УДК 681.518.5

© 2010 г. **В.В. Воронин,** д-р техн. наук,
С.С. Шалобанов
(Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск)

ДИАГНОСТИРОВАНИЕ НЕПРЕРЫВНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ МЕТОДОМ ПРОБНЫХ ОТКЛОНЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ

Рассматривается метод поиска дефектов в непрерывной динамической системе с глубиной до динамического блока либо параметра блока на основе пробных отклонений параметров ее модели с использованием нормированных диагностических признаков.
Ключевые слова: объект диагностирования, пробные отклонения параметров модели, интегральные преобразования, диагностический признак, различимость дефектов.

Введение

Адекватное описание проявления некоторых дефектов часто требует изменения структуры динамической модели одного или нескольких блоков объекта диагностирования (ОД). Использование диагностических признаков в виде параметров модели неизменной структуры может приводить к ошибкам диагностирования. Для устранения этого источника ошибок целесообразно строить диагностические признаки по блочному принципу [1]. При этом, как показано в работе [2], для вычисления диагностических признаков можно применять модель структурной чувствительности. Ее можно быть получить путем последовательного соединения двух одинаковых моделей объекта, когда выходом первой является входной сигнал i-го динамического элемента, а вход второй организуется на выходе i-го динамического элемента [3]. Сложность получения модели чувствительности ограничивает применение подобных алгоритмов и может стать дополнительным источником ошибок при диагностировании. В работе рассматривается подход, позволяющий упростить получение информации о модели структурной чувствительности. Рассматриваются нормированные диагностические признаки структурных дефектов, дающие возможность проводить сравнение результатов диагностирования в различных режимах.

Постановка задачи

В качестве ОД рассматривается непрерывный динамический объект, состоящий из n линейных динамических элементов (ДЭ), номинальные передаточные функции которых $W_{o1},\ldots,W_{on}$ известны.

Одиночный дефект определим как такое изменение технического состояния ОД, которое приводит к произвольному изменению ΔW_i всего оператора W_i одного из n динамических элементов.

Примем гипотезу о возможности появления в ОД только одиночных дефектов и синтезируем алгоритм их поиска с использованием интегральных преобразований реакций ОД, номинальной модели и модели при наличии пробных отклонений параметров ДЭ.

Метод поиска дефектов

Алгоритм поиска блочных дефектов основан на определении интегральных оценок отклонений сигналов номинальной модели от сигналов объекта диагностирования. Для получения интегральных оценок отклонений сигналов динамических элементов будем использовать преобразования по Лапласу временных функций в области вещественных значений переменной Лапласа $p = \alpha$, которые лежат в интервале $0 \le \alpha \le \infty$. Использование преобразования Лапласа позволяет перейти от обработки временных функций к анализу численных значений их функционалов:

$$\begin{cases} \Delta F_i(t) = F_{mi}(t) - F_{oi}(t), \\ \Delta F_i(\alpha) = L\{\Delta F_i(t)\} = \int\limits_0^{T_k} \Delta F_i(t) e^{-\alpha t} dt, \; i = \overline{1,k}, \end{cases} \tag{1}$$

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

В процессе диагностирования вычисляются также интегральные оценки отклонений сигналов номинальной модели от сигналов модели с пробными отклонениями параметров в различных блоках согласно формуле:

$$\begin{cases} \Delta P_{ij}(t) = P_{mi}(t) - P_{ij}(t), \\ \Delta P_{ij}(\alpha) = L\{\Delta P_{ij}(t)\} = \int\limits_0^{T_k} \Delta P_{ij}(t) e^{-\alpha t} dt, i = \overline{1,k}, \; j = \overline{1,n}, \end{cases} \tag{2}$$

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

Выражения (1) и (2) позволяют вычислить элементы векторов ΔF и ΔP, размерность которых определяется количеством контрольных точек. Для получения нормированного диагностического признака элементы указанных векторов пронормируем по формулам:

$$\Delta \tilde{F}_i(\alpha) = \frac{\Delta F_i(\alpha)}{\sqrt{\sum\limits_{l=1}^{k} \Delta F_l^2(\alpha)}},$$

$$\Delta\widetilde{P}_{ij}(\alpha)=\frac{\Delta P_{ij}(\alpha)}{\sqrt{\sum\limits_{l=1}^{k}\Delta P_{lj}^{2}(\alpha)}},$$

где l – номер контрольной точки объекта диагностирования.

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

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

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

Графическая интерпретация диагностического признака заключается в следующем: поскольку в квадратных скобках выражения (3) записано скалярное произведение двух векторов единичной длины размерностью k (число контрольных точек), то выражение в квадратных скобках есть косинус угла между этими векторами, – следовательно, выражение (3) можно заменить выражением:

$$J_j=1-\cos^2\varphi_j(\alpha)=\sin^2\varphi_j(\alpha),$$

где $\varphi_j(\alpha)$ – угол между векторами единичной длины интегральных оценок отклонений сигналов ОД от номинальных и отклонений сигналов модели с пробными изменениями параметров от номинальных для j-го динамического элемента и параметра интегрального преобразования α.

Пробное отклонение параметров блока, минимизирующее значение диагностического признака (3), указывает на наличие дефекта в этом блоке.

Изменение диагностических признаков во времени в процессе их вычисления описывается формулой:

$$J_j(t)=1-\left[\sum_{i=1}^{k}\frac{\int\limits_0^t\Delta P_{ij}(\tau)\cdot e^{-\alpha\tau}d\tau}{\sqrt{\sum\limits_{l=1}^{k}(\int\limits_0^t\Delta P_{lj}(\tau)\cdot e^{-\alpha\tau}d\tau)^2}}\cdot\frac{\int\limits_0^t\Delta F_i(\tau)\cdot e^{-\alpha\tau}d\tau}{\sqrt{\sum\limits_{l=1}^{k}(\int\limits_0^t\Delta F_l(\tau)\cdot e^{-\alpha\tau}d\tau)^2}}\right]^2, \qquad (4)$$

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

Результирующее значение диагностического признака определяется при $t = T_k$.

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

1. Фиксируют число динамических элементов n.
2. Путем анализа графиков номинальных переходных характеристик определяют время переходного процесса системы; фиксируют время контроля $T_k \geq T_{ПП}$.
3. Определяют оптимальный параметр интегрального преобразования сигналов $\alpha=\frac{5}{T_к}$.
4. Фиксируют число контрольных точек на выходах блоков k.

5. Предварительно находят элементы векторов $\Delta P_{ij}(\alpha)$ деформаций интегральных преобразований динамических характеристик модели, полученные в результате пробных отклонений параметров соответствующих блоков; величину пробных отклонений выбирают равной 10%.

6. Находят нормированные векторы $\Delta\widetilde{P}_{ij}(\alpha)$ деформаций интегральных преобразований динамических характеристик модели, полученные в результате пробных отклонений параметров соответствующих блоков.

7. Замещают систему с номинальными характеристиками контролируемой.

8. Определяют отклонения интегральных преобразований динамических характеристик контролируемой системы для k контрольных точек от номинальных значений $\Delta F_i(\alpha)$.

9. Вычисляют нормированные значения отклонений интегральных преобразований динамических характеристик контролируемой системы $\Delta\widetilde{F}_j(\alpha)$.

10. Вычисляют диагностические признаки наличия неисправного блока по формуле (3).

11. По минимуму значения 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.

Возмущающими факторами метода 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 пробными отклонениями. Время контроля выбирается заведомо больше времени переходного процесса системы.

Пример применения метода

Проиллюстрируем применение описанного подхода для диагностирования объекта, структурная схема которого представлена на рис. 1.

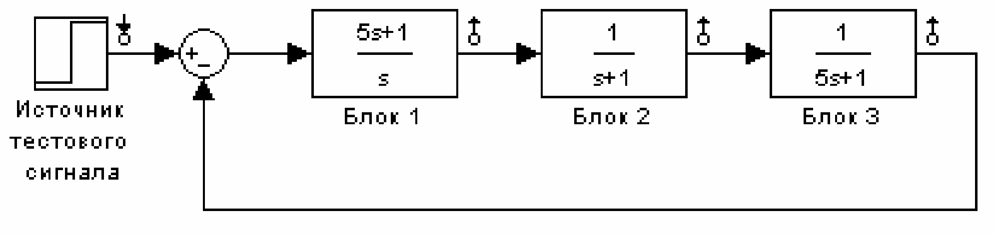


Рис. 1. Структурная схема объекта диагностирования.

Передаточные функции блоков:

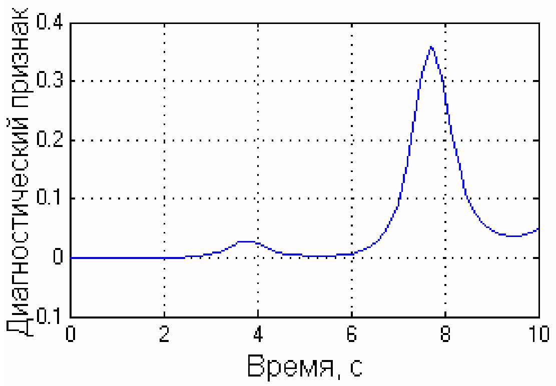
$$W_1 = \frac{k_1(T_1 p + 1)}{p};\ W_2 = \frac{k_2}{T_2 p + 1};\ W_3 = \frac{k_3}{T_3 p + 1},$$

где номинальные значения параметров: T_1 = 5 с; K_1 = 1; K_2 = 1; T_2 = 1 с; K_3 = 1; T_3 = 5 с.

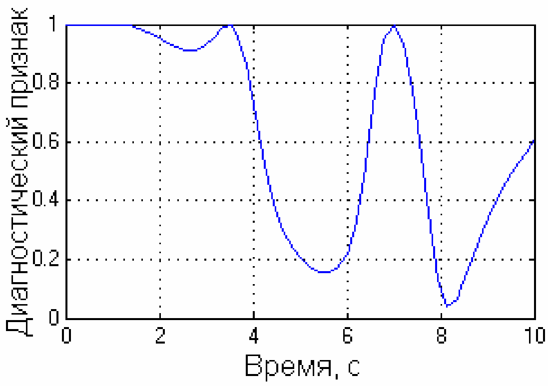
Рекомендуемый параметр интегрального преобразования $\alpha = \frac{5}{T_к} = 0.5$. Проверим оптимальность этого значения на примере трех случаев:

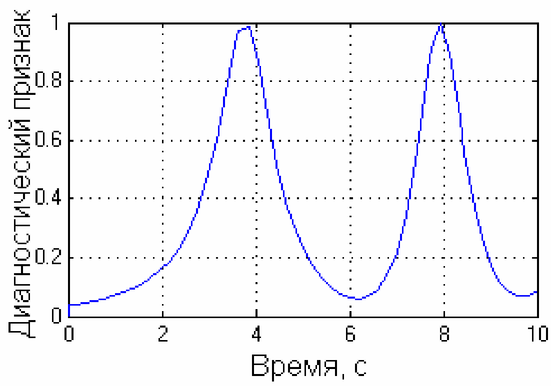
$\alpha = 0.01 < \frac{5}{T_к}$, $\alpha = \frac{5}{T_к} = 0.5$ и $\alpha = 0.9 > \frac{5}{T_к}$.

При поиске одиночного дефекта в виде отклонения постоянной времени $T_1 = 4$ с в первом блоке путем подачи ступенчатого тестового входного сигнала единичной амплитуды и интегрального преобразования сигналов для параметра $\alpha = 0.01$ и $T_к = 10$ с получены значения диагностических признаков при использовании трех контрольных точек и пробных отклонений на величину 10%: $J_1 = 0.048$; $J_2 = 0.6082$; $J_3 = 0.0917$. Минимальное значение признака J_1 однозначно указывает на наличие дефекта в первом блоке, а разность между третьим и первым признаками может количественно характеризовать фактическую различимость этого дефекта. Изменение диагностических признаков во времени (4) представлено на рис. 2.



а)





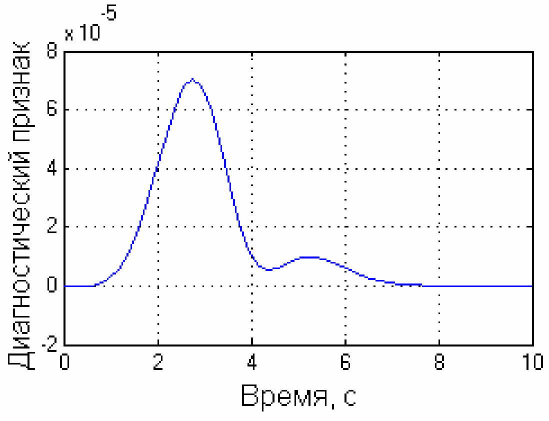
б) в)

Рис. 2. Изменение диагностических признаков во времени ($\alpha = 0.01$):
а) блока 1; б) блока 2; в) блока 3.

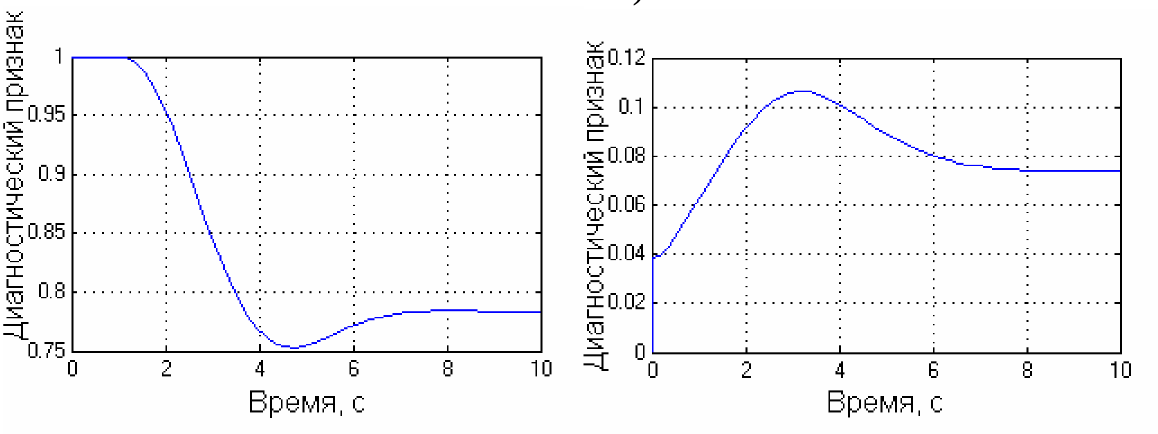
Тот же дефект, найденный с использованием параметра $\alpha = 0.5$, дает следующие значения диагностических признаков в конечный момент времени контроля: $J_1 = 0$; $J_2 = 0.7828$; $J_3 = 0.07399$. Изменение диагностических признаков во времени представлено на рис. 3.

Тот же дефект, найденный для параметра $\alpha = 0.9$ и $T_к = 10$ с, дает следующие значения диагностических признаков в конечный момент времени контроля:

$J_1 = 0$; $J_2 = 0.8896$; $J_3 = 0.05122$. Изменение диагностических признаков во времени представлено на рис. 4.



а)



б) в)

Рис. 3. Изменение диагностических признаков во времени ($\alpha = 0.5$):
а) блока 1; б) блока 2; в) блока 3.

Таким образом, отклонение постоянной интегрирования от рекомендуемого значения $\left(\alpha = \frac{5}{T_к}\right)$ ухудшает различимость дефекта.

Вычислим диагностический признак наличия дефекта в 1-м блоке для разных процентных отношений пробных отклонений и дефекта ($\alpha = 0.5$, $T_к = 10$ с.).

1. Пробные отклонения 10%:

а) дефект 20%: $J_1 = 0$; $J_2 = 0.7828$; $J_3 = 0.07399$;

б) дефект 10%: $J_1 = 0$; $J_2 = 0.7829$; $J_3 = 0.07403$;

в) дефект 1%: $J_1 = 0$; $J_2 = 0.783$; J_3=0.07406.

2. Дефект 10%:

а) пробные отклонения 20%: $J_1 = 0$; $J_2 = 0.7828$; $J_3 = 0.07403$;

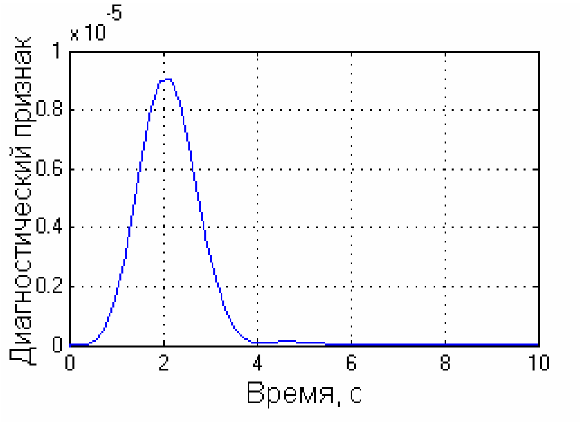
б) пробные отклонения 10%: $J_1 = 0$; $J_2 = 0.7829$; $J_3 = 0.07403$;

в) пробные отклонения 1%: $J_1 = 0$; $J_2 = 0.783$; $J_3 = 0.07402$.

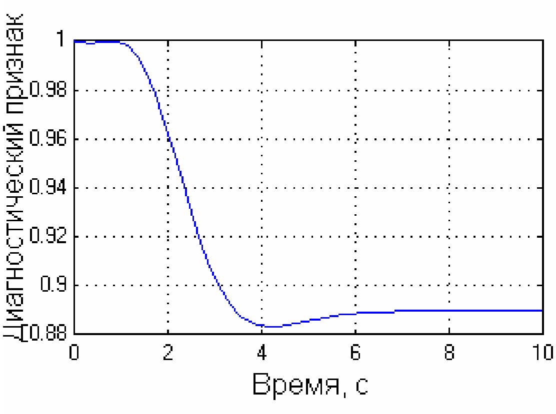
Применение метода для поиска дефектов во втором и третьем ДЭ также дает удовлетворительные результаты.

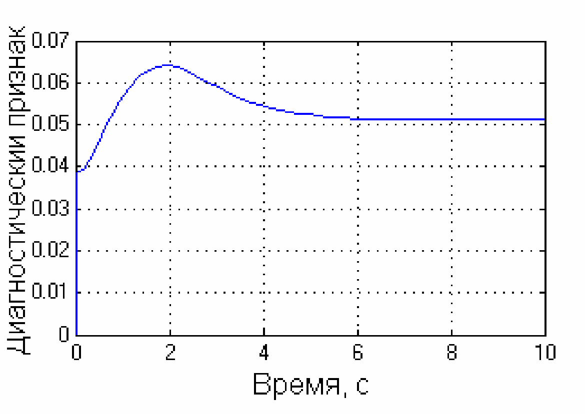
Заключение

Нормированные диагностические признаки позволяют сравнивать результаты поиска дефектов в различных режимах и количественно определять фактическую различимость дефектов. Предложенный метод поиска дефектов позволяет перейти от анализа функций к анализу численных значений их функционалов, уменьшить требуемый объем вычислений и обеспечить различимость дефектов без использования модели чувствительности. Исследована зависимость различимости дефектов от параметра интегрального преобразования α. Наилучшие результаты получены для значений α, близких к величине $5/T_к$. Различимость дефектов при величинах пробных отклонений и величинах дефектов от 1 до 20% практически не изменяется.



а)





б) в)

Рис. 4. Изменение диагностических признаков во времени (α = 0.9):
а) блока 1; б) блока 2; в) блока 3.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Латышев А.В.* Диагностирование подсистем в линейных системах // Автоматика и телемеханика. – 1991. – № 8. – С.145-154.
2. *Шалобанов С.В.* Диагностирование динамических объектов методом интегральных преобразований сигналов // Информационные и управляющие системы: Сб. науч. тр. / под ред. В.В. Воронина. – Хабаровск: Изд-во ХГТУ, 2003.
3. *Шалобанов С.В.* Структурные методы поиска одиночных дефектов в динамических системах // Изв. вузов. Приборостроение. – 2000. – № 4. – С.7-13.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Чье Ен Уном.

E-mail:
Воронин В.В. – voronin@ais.khstul.ru
Шалобанов С.С. – shalobanov_ne@mail.ru.