

УДК 681.518.5

© 2018 г. С.В. Шалобанов, д-р техн. наук,

С.С. Шалобанов, канд. техн. наук

(Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск)

АЛГОРИТМ ПОИСКА ДЕФЕКТОВ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПРОБНЫХ ОТКЛОНЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ И АНАЛИЗА ЗНАКОВ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ОЦЕНОК СИГНАЛОВ*

Рассматривается алгоритм поиска дефектов в непрерывной динамической системе с глубиной до динамического блока на основе пробных отклонений параметров модели, с использованием анализа знаков интегральных оценок отклонений сигналов.

Ключевые слова: пробные отклонения параметров модели, интегральные оценки отклонений выходных сигналов, анализ знаков интегральных оценок отклонений сигналов, диагностическая модель, объект диагностирования, нормированный диагностический признак.

DOI: 10.22250/isu.2018.58.104-111

Введение

В работе рассмотрен алгоритм поиска дефектов в непрерывной динамической системе с глубиной до динамического блока, позволяющий при невысокой размерности решаемой задачи полнее учесть специфику проявления реального дефекта (изменение значений всех параметров одного блока или вида передаточной функции одного блока). Такой подход упрощает реализацию алгоритма путем уменьшения числа контрольных точек, что позволяет сократить аппаратные затраты при диагностировании сложных объектов. Применение известных алгоритмов подобного рода осложняется необходимостью определения полной модели структурной чувствительности [1, 2], либо достижением невысокой различимости дефектов [3 – 8], либо отсутствием количественной меры различимости дефектов [9 – 12]. Ниже рассматривается алгоритм поиска дефектов блоков объ-

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

екта диагностирования, позволяющий устранить указанные недостатки путем использования анализа знаков интегральных оценок сигналов, полученных на основе пробных отклонений параметров модели.

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. Синтезируем алгоритм поиска одиночных дефектов блоков с использованием анализа знаков интегральных оценок отклонений сигналов объекта диагностирования от сигналов номинальной модели объекта, нормированного диагностического признака при использовании пробных отклонений параметров модели.

Алгоритм поиска дефектов

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

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

где i – номер контрольной точки; $F_{mi}(t)$ и $F_{oi}(t)$ – сигналы объекта и модели соответственно в i -й точке; T_k – время контроля объекта диагностирования; k – число контрольных точек. В процессе диагностирования вычисляются знаки интегральных оценок отклонений сигналов номинальной модели от сигналов модели с пробными отклонениями параметров в различных блоках, по формуле:

$$\begin{cases} \Delta P_{ij}(t) = F_{mi}(t) - P_{ij}(t), \\ \Delta P_{ij} = \text{sign} \left\{ \int_0^{T_k} \Delta P_{ij}(t) dt \right\}; \\ i = \overline{1, k}, j = \overline{1, n}, \end{cases} \quad (2)$$

где j – номер рассматриваемого блока; $P_{ij}(t)$ – сигнал модели с пробными отклонениями параметров в j -го блоке для i -й контрольной точки; n – число блоков.

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

Для получения нормированных векторов элементы указанных векторов вычислим по формулам:

$$\Delta \hat{F}_i = \frac{\Delta F_i}{\sqrt{\sum_{l=1}^k \Delta F_l^2}},$$

$$\Delta \hat{P}_{ij} = \frac{\Delta P_{ij}}{\sqrt{\sum_{l=1}^k \Delta P_{lj}^2}},$$

где l – номер контрольной точки объекта диагностирования.

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

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

$$j = \overline{1, n}.$$

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

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

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

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.

Определяют параметр интегрального преобразования сигналов из соотношения $\alpha = 5/T_k$.

Фиксируют число контрольных точек на выходах блоков k .

Предварительно находят элементы векторов интегральных оценок отклонений выходных сигналов ΔP_{ij} для каждой из k контрольных точек, полученные в результате пробных отклонений параметров модели каждого из n блоков.

Определяют элементы векторов знаков интегральных оценок отклонений выходных сигналов модели $\text{sign}(\Delta P_{ij})$, полученные в результате пробных откло-

нений параметров соответствующих блоков n .

Находят элементы нормированных векторов знаков интегральных оценок отклонений выходных сигналов модели $\Delta \hat{P}_{ij}$, полученные в результате пробных отклонений параметров соответствующих блоков.

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

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

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

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.

Функциональная схема устройства реализующего вычисление диагностического признака наличия дефекта с использованием пробных отклонений параметров модели и анализа знаков передач сигналов приведена на рис. 1.

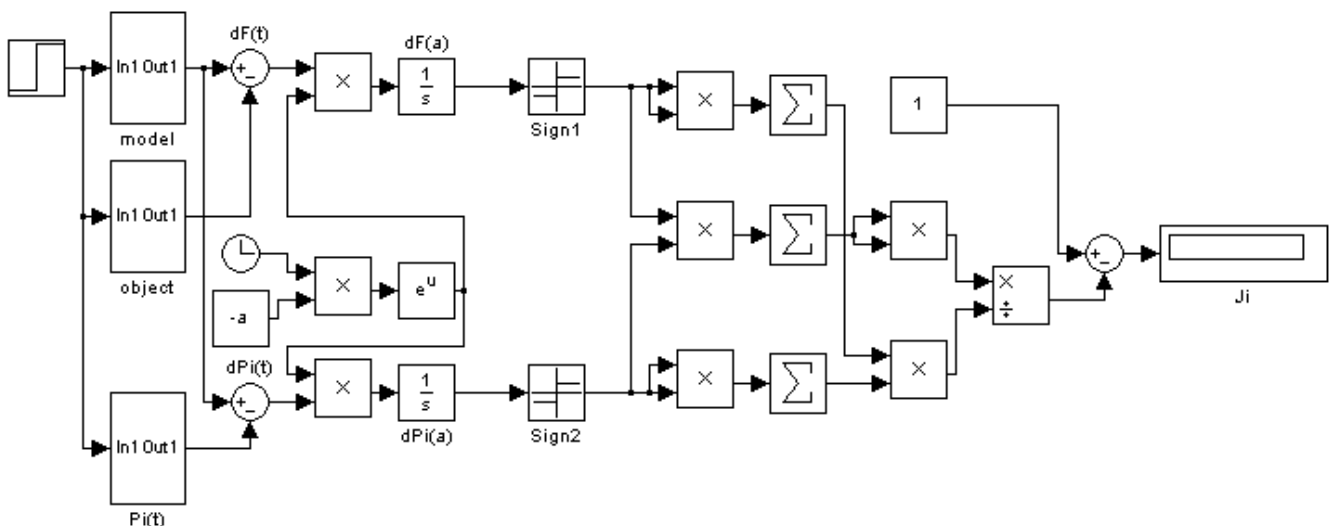


Рис. 1. Функциональная схема устройства поиска дефектов на основе анализа знаков интегральных оценок отклонений выходных сигналов объекта и пробных отклонений параметров модели.

Пример применения алгоритма

Рассмотрим реализацию предлагаемого алгоритма для диагностирования объекта, структурная схема которого представлена на рис. 2.

Передаточные функции блоков:

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

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

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:

$$K_1 = 4.5; K_2 = 4; K_3 = 0.5; \tau = 0.1 \text{ с}; K_5 = 1;$$

$$T_1 = T_2 = T_3 = 0.1 \text{ с}; T_5 = 1 \text{ с}.$$

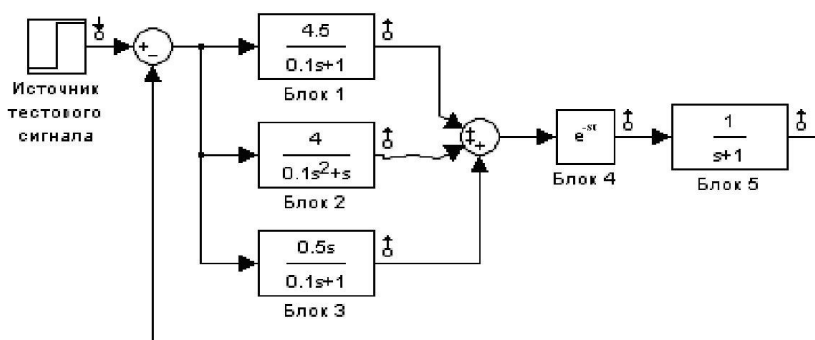


Рис. 2. Структурная схема объекта диагностирования.

Объект диагностирования имеет длительность переходного процесса $T_m = 8$ с. Поэтому наибольшие значения фактической различимости получены при использовании времени контроля $T_K = 10$ с. Будем использовать единичное ступенчатое входное воздействие и множество контрольных точек, которые практически возможно организовать в объекте, т.е. четыре контрольные точки на выходе первого, второго, третьего и пятого блоков.

Применение алгоритма поиска одиночного структурного 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 по формуле (3): $J_1 = 1; J_2 = 0.75; J_3 = 1; J_5 = 0$.

Тот же дефект, найденный путем пробных отклонений параметров модели,

без использования анализа знаков передач сигналов или с помощью смены позиции входного сигнала [3, 4, 9, 10], дает следующие значения диагностических признаков: $J_1 = 0.9699$; $J_2 = 0.8359$; $J_3 = 0.6819$; $J_5 = 0$.

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

Моделирование процессов поиска структурных 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 результаты:

$$J_1 = 0; J_2 = 0.75; J_3 = 1; J_5 = 0.75.$$

При наличии дефекта в интегрирующем звене (блоке №2 в виде уменьшения параметра K_2 на 20%, дефект №2) получим значения признаков:

$$J_1 = 0.75; J_2 = 0; J_3 = 0.75; J_5 = 1.$$

При наличии дефекта в дифференцирующем звене (блоке №3 в виде уменьшения параметра K_3 на 20%, дефект №3) получим значения признаков:

$$J_1 = 1; J_2 = 0.75; J_3 = 0; J_5 = 0.75.$$

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

Различимости дефектов первого, второго и третьего блоков при поиске их с помощью пробных отклонений параметров модели без использования анализа знаков передач сигналов [3, 4] или при помощи смены позиции входного сигнала [7, 8] также получаются одинаковыми и принимают следующие значения.

При наличии дефекта в пропорциональном звене (блоке №1 в виде уменьшения параметра K_1 на 20%, дефект №1) алгоритмы дают результаты:

$$J_1 = 0; J_2 = 0.1202; J_3 = 0.9926; J_5 = 0.97.$$

При наличии дефекта в интегрирующем звене (блоке №2 в виде уменьшения параметра K_2 на 20%, дефект №2) получим значения признаков:

$$J_1 = 0.1201; J_2 = 0; J_3 = 0.9301; J_5 = 0.8359.$$

При наличии дефекта в дифференцирующем звене (блоке №3 в виде уменьшения параметра K_3 на 20%, дефект №3) получим значения признаков: $J_1 = 0.9925$; $J_2 = 0.9306$; $J_3 = 0$; $J_5 = 0.6887$.

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, составляет 0.75, в алгоритмах на

основе пробных отклонений параметров модели или при помощи смены позиции входного сигнала составляет 0.12. Как видно, первый алгоритм обеспечивает лучшие различимости за счет дискретного изменения значений диагностических признаков, которые можно определить по следующей формуле:

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

При $k = 4$ 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 0.75, что и определяет минимальную различимость дефектов для данного количества контрольных точек. Отметим, что при несовпадении знаков для двух элементов векторов значение признака будет равно 1.

Заключение

Возмущающими факторами алгоритма являются: неадекватность модели диагностирования и погрешности регистрации сигналов объекта.

На входной сигнал нет никаких ограничений, кроме того, что он должен быть одинаковым для объекта диагностирования, модели диагностирования и моделей с пробными отклонениями.

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 пробных отклонений параметров модели с использованием анализа знаков интегральных оценок отклонений сигналов лучше, чем при использовании других алгоритмов [3 – 8]. При этом сохраняется непрерывная шкала различимости в интервале значений [0 – 1] в отличие от алгоритмов, построенных на применении бинарных диагностических признаков [9 – 12].

ЛИТЕРАТУРА

1. Розенвассер Е.Н., Юсупов Р.М. Чувствительность систем управления. – М.: Наука, 1981.
2. Шалобанов С.В. Структурные методы поиска одиночных дефектов в динамических системах // Изв. вузов. Приборостроение. – 2000. – № 4. – С. 7-13.
3. 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.

4. Пат. 2435189 РФ. Способ поиска неисправного блока в динамической системе / С.В. Шалобанов, С.С. Шалобанов // Официальный бюл. «Изобретения. Полезные модели». – 2011. – №33.
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. 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.
8. 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.
9. Шалобанов С.С. Диагностирование непрерывных динамических систем методом логических функций // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2012. – № 3(26). – С. 85-90.
10. Пат. 2461861 РФ. Способ поиска неисправного блока в непрерывной динамической системе / С.С. Шалобанов // Официальный бюл. «Изобретения. Полезные модели». – 2012. – №26.
11. 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.
12. 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.

E-mail:

Шалобанов Сергей Викторович – shalobanov@mail.ru;

Шалобанов Сергей Сергеевич – shalobanov_ne@mail.ru.