



УДК 681.518.5

© 2019 г. С.С. Шалобанов, канд. техн. наук
(Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск)

АЛГОРИТМ ПОИСКА ДЕФЕКТОВ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ СМЕНЫ ПОЗИЦИИ ВХОДНОГО СИГНАЛА И АНАЛИЗА ЗНАКОВ ПЕРЕДАЧ ВЫХОДНЫХ СИГНАЛОВ*

Рассматривается алгоритм поиска дефектов в непрерывной динамической системе с глубиной до динамического блока на основе смены позиции подачи входного сигнала с использованием анализа знаков интегральных оценок отклонений ее выходных сигналов.

Ключевые слова: смена позиции входного сигнала, интегральные оценки отклонений выходных сигналов, анализ знаков интегральных оценок отклонений выходных сигналов, диагностическая модель, объект диагностирования, нормированный диагностический признак, различимость дефектов.

DOI: 10.22250/isu.2019.62.101-109

Введение

В работе рассмотрен алгоритм поиска дефектов в непрерывной динамической системе с глубиной до динамического блока, позволяющий при невысокой размерности решаемой задачи (небольшом количестве блоков объекта диагностирования) полнее учесть специфику проявления реального дефекта. Такой подход упрощает реализацию алгоритма путем уменьшения числа контрольных точек, что позволяет сократить вычислительные и временные затраты при диагностировании сложных объектов. Применение известных алгоритмов подобного рода осложняется необходимостью определения полной модели структурной чувствительности [1, 2], либо достиже-

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

ем невысокой различимости дефектов [3 – 8], либо использованием моделей с пробными отклонениями параметров [9 – 11], что усложняет процесс диагностирования. Ниже рассматривается алгоритм поиска дефектов блоков объекта диагностирования, позволяющий использовать анализ знаков передач сигналов на основе смены позиции входного сигнала, дающий возможность устранить указанные недостатки. Рассматриваются результаты исследования эффективности его применения.

Постановка задачи

В качестве объекта диагностирования рассматривается непрерывный динамический объект, состоящий из n динамических блоков.

Примем гипотезу о возможности появления в объекте только одиночных дефектов блоков. Под одиночными дефектами блоков будем понимать такое изменение технического состояния объекта, которое приводит к изменению передаточной функции одного блока, не вызывающее потерю устойчивости объекта. Синтезируем алгоритм поиска одиночных дефектов блоков с использованием знаков интегральных оценок отклонений выходных сигналов объекта диагностирования от сигналов номинальной модели объекта и нормированного диагностического признака при использовании смены позиции входного сигнала.

Алгоритм поиска дефектов

Алгоритм поиска дефектов блоков основан на определении знаков интегральных оценок отклонений выходных сигналов номинальной модели от сигналов объекта диагностирования. Использование знаков интегральных оценок отклонений выходных сигналов позволяет перейти от обработки временных функций к анализу знаков интегральных оценок:

$$\Delta F_i(t) = F_{mi}(t) - F_{oi}(t); \quad \Delta F_i = \text{sign} \left\{ \int_0^{T_k} \Delta F_i(t) dt \right\}; \quad i = \overline{1, k}, \quad (1)$$

где i – номер контрольной точки; $F_{mi}(t)$ и $F_{oi}(t)$ – сигналы объекта и модели соответственно в i -й контрольной точке; T_k – время контроля объекта диагностирования; k – число контрольных точек.

Оценка чувствительности объекта к изменению передаточной функции j -го блока может быть получена путем перемещения входного сигнала V на выход j -го блока модели (рис. 1). Такую модель назовем моделью со сменой позиции входного сигнала объекта диагностирования.

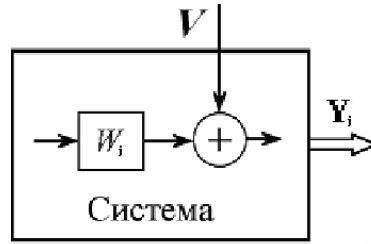


Рис. 1. Модель со сменой позиции входного сигнала V на выход j -го блока.

В процессе диагностирования вычисляются интегральные оценки выходных сигналов модели со сменой позиции входного сигнала для различных блоков согласно формуле:

$$Y_{ij}(a) = L\{Y_{ij}(t)\} = \int_0^{T_k} Y_{ij}(t)e^{-at} dt, \quad i = \overline{1, k}, \quad j = \overline{1, n}, \quad (2)$$

где j – номер рассматриваемого блока; $Y_{ij}(t)$ – выходной сигнал модели со сменой позиции входного сигнала j -го блока для i -й контрольной точки; n – число блоков.

Выражения (1) и (2) позволяют вычислить элементы векторов ΔF и Y_j , размерность которых определяется количеством контрольных точек.

Затем определяют элементы векторов знаков интегральных оценок выходных сигналов моделей со сменой позиции входного сигнала для различных блоков:

$$Y_{ij} = \text{sign}(Y_{ij}(\alpha)), \quad i = 1, \dots, k, \quad j = 1, \dots, n.$$

Элементы нормированных векторов вычислим по формулам:

$$\Delta \hat{F}_i = \frac{\Delta F_i}{\sqrt{\sum_{l=1}^k \Delta F_l^2}}, \quad \hat{Y}_{ij} = \frac{Y_{ij}}{\sqrt{\sum_{l=1}^k Y_{lj}^2}},$$

где l – номер контрольной точки объекта диагностирования.

Элементы полученных нормированных векторов используются для вычислений диагностических признаков по формуле:

$$J_j = 1 - \left[\sum_{i=1}^k \hat{Y}_{ij} \cdot \Delta \hat{F}_i \right]^2, \quad j = \overline{1, n}. \quad (3)$$

Диагностические признаки (3) могут принимать значения от 0 до 1. Минимальное значение признака указывает на наличие дефекта в блоке.

Поиск неисправного блока согласно предлагаемому алгоритму сводится к выполнению следующих операций.

1. В качестве динамической системы рассматривают систему, состоящую из произвольно соединенных динамических блоков, с количеством рассматриваемых блоков n .

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 $\alpha = 5/T_k$.

4. Фиксируют число контрольных точек на выходах блоков k .

5. Предварительно находят элементы векторов интегральных оценок выходных сигналов модели с измененной позицией входного сигнала Y_{ij} для каждой из k контрольных точек, полученные в результате перемещения позиции входного сигнала на позицию после каждого из n блоков.

6. Определяют элементы векторов знаков интегральных оценок выходных сигналов модели $\text{sign}(Y_{ij})$, полученные в результате смены позиции входного сигнала после соответствующих блоков n .

7. Находят элементы нормированных векторов знаков интегральных оценок выходных сигналов модели с измененной позицией входного сигнала \hat{Y}_{ij} , полученные в результате перемещения позиции входного сигнала на позицию после соответствующих блоков n .

8. Определяют интегральные оценки отклонений выходных сигналов модели и контролируемой системы для k контрольных точек от номинальных значений ΔF_i .

9. Вычисляют знаки интегральных оценок отклонений выходных сигналов модели и контролируемой системы для k контрольных точек от номинальных значений $\text{sign}(\Delta F_i)$.

10. Вычисляют значения элементов нормированного вектора знаков интегральных оценок отклонений выходных сигналов модели и контролируемой системы $\Delta \hat{F}_i$.

11. Вычисляют диагностические признаки наличия неисправного блока по формуле (3). По минимальному значению диагностического признака определяют дефектный блок.

Поскольку диагностические признаки лежат в фиксированном интервале значений $[0, 1]$, различимость двух дефектов может оцениваться как разность значений соответствующих признаков [12 – 16].

Функциональная схема устройства, реализующего вычисление диагностического признака наличия дефекта с использованием смены позиции входного сигнала и анализа знаков передач выходных сигналов, приведена на рис. 2.

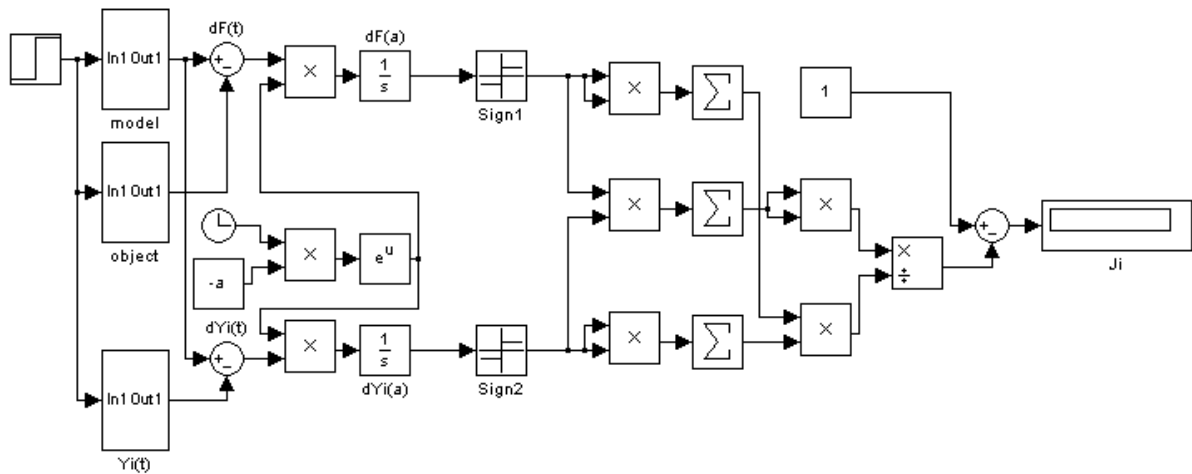


Рис. 2. Функциональная схема устройства поиска дефектов на основе анализа знаков передач выходных сигналов и смены позиции входного сигнала.

Пример использования алгоритма

Рассмотрим реализацию предлагаемого алгоритма для диагностирования объекта [17 – 20], структурная схема которого представлена на рис. 3.

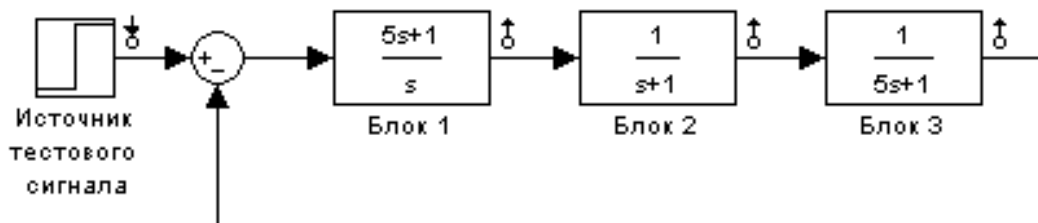


Рис. 3. Структурная схема объекта диагностирования.

Передаточные функции блоков

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

имеют следующие номинальные значения параметров: $k_1 = 1$; $T_1 = 5$ с; $k_2 = 1$; $T_2 = 1$ с; $k_3 = 1$; $T_3 = 5$ с.

При поиске одиночного дефекта в виде отклонения постоянной времени $T_1 = 4$ с (дефект №1) в первом звене путем подачи ступенчатого тестового входного сигнала единичной амплитуды и интегральных оценок сигналов для $T_k = 10$ с получены значения диагностических признаков по формуле (3), при использовании трех контрольных точек, расположенных на выходах блоков. Дефект, вычисленный по формуле (3), дает следующие значения диагностических признаков: $J_1 = 0$; $J_2 = 0.8889$; $J_3 = 0.8889$. Минимальная различимость как разность диагностических признаков составляет 0.8889.

Тот же дефект, найденный путем смены позиции входного сигнала без использования анализа знаков передач сигналов [6, 7] или с помощью проб-

ных отклонений параметров модели [9 – 11, 14], дает следующие значения диагностических признаков: $J_1 = 0$; $J_2 = 0.7853$; $J_3 = 0.07409$ с минимальной различимостью 0.07409, что значительно меньше, чем в предлагаемом алгоритме.

Моделирование процессов поиска дефектов во втором и третьем блоках объекта диагностирования для предлагаемого алгоритма и тех же условиях диагностирования дает следующие значения диагностических признаков:

при наличии дефекта в блоке №2 (в виде уменьшения параметра T_2 на 20% или изменение любого другого параметра на любую другую величину, дефект №2) $J_1 = 0.8889$; $J_2 = 0$; $J_3 = 0.8889$. Минимальная различимость как разность диагностических признаков составляет 0.8889;

при наличии дефекта в блоке №3 (в виде уменьшения параметра T_3 на 20% или изменение любого другого параметра на любую другую величину, дефект №3) $J_1 = 0.8889$; $J_2 = 0.8889$; $J_3 = 0$. Минимальная различимость как разность диагностических признаков составляет 0.8889.

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

Различимости дефектов второго и третьего блоков при поиске их с помощью смены позиции входного сигнала без использования анализа знаков передач сигналов [6, 7] или при помощи пробных отклонений параметров модели [9 – 11, 14] тоже не выше, чем в рассматриваемом алгоритме:

при наличии дефекта в блоке №2 (в виде уменьшения параметра T_2 на 20%, дефект №2): $J_1 = 0.7826$; $J_2 = 0$; $J_3 = 0.7459$ с минимальной различимостью 0.7459, что тоже меньше, чем в предлагаемом алгоритме;

при наличии дефекта в блоке №3 (в виде уменьшения параметра T_3 на 20%, дефект №3) $J_1 = 0.0739$; $J_2 = 0.7488$; $J_3 = 0$ с минимальной различимостью 0.0739, что значительно меньше, чем в предлагаемом алгоритме.

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

Сравнение различимости дефектов, полученных при использовании двух алгоритмов, показывает, что минимальная различимость в алгоритме, основанном на определении знаков интегральных оценок отклонений сигналов номинальной модели от сигналов объекта диагностирования и смены позиций входного сигнала, составляет 0.8889, в алгоритме на основе пробных отклонений параметров модели или при помощи смены позиции входного сигнала без анализа знаков передач выходного сигнала составляет 0.0739. Как видно, первый алгоритм обеспечивает лучшие различимости за счет

дискретного изменения значений диагностических признаков, которые можно определить по следующей формуле:

$$J_j = 1 - \left[\sum_{i=1}^k \hat{Y}_{ij} \cdot \Delta \hat{F}_i \right]^2 = 1 - \left[\sum_{i=1}^k \frac{\hat{Y}_{ij}}{\sqrt{k}} \cdot \frac{\Delta F_i}{\sqrt{k}} \right]^2 = 1 - \frac{\left[\sum_{i=1}^k \hat{Y}_{ij} \cdot \Delta F_i \right]^2}{k^2}.$$

При $k = 3$ и при совпадении знаков всех элементов вектора (или их противоположности) получаем $J = 0$, при несовпадении знака одного элемента вектора или трех элементов векторов получим значение диагностического признака $J_j = 1 - 1/9 = 0.8889$, что и определяет минимальную различимость дефектов для данного количества контрольных точек. Отметим, что при несовпадении знаков для двух элементов векторов значение признака будет равно $J_j = 1 - 0 = 1$.

Заключение

Анализ значений диагностических признаков показывает, что практическая различимость нахождения дефектов описанным алгоритмом выше, следовательно, выше будет и помехоустойчивость алгоритма.

Возмущающими факторами алгоритма являются: неадекватность модели диагностирования и погрешности регистрации сигналов объекта. На входной сигнал нет никаких ограничений, кроме того, что он должен быть непрерывным и одинаковым для объекта диагностирования, модели диагностирования и моделей с измененной позицией входного сигнала. Время контроля выбирается заведомо больше времени переходного процесса системы.

Моделирование процессов поиска дефектов производилось в среде Matlab. Приведенные данные показывают, что результаты нахождения дефектов при применении описанного алгоритма на основе смены позиции входного сигнала с использованием анализа знаков интегральных оценок отклонений выходных сигналов лучше, чем при использовании других алгоритмов [3 – 7, 9 – 11, 14]. При этом сохраняется непрерывная шкала различимости в интервале значений $[0 - 1]$ в отличие от алгоритмов, построенных на основе бинарных диагностических признаков [8, 12, 13, 15, 16].

ЛИТЕРАТУРА

1. Шалобанов С.В. Структурные методы поиска одиночных дефектов в динамических системах // Изв. вузов. Приборостроение. – 2000. – № 4. – С. 7-13.
2. Rosenwasser E.N., Yusupov R.M. Sensitivity of Automatic Control Systems, CRS Press, Boca Raton, London, New York, Washington, DC, 1999.

3. *Шалобанов С.В., Шалобанов С.С.* Диагностирование непрерывных динамических систем методом топологических связей // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2011. – № 4(23). – С.75-82.
4. *Пат. 2439647 РФ.* Способ поиска неисправного блока в непрерывной динамической системе / С.В. Шалобанов, С.С. Шалобанов // Официальный бюл. «Изобретения. Полезные модели». – 2012. – №1.
5. *Shalobanov S.V., Shalobanov S.S.* The Search Defects Algorithm In Continuous Dynamical Systems By Vectors Of Topological Relations // 3rd Russian-Pacific Conference on Computer Technology and Applications (RPC). – 2018. – P. 1-4.
6. *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.
7. *Пат. 2528135 РФ.* Способ поиска неисправного блока в непрерывной динамической системе на основе смены позиции входного сигнала / С.В. Шалобанов, С.С. Шалобанов // Официальный бюл. «Изобретения. Полезные модели». – 2014. – №25.
8. *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). – 2018. – P. 1-4.
9. *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.
10. *Пат. 2435189 РФ.* Способ поиска неисправного блока в динамической системе / С.В. Шалобанов, С.С. Шалобанов // Официальный бюл. «Изобретения. Полезные модели». – 2011. – №33.
11. *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). – 2017. – P. 1-4.
12. *Шалобанов С.С.* Диагностирование непрерывных динамических систем методом логических функций // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2012. – № 3(26). – С. 85-90.
13. *Пат. 2461861 РФ.* Способ поиска неисправного блока в непрерывной динамической системе / С.С. Шалобанов // Официальный бюл. «Изобретения. Полезные модели». – 2012. – №26.
14. *Shalobanov S. V., Shalobanov S. S.* Defect Search in Automatical Control Systems with Depth to Dynamic Block // 2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – 2018. – P. 1-5.
15. *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.
16. *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.
17. *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 Con-

- tinuous Dynamic Objects // 2019 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – 2019. – P. 1-5.
18. *Воронин В.В.* Информационное обеспечение процессов диагностирования в системах технического обслуживания // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2018. – № 2(49). – С. 35-44.
 19. *Воронин В.В.* Относительная эквивалентность дефектов // Информатика и системы управления. – 2018. – № 4(58). – С. 60-69.
 20. *Voronin V.V., Davydov O.A.* Local Area Network Failures Types, Consequences and Criticality Analysis // 2017 Second Russia and Pacific Conference on Computer Technology and Applications (RPC). – 2017. – P.184-187.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Е.А. Ереминым.

E-mail:

Шалобанов Сергей Сергеевич – shalobanov_ne@mail.ru.