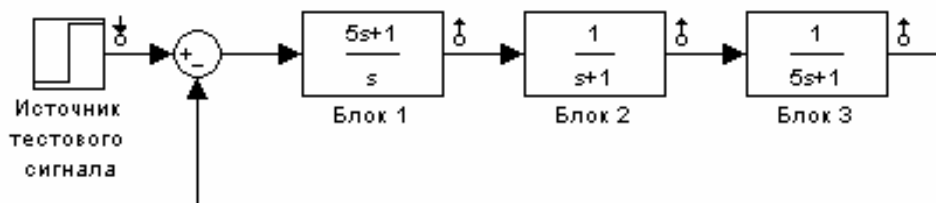


Рис. 3. Структурная схема линейного объекта диагностирования

Передаточные функции блоков:

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

где номинальные значения параметров: $T_1 = 5$ с; $K_1 = 1$; $K_2 = 1$; $T_2 = 1$ с; $K_3 = 1$; $T_3 = 5$ с.

Определим элементы топологических связей каждого блока, входящего в состав системы для каждой контрольной точки P_{ji} , $j = 1, 2, 3$; $i = 1, 2, 3$, знак передачи сигнала от выхода первого блока до первой контрольной точки положителен, поэтому $P_{11} = 1$, знак передачи сигнала от выхода первого блока до второй контрольной точки положителен, поэтому $P_{21} = 1$, знак передачи сигнала от выхода первого блока до третьей контрольной точки положителен, поэтому $P_{31} = 1$, таким образом, вектор топологических связей первого блока будет иметь вид: $P_1 = (1, 1, 1)$. Для второго блока знак передачи сигнала от его выхода до первой контрольной точки отрицателен, а для второй и третьей контрольных точек – положителен, поэтому вектор топологических связей для второго блока будет иметь вид: $P_2 = (-1, 1, 1)$. Для третьего блока вектор топологических связей будет иметь вид: $P_3 = (-1, -1, 1)$.

При поиске одиночного дефекта в виде отклонения постоянной времени $T_1 = 4$ с (дефект № 1) в первом звене путем подачи ступенчатого тестового входного сигнала единичной амплитуды и интегральных оценок сигналов для параметра $\alpha = 0,5$ и $T_k = 10$ с получены значения диагностических признаков по формуле (5) при использовании трех контрольных точек, расположенных на выходах блоков. Дефект, вычисленный по формуле (5), дает следующие значения диагностических признаков: $J_1 = 0,2237$; $J_2 = 0,9954$; $J_3 = 0,5093$.

Моделирование процессов поиска дефектов во втором и третьем блоках для данного объекта диагностирования при том же параметре интегрирования α и при единичном ступенчатом входном сигнале дает следующие значения диагностических признаков.

При наличии дефекта в блоке № 2 (в виде уменьшения параметра T_2 на 20 %, дефект № 2): $J_1=0,9666$; $J_2=0,2918$; $J_3=0,8916$.

При наличии дефекта в блоке № 3 (в виде уменьшения параметра T_3 на 20 %, дефект № 3) $J_1=0,4718$; $J_2=0,9483$; $J_3=0,2549$.

Минимальное значение диагностического признака во всех случаях правильно указывает на дефектный блок.

Данный метод очень удобно применять для поиска одиночных структурных дефектов нелинейных систем.

Проиллюстрируем применение описанного подхода для диагностирования нелинейного непрерывного объекта, структурная схема которого представлена на рис. 4.

Передаточные функции блоков:

$$W_1 = \frac{k_1(T_1 p + 1)}{p}; \quad W_2 - \text{ограничитель по уровню}; \quad W_3 = \frac{k_3}{T_3 p + 1},$$

где: номинальные значения параметров: $T_1 = 5$ с; $K_1 = 1$; нижний уровень (down) = $-0,5$; верхний уровень (up) = $0,5$; $K_3 = 1$; $T_3 = 5$ с.

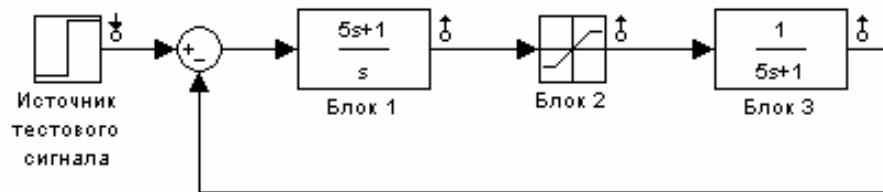


Рис. 4. Структурная схема нелинейного объекта диагностирования

Определим элементы топологических связей каждого блока, входящего в состав системы для каждой контрольной точки P_{ji} , $j = 1, 2, 3$; $i = 1, 2, 3$, знак передачи сигнала от выхода первого блока до первой контрольной точки положителен, поэтому $P_{11} = 1$, знак передачи сигнала от выхода первого блока до второй контрольной точки положителен, поэтому $P_{21} = 1$, знак передачи сигнала от выхода первого блока до третьей контрольной точки положителен, поэтому $P_{31} = 1$, таким образом, вектор топологических связей первого блока будет иметь вид: $P_1 = (1, 1, 1)$. Для второго блока знак передачи сигнала от его выхода до первой контрольной точки отрицателен, а для второй и третьей контрольных точек – положителен, поэтому вектор топологических связей для второго блока будет иметь вид: $P_2 = (-1, 1, 1)$. Для третьего блока вектор топологических связей будет иметь вид: $P_3 = (-1, -1, 1)$.

При поиске одиночного дефекта в виде отклонения постоянной времени $T_1 = 4$ с (дефект № 1) в первом звене путем подачи ступенчатого тестового входного сигнала единичной амплитуды и интегральных оценок сигналов для



параметра $\alpha = 0.5$ и $T_k = 10$ с получены значения диагностических признаков по формуле (5) при использовании трех контрольных точек, расположенных на выходах блоков. Дефект, вычисленный по формуле (5), дает следующие значения диагностических признаков: $J_1 = 0,166$; $J_2 = 0,9206$; $J_3 = 0,5803$.

Моделирование процессов поиска дефектов во втором и третьем блоках для данного объекта диагностирования при том же параметре интегрирования α и при единичном ступенчатом входном сигнале дает следующие значения диагностических признаков.

При наличии дефекта в блоке № 2 (в виде уменьшения параметра UP на 20 %, дефект № 2): $J_1 = 0,9685$; $J_2 = 0,2865$; $J_3 = 0,8913$.

При наличии дефекта в блоке № 3 (в виде уменьшения параметра T_3 на 20 %, дефект № 3) $J_1 = 0,4269$; $J_2 = 0,9996$; $J_3 = 0,2483$.

Минимальное значение диагностического признака во всех случаях правильно указывает на дефектный блок.

Заключение

Недостатком поиска одиночного структурного дефекта методом пробных отклонений параметров модели или методом функции чувствительности является то, что они используют m моделей с пробными отклонениями параметров передаточных функций блоков, либо $2m$ моделей функций чувствительности.

Матрица топологических связей является предельным случаем упрощения матрицы чувствительности либо матрицы пробных отклонений, что упрощает реализацию алгоритма, особенно при диагностировании нелинейных объектов. Данный подход, использующий матрицу топологических связей, позволяет уменьшить аппаратные или программные затраты, связанные с реализацией пробных отклонений параметров модели или функций чувствительности и упрощения алгоритма вычисления диагностических признаков [5, 6].

Библиографические ссылки

1. Шалобанов С. В. Поиск дефектов в динамических системах методом интегральных преобразований сигналов // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – № 1. – 2005.

2. Воронин В. В., Шалобанов С. С. Диагностирование непрерывных динамических систем методом пробных отклонений параметров модели // Информатика и системы управления. – № 1 (23). – 2010.



3. Шалобанов С. В., Шалобанов С. С. Способ поиска неисправного блока в динамической системе / Положительное решение от 12.07.2010 о выдаче патента на изобретение по заявке № 2009123999/08(033242), МКИ ⁶ G 05B 23/02, 2010.

4. Шалобанов С. С. Диагностирование динамических систем автоматического управления методом пробных отклонений / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011613096. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 19 апреля 2011.

5. Шалобанов С. В., Шалобанов С. С. Способ поиска неисправного блока в непрерывной динамической системе / Положительное решение о выдаче патента на изобретение от 22.07.2011 по заявке №2011100409/08(000540), МКИ ⁶ G 05B 23/02, 2011.

6. Voronin V. V., Shalobanov S. V., Shalobanov S. S. The search defects algorithm in continuous dynamical systems by vectors of topological relations. "Modern materials and technologies 2011" International Russian-Chinese Symposium PROCEEDINGS, Khabarovsk 24–28 October 2011.