

ИНФОРМАЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ
И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

INFORMATION
TECHNOLOGIES
AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 681.518.5

DOI: 10.17212/2782-2001-2022-2-7-20

Диагностирование непрерывных динамических систем с использованием структурных 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 004183@pnu.edu.ru ^б shalobanov@mail.ru ^с shalobanone@mail.ru

В работе рассмотрен алгоритм поиска одиночных дефектов структурных блоков объекта диагностирования в виде произвольного изменения параметров одного динамического блока в составе непрерывной динамической системы. Такой подход соответствует реальной картине проявления конкретного конструктивного дефекта блока и его влияния на динамику системы. Применение известных алгоритмов подобного рода осложняется необходимостью использования моделей с пробными отклонениями параметров либо необходимостью анализа знаков передач сигналов. Алгоритм на основе пробных отклонений параметров модели использует задание этих изменений в модели, что является трудоемкой задачей. Алгоритм анализа знаков передач с использованием нормированного диагностического признака, а также с использованием бинарного диагностического признака требует дополнительные вычисления знаков передач сигналов от выходов блоков до контрольных точек. Рассматривается алгоритм поиска одиночных дефектов в виде изменения параметров динамических блоков, основанный на использовании модели структурной чувствительности интегральных оценок выходных сигналов объекта к изменению динамических свойств блока. Алгоритм позволяет перейти от анализа временных функций к анализу численных значений их интегральных оценок. Такой подход позволяет определить неисправный динамический блок без определения фактических параметров его передаточной функции. Определена процедура получения нормированных диагностических признаков и вычисления количественной меры различимости дефектов. Приведены результаты реализации алгоритма для системы стабилизации давления газа на установке прямотрубной печи для подогрева нефтепродуктов нефтеперерабатывающего завода. Реализация алгоритма показывает, что рассматриваемый алгоритм дает приемлемые значения различимости всех одиночных дефектов.

Ключевые слова: диагностирование, передаточная функция динамического структурного блока, функция структурной чувствительности, непрерывная динамическая система, диагностический объект, модель диагностирования, интегральные преобразования реакций, унарный признак поиска дефектов, различимость диагностирования

* Статья получена 27 января 2022 г.

ВВЕДЕНИЕ

Диагностические модели непрерывных систем автоматического управления построены как при помощи формализации с применением блок-схем [1, 2], так и методом графоаналитики с помощью пространства состояний [3, 4]. Применение модели чувствительности позволяет эффективно решать задачи диагностирования динамических систем в областях времени и частоты [5]. Методика пространств состояний подразумевает инструмент свойства величин (выраженных буквами), независимо от числового их значения (включая многомерное описание) [6–8].

Помимо этого, в рассмотренной с помощью преобразований Лапласа модели обязательно возможен выбор переменных состояний [9–11]. Модель на основе передаточных функций однозначно представляет объект диагностирования, в отличие от модели в пространстве состояний, которая дает более общее описание [12–14]. Уменьшенный размер матрицы параметров системы диагностики, укрупненное описание функциональных признаков индивидуальных динамических блоков и представление топологических структур, отражающих связи объекта диагностирования, является удобством графоаналитического представления объекта диагностирования ОД [15–18]. Эти способы поиска дефектов возможно использовать для создания структурного диагностирования, так как методики содержат преимущества многомерных методик пространств состояний (применение свойств величин, независимо от числового их значения, многомерное описание) и графоаналитики (описание межблочных связей) [19–21].

1. АЛГОРИТМ ПОИСКА ДЕФЕКТОВ

Методика поиска неисправностей размерности динамического элемента блок-схемы заключается в нахождении интегральных преобразований деформаций измеренных реакций объекта диагностирования и реакций эталонной системы [11–13]:

$$\Delta F_j(\alpha) = F_j(\alpha) - F_{j_{\text{ном}}}(\alpha), \quad j=1, \dots, k, \quad (1)$$

где $\alpha = 5/T_k$, j – индекс контрольной точки объекта диагностирования; k – количество точек контроля; $F_j(\alpha)$ и $F_{j_{\text{ном}}}(\alpha)$ – интегральные преобразования реакций объекта диагностирования и номинальной системы соответственно в j -й точке контроля; T_k – период контролирования.

Модель функции чувствительности блоков для выявления изменения динамических свойств одиночного динамического элемента объекта диагностирования создается по следующей методике. Для каждого из m динамических элементов контролируемого объекта соединяют две одинаковые номинальные динамические модели связью, проходящей от входа рассматриваемого динамического блока первой номинальной модели до выхода того же динамического блока второй номинальной модели. Входное воздействие $x(t)$ подается на вход первой номинальной динамической модели, структурные функции чувствительности снимаются с контрольных точек второй номинальной

модели. Модель функции чувствительности i -го динамического элемента объекта диагностирования можно представить с помощью связи двух одинаковых номинальных систем, объединенных друг с другом соединяющей связью согласно представлению рис. 1.

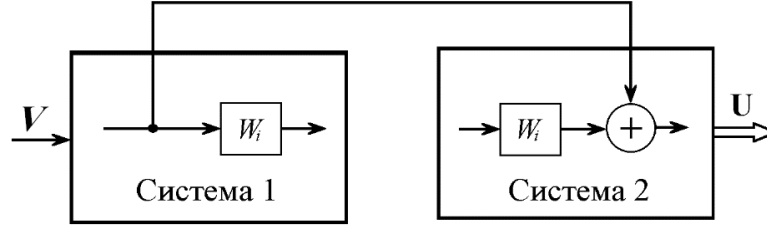


Рис. 1. Модель структурной функции чувствительности

Fig. 1. Structure sensitivity function model

В рамках технологии поиска дефектов определяют интегральные преобразования реакций системы, представляющей собой структурные чувствительности:

$$U_{ji}(\alpha) \quad j=1, \dots, k; \quad i=1, \dots, m, \quad (2)$$

где U_{ji} – функция структурной чувствительности диагностического объекта к отклонению параметров i -го динамического элемента и j -й точки контроля; m – количество контролируемых динамических элементов.

Реакции систем структурной чувствительности (2) определяются функцией чувствительности блоков U . Формулы (1) и (2) помогают найти параметры рядов ΔF и U , порядок последних вычисляется числом точек контроля объекта диагностирования. Признак поиска дефекта присутствия неисправности динамического элемента находится выражением

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

Унарные множества $\Delta \hat{F}$ и \hat{U} с помощью формулы (3) лучше выразить так:

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

где

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

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

где m – количество структурных неисправностей рассматриваемого множества функций чувствительности блоков; k – количество изменений реакций диагностического объекта относительно реакций эталона для периода контролирования T_k [25–27].

Динамический элемент, стагностический признак дефекта которого (3) и (4) становится минимальным, является дефектным.

Применяемые признаки поиска дефектов (3) и (4) принадлежат фиксированному цифровому интервалу $\{0, 1\}$. Следовательно, различимость обоих дефектов блоков должна определяться разностью величин данных признаков [28].

Тригонометрическое толкование описываемого признака поиска дефекта заключается в следующем: так как в квадратных скобках формулы (4) написано векторное умножение нормированной величины порядка k (k – количество точек контроля объекта диагностирования), следовательно, часть формулы в скобках – это $\cos \varphi$ этих векторов, поэтому формулу (4) возможно заменить формулой

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

где φ_i – угол нормированного вектора интегральных преобразований деформаций реакций диагностического объекта к номинальным значениям и нормированным векторам интегральных преобразований реакций структурной чувствительности i -го динамического элемента.

Апостериорная различимость i -й блочной неисправности определяется следующим простейшим выражением

$$J_i = J_k - J_i,$$

где J_i – величина признака i -го дефекта блока объекта диагностирования; J_k – величина ближайшего по значению признака дефекта.

Блок-схема технологии, выполняющей определение признака присутствия структурной неисправности объекта диагностирования с использованием функции чувствительности блоков (3) показана на рис. 2.

Диагностирование структурной неисправности контролируемого объекта благодаря представленной методике поиска дефектов подразумевается выполнением следующих действий.

ШАГ 1. Диагностическим объектом считается модель системы, включающая m подключенных стохастических блочных элементов.

ШАГ 2. Заранее выбирается период контролирования $T_k \geq T_{ПП}$, где $T_{ПП}$ – период перехода до установившегося состояния объекта диагностирования. Период перехода до установившегося состояния определяют для эталонных величин элементов диагностической системы.

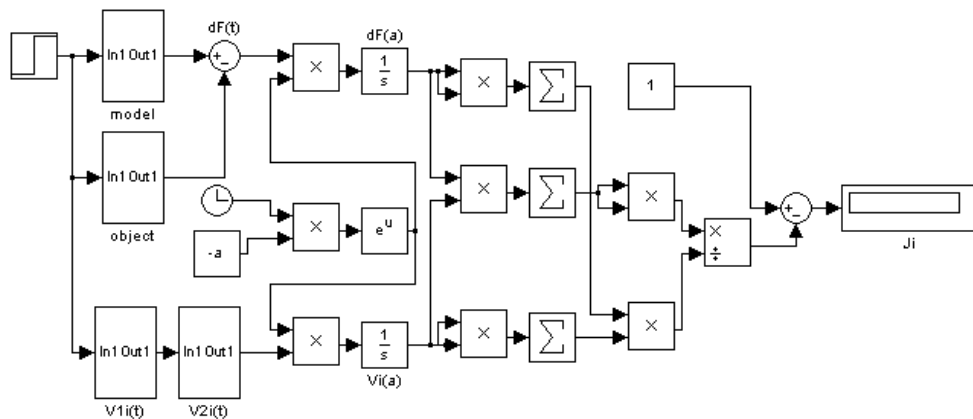


Рис. 2. Функциональная схема устройства поиска дефектов с использованием структурной функции чувствительности

Fig. 2. Functional diagram of a device for finding defects using the structure function of sensitivity

ШАГ 3. Вычисляют цифровую величину параметра интегральной оценки реакций согласно выражению $\alpha = 5 / T_k$.

ШАГ 4. Выбирают количество точек контроля k объекта диагностирования.

ШАГ 5. Задается входное воздействие $x(t)$ (единичное ступенчатое, линейно возрастающее, прямоугольное импульсное и т. д.) на входе объекта диагностирования, эталонной модели и на входе системы чувствительности. Функциональных требований к виду задающего сигнала не предусмотрено [22–24].

ШАГ 6. Заведомо определяются величины элементов $V_i(\alpha)$ интегральных преобразований реакций системы чувствительности, поэтому вычисляют интегральные преобразования реакций системы в любой точке контроля k . По очереди каждый из m блоков диагностической модели подключают к такому же блоку другой модели: ко входу 1-й модели подключают входное воздействие $x(t)$, от 1-й системы сигнал выходит из входа рассматриваемого динамического элемента, сигнал 1-й системы подключают ко входу 2-й системы, во 2-й системе сигнал подходит к выходу рассматриваемого динамического элемента, фиксируют реакции во всех контрольных точках 2-й системы. Реакции каждой из k контрольных точек и каждой из m составных систем интегрируют с весом e^{-at} ; определенные интегральные преобразования $V_{ji}(\alpha) j=1, \dots, k$, $i=1, \dots, m$, используются далее.

ШАГ 7. Определяют унарные величины интегральных преобразований реакций системы, вычисленные с помощью применения функции чувствительности динамических элементов согласно выражению

$$\hat{V}_{ji}(\alpha) = \frac{V_{ji}(\alpha)}{\sqrt{\sum_{n=1}^k V_{ri}^2(\alpha)}}.$$

ШАГ 8. Запоминают выходные сигналы эталонной модели $f_{j\text{ном}}(t)$, $j = 1, \dots, k$, во временном промежутке $t_l \in [0, T_k]$ для k точек контроля и определяют интегральные преобразования реакций $F_{j\text{ном}}(\alpha)$, $j = 1, \dots, k$, номинальной модели. Поэтому подводят входное воздействие к объекту диагностирования номинальных характеристик и интегрируют реакции для всех k точек контроля согласно веса $e^{-\alpha t}$, где $\alpha = 5/T_k$, согласно чему реакции объекта диагностирования передают к первым входам k элементов умножения, ко вторым входам элементов умножения подключают вес с экспонентой $e^{-\alpha t}$, реакции k элементов умножения передают ко входам k интегральных элементов, интегральные оценки заканчивают вычислять в конце промежутка T_k . Определенные интегральные преобразования реакций объекта диагностирования $F_{j\text{ном}}(\alpha)$, $j = 1, \dots, k$ используют далее.

ШАГ 9. Теперь рассматривают вместо номинальной модели объект диагностирования. Ко входу контролируемого объекта подключают то же самое входное воздействие $x(t)$.

ШАГ 10. Вычисляют интегральные преобразования реакций объекта диагностирования в k точках контроля $F_j(\alpha)$, $j = 1, \dots, k$, производя действия, выполненные на ШАГЕ 8, но только для объекта диагностирования.

ШАГ 11. Определяют деформации интегральных преобразований реакций объекта диагностирования в k точках контроля и эталонных величин $\Delta F_j(\alpha) = F_j(\alpha) - F_{j\text{ном}}(\alpha)$, $j = 1, \dots, k$.

ШАГ 12. Находят унарные величины деформаций реакций объекта диагностирования и эталонных величин с помощью формулы

$$\Delta F_j(\alpha) = \frac{\Delta F_j(\alpha)}{\sqrt{\sum_{n=1}^k \Delta F_n^2(\alpha)}}.$$

ШАГ 13. Рассчитывают признаки присутствия неисправности динамического элемента согласно следующему выражению:

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

ШАГ 14. Экстремальное (минимальное) значение признака фиксирует данную структурную неисправность.

Покажем применение этой методики структурного диагностирования любых элементов блок-схемы с помощью объекта диагностирования, представленного далее.

2. ПРИМЕР ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ

Опишем применение разработанной методики диагностирования структурной неисправности объекта диагностирования, блок-схема которого показана на рис. 3 и является системой стабилизации газового давления прямотрубной печи подогревания продуктов нефтеперегонного предприятия.

Передаточные функции системы стабилизации приведены ниже:

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

$$W_4 = e^{-p\tau}; \quad W_5 = \frac{k_5}{T_5 p + 1}.$$

В объекте диагностирования ПИД-регулятор представлен блоком 4, а объект управления – блоком 5.

Величина коэффициента увеличения для нормированных значений и временные величины инерционности переходных процессов: $K_1 = 4.5$; $K_2 = 4$; $K_3 = 0.5$; $t = 0.1$ с; $K_5 = 1$; $T_1 = T_2 = T_3 = 0.1$ с; $T_5 = 1$ с.

Контролируемая система определяется максимальной постоянной времени передаточной функции, которая равна $T_{nn} = 8$ с. Следовательно, максимальные величины апостериорной различимости вычислены с использованием периода диагностирования $T_K = 10$ с. При моделировании применялся ступенчатый входной сигнал единичной амплитуды на множестве точек контроля, физически реализуемых для объекта диагностирования (с помощью четырех контрольных точек на выходах структурных блоков 1–3 и 5).

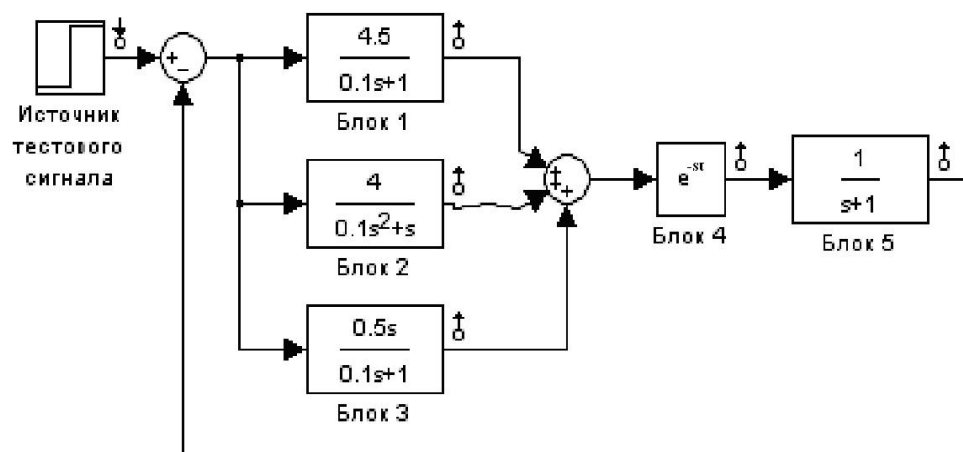


Рис. 3. Структурная схема объекта диагностирования

Fig. 3. Structural diagram of the diagnostic object

Использование описанной выше методики одиночного диагностирования для блока 5 (уменьшение величины k_5 на 20 %) с использованием совокупности точек контроля (1, 2, 3 и 5) позволяет определить величины признаков структурных дефектов:

$$J_1 = 0.9831; J_2 = 0.9964; J_3 = 0.7533; J_5 = \mathbf{0.0234}.$$

Машинный эксперимент диагностирования структурной неисправности ПИД-регулятора рассматриваемой системы с использованием аналогичных условий поиска дефектов позволяет определить диагностические признаки (неисправность блока 1 в виде уменьшения k_1 на 20 %):

$$J_1 = \mathbf{0}; J_2 = 0.1147; J_3 = 0.9998; J_5 = 0.9996.$$

При введении дефекта в блок 2 (в виде уменьшения k_2 на 20 %) найдем величины диагностических признаков:

$$J_1 = 0.1518; J_2 = \mathbf{0.006262}; J_3 = 0.9605; J_5 = 0.9208.$$

При введении дефекта в блок 3 (в виде уменьшения k_3 на 20 %) найдем величины диагностических признаков:

$$J_1 = 0.9398; J_2 = 0.851; J_3 = \mathbf{0.06822}; J_5 = 0.6883.$$

В любом рассмотренном случае минимальное значение, показанное диагностическим признаком, верно указывает на структурный дефект.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследована уникальная методика одиночного структурного диагностирования непрерывной динамической системы для временных характеристик с помощью функции структурной чувствительности, применяющая интегральные преобразования реакций. Данная методика значительно повышает продуктивность процессов поиска дефектов с помощью улучшения различимости неисправностей в сравнении со способом, не применяющим интегральные оценки реакций. Статья посвящена новому способу, позволяющему сократить используемую информацию о функциях структурной чувствительности. Рассматриваются единичные признаки неисправностей блоков, помогающие проводить оценку итогов поиска дефектов для разных режимов работы объекта диагностирования.

Модель структурной чувствительности является более гибкой моделью в сравнении с набором функций производных пространства состояния, потому что применяет не дифференциальные уравнения производных, а интегральные оценки сигналов. Следовательно, алгоритм диагностики помогает выполнить исследование текущих временных характеристик и включает структурную и топологическую чувствительность конкретных элементов уровня структурного блока контролируемой системы.

Методика одиночного структурного диагностирования контролируемой системы принимает во внимание особенность воздействия отдельных структурных неисправностей на отклонение функциональных свойств системы.

Статья показывает перспективу использования способов диагностирования линейных не дискретных объектов. Описанная методика позволяет применять разные тестовые воздействия, подключаемые одновременно к контролируемой системе, к ее номинальному эталону и к системе чувствительности. Применяется концепция единичного признака дефекта, который является безразмерным значением, это помогает выполнять сравнение свойств и итогов поиска дефектов разных объектов диагностирования.

Приведены числовые значения различимости неисправностей различных блоков с помощью поиска структурных дефектов с применением функции чувствительности. Использование единичных величин различимости, допускающих результаты диапазона (0, 1), помогает толковать уровень различимости неисправности понятиями: 100-процентная различимость, не 100-процентная различимость или 0-процентная различимость (т. е. 100-процентная эквивалентность), а также сопоставлять итоги поиска дефектов для разных режимов. Исследование вида и параметров функции чувствительностей помогает вычислять уровень воздействия разнovidных неисправностей на выходные сигналы контролируемой системы, следовательно, анализировать вероятность наличия той или иной структурной неисправности.

Предложенная методика поиска дефектов с помощью функций структурных чувствительностей помогает определить различимость неисправностей с учетом погрешности измерений выходных сигналов контролируемой системы. Разрешение проблем диагностирования с помощью реального объекта доказало эффективность (хорошую различимость дефектов), пользу (минимальные аппаратные и программные расходы) и обширные практические достоинства разработанной методики, в том числе верность поставленных гипотез. Доказано, что практические величины различимости двух неисправностей дают результаты адекватной достоверности для применения на практике.

Методика предусматривает применение функции чувствительности блоков двух систем, подключенных связью, которая определяется расположением контролируемого структурного блока. Эта технология позволяет избежать недостатков алгоритма введения пробных дефектов структурных блоков, которые нужно предварительно задавать. Преимуществом рассмотренного подхода является переход от библиотеки дефектов к модели чувствительности блоков, не снижая различимость неисправностей, следовательно, не уменьшая помехоустойчивость поиска дефектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Воронин В.В., Шалобанов С.В., Шалобанов С.С. Диагностирование непрерывных динамических систем с использованием параметрических функций чувствительности // Научный вестник НГТУ. – 2016. – № 2 (63). – С. 23–34.
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 // Proceedings IFAC Symposium SAFEPROCESS'94. – Espoo, Finland, 1994. – P. 1–24.

5. Rosenwasser E.N., Yusupov R.M. Sensitivity of automatic control systems. – Boca Raton: CRS Press, 1999. – 436 p.
6. Gertler J. Fault detection and diagnosis in engineering systems. – New York: Marcel Dekker, 1998. – 504 p.
7. Simani S., Fantuzzi C., Patton R. Model-based fault diagnosis in dynamic systems using identification. – Berlin: Springer-Verlag, 2002. – 282 p.
8. Diagnosis and fault-tolerant control / M. Blanke, M. Kinnaert, J. Lunze, M. Staroswiecki. – Berlin: Springer, 2006. – 672 p.
9. Ding S. Data-driven design of fault diagnosis and fault-tolerant control systems. – London: Springer-Verlag, 2014.
10. Lindner B., Auret L. Data-driven fault detection with process topology for fault identification // IFAC Proceedings. – 2014. – Vol. 47, N 3. – P. 8903–8908.
11. Gertler J. Residual generation in model-based fault diagnosis // Control, Theory and Advanced Technology. – 1993. – Vol. 9 (1). – P. 259–285.
12. Samy I., Postlethwaite I., Gu D. Survey and application of sensor fault detection and isolation schemes // Control Engineering Practice. – 2011. – Vol. 19 (7). – P. 658–674.
13. Diagnosis and fault-tolerant control / M. Blanke, M. Kinnaert, J. Lunze, M. Staroswiecki. – Berlin: Springer-Verlag, 2005.
14. Russell E., Chiang L., Chiang L. Fault detection and diagnosis in industrial systems. – Berlin: Springer, 2001.
15. He J., Zhang C. Fault reconstruction based on sliding mode observer for nonlinear systems // Mathematical Problems in Engineering. – 2012. – Vol. 2012. – P. 1–22. – DOI: 10.1155/2012/451843.
16. Yan X., Edwards C. Nonlinear robust fault reconstruction and estimation using a sliding modes observer // Automatica. – 2007. – Vol. 43. – P. 1605–1614.
17. Simultaneous actuator and sensor faults reconstruction based on robust sliding mode observer for a class of nonlinear systems / A. Brahim, S. Dhahri, F. Hmida, A. Sellami // Asian Journal of Control. – 2017. – Vol. 19. – P. 362–371.
18. Fault detection and isolation for a multi-cellular converter based on sliding mode observer / H. Meziane, C. Labarre, S. Lefteriu, M. Defoort, M. Djemai // IFAC – PaperOnline. – 2015. – Vol. 48 (21). – P. 164–170. – DOI: 10.1016/j.ifacol.2015.09.521.
19. Журабок А.Н., Шумский А.Е., Павлов С.В. Диагностирование линейных динамических систем непараметрическим методом // Автоматика и телемеханика. – 2017. – № 7. – С. 3–21.
20. Журабок А.Н., Шумский А.Е. Непараметрический метод диагностирования нелинейных динамических систем // Автоматика и телемеханика. – 2019. – № 2. – С. 24–45.
21. Шумский А.Е., Журабок А.Н. Принятие решений при диагностировании нелинейных динамических систем непараметрическим методом // Автоматика и телемеханика. – 2021. – № 2. – С. 111–131.
22. 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.
23. 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.
24. 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.
25. 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.
26. Shalobanov S.V., Shalobanov S.S. Diagnostics of automatic control systems using trial deviations of model parameters and binary diagnostic signs // 2020 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). – Sochi, Russia, 2020. – P. 1–5.

27. *Shalobanov S.V., Shalobanov S.S.* Diagnosing continuous dynamic systems using topological sensitivity functions // 2020 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). – Sochi, Russia, 2020. – P. 1–5.

28. *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.

Воронин Владимир Викторович, доктор технических наук, профессор кафедры автоматизации и системотехники Тихоокеанского государственного университета. Основное направление научных исследований – анализ и синтез концептуальных диагностических моделей различных типов объектов диагностирования. Имеет более 200 печатных работ и учебных пособий. E-mail: 004183vvv@mail.ru

Шалобанов Сергей Викторович, доктор технических наук, профессор кафедры автоматизации и системотехники Тихоокеанского государственного университета. Основное направление научных исследований – разработка методов и алгоритмов диагностирования систем автоматического управления. Имеет более 200 печатных работ и 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 – разработка методов и алгоритмов диагностирования систем автоматического управления. Имеет более 100 печатных работ и учебных пособий. E-mail: shalobanov_ne@mail.ru

Voronin Vladimir V., Doctor of Technical Sciences, professor at the Department of Automation and Systems Engineering, Pacific National University. His research interests include analysis and synthesis of conceptual diagnostic models of various types of diagnostic objects. He has more than 200 publications and teaching manuals. E-mail: 004183vvv@mail.ru

Shalobanov Sergei V., Doctor of Technical Sciences, professor at the Department of Automation and Systems Engineering, Pacific National University. His research interests include development of methods and algorithms for diagnosing automatic control systems He has more than 200 publications and teaching manuals. E-mail: shalobanov@mail.ru

Shalobanov Sergei S., PhD, associate professor at the Department of Automation and Systems Engineering, Pacific National University. His research interests include development of methods and algorithms for diagnosing automatic control systems He has more than 100 publications and teaching manuals. E-mail: shalobanov_ne@mail.ru

Diagnostics of continuous dynamic systems using structure sensitivity functions*

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

Pacific National University, 136 Tikhoookeanskaya Street, Khabarovsk, 680035, Russian Federation

^a 004183@pnu.edu.ru ^b shalobanov@mail.ru ^c shalobanone@mail.ru

Abstract

The paper considers an algorithm for searching for single defects of structural blocks of a diagnostic object in the form of an arbitrary change in the parameters of one dynamic block as part of a continuous dynamic system. This approach corresponds to the real picture of the manifestation of a specific structural defect in the unit and its influence on the dynamics of the system. The use of known algorithms of this kind is complicated by the need to use models with trial deviations of parameters, or by the need to analyze the signs of signal transmissions. The algorithm based on trial deviations of model parameters uses the specification of these changes in the model, which is a laborious task. The algorithm for analyzing transmission signs using a normalized diagnostic feature, as well as using a binary diagnostic feature, requires additional calculations of the signs of signal transmissions from block outputs to checkpoints. An algorithm for searching for single defects in the form of changes in the parameters of dynamic blocks is considered, based on the use of a model of the structural sensitivity of integral estimates of the output signals of an object to changes in the dynamic properties of a block. The algorithm allows you to move from the analysis of time functions to the analysis of the numerical values of their integral estimates. This approach allows you to identify a faulty dynamic unit without determining the actual parameters of its transfer function. The procedure for obtaining normalized diagnostic features and calculating a quantitative measure of the distinguishability of defects has been determined. The results of the implementation of the algorithm for the gas pressure stabilization system at a straight-tube furnace for heating oil products of an oil refinery are presented. The implementation of the algorithm shows that the considered algorithm gives acceptable values of the distinguishability of all single defects.

Keywords: diagnostics, transfer function of a dynamic structural block, structural sensitivity function, continuous dynamic system, diagnostic object, diagnostics model, integral transformations of reactions, unary feature of defect search, diagnostics distinguishability

REFERENCES

1. 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.
2. Voronin V.V., Shalobanov S.V., Shalobanov S.S. Diagnostirovanie nepreryvnykh dinamicheskikh sistem s ispol'zovaniem parametricheskikh funktsii chuvstvitel'nosti [Diagnostics of continuous dynamic systems by using parameter sensitivity functions]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2016, no. 2 (63), pp. 23–34.

* Received 27 January 2022.

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. Robust model-based fault diagnosis: the state of the art. *Proceedings IFAC Symposium SAFEPROCESS'94*, Espoo, Finland, 1994, pp. 1–24.
5. Rosenwasser E.N., Yusupov R.M. *Sensitivity of automatic control systems*. Boca Raton, CRS Press, 1999. 436 p.
6. Gertler J. *Fault detection and diagnosis in engineering systems*. New York, Marcel Dekker, 1998. 504 p.
7. Simani S., Fantuzzi C., Patton R. *Model-based fault diagnosis in dynamic systems using identification*. Berlin, Springer-Verlag, 2002. 282 p.
8. Blanke M., Kinnaert M., Lunze J., Staroswiecki M. *Diagnosis and fault-tolerant control*. Berlin, Springer, 2006. 672 p.
9. Ding S. *Data-driven design of fault diagnosis and fault-tolerant control systems*. London, Springer-Verlag, 2014.
10. Lindner B., Auret L. Data-driven fault detection with process topology for fault identification. *IFAC Proceedings*, 2014, vol. 47, no. 3, pp. 8903–8908.
11. Gertler J. Residual generation in model-based fault diagnosis. *Control, Theory and Advanced Technology*, 1993, vol. 9 (1), pp. 259–285.
12. Samy I., Postlethwaite I., Gu D. Survey and application of sensor fault detection and isolation schemes. *Control Engineering Practice*, 2011, vol. 19 (7), pp. 658–674.
13. Blanke M., Kinnaert M., Lunze J., Staroswiecki M. *Diagnosis and fault-tolerant control*. Berlin, Springer-Verlag, 2005.
14. Russell E., Chiang L., Chiang L. *Fault detection and diagnosis in industrial systems*. Berlin, Springer, 2001.
15. He J., Zhang C. Fault reconstruction based on sliding mode observer for nonlinear systems. *Mathematical Problems in Engineering*, 2012, vol. 2012, pp. 1–22. DOI: 10.1155/2012/451843.
16. Yan X., Edwards C. Nonlinear robust fault reconstruction and estimation using a sliding modes observer. *Automatica*, 2007, vol. 43, pp. 1605–1614.
17. Brahim A., Dhahri S., Hmida F., Sellami A. Simultaneous actuator and sensor faults reconstruction based on robust sliding mode observer for a class of nonlinear systems. *Asian Journal of Control*, 2017, vol. 19, pp. 362–371.
18. Meziane H., Labarre C., Lefteriu S., Defoort M., Djemai M. Fault detection and isolation for a multi-cellular converter based on sliding mode observer. *IFAC – PaperOnline*, 2015, vol. 48 (21), pp. 164–170.
19. Zhirabok A.N., Shumsky A.E., Pavlov S.V. Diagnostirovanie lineinykh dinamicheskikh sistem neparametricheskim metodom [Diagnostics of linear dynamic systems by the nonparametric method]. *Avtomatika i telemekhanika = Automation and Remote Control*, 2017, no. 7, pp. 3–21. (In Russian).
20. Zhirabok A.N., Shumsky A.E. Neparametricheskii metod diagnostirovaniya nelineinykh dinamicheskikh sistem [Nonparametric method for diagnosis of nonlinear dynamic systems]. *Avtomatika i telemekhanika = Automation and Remote Control*, 2019, no. 2, pp. 24–45. (In Russian).
21. Shumskii A.E., Zhirabok A.N. Prinyatie reshenii pri diagnostirovanii nelineinykh dinamicheskikh sistem neparametricheskim metodom [Decision making in nonlinear dynamical system diagnosis by a nonparametric method]. *Avtomatika i telemekhanika = Automation and Remote Control*, 2021, no. 2, pp. 111–131.
22. 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.
23. 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.
24. 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.

25. 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.

26. Shalobanov S.V., Shalobanov S.S. Diagnostics of automatic control systems using trial deviations of model parameters and binary diagnostic signs. *2020 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*, Sochi, Russia, 2020, pp. 1–5.

27. Shalobanov S.V., Shalobanov S.S. Diagnosing continuous dynamic systems using topological sensitivity functions. *2020 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*, Sochi, Russia, 2020, pp. 1–5.

28. 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, pp. 1–5.

Для цитирования:

Воронин В.В., Шалобанов С.В., Шалобанов С.С. Диагностирование непрерывных динамических систем с использованием структурных функций чувствительности // Системы анализа и обработки данных. – 2022. – № 2 (86). – С. 7–20. – DOI: 10.17212/2782-2001-2022-2-7-20.

For citation:

Voronin V.V., Shalobanov S.V., Shalobanov S.S. Diagnostirovanie nepreryvnykh dinamicheskikh si-stem s ispol'zovaniem strukturnykh funktsii chuvstvitel'nosti [Diagnostics of continuous dynamic systems using structure sensitivity functions]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2022, no. 2 (86), pp. 7–20. DOI: 10.17212/2782-2001-2022-2-7-20.