

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPPUTER ENGINEERING
AND MANAGEMENT

УДК 681.518.5

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-4-17-30

Диагностирование непрерывных динамических систем с использованием топологических функций чувствительности*

В.В. ВОРОНИН^а, С.В. ШАЛОБАНОВ^б, С.С. ШАЛОБАНОВ^с

680035, РФ, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136, Тихоокеанский государственный университет

^а 004183vzv@mail.ru ^б shalobanov@mail.ru ^с shalobanov_ne@mail.ru

В работе рассмотрен алгоритм поиска дефектов топологических связей между динамическими блоками, позволяющий полнее учесть специфику проявления реального одностороннего дефекта – обрыва одной связи между динамическими блоками передаточной функции объекта диагностирования. Применение известных алгоритмов подобного рода осложняется необходимостью использования моделей с пробными отклонениями параметров, либо необходимостью анализа знаков передач выходных сигналов, либо сменой позиции входного сигнала. Недостатком алгоритма на основе пробных изменений топологических связей модели является то, что он использует задание этих изменений в моделях с пробными отклонениями, что является трудоемкой задачей. Недостатком алгоритма с анализом знаков передач выходных сигналов с использованием нормированного диагностического признака, а также с использованием бинарного диагностического признака является то, что необходимы дополнительные вычисления знаков передач выходных сигналов от динамических блоков передаточной функции до контрольных точек. Недостатком алгоритма со сменой позиции входного сигнала является то, что он использует перемещение места подачи входного сигнала на другую позицию в моделях, контролирующей топологическую связь. Ниже рассматривается алгоритм поиска дефектов в виде нарушения связей между динамическими блоками передаточной функции, основанный на использовании модели топологической чувствительности с помощью интегральных оценок выходных сигналов объекта диагностирования. Топологическая чувствительность может быть получена с использованием структурно-матричной динамической модели. Такой подход упрощает реализацию алгоритма путем уменьшения числа контрольных точек, что позволяет сократить аппаратные и временные затраты при диагностировании сложных объектов. Определена процедура получения нормированных диагностических признаков и вычисления количественной меры различимости дефектов.

* Статья получена 10 сентября 2019 г.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-08-00737).

Ключевые слова: поиск дефектов, непрерывная система с обратной связью, передаточная функция динамического блока, топологическая функция чувствительности, диагностическая модель, объект диагностирования, контрольные точки, интегральные оценки выходных сигналов, нормированный диагностический признак, различимость дефектов

ВВЕДЕНИЕ

Динамические модели стационарных непрерывных линейных систем управления строятся как с помощью графоаналитического описания с использованием структурных схем [1, 2], так и путем описания их в пространстве состояний [3, 4]. Метод пространства состояний применим в программировании на ЭВМ, так как использует вычислительные методы линейной алгебры и матричное представление систем. Между тем в описанной при помощи передаточных функций системе всегда есть определенный произвол в выборе переменных состояния. Передаточной функции системы соответствует несколько представлений в пространстве состояний, и первая определяется однозначным образом. Если известна модель последней в пространстве состояний, это говорит о том, что описание системы является в нем более общим. Меньшая размерность n вектора переменных, динамические свойства отдельных блоков и отражение межблочных связей (топологических особенностей) является удобством графоаналитического представления объекта диагностирования ОД [5–7].

Данные диагностические модели удобно применять при разработке структурных методов поиска дефектов, поскольку они имеют достоинства методов пространства состояний (использование методов линейной алгебры, матричное представление) и графоаналитического представления (отображение блочных связей) [8–10].

1. АЛГОРИТМ ПОИСКА ДЕФЕКТОВ

Алгоритм поиска дефектов с глубиной до структурной связи между динамическими блоками основан на определении отклонений выходных сигналов объекта диагностирования от сигналов номинальной модели [11–13]:

$$DF_j(\alpha) = F_j(\alpha) - F_{j\text{ном}}(\alpha), \quad j=1, \dots, k; \quad \alpha = S/T_k,$$

где j – номер контрольной точки; k – число контрольных точек; $F_j(\alpha)$ и $F_{j\text{ном}}(\alpha)$ – сигналы объекта и модели соответственно в j -й контрольной точке; T_k – время контроля.

Пусть система состоит из n блоков с передаточными функциями W_1, W_2, \dots, W_n . Обозначим V – входное воздействие, $\mathbf{Y} = (y_1, y_2, \dots, y_n)^T$, $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ – векторы выходных и входных сигналов блоков соответственно. Пусть также задан порядок соединения блоков в диагностической модели. Тогда структурно-топологические особенности системы однозначно определяются структурно-матричной схемой, представленной на рис. 1.

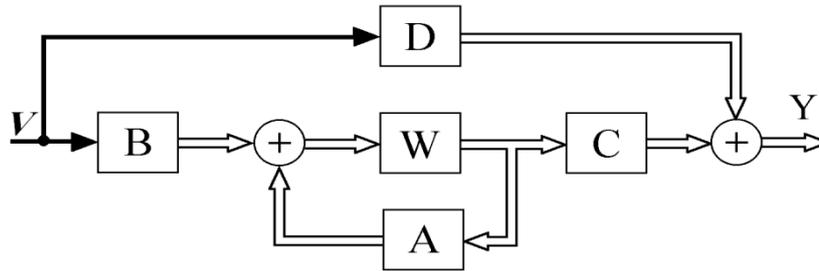


Рис. 1. Полная структурно-матричная модель ОД

Fig. 1. A complete structural-matrix model of the diagnosis object (DO)

В модели введены следующие обозначения:

V – скалярный входной сигнал ОД;

$B = (b_1, \dots, b_n)^T$ – вектор преобразования входного сигнала V ;

$W = \begin{bmatrix} W_1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & W_n \end{bmatrix}$ – диагональная матрица передаточных функций

блоков ОД;

$A = [a_{ij}]$ – $(n \times n)$ -матрица топологии ОД, где a_{ij} принимает значения из множества $\{-1, 0, 1\}$ и определяет наличие и знак связи выходного сигнала j -го блока со входом i -го блока;

$C = \begin{bmatrix} E \\ P \end{bmatrix}$ – $(n + s \times n)$ -матрица преобразования сигналов, где s – число сумматоров в ОД, верхний блок E – единичная матрица, P – $(s \times n)$ -матрица, элемент p_{ij} которой определяет наличие и знак связи выходного сигнала j -го блока с i -м сумматором;

$D = \begin{bmatrix} O \\ G \end{bmatrix}$ – $(n + s \times 1)$ -вектор, O – нулевой блок, G – $(s \times 1)$ -вектор, компонент g_i которого определяет наличие и знак связи входа V с i -м сумматором.

При таком представлении элементы вектора выходных сигналов Y представляют собой все $n + s$ сигналов ОД. Структурно-матричная модель определяет соотношение между вектором выходных сигналов Y и входным сигналом V (1):

$$Y = (C[E - WA]^{-1}WB + D)V, \quad (1)$$

откуда вектор передаточных функций

$$\Phi = \frac{Y}{V} = C[E - WA]^{-1}WB + D = C[W^{-1} - A]^{-1}B + D. \quad (2)$$

Модель топологической чувствительности определяется дифференцированием выражения (2) по связи между i -м и j -м блоками:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \alpha_{ij}} = C[W^{-1} - A]^{-1} A'_{ij}[W^{-1} - A]^{-1} B,$$

где A'_{ij} – производная матрицы A по связи (i, j) .

Модель чувствительности получают следующим образом. Поочередно, для каждой из m связей всех блоков динамической системы соединяют перемычкой две модели: на вход первой модели подают тестовый сигнал V , выходом первой модели определяют выход i -го блока (начало рассматриваемой топологической связи), выход первой модели соединяют со входом второй аналогичной модели, входом второй модели определяют вход j -го блока (окончание контролируемой топологической связи) (рис. 2). Модель топологической чувствительности может быть представлена в виде соединения двух моделей, связанных перемычкой.

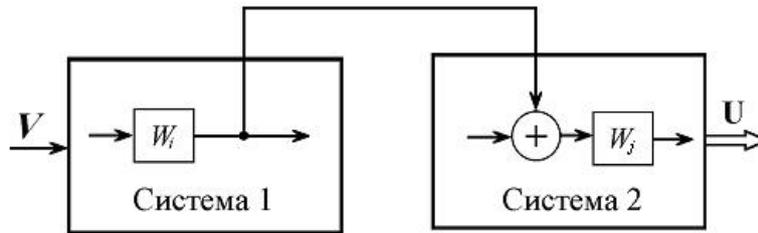


Рис. 2. Модель топологической функции чувствительности

Fig. 2. A model of the topological function of sensitivity

В процессе диагностирования регистрируют интегральные оценки выходных сигналов моделей топологической чувствительности:

$$U(\alpha)_{ji}, j = 1, \dots, k, i = 1, \dots, m,$$

где $U(\alpha)_{ji}$ – чувствительность передаточной функции объекта диагностирования к изменению i -й связи для j -й контрольной точки; m – число рассматриваемых топологических связей.

Выходные сигналы моделей чувствительности (2) являются топологическими функциями чувствительности U . Выражения (1) и (2) позволяют вычислить элементы векторов ΔF и U , размерность которых определяется количеством контрольных точек. Диагностический признак наличия топологического дефекта определяется формулой

$$J_i = 1 - \left[\sum_{j=1}^k \frac{U_{ji}(\alpha)}{\sqrt{\sum_{n=1}^k U_{ni}^2(\alpha)}} \frac{\Delta F_j(\alpha)}{\sqrt{\sum_{n=1}^k \Delta F_n^2(\alpha)}} \right]^2, \quad i = 1, \dots, m. \quad (3)$$

Для нормированных векторов $\Delta\hat{F}$ и \hat{U} формула (3) запишется в виде

$$J_i = 1 - \left[\sum_{j=1}^k \hat{U}_{ji}(\alpha) \cdot \Delta\hat{F}_j(\alpha) \right]^2, \quad i = 1, \dots, m, \quad (4)$$

где

$$\Delta\hat{F}_j(\alpha) = \frac{F_j(\alpha)}{\sqrt{\sum_{n=1}^k \Delta F_n^2(\alpha)}}, \quad (5)$$

$$\hat{U}_{ji}(\alpha) = \frac{U_{ji}(\alpha)}{\sqrt{\sum_{n=1}^k U_{ni}^2(\alpha)}}, \quad (6)$$

где m – число рассматриваемых изменений связей для функции топологической чувствительности; k – число отклонений выходных сигналов объекта диагностирования от сигналов номинальной модели на интервале контроля T_k [14–16].

Топологическая связь, для которой диагностический признак (3) или (4) принимает минимальное значение, считается дефектной.

Диагностические признаки (3) и (4) лежат в фиксированном интервале значений $[0, 1]$, поэтому различимость двух топологических дефектов может оцениваться как разность значений соответствующих признаков.

Графическая интерпретация диагностического признака заключается в следующем: поскольку в квадратных скобках выражения (4) записано скалярное произведение двух векторов единичной длины размерностью k (k – число контрольных точек), то выражение в квадратных скобках есть косинус угла между этими векторами. Следовательно, выражение (4) можно заменить выражением

$$J_i = 1 - \cos^2 \varphi_i = \sin^2 \varphi_i,$$

где φ_i – угол между вектором единичной длины интегральных оценок отклонений сигналов объекта диагностирования от номинальных и вектором единичной длины интегральных оценок выходных сигналов модели чувствительности i -й связи.

Фактическая различимость i -го топологического дефекта определяется как

$$\Delta J_i = J_k - J_i,$$

где J_i – значение признака i -го присутствующего в объекте топологического дефекта; J_k – значение ближайшего к нему по величине признака.

Функциональная схема устройства, реализующего вычисление диагностического признака наличия топологического дефекта с использованием топологической функции чувствительности (3), приведена на рис. 3.

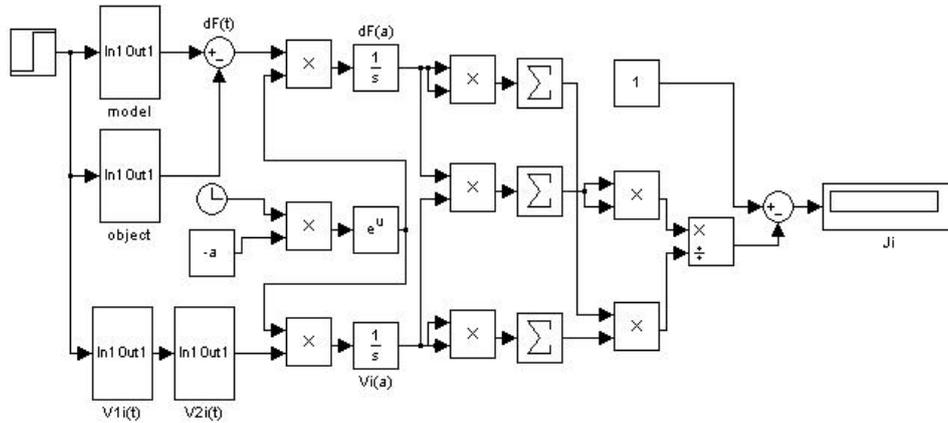


Рис. 3. Функциональная схема устройства поиска дефектов с использованием топологической функции чувствительности

Fig. 3. A functional diagram of a defect search unit with the use of the topological function of sensitivity

Поиск неисправной топологической связи согласно предлагаемому алгоритму сводится к выполнению следующих операций.

1. В качестве динамической системы рассматривают систему, состоящую из произвольно соединенных динамических элементов, передаточные функции которых в сумме содержат m топологических связей.

2. Предварительно определяют время контроля $T_k \geq T_{\text{ПП}}$, где $T_{\text{ПП}}$ – время переходного процесса системы. Время переходного процесса оценивают для номинальных значений параметров динамической системы.

3. Определяют параметр интегрального преобразования сигналов из соотношения $\alpha = 5/T_k$ [17–19].

4. Фиксируют число контрольных точек k [20–22].

5. Предварительно определяют векторы $\hat{U}(\alpha)$ интегральных оценок выходных сигналов модели, полученные в результате функций чувствительности i -й межблочной связи каждой из m топологических связей всех блоков, для чего выполняют пункты 6–9.

6. Подают тестовый сигнал V (единичный ступенчатый, линейно возрастающий, прямоугольный импульсный и т. д.) на вход системы управления с номинальными характеристиками. Принципиальных ограничений на вид входного тестового воздействия предлагаемый способ не предусматривает.

7. Регистрируют реакцию системы с номинальными характеристиками $f_{j\text{ном}}(t)$, $j=1, \dots, k$, на интервале $t \in [0, T_k]$ в k контрольных точках и определяют интегральные оценки выходных сигналов $F_{j\text{ном}}(a)$, $j=1, \dots, k$, системы. Для этого в момент подачи тестового сигнала на вход системы управления с номинальными характеристиками одновременно начинают интегрирование сигналов системы управления в каждой из k контрольных

точек с весами $e^{-\alpha t}$, где $\alpha = 5 / T_k$. Для этого сигналы системы управления подают на первые входы k блоков перемножения, на вторые входы блоков перемножения подают экспоненциальный сигнал $e^{-\alpha t}$, выходные сигналы k блоков перемножения подают на входы k блоков интегрирования, интегрирование завершают в момент времени T_k , полученные в результате интегрирования оценки выходных сигналов $F_{j\text{ном}}(\alpha)$, $j = 1, \dots, k$, регистрируют.

8. Определяют интегральные оценки выходных сигналов модели для каждой из k контрольных точек, полученные в результате использования топологической функции чувствительности. Для этого поочередно для каждой из m топологических связей блоков динамической системы соединяют топологической связью две модели: на вход первой модели подают тестовый сигнал $x(t)$; выходом первой модели фиксируют выход блока, к которому подключена рассматриваемая топологическая связь; соединяют выход первой модели со входом второй; входом второй модели фиксируют вход блока, к которому подключена рассматриваемая топологическая связь; снимают выходные сигналы для каждой контрольной точки второй модели; полученные выходные сигналы для каждой из k контрольных точек и каждой из m составных моделей с топологической функцией чувствительности $U(\alpha)_{ji}$, $j = 1, \dots, k$; $i = 1, \dots, m$, регистрируют.

9. Определяют нормированные значения интегральных оценок выходных сигналов модели, полученные в результате использования топологической функции чувствительности соответствующих межблочных связей по формуле

$$\hat{U}_{ji}(\alpha) = \frac{U_{ji}(\alpha)}{\sqrt{\sum_{n=1}^k U_{ni}^2(\alpha)}}.$$

10. Замещают систему с номинальными характеристиками контролируемой. На вход системы подают аналогичный тестовый сигнал $x(t)$.

11. Определяют интегральные оценки выходных сигналов контролируемой системы для k контрольных точек $F_j(\alpha)$, $j = 1, \dots, k$, осуществляя операции, описанные в пунктах 6 и 7 применительно к контролируемой системе.

12. Определяют отклонения интегральных оценок выходных сигналов контролируемой системы для k контрольных точек от номинальных значений $\Delta F_j(\alpha) = F_j(\alpha) - F_{j\text{ном}}(\alpha)$, $j = 1, \dots, k$.

13. Вычисляют нормированные значения отклонений выходных сигналов контролируемой системы от номинальных по формуле

$$\Delta \hat{F}_j(\alpha) = \frac{\Delta \hat{F}_j(\alpha)}{\sqrt{\sum_{n=1}^k \Delta \hat{F}_n(\alpha)}}.$$

14. Вычисляют диагностические признаки наличия неисправной топологической связи блоков по формуле

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

15. По минимуму значения диагностического признака определяют топологический дефект.

Покажем, что данный алгоритм позволяет находить дефекты топологических связей между соответствующими блоками.

2. ПРИМЕР ПРИМЕНЕНИЯ АЛГОРИТМА

Рассмотрим реализацию предлагаемого алгоритма поиска одиночного топологического дефекта для системы, структурная схема которой представлена на рис. 4 и является моделью системы стабилизации давления газа на установке прямотрубной печи для подогрева нефтепродуктов нефтеперерабатывающего завода.

Передаточные функции блоков, входящих в объект диагностирования, следующие:

$$W_1 = \frac{k_1}{T_1 s + 1}; \quad W_2 = \frac{k_2}{s(T_2 s + 1)}; \quad W_3 = \frac{k_3 s}{T_3 s + 1}; \quad W_4 = e^{-s\tau}; \quad W_5 = \frac{k_5}{T_5 s + 1}.$$

В системе реализован ПИД закон регулирования (блоки № 1–3). Исполнительное устройство, представляющее собой электрический вентиль, объект регулирования (зона трубопровода между вентилем и датчиком) и датчик давления представлены в модели динамическими элементами № 4 и 5. Значения коэффициентов усиления в относительных единицах и постоянных времени: $K_1 = 4.5$; $K_2 = 4$; $K_3 = 0.5$; $\tau = 0.1$ с; $K_5 = 1$; $T_1 = T_2 = T_3 = 0.1$ с; $T_5 = 1$ с.

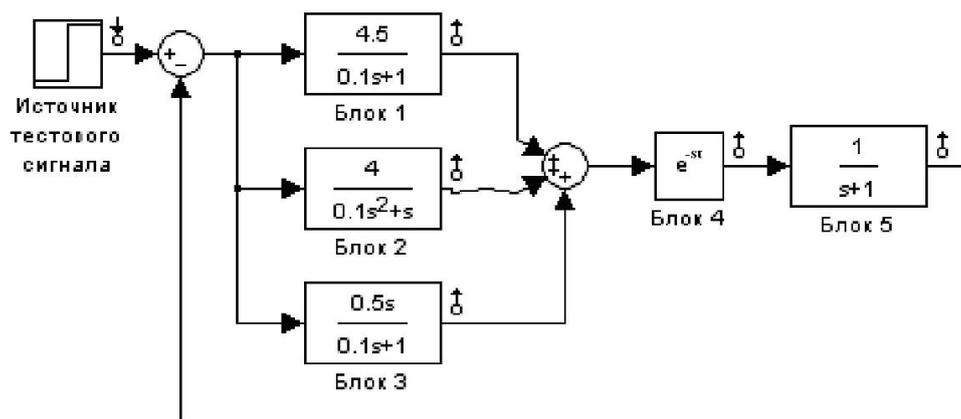


Рис. 4. Структурная схема объекта диагностирования

Fig. 4. A structural diagram of the diagnosis object

Объект диагностирования имеет длительность переходного процесса $T_{п.п} = 2$ с. Поэтому наибольшие значения фактической различимости получены при использовании времени контроля $T_k = 2$ с. Будем использовать единичное ступенчатое входное воздействие и множество контрольных точек, которые практически возможно организовать в объекте, т. е. четыре контрольные точки на выходе первого, второго, третьего и пятого блоков.

Применение алгоритма поиска одиночного топологического дефекта в связи № 5 (обрыв связи между блоком № 5 и входом регулятора) при использовании множества контрольных точек $\{1, 2, 3, 5\}$ дает следующие значения нормированных диагностических признаков:

$$J_1 = 0.962; J_2 = 0.799; J_3 = 0.935; J_5 = \mathbf{0.002}.$$

Моделирование процессов поиска топологических дефектов в ПИД-регуляторе данного объекта диагностирования при тех же условиях диагностирования дает следующие значения диагностических признаков.

При наличии дефекта в связи № 1 (обрыв связи между первым и четвертым блоком) алгоритм дает следующие результаты:

$$J_1 = \mathbf{0.004}; J_2 = 0.076; J_3 = 0.26; J_5 = 0.956.$$

При наличии дефекта в связи № 2 (обрыв связи между вторым и четвертым блоком) получим значения признаков:

$$J_1 = 0.13; J_2 = \mathbf{0.003}; J_3 = 0.562; J_5 = 0.787.$$

При наличии дефекта в связи № 3 (обрыв связи между третьим и четвертым блоком) получим значения признаков:

$$J_1 = 0.15; J_2 = 0.424; J_3 = \mathbf{0.013}; J_5 = 0.961.$$

Минимальное значение диагностического признака во всех случаях правильно указывает на дефектную топологическую связь.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан новый алгоритм поиска одиночных топологических дефектов непрерывных САУ во временной области на основе топологической функции чувствительности, использующий интегральные оценки выходных сигналов, значительно улучшающий эффективность диагностирования за счет увеличения различимости, по сравнению с алгоритмом, использующим временные характеристики сигналов. В работе рассматривается подход, позволяющий упростить получение информации о модели топологической чувствительности. Рассматриваются нормированные диагностические признаки топологических дефектов, позволяющие проводить сравнение результатов диагностирования в различных режимах.

Структурно-матричная модель топологической чувствительности удобней моделей, представленных в виде дифференциальных уравнений и пространства состояний, так как использует не дифференциальные, а интегральные уравнения, поэтому диагностическая модель позволяет производить анализ технического состояния во временной области и обладает структурно-топологической чувствительностью отдельных параметров на уровне динамического элемента объекта диагностирования.

Алгоритм поиска одиночных дефектов с глубиной до топологической связи ОД, учитывающий специфику влияния конкретных конструктивных дефектов на изменение динамических характеристик объекта диагностирования. Показана применимость методов поиска дефектов для диагностирования линейных непрерывных систем. Рассмотренный алгоритм позволяет использовать различные входные сигналы, подаваемые одновременно на объект, модель объекта и модель чувствительности. Введено понятие нормированного диагностического признака, являющегося безразмерной величиной, что позволяет производить сравнительный анализ условий и результатов диагностирования различных объектов. Предложены количественные характеристики различимости пары топологических дефектов при диагностировании с использованием функции топологической чувствительности. Применение нормированных характеристик различимости, принимающих значения в диапазоне $[0, 1]$, позволяет интерпретировать степень различимости дефектов в терминах полной различимости, частичной различимости или полной эквивалентности и сравнивать результаты диагностирования в различных режимах. Анализ формы и значений функций чувствительности позволяет предварительно определять степень влияния различных дефектов на временные характеристики объекта, а значит, предварительно оценивать возможность нахождения того или иного топологического дефекта.

Алгоритм диагностирования на основе функции топологической чувствительности позволяет обеспечить различимость дефектов в условиях наличия погрешностей измерения динамических характеристик. Решение задач поиска дефектов на тестовом примере подтвердило работоспособность (наличие помехоустойчивости), эффективность (наименьшие вычислительные и временные затраты) и широкие функциональные возможности предложенных алгоритмов, а также правильность выдвинутых теоретических положений. Показано, что апостериорные меры различимости пар дефектов дают оценки с достаточной для практики точностью.

Алгоритм использует модель топологической чувствительности, которая предполагает использование двух моделей, соединенных последовательно друг с другом связью, которая определяется расположением контролируемой топологической связи. Рассмотренный алгоритм позволяет избежать недостатков алгоритма введения пробных дефектов топологических связей, которые нужно предварительно задавать. Преимуществом рассмотренного подхода является переход от пробных топологических дефектов модели к топологической функции чувствительности без снижения различимости дефектов, а значит, и без падения помехоустойчивости диагностирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шалобанов С.В. Структурные методы поиска одиночных дефектов в динамических системах // Известия вузов. Приборостроение. – 2000. – № 4. – С. 7–13.
2. Розенвассер Е.Н., Юсупов Р.М. Чувствительность систем управления. – М.: Наука, 1981. – 464 с.
3. Frank P.M. Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge-based redundancy – a survey and some new results // Automatica. – 1990. – Vol. 26, N 3. – P. 459–474.
4. Patton R. Robust model-based fault diagnosis: the state of the art // IFAC Proceedings. – 1994. – Vol. 27 (5). – P. 1–24.

5. Шалобанов С.В., Шалобанов С.С. Диагностирование непрерывных динамических систем методом топологических связей // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2011. – № 4 (23). – С. 75–82.
6. Патент 2439647 Российская Федерация. Способ поиска неисправного блока в непрерывной динамической системе / С.В. Шалобанов, С.С. Шалобанов. – № 2011100409/08; заявл. 11.01.2011; опубл. 10.01.2012, Бюл. № 1.
7. *Shalobanov S.V., Shalobanov S. S.* The search defects algorithm in continuous dynamical systems by vectors of topological relations // Proceedings of the 3rd Russian-Pacific Conference on Computer Technology and Applications (RPC). – Vladivostok, 2018. – P. 1–4.
8. Шалобанов С.В., Шалобанов С.С. Диагностирование непрерывных динамических систем с использованием смены позиции входного сигнала // Информатика и системы управления. – 2016. – № 2 (48). – С. 91–96.
9. Патент 2528135 Российская Федерация. Способ поиска неисправного блока в непрерывной динамической системе на основе смены позиции входного сигнала / С.С. Шалобанов. – № 2013144231/08; заявл. 01.10.2013; опубл. 10.09.2014, Бюл. № 25.
10. *Shalobanov S.V., Shalobanov S.S.* Defect search using the input signal position change and the binary diagnostic sign // 2018 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics): Proceedings. – Omsk, 2018. – P. 1–4.
11. Воронин В.В., Шалобанов С.С. Диагностирование непрерывных динамических систем методом пробных отклонений параметров модели // Информатика и системы управления. – 2010. – № 1 (23). – С. 121–127.
12. Патент 2435189 Российская Федерация. Способ поиска неисправного блока в динамической системе / С.В. Шалобанов, С.С. Шалобанов. – № 2009123999/08; заявл. 23.06.2009; опубл. 21.11.2011, Бюл. № 33.
13. *Shalobanov S.V., Shalobanov S.S.* Defect search in automatical control systems based on trial deviations of model parameters // 2017 IEEE 11th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT). – Moscow, 2017. – P. 1–4.
14. Шалобанов С.С. Диагностирование непрерывных динамических систем методом логических функций // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2012. – № 3 (26). – С. 85–90.
15. Патент 2461861 Российская Федерация. Способ поиска неисправного блока в непрерывной динамической системе / С.С. Шалобанов. – № 2011140376/08; заявл. 04.10.2011; опубл. 20.09.2012, Бюл. № 26.
16. *Shalobanov S.V., Shalobanov S.S.* Defect search in automatical control systems with depth to dynamic block // Proceedings 2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – Moscow, 2018. – P. 1–5.
17. Шалобанов С.В., Шалобанов С.С. Алгоритм поиска дефектов в системах автоматического управления с использованием смены позиции входного сигнала // Информатика и системы управления. – 2017. – № 2 (52). – С. 57–63.
18. Шалобанов С.В., Шалобанов С.С. Диагностирование систем автоматического управления с использованием пробных отклонений параметров модели и бинарных диагностических признаков // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2017. – № 4 (47). – С. 17–22.
19. *Bloshchinskiy V.D., Shalobanov S.V., Shalobanov S.S.* Application of configurable diagnostic models on IIR-filters and Laguerre filters for finding parametric defects in continuous dynamic objects // 2019 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – Tomsk, 2019. – P. 1–5.
20. Воронин В.В. Информационное обеспечение процессов диагностирования в системах технического обслуживания // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2018. – № 2 (49). – С. 35–44.
21. Воронин В.В. Относительная эквивалентность дефектов // Информатика и системы управления. – 2018. – № 4 (58). – С. 60–69.
22. *Voronin V.V., Davydov O.A.* Local area network failures types, consequences and criticality analysis // Proceedings of the 2nd Russian-Pacific Conference on Computer Technology and Applications (RPC). – Vladivostok, 2017. – P. 184–187.

Воронин Владимир Викторович, доктор технических наук, профессор кафедры автоматизации и системотехники Тихоокеанского государственного университета. Основное направление научных исследований – техническая диагностика. Имеет более 140 публикаций, в том числе 4 монографии, 3 учебных пособия. E-mail: 004183vvv@mail.ru.

Шалобанов Сергей Викторович, доктор технических наук, профессор кафедры автоматизации и системотехники Тихоокеанского государственного университета. Основное направление научных исследований – техническая диагностика. Имеет более 170 публикаций, в том числе 4 монографии, 5 учебных пособий. E-mail: shalobanov@mail.ru .

Шалобанов Сергей Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации и системотехники Тихоокеанского государственного университета. Основное направление научных исследований – техническая диагностика. Имеет более 60 публикаций, в том числе одну монографию, 3 учебных пособий. E-mail: shalobanov_ne@mail.ru.

Voronin Vladimir Victorovich, D.Sc. (Eng.), professor at the department of automation and systems engineering, Pacific Sate University. His research interests are currently focused on technical diagnostics. He is the author of more than 140 publications including 4 monographs and 3 teaching manuals. E-mail: 004183vvv@mail.ru

Shalobanov Sergei Victorovich D.Sc. (Eng.), professor at the department of automation and systems engineering, Pacific Sate University. His research interests are currently focused on technical diagnostics. He is the author of more than 170 publications including 4 monographs and 5 teaching manuals. E-mail: shalobanov@mail.ru

Shalobanov Sergei Sergeevich, PhD (Eng.), an associate professor at the department of automation and systems engineering, Pacific Sate University. His research interests are currently focused on technical diagnostics. He is the author of more than 60 publications including 1 monograph and 5 teaching manuals. E-mail: shalobanov_ne@mail.ru

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-4-17-30

Diagnosis of continions dynamic sistems with the use of topological sensitivity functions*

V.V. VORONIN^a, S.V. SHALOBANOV^b, S.S. SHALOBANOV^c

Pacific State University, 136 Tikhookeanskaya Street, Khabarovsk, 680035, Russian Federation

^a 004183vvv@mail.ru ^b shalobanov@mail.ru ^c shalobanov_ne@mail.ru

Abstract

The paper considers an algorithm for searching for defects in topological connections between dynamic blocks, which allows one to more fully take into account the specifics of the manifestation of a real defect: breaking one connection between the dynamic blocks of the transfer function of the diagnostic object. The use of well-known algorithms of this kind is complicated by the need to use models with trial deviations of the parameters, or the need to analyze the signs of the output signals, or to change the position of the input signal. The disadvantage of the algorithm based on trial changes in the topological relationships of the model is that it uses setting of these changes in models with trial deviations, which is a time-consuming task. The disadvantage of the algorithm with the analysis of signs of output signal transmission using a normalized diagnostic feature, as well as using the binary diagnostic feature, is that additional calculations of the signs of the transmission of the output signals from the dynamic blocks of the transfer function to the control points are necessary. The disadvantage of the algorithm with changing the position of the input signal is that it uses the movement of the place of the input signal injection to another position in the models controlling the topological connec-

* Received 10 September 2019.

The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project 18-08-00737).

tion. Below, we consider an algorithm for searching for defects in the form of breaking links between the dynamic blocks of the transfer function based on the use of a topological sensitivity model using integrated estimates of the output signals of the diagnostic object. Topological sensitivity can be obtained using a structural matrix dynamic model. This approach simplifies the implementation of the algorithm by reducing the number of control points, which reduces hardware costs when diagnosing complex objects. The procedure for obtaining normalized diagnostic features and calculating a quantitative measure of the distinguishability of defects is determined.

Keywords: defect search, continuous feedback system, transfer function of dynamic block, topologic sensitivity function, diagnostic model, object of diagnosing, control points, signal deviations integral marks, normalized diagnostic sign, defects distinguishability

REFERENCES

1. Shalobanov S.V. Strukturnye metody poiska odinochnykh defektov v dinamicheskikh sistemakh [Structural methods defects of single faults searching in the dynamic systems]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Priborostroenie – Journal of Instrument Engineering*, 2000, no. 4, pp. 7–13.
2. Rozenvasser E.N., Yusupov R.M. *Chuvstvitel'nost' sistem upravleniya* [Sensitivity of automatic control systems]. Moscow, Nauka Publ., 1981. 464 p.
3. Frank P.M. Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge-based redundancy – a survey and some new results. *Automatica*, 1990, vol. 26, no. 3, pp. 459–474.
4. Patton R. Robast model-based fault diagnosis: the state of the art. *IFAC Proceedings*, 1994, pp. 1–24. *IFAC Proceedings*, 1994, vol. 27 (5), pp. 1–24.
5. Shalobanov S.V., Shalobanov S.S. Diagnostirovanie nepreryvnykh dinamicheskikh sistem metodom topologicheskikh svyazei [Diagnosis of continuous dynamic systems by the method of topological connections]. *Vestnik Tikhookeanskogo gosudarstvennogo universiteta – Bulletin of Pacific National University*, 2011, no. 4 (23), pp. 75–82.
6. Shalobanov S.V., Shalobanov S.S. *Sposob poiska neispravnogo bloka v nepreryvnoi dinamicheskoi sisteme* [Method to search for faulty block in continuous dynamic system]. Patent RF, no. 2439647, 2012.
7. Shalobanov S.V., Shalobanov S. S. The search defects algorithm in continuous dynamical systems by vectors of topological relations. *Proceedings of the 3rd Russian-Pacific Conference on Computer Technology and Applications (RPC)*, Vladivostok, 2018, pp. 1–4.
8. Shalobanov S.V., Shalobanov S.S. Diagnostirovanie nepreryvnykh dinamicheskikh sistem s ispol'zovaniem smeny pozitsii vkhodnogo signala [Diagnostics of continuous dynamic systems using input signal position change]. *Informatika i sistemy upravleniya – Information Science and Control Systems*, 2016, no. 2 (48), pp. 91–96.
9. Shalobanov S.S. *Sposob poiska neispravnogo bloka v nepreryvnoi dinamicheskoi sisteme na osnove smeny pozitsii vkhodnogo signala* [Method of searching for faulty unit in continuous dynamic system based on change of position of input signal]. Patent RF, no. 2528135, 2014.
10. Shalobanov S.V., Shalobanov S.S. Defect search using the input signal position change and the binary diagnostic sign. *2018 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics): Proceedings*, Omsk, 2018, pp. 1–4.
11. Voronin V.V., Shalobanov S.S. Diagnostirovanie nepreryvnykh dinamicheskikh sistem metodom probnykh otklonenii parametrov modeli [Diagnosis of continuous dynamic systems by trial deviations of model parameters]. *Informatika i sistemy upravleniya – Information Science and Control Systems*, 2010, no. 1 (23), pp. 121–127.
12. Shalobanov S.V., Shalobanov S.S. *Sposob poiska neispravnogo bloka v dinamicheskoi sisteme* [Method of searching for faulty unit in dynamic system]. Patent RF, no. 2435189, 2011.
13. Shalobanov S.V., Shalobanov S.S. Defect search in automatical control systems based on trial deviations of model parameters. *2017 IEEE 11th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT)*, Moscow, 2017, pp. 1–4.
14. Shalobanov S.S. Diagnostirovanie nepreryvnykh dinamicheskikh sistem metodom logicheskikh funktsii [Diagnosis of continuous dynamic systems by the method of logical functions]. *Vestnik Tikhookeanskogo gosudarstvennogo universiteta – Bulletin of Pacific National University*, 2012, no. 3 (26), pp. 85–90.

15. Shalobanov S.S. *Sposob poiska neispravnogo bloka v nepreryvnoi dinamicheskoi sisteme* [Method of searching for faulty module in continuous dynamic system]. Patent RF, no. 2461861, 2012.
16. Shalobanov S.V., Shalobanov S.S. Defect search in automatical control systems with depth to dynamic block. *Proceedings 2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, Moscow, 2018, pp. 1–5.
17. Shalobanov S.V., Shalobanov S.S. Algoritm poiska defektov v sistemakh avtomaticheskogo upravleniya s ispol'zovaniem smeny pozitsii vkhodnogo signala [Algorithm for finding defects in automatic control systems using a change in the position of the input signal]. *Informatika i sistemy upravleniya – Information Science and Control Systems*, 2017, no. 2 (52), pp. 57–63.
18. Shalobanov S.V., Shalobanov S.S. Diagnostirovanie sistem avtomaticheskogo upravleniya s is-pol'zovaniem probnykh otklonenii parametrov modeli i binarnykh diagnosticheskikh priznakov [Diagnostics of automatic control systems using trial deviations of model parameters and binary diagnostic features]. *Vestnik Tikhookeanskogo gosudarstvennogo universiteta – Bulletin of Pacific National University*, 2017, no. 4 (47), pp. 17–22.
19. Bloschinskiy V.D., Shalobanov S.V., Shalobanov S.S. Application of configurable diagnostic models on IIR-filters and Laguerre filters for finding parametric defects in continuous dynamic objects. *2019 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*, Tomsk, 2019, pp. 1–5.
20. Voronin V.V. Informatsionnoe obespechenie protsessov diagnostirovaniya v sistemakh tekhnicheskogo obsluzhivaniya [Information support of diagnostic processes in maintenance systems]. *Vestnik Tikhookeanskogo gosudarstvennogo universiteta – Bulletin of Pacific National University*, 2018, no. 2 (49), pp. 35–44.
21. Voronin V.V. Otnositel'naya ekvivalentnost' defektov [Relative defect equivalence]. *Informatika i sistemy upravleniya – Information Science and Control Systems*, 2018, no. 4 (58), pp. 60–69.
22. Voronin V.V., Davydov O.A. Local area network failures types, consequences and criticality analysis. *Proceedings of the 2nd Russian-Pacific Conference on Computer Technology and Applications (RPC)*, Vladivostok, 2017, pp. 184–187.

Для цитирования:

Воронин В.В., Шалобанов С.В., Шалобанов С.С. Диагностирование непрерывных динамических систем с использованием топологических функций чувствительности // Научный вестник НГТУ. – 2019. – № 4 (77). – С. 17–30. – DOI: 10.17212/1814-1196-2019-4-17-30.

For citation:

Voronin V.V., Shalobanov S.V., Shalobanov S.S. Diagnostirovanie nepreryvnykh dinamicheskikh sistem s ispol'zovaniem topologicheskikh funktsii chuvstvitel'nosti [Diagnosis of continuous dynamic systems with the use of topological sensitivity functions]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2019, no. 4 (77), pp. 17–30. DOI: 10.17212/1814-1196-2019-4-17-30.