

УДК 681.518.5

Диагностирование непрерывных динамических систем с использованием параметрических функций чувствительности *

В.В. ВОРОНИН¹, С.В. ШАЛОБАНОВ², С.С. ШАЛОБАНОВ³

¹ 680035, РФ, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136, Тихоокеанский государственный университет, доктор технических наук, профессор. E-mail: voronin@ais.khstu.ru

² 680035, РФ, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136, Тихоокеанский государственный университет, доктор технических наук, профессор. E-mail: shalobanov@mail.ru

³ 680035, РФ, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136, Тихоокеанский государственный университет, кандидат технических наук, доцент. E-mail: shalobanov_ne@mail.ru

В работе рассмотрен алгоритм поиска дефектов с глубиной до параметра динамического блока, позволяющий полнее учесть специфику проявления реального дефекта: изменение значений одного параметра передаточной функции блока. Применение известных алгоритмов подобного рода осложняется необходимостью использования моделей с пробными отклонениями параметров либо необходимостью анализа знаков передач сигналов. Недостатком метода пробных отклонений параметров модели является то, что он использует задание величин относительных отклонений параметров передаточных функций для моделей с пробными отклонениями. Недостатком метода анализа знаков передач с использованием нормированного диагностического признака, а также с использованием бинарного диагностического признака является то, что он использует вычисление знаков передач сигналов от выходов блоков до контрольных точек. Ниже рассматривается алгоритм поиска дефектов блоков передаточной функции, позволяющий использовать модель параметрической чувствительности на основе временных характеристик выходного сигнала. Процедура получения нормированных диагностических признаков заключается в том, что предварительно регистрируют реакцию на входное воздействие заведомо исправной системы на интервале времени в контрольных точках для дискретных моментов времени. Затем определяют выходные сигналы модели для каждой из чувствительности, для чего поочередно для каждого из параметров всех блоков динамической системы соединяют связью две модели: на вход первой модели подают тестовый сигнал, выходом первой модели становится вход блока с искомым параметром. Соединяют выход первой модели с входом второй через передаточную функцию блока, в котором содержится контролируемый параметр. Входом второй модели становится выход блока с контролируемым параметром. Снимают выходные сигналы после каждого блока второй модели. Полученные выходные сигналы для каждой из контрольных точек и каждой из совмещенных моделей с параметриче-

* Статья получена 09 февраля 2016 г.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, проект № 7.559.2011, государственный регистрационный номер НИИР 01201255056.

ской функцией чувствительности в дискретные моменты времени регистрируют. Замещают систему с номинальными характеристиками контролируемой, на вход системы подают аналогичный тестовый сигнал. Определяют выходные сигналы контролируемой системы в контрольных точках для дискретных моментов времени. Определяют отклонения выходных сигналов контролируемой системы в контрольных точках для дискретных моментов времени от номинальных значений. Определяют нормированные диагностические признаки для каждого из рассматриваемых параметров. По минимуму значения диагностического признака определяют неисправный параметр. Также определена процедура графической интерпретации нормированного диагностического признака и определения величины различимости дефектов.

Ключевые слова: поиск дефектов, непрерывная система с обратной связью, передаточная функция динамического блока, параметрическая функция чувствительности, диагностическая модель, объект диагностирования, контрольные точки, временные характеристики системы, нормированный диагностический признак, различимость дефектов

DOI: 10.17212/1814-1196-2016-2-23-34

ВВЕДЕНИЕ

Современное состояние диагностического обеспечения характеризуется большим числом методов и алгоритмов поиска дефектов в динамических системах, в частности системах автоматического управления. Эффективность проектирования, создания и эксплуатации систем автоматического управления обеспечивается применением алгоритмов и методов их диагностирования.

Уменьшение аппаратных или программных затрат на поиск дефектов представляется непростой задачей из-за достаточной сложности системы автоматического управления, которая является структурно связанным динамическим объектом. Улучшение различимости дефектов и увеличение помехоустойчивости диагностирования является сложной и актуальной задачей.

Описание поведения в исправном и неисправном состояниях и наличие формального описания объекта предполагает процессы построения диагностического обеспечения некоторого объекта диагностирования. Диагностической моделью будет называться формальное описание объекта диагностирования (в аналитическом, графическом, табличном, векторном или другом представлении). Вид диагностической модели принят в качестве основного признака классификации при детальном анализе процессов диагностирования, потому что в наибольшей степени влияет на выбор методов поиска дефектов в системах автоматического управления. Методы диагностирования классифицируются и по используемому математическому аппарату (теория чувствительности, теория идентификации, теория распознавания образов) [1–3], по типу диагностических параметров (коэффициенты дифференциальных уравнений или передаточных функций, показатели качества регулирования), по используемым режимам работы объекта при диагностировании (динамический, статический), по задачам диагностирования (поиск дефектов, проверка работоспособности).

В работе рассмотрен алгоритм поиска дефектов с глубиной до параметра динамического блока, позволяющий конкретизировать дефект, увеличить глубину поиска [4]. Применение известных алгоритмов подобного рода за-

ключается в необходимости определения модели структурной чувствительности [5–7] либо усложняется использованием моделей с пробными отклонениями параметров [8–10]. Ниже рассматривается алгоритм поиска параметрических дефектов передаточной функции блока [11–14], позволяющий использовать модель параметрической чувствительности временных характеристик [15, 16].

В качестве объекта диагностирования рассматривается непрерывный динамический объект, состоящий из произвольно соединенных динамических элементов, передаточные функции которых в сумме содержат m параметров.

Под одиночным параметрическим дефектом будем понимать такое изменение технического состояния объекта диагностирования, которое приводит к изменению одного параметра блока. Примем гипотезу о возможности появления в объекте только одиночных дефектов и синтезируем алгоритм поиска одиночных параметрических дефектов блока с использованием выходных сигналов объекта диагностирования, номинальной модели и модели параметрической функции чувствительности при подаче на входы объекта и моделей общего тестового сигнала. Поскольку на практике изменение технического состояния объекта может приводить к изменению нескольких параметров, синтезируем алгоритм, который будет определять один параметр, изменение которого в наибольшей степени описывает наблюдаемое изменение временных характеристик объекта.

1. АЛГОРИТМ ПОИСКА ДЕФЕКТОВ

Алгоритм поиска дефектов с глубиной до параметра динамического блока основан на определении отклонений выходных сигналов объекта диагностирования от сигналов номинальной модели:

$$\Delta F_j(t) = F_j(t) - F_{j\text{ном}}(t), \quad j = 1, \dots, k; \quad t \in [0, T_k], \quad (1)$$

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

Модель чувствительности получают следующим образом. Поочередно для каждого из m параметров всех блоков динамической системы соединяют связью две модели: на вход первой модели подают тестовый сигнал $x(t)$, выходом первой модели определяют вход блока с искомым параметром, соединяют выход первой модели с входом второй через передаточную функцию:

$$V_{ji} = \frac{\partial W_j}{\partial \alpha_i}, \quad i = 1, \dots, m,$$

где W_j – передаточная функция j -го блока, в котором содержится контролируемый параметр α_i , входом второй модели становится выход блока с контролируемым параметром α_i (рис. 1). Такие модели назовем моделями параметрической функции чувствительности.

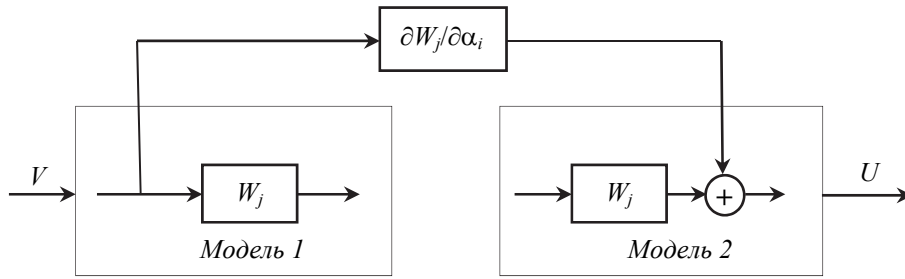


Рис. 1. Модель параметрической функции чувствительности

В процессе диагностирования регистрируют выходные сигналы моделей параметрической чувствительности с передаточными функциями:

$$Q_{ji} = \frac{\partial \varphi_j}{\partial \alpha_i}, \quad j = 1, \dots, k, \quad i = 1, \dots, m, \quad (2)$$

где Q_{ji} – чувствительность передаточной функции объекта диагностирования к изменению i -го параметра для j -й контрольной точки; m – число рассматриваемых параметров.

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

$$Q_{ji} = 1 - \frac{\left[\int_0^{T_k} \sum_{j=1}^k U_{ji}(t) \Delta F_j(t) dt \right]}{\int_0^{T_k} \sum_{j=1}^k U_{ji}(t) \int_0^{T_k} \sum_{j=1}^k \Delta F_j^2(t) dt}, \quad i = \overline{1, m}. \quad (3)$$

В дискретном времени и для нормированных векторов $\Delta \hat{F}$ и \hat{U} формула (3) запишется в виде

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

где

$$\Delta \hat{F}_j(t_l) = \frac{\Delta F_j(t_l)}{\sqrt{\sum_{u=1}^n \sum_{r=1}^k \Delta F_r^2(t_u)}}, \quad j = \overline{1, k}, \quad l = \overline{1, n}, \quad (5)$$

$$\hat{U}_{ji}(t_l) = \frac{U_{ji}(t_l)}{\sqrt{\sum_{u=1}^n \sum_{r=1}^k U_{ri}^2(t_u)}}, \quad j = \overline{1, k}, \quad i = \overline{1, m}, \quad l = \overline{1, n}, \quad (6)$$

где n – число дискретных значений функции чувствительности и отклонений выходных сигналов объекта диагностирования от сигналов номинальной модели на интервале контроля T_k .

Параметр, для которого диагностический признак (3) или (4) принимает минимальное значение, считается дефектным. Диагностические признаки (3) и (4) лежат в фиксированном интервале значений $[0, 1]$, поэтому различимость двух параметрических 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 $k \cdot n$ (k – число контрольных точек, n – число дискретных значений времени), 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 отклонений сигналов объекта диагностирования от номинальных и вектором единичной длины выходных сигналов модели чувствительности i -го параметра.

Фактическая различимость i -го параметрического дефекта определяется по формуле

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

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

Функциональная схема устройства, реализующего вычисление диагностического признака наличия параметрического дефекта с использованием параметрической функции чувствительности (3), приведена на рис. 2.

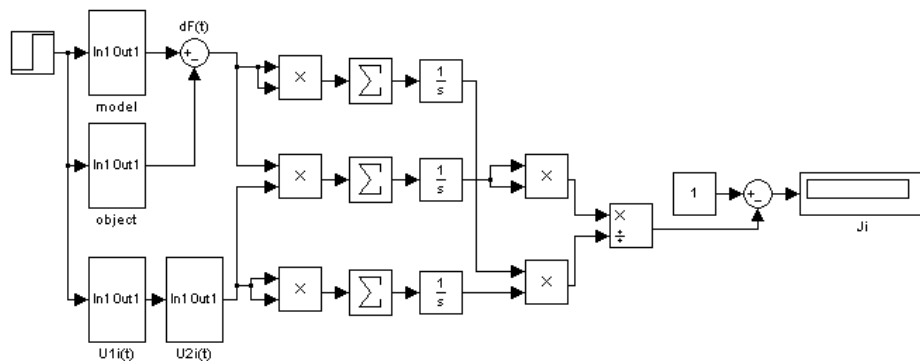


Рис. 2. Функциональная схема устройства поиска дефектов с использованием параметрической функции чувствительности

Поиск неисправного параметра 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 параметров.

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

3. Фиксируют число контрольных точек k .

4. Предварительно определяют векторы $U_{ji}(t_l)$ выходных сигналов модели в l -е дискретные моменты времени, полученные в результате функций чувствительности i -го параметра каждого из m параметров всех блоков для номинальных значений параметров передаточных функций блоков, для чего выполняют пункты 5–7.

5. Подают тестовый сигнал $x(t)$ (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.

6. Регистрируют реакцию системы с номинальными характеристиками $F_{jном}(t_l)$, $j = 1, \dots, k$, $l = 1, \dots, n$ на интервале $t_l \in [0, T_k]$ в k контрольных точках для n дискретных моментов времени.

7. Определяют выходные сигналы модели для каждой из k контрольных точек, полученные в результате использования параметрической функции чувствительности, для чего поочередно для каждого из m параметров всех блоков динамической системы соединяют связью две модели: на вход первой модели подают тестовый сигнал $x(t)$, выходом первой модели становится вход блока с искомым параметром, соединяют выход первой модели с входом второй через передаточную функцию $V_{ji} = \partial W_j / \partial \alpha_i$, $j = 1, \dots, k$, $i = 1, \dots, m$, где W_j – передаточная функция блока, в котором содержится контролируемый параметр α ; входом второй модели становится выход блока с контролируемым параметром α . Снимают выходные сигналы после каждого блока второй модели, полученные выходные сигналы для каждой из k контрольных точек и каждой из m совмещенных моделей с параметрической функцией чувствительности и n дискретных значений времени $U_{ji}(t_l)$, $j = 1, \dots, k$, $i = 1, \dots, m$, $l = 1, \dots, n$ регистрируют.

8. Находят нормированные значения выходных сигналов моделей параметрической чувствительности $\hat{U}_{ji}(t_l)$, полученные в результате вычисления параметрической функции чувствительности для каждого из m параметров блоков по формуле (6).

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

10. Определяют сигналы контролируемой системы для k контрольных точек и n моментов времени $F_j(t_l)$, $j = 1, \dots, k$, $l = 1, \dots, n$, осуществляя операции, описанные в пунктах 5 и 6 применительно к контролируемой системе.

11. Определяют отклонения сигналов контролируемой системы для k контрольных точек и n моментов времени от номинальных значений $\Delta F_j(t_l) = F_j(t_l) - F_{jном}(t_l)$, $j = 1, \dots, k$, $l = 1, \dots, n$.

12. Вычисляют нормированные значения отклонений выходных сигналов контролируемой системы от номинальных $\Delta \hat{F}_j(t_l)$ по формуле (5).

13. Вычисляют диагностические признаки наличия неисправного параметра по формуле (4).

14. По минимуму значения диагностического признака определяют дефектный параметр.

Покажем, что данный алгоритм позволяет находить дефекты с глубиной до параметра соответствующего блока.

2. ПРИМЕР ПРИМЕНЕНИЯ АЛГОРИТМА

Рассмотрим реализацию предлагаемого алгоритма поиска одиночного параметрического дефекта для системы, структурная схема которой является моделью системы стабилизации давления газа на установке прямотрубной печи для подогрева нефтепродуктов нефтеперерабатывающего завода и представлена на рис. 3.

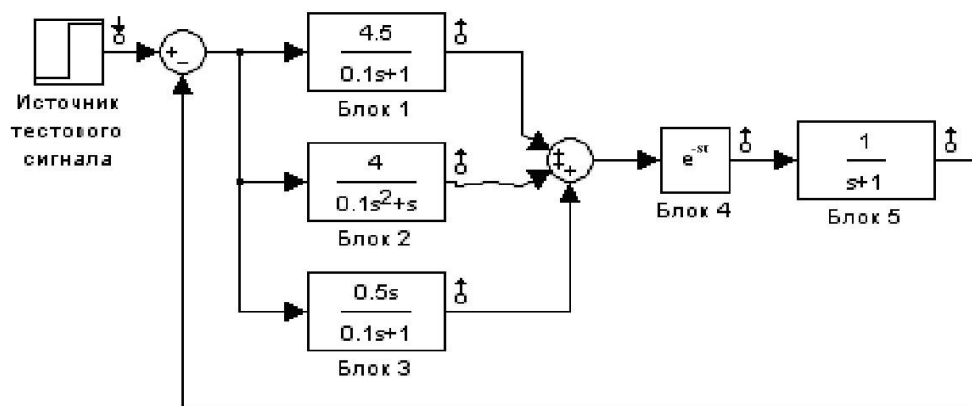


Рис. 3. Структурная схема объекта диагностирования

Передаточные функции блоков, входящих в объект диагностирования, имеют следующий вид:

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

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.

Объект диагностирования имеет длительность переходного процесса $T_{\text{ПП}} = 8$ с. Поэтому наибольшие значения фактической различимости получены при использовании времени контроля $T_K = 10$ с. Будем использовать еди-

ничное 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 параметрического дефекта в блоке 5 (изменение технического состояния датчика, измеряющего давление газа, в виде изменения коэффициента усиления $K_5 = 0.8$) при использовании множества контрольных точек $\{1, 2, 3, 5\}$ дает следующие значения нормированных диагностических признаков:

$$J_{k1} = 0.392; J_{T1} = 0.46; J_{k2} = 0.385; J_{T2} = 0.399; J_{k3} = 0.719; J_{T3} = 0.422; \\ J_{k5} = \mathbf{0.004}; J_{T5} = 0.274.$$

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

При наличии дефекта в пропорциональном звене (блоке 1 в виде уменьшения параметра K_1 на 20 %, дефект 1) алгоритм дает следующие результаты:

$$J_{k1} = \mathbf{0.005}; J_{T1} = 0.362; J_{k2} = 0.447; J_{T2} = 0.471; J_{k3} = 0.773; J_{T3} = 0.49; \\ J_{k5} = 0.392; J_{T5} = 0.334.$$

При наличии дефекта в интегрирующем звене (блоке 2 в виде уменьшения параметра K_2 на 20 %, дефект 3) получим значения признаков:

$$J_{k1} = 0.454; J_{T1} = 0.329; J_{k2} = \mathbf{0.029}; J_{T2} = 0.273; J_{k3} = 0.805; J_{T3} = 0.377; \\ J_{k5} = 0.386; J_{T5} = 0.298.$$

При наличии дефекта в дифференцирующем звене (блоке 3 в виде уменьшения параметра K_3 на 20 %, дефект 5) получим значения признаков:

$$J_{k1} = 0.753; J_{T1} = 0.687; J_{k2} = 0.802; J_{T2} = 0.629; J_{k3} = \mathbf{0.024}; J_{T3} = 0.578; \\ J_{k5} = 0.687; J_{T5} = 0.721.$$

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

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

Временная диагностическая модель удобней моделей, представленных в виде дифференциальных уравнений и пространства состояний, так как использует не дифференциальные, а алгебраические уравнения, поэтому диа-

гностическая модель позволяет производить анализ технического состояния не только в частотной, но и во временной области и обладает структурно-топологической чувствительностью отдельных параметров на уровне динамического элемента объекта диагностирования.

Разработан и исследован новый алгоритм поиска одиночных дефектов с глубиной до параметра передаточной функции, учитывающей специфику влияния конкретных конструктивных дефектов на изменение динамических характеристик объекта диагностирования. Показана применимость методов поиска дефектов во временной области 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 параметрических дефектов при диагностировании методом функции параметрической 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 параметров на временные характеристики объекта, а значит, предварительно оценивать возможность нахождения того или иного параметрического дефекта.

Разработанный алгоритм диагностирования методом функции параметрической 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 методов и алгоритмов, а также правильность выдвинутых теоретических положений. Показано, что апостериорные меры различимости пар дефектов дают оценки с достаточной для практики точностью.

Предлагаемый алгоритм использует модель параметрической чувствительности, которая предполагает использование двух моделей, соединенных последовательно через соответствующую передаточную функцию для каждого параметра. Рассмотренный алгоритм позволяет избежать недостатков метода пробных отклонений параметров модели, заключающихся в определении величин относительных отклонений параметров передаточных функций, которые нужно предварительно задавать. Преимуществом рассмотренного подхода является переход от пробных отклонений параметров модели к параметрической функции чувствительности без снижения различимости дефектов, а значит, и без падения помехоустойчивости диагностирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Розенвассер Е.Н., Юсунов Р.М. Чувствительность систем управления. – М.: Наука, 1981. – 464 с.
2. 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.
3. Patton R. Robast model-based fault diagnosis: the state of the art // Proceedings IFAC Symposium SAFEPROCESS'94. – Espoo, Finland, 1994. – P. 1–24.
4. Шалобанов С.В. Структурные методы поиска одиночных дефектов в динамических системах // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2000. – № 4. – С. 7–13.
5. Воронин В.В. Диагностирование технических объектов: монография. – Хабаровск: Изд-во Хабар. гос. техн. ун-та, 2002. – 188 с.
6. Шалобанов С.В. Диагностирование динамических объектов методом интегральных преобразований сигналов // Информационные и управляющие системы: сборник научных трудов / под ред. В.В. Воронина. – Хабаровск, 2003. – С. 30–33.
7. Шалобанов С.В. Поиск дефектов в динамических системах методом интегральных преобразований сигналов // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2005. – № 1. – С. 59–68.
8. Шалобанов С.С. Поиск параметрических дефектов в непрерывных динамических системах методом пробных отклонений параметров модели // Датчики и системы. – 2011. – № 4. – С. 34–37.
9. Шалобанов С.С. Априорная различимость одиночных параметрических дефектов для метода пробных отклонений параметров модели // Высокие технологии, образование, промышленность: сборник статей одиннадцатой международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности», 27–29 апреля 2011 г., Санкт-Петербург, Россия. – СПб., 2011. – Т. 1. – С. 448–452.
10. Патент 2429518 Российская Федерация. Способ поиска неисправностей динамического блока в непрерывной системе / С.С. Шалобанов. – № 2010128421/08; заявл. 08.07.2010; опубл. 20.09.2011, Бюл. № 26.
11. Патент 2450309 Российская Федерация. Способ поиска неисправностей динамического блока в непрерывной системе / С.С. Шалобанов. – № 2010148469/08; заявл. 26.11.2010; опубл. 10.05.2012, Бюл. № 13.
12. Патент 2464616 Российская Федерация. Способ поиска неисправностей динамического блока в непрерывной системе / В.В. Киселев, С.С. Шалобанов. – 2011144335/08; заявл. 01.11.2011; опубл. 20.10.2012, Бюл. № 29.
13. Патент 2473105 Российская Федерация. Способ поиска неисправностей блоков в непрерывной динамической системе / С.В. Шалобанов, С.С. Шалобанов. – № 2011151174/08; заявл. 14.12.2011; опубл. 20.01.2013, Бюл. № 2.
14. Воронин В.В., Шалобанов С.В., Шалобанов С.С. Алгоритмы поиска дефектов в системах автоматического управления методом пробных отклонений параметров модели: монография. – Хабаровск: Изд-во ТОГУ, 2013. – 132 с.
15. Патент 2541857 Российская Федерация. Способ поиска неисправностей в непрерывной динамической системе на основе введения пробных отклонений / С.С. Шалобанов. – № 2013149468/08; заявл. 06.11.2013; опубл. 20.02.2015, Бюл. № 5.
16. Патент 2580405 Российская Федерация. Способ поиска неисправностей динамического блока в непрерывной системе на основе функции чувствительности / С.В. Шалобанов, С.С. Шалобанов. – № 2015110545/08; заявл. 24.03.2015; опубл. 10.04.2016, Бюл. № 13.

Воронин Владимир Викторович, доктор технических наук, профессор. Основное направление научных исследований – техническая диагностика. Имеет 128 публикаций, в том числе 4 монографии, 2 учебных пособия. E-mail: voronin@ais.khstu.ru

Шалобанов Сергей Викторович, доктор технических наук, профессор. Основное направление научных исследований – техническая диагностика. Имеет 140 публикаций, в том числе 2 монографии, 3 учебных пособия. E-mail: shalobanov@mail.ru

Шалобанов Сергей Сергеевич, кандидат технических наук. Основное направление научных исследований – техническая диагностика. Имеет 61 публикацию, в том числе одну монографию, 3 учебных пособия. E-mail: shalobanov_ne@mail.ru

Diagnostics of continuous dynamic systems by using parameter sensitivity functions*

V.V. VORONIN¹, S.V. SHALOBANOV², S.S. SHALOBANOV³

¹ Pacific National University, 136, Tihookeanskaya St., Khabarovsk, 680035, Russian Federation, D. Sc. (Eng.), professor. E-mail: voronin@ais.khstu.ru

² Pacific National University, 136, Tihookeanskaya St., Khabarovsk, 680035, Russian Federation, D. Sc. (Eng.), professor. E-mail: shalobanov@mail.ru

³ Pacific National University, 136, Tihookeanskaya St., Khabarovsk, 680035, Russian Federation, PhD (Eng.), associate professor. E-mail: shalobanov_ne@mail.ru

In this paper we consider the fault search algorithm in terms of dynamic block parameters which makes it possible to better take into account the specifics of a real fault, namely the change in values of one parameter of the unit transfer function. The application of the known algorithms of this type is complicated by the need to use models with trial deviation parameters or the need to analyze signal transfer signs. The disadvantage of the method of trial deviations model parameters is that it uses the reference values of relative deviations of transfer function parameters for the models with trial deviations. The disadvantage of the method of signal transfer sign analysis, in which a normalized diagnostic sign as well as a binary diagnostic sign are used, is that it uses the calculation of signal transfer signs from the block outputs to control points. Below the algorithm of fault search in transfer function blocks enabling the use of the parametric sensitivity model based on time characteristics of the output signal. The procedure of obtaining normalized diagnostic signs is to pre-record a response to an input action of a fault-free system over the time interval at the control points for discrete time moments. Then the model output signals for each of the control points obtained by using parametric sensitivity function are determined. To do this, two models are alternately coupled for each parameter of all dynamic system blocks, i.e. a test signal is fed to the input of the first model, and the output of the first model becomes the input of the block containing the required parameter. The output of the first model is connected with the second model input through the transfer function block which contains the controlled parameter. The input to the second model becomes the output of the block with the controlled parameter. Output signals are taken after every block of the second model. Output signals for each of the control points and each of the combined models with the parametric sensitivity function are recorded at discrete time moments. The nominal system is replaced by the controlled system; a similar test signal is fed to the system input. Output signals of the controlled system are determined at control points for discrete time moments. Deviations of the controlled system output signals from the nominal values at control points are determined for discrete time moments. The normalized diagnostic signs for each of the considered parameters are then found. A faulty parameter is found by a minimal diagnostic sign value. The procedure of graphic interpretation of a normalized diagnostic sign and determination of a fault distinction value is also described.

Keywords: fault search, continuous feedback system, transfer function of a dynamic block, parametric sensitivity function, diagnostic model, diagnostics object, control points, system time characteristics, normalized diagnostic sign, fault distinction

DOI: 10.17212/1814-1196-2016-2-23-34

* Received 09 February 2016.

REFERENCES

1. Rosenwasser E.N., Yusupov R.M. *Sensitivity of automatic control systems*. Boca Raton, CRS Press, 1999. 436 p. (Russ. ed.: Rozenvasser E.N., Yusupov R.M. *Chuvstvitel'nost' sistem upravleniya*. Moscow, Nauka Publ., 1981. 464 p.).
2. 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.
3. Patton R. Robust model-based fault diagnosis: the state of the art. *Proceedings IFAC Symposium SAFEPROCESS'94*, Espoo, Finland, 1994, pp. 1–24.
4. Shalobanov S.V. Strukturnye metody poiska odinichnykh 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.
5. Voronin V.V. *Diagnostirovanie tekhnicheskikh ob"ektov* [Diagnosis of technical objects]. Khabarovsk, Khabarovskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet Publ., 2002. 188 p.
6. Shalobanov S.V. Diagnostirovanie dinamicheskikh ob"ektov metodom integral'nykh preobrazovaniy signalov [Diagnosing dynamic objects by integral transforms signals]. *Informatsionnye i upravlyayushchie sistemy* [Russian information and control systems]. Ed. by V.V. Voronin. Khabarovsk, 2003, pp. 30–33.
7. Shalobanov S.V. Poisk defektov v dinamicheskikh sistemakh metodom integral'nykh preobrazovaniy signalov [Search of defects in dynamical systems by the method of integral signal transformation]. *Vestnik Tikhookeanskogo gosudarstvennogo universiteta – Bulletin of Pacific national university*, 2005, no. 1, pp. 59–68.
8. Shalobanov S.S. Poisk parametricheskikh defektov v nepreryvnykh dinamicheskikh sistemakh metodom probnykh otklonenii parametrov modeli [Search of parametrical defects in continuous dynamical systems by the method of trial deviations of model parameters]. *Datchiki i sistemy – Sensors and Systems*, 2011, no. 4, pp. 34–37.
9. Shalobanov S.S. [A priori distinction of single parameters defects for the trial deviations its model parameters method]. *Vysokie tekhnologii, obrazovanie, promyshlennost': sbornik statei odinadtsatoi mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Fundamental'nye i prikladnye issledovaniya, razrabotka i primeneniye vysokikh tekhnologii v promyshlennosti"* [Proceedings of eleventh international scientific-practical conference "Fundamental and applied research, development and application of high technologies in the industry"], St. Petersburg, Russia, 27–29 April 2011, vol. 1, pp. 448–452. (In Russian)
10. Shalobanov S.S. *Sposob poiska neispravnostei dinamicheskogo bloka v nepreryvnoi sisteme* [Search method of dynamic fault block in a continuous system]. Patent RF, no. 2429518, 2011.
11. Shalobanov S.S. *Sposob poiska neispravnostei dinamicheskogo bloka v nepreryvnoi sisteme* [Search method of dynamic fault block in a continuous system]. Patent RF, no. 2450309, 2012.
12. Kiselev V.V., Shalobanov S.S. *Sposob poiska neispravnostei dinamicheskogo bloka v nepreryvnoi sisteme* [Search method of dynamic fault block in a continuous system]. Patent RF, no. 2464616, 2012.
13. Shalobanov S.V., Shalobanov S.S. *Sposob poiska neispravnostei blokov v nepreryvnoi dinamicheskoi sisteme* [A method of searching fault blocks in the continuous dynamic system]. Patent RF, no. 2473105, 2013.
14. Voronin V.V., Shalobanov S.V., Shalobanov S.S. *Algoritmy poiska defektov v sistemakh avtomaticheskogo upravleniya metodom probnykh otklonenii parametrov modeli* [Defects search algorithms in automatic control systems by trial deviations of model parameters]. Khabarovsk, PNU Publ., 2013. 132 p.
15. Shalobanov S.S. *Sposob poiska neispravnostei v nepreryvnoi dinamicheskoi sisteme na osnove vvedeniya probnykh otklonenii* [Troubleshooting method in a continuous dynamic system through the introduction of pilot deviations]. Patent RF, no. 2541857, 2015.
16. Shalobanov S.V., Shalobanov S.S. *Sposob poiska neispravnostei dinamicheskogo bloka v nepreryvnoi sisteme na osnove funktsii chuvstvitel'nosti* [Search method of dynamic fault block in a continuous system on basis of the sensitivity of wasps]. Patent RF, no. 2580405, 2016.