УДК 681.518.5

© 2021 г. С.В. Шалобанов, д-р техн. наук,

С.С. Шалобанов, канд. техн. наук,

А.А. Александров

(Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск)

ПОИСК ДЕФЕКТОВ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ФУНКЦИИ СТРУКТУРНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ И АНАЛИЗА ИНТЕГРАЛЬНЫХ ОЦЕНОК ВЫХОДНЫХ СИГНАЛОВ*

Рассматривается алгоритм поиска дефектов в непрерывной динамической системе с глубиной до динамического блока на основе функции структурной чувствительности, с использованием анализа знаков интегральных оценок отклонений выходных сигналов.

Ключевые слова: структурная функция чувствительности, 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.2021.68.47-55

Введение

Рассматривается алгоритм поиска одиночных дефектов в непрерывной динамической системе с глубиной до динамического блока, позволяющий снизить размерность решаемой задачи, которая определяется количеством блоков объекта диагностирования. Такой алгоритм дает возможность полнее учесть специфику проявления реального дефекта, проявляющегося как изменение нескольких параметров динамического блока [1, 2]. Такой подход упрощает реализацию алгоритма путем уменьшения числа контрольных то-

* Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук (проект МК-1616.2020.8).

чек, что сокращает вычислительные и временные затраты при диагностировании сложных объектов. Применение известных алгоритмов подобного рода осложняется необходимостью смены позиции входного сигнала, либо достижением невысокой различимости дефектов, либо использованием моделей с пробными отклонениями параметров, что усложняет процесс диагностирования [3, 4]. Ниже рассматривается алгоритм поиска дефектов блоков объекта диагностирования, использующий анализ знаков интегральных оценок выходных сигналов и интегральных оценок полной модели структурной чувствительности, позволяющий устранить указанные недостатки. Оцениваются результаты исследования эффективности его применения.

Постановка задачи

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

Будем считать, что в объекте возможно появление только одиночных дефектов блоков. Под одиночными дефектами блоков будем понимать такое изменение технического состояния объекта, которое приводит к изменению передаточной функции одного блока, не приводящее к потере устойчивости объекта. Синтезируем алгоритм поиска одиночных дефектов блоков с использованием знаков интегральных оценок отклонений выходных сигналов объекта диагностирования от сигналов номинальной модели объекта и знаков интегральных оценок сигналов полной модели структурной чувствительности. Формирование диагноза будем осуществлять с использованием нормированного диагностического признака.

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 вектора знаков с элементами ΔF_j [5 – 8]:

$$\begin{cases} \Delta F_j(t) = F_{mj}(t) - F_{oj}(t), \\ \Delta F_j = \text{sign} \left\{ \int_0^{T_k} \Delta F_j(t) dt \right\}, \quad j = \overline{1, k}, \end{cases} \quad (1)$$

где j – номер контрольной точки; $F_{mj}(t)$ и $F_{oj}(t)$ – сигналы модели и

объекта соответственно в j -й контрольной точке; T_k – время контроля объекта диагностирования; k – число контрольных точек [8 – 10].

Оценка чувствительности объекта к изменению передаточной функции j -го блока может быть получена путем соединения связью двух моделей: на вход первой модели подают тестовый сигнал $x(t)$ [11 – 13], выходом первой модели определяют вход контролируемого блока, соединяют выход первой модели со входом второй, входом второй модели становится выход контролируемого блока (рис. 1). Такую модель назовем моделью структурной чувствительности объекта диагностирования [14].

Рис. 1. Модель структурной чувствительности j -го блока.

В процессе диагностирования вычисляются также интегральные оценки выходных сигналов модели структурной чувствительности для различных блоков согласно формуле:

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

где i – номер рассматриваемого блока; $V_{ji}(t)$ – выходной сигнал модели структурной чувствительности i -го блока для j -й контрольной точки; m – число блоков.

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

Затем определяют элементы векторов знаков интегральных оценок выходных сигналов модели структурной чувствительности для различных блоков:

$$V_{ji} = \text{sign}(V_{ji}(\alpha)), \quad j = 1, \dots, k, i = 1, \dots, m.$$

Элементы нормированных векторов вычисляются по формулам:

$$\Delta \hat{F}_j = \frac{\Delta F_j}{\sqrt{\sum_{r=1}^k \Delta F_r^2}}, \quad \hat{V}_{ji} = \frac{V_{ji}}{\sqrt{\sum_{r=1}^k V_{ri}^2}},$$

где r – номер контрольной точки объекта диагностирования.

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

$$J_i = 1 - \left[\sum_{j=1}^k \hat{V}_{ji} \cdot \Delta \hat{F}_j \right]^2, i = 1, \dots, m. \quad (3)$$

Диагностические признаки (3) могут принимать значения от 0 до 1. Минимальное значение признака указывает на наличие дефекта в блоке [15 – 17].

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 m .

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. 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 структурной чувствительности V_{ji} для каждой из k контрольных точек, полученные в результате интегрирования функций чувствительности i -го блока каждого из m блоков для номинальных значений параметров передаточных функций блоков и определенного выше параметра α .

6. Определяют элементы векторов знаков интегральных оценок выходных сигналов модели $\text{sign}(V_{ji})$, полученные в результате интегрирования функций чувствительности i -го блока каждого из m блоков для номинальных значений параметров передаточных функций блоков и определенного выше параметра α .

7. Находят элементы нормированных векторов знаков интегральных оценок выходных сигналов модели структурной чувствительности V_{ji} , полученные в результате интегрирования функций чувствительности i -го блока каждого из m блоков для номинальных значений параметров передаточных функций блоков и определенного выше параметра α .

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

9. Вычисляют знаки интегральных оценок отклонений выходных сигналов модели и контролируемой системы для k контрольных точек от

номинальных значений $\text{sign}(\Delta F_j)$.

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

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

Данная последовательность действий защищена патентом на изобретение как способ поиска неисправного блока в непрерывной динамической системе [18].

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

Функциональная схема устройства, реализующего вычисление диагностического признака наличия дефекта с использованием структурной функции чувствительности и анализа знаков передач интегральных оценок выходных сигналов, приведена на рис. 2.

Рис. 2. Функциональная схема устройства поиска дефектов на основе анализа знаков передач интегральных оценок выходных сигналов и структурной функции чувствительности.

Пример применения алгоритма

Рассмотрим реализацию предлагаемого алгоритма для диагностирования объекта, структурная схема которого представлена на рис. 3.

Передаточные функции блоков:

$$W_1(s) = \frac{k_1(T_1s + 1)}{s}, \quad W_2(s) = \frac{k_2}{T_2s + 1}, \quad W_3(s) = \frac{k_3}{T_3s + 1}.$$

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

Рис. 3. Структурная схема объекта диагностирования.

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 структурной функции чувствительности без использования анализа знаков передач сигналов или с помощью пробных отклонений параметров модели или смены позиции входного сигнала, 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 при тех же условиях диагностирования дает следующие значения диагностических признаков.

При наличии дефекта в блоке №2 (в виде уменьшения параметра T_2 на 20% или изменения 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 изменения 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 структурной функции чувствительности, без использования анализа знаков передач сигналов или при помощи пробных отклонений пара-

метров модели или смены позиции входного сигнала, 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 трех алгоритмов, показывает, что минимальная различимость в алгоритме, основанном на определении знаков интегральных оценок отклонений сигналов номинальной модели от сигналов объекта диагностирования и интегральных оценок структурной функции чувствительности, составляет 0.8889; в алгоритмах на основе пробных отклонений параметров модели, смены позиции входного сигнала или при помощи структурной функции чувствительности без анализа знаков передач выходного сигнала составляет 0.0739. Как видно, рассматриваемый алгоритм обеспечивает лучшие различимости за счет дискретного изменения значений диагностических признаков, которые можно определить по следующей формуле:

$$J_i = 1 - \left[\sum_{j=1}^k \hat{V}_{ji} \cdot \Delta \hat{F}_j \right]^2 = 1 - \left[\sum_{j=1}^k \frac{\hat{V}_{ji}}{\sqrt{k}} \cdot \frac{\Delta F_j}{\sqrt{k}} \right]^2 = 1 - \frac{\left[\sum_{j=1}^k \hat{V}_{ji} \cdot \Delta F_j \right]^2}{k^2}.$$

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

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 мо-

дели 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 объекта диагностирования и моделей структурной чувствительности. Время контроля выбирается заведомо больше времени переходного процесса системы.

Моделирование процессов поиска дефектов производилось в среде Matlab. Приведенные результаты показывают, что результаты нахождения дефектов при применении описанного алгоритма на основе структурной функции чувствительности с использованием анализа знаков интегральных оценок отклонений выходных сигналов лучше, чем при использовании других алгоритмов. При этом сохраняется непрерывная шкала различимости в интервале значений $\{0, 1\}$ в отличие от алгоритмов, построенных на применении бинарных диагностических признаков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шалобанов С.В. Структурные методы поиска одиночных дефектов в динамических системах // Изв. вузов. Приборостроение. – 2000. – № 4. – С. 7-13.
2. Шалобанов С.С. Алгоритм поиска дефектов в системах автоматического управления на основе смены позиции входного сигнала и анализа знаков передач выходных сигналов // Информатика и системы управления. – 2019. – №4(62). – С. 101-109.
3. Шалобанов С.В., Шалобанов С.С. Алгоритм поиска дефектов в системах автоматического управления на основе пробных отклонений параметров и анализа знаков интегральных оценок сигналов // Информатика и системы управления. – 2018. – №4(58). – С. 104-111.
4. Rosenwasser E.N., Yusupov R.M. Sensitivity of Automatic Control Systems, CRS Press, Boca Raton, London, New York, Washington, DC, 1999.
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. Пат. 2439647 РФ. Способ поиска неисправного блока в непрерывной динамической системе / С.В. Шалобанов, С.С. Шалобанов // Официальный бюл. «Изобретения. Полезные модели». – 2012. – №1.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. 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). – 2020. – P. 1-5.
11. *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.
 12. *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.
 13. *Пат. 2661180 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». – 2018. – №20.
 14. *Shalobanov S. V., Shalobanov S. S.* Diagnosing Continuous Dynamic Systems Using Topological Sensitivity Functions. 2020 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). – 2020. – P. 1-5.
 15. *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). – 2019. – P. 1-5.
 16. *Воронин В.В.* Относительная эквивалентность дефектов // Информатика и системы управления. – 2018. – № 4(58). – С. 60-69.
 17. *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.
 18. *Пат. 2740540 РФ.* Способ поиска неисправного блока в непрерывной динамической системе на основе функции чувствительности и анализа знаков передач / С. В. Шалобанов, С. С. Шалобанов // Официальный бюл. «Изобретения. Полезные модели». – 2021. – №2.

E-mail:

Шалобанов Сергей Викторович – shalobanov@mail.ru;

Шалобанов Сергей Сергеевич – shalobanov_ne@mail.ru;

Александров Александр Александрович – fire321war@mail.ru.