

# ПОИСК НЕИСПРАВНОГО БЛОКА В ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ КЛАССА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ВЕСОВОЙ ФУНКЦИИ<sup>1</sup>

**Шалобанов Сергей Викторович**

Доктор технических наук, профессор, Тихоокеанский  
государственный университет, Хабаровск  
shalobanov@mail.ru

**Шалобанов Сергей Сергеевич**

Кандидат технических наук, доцент, Тихоокеанский  
государственный университет, Хабаровск  
shalobanov\_ne@mail.ru

## SEARCH FOR A FAULTY BLOCK IN DYNAMIC SYSTEMS OF THE AUTOMATIC CONTROL CLASS USING A DIFFERENTIAL WEIGHTING FUNCTION<sup>2</sup>

**Shalobanov S.  
Shalobanov S.**

*Summary.* An algorithm for searching for a defect in a dynamic system, with a depth up to a dynamic block, based on trial deviations of model parameters using a differential weight for integral estimates of signal deviations is considered.

*Keywords:* trial deviations of model parameters, diagnostic model, integral estimates of signal deviations, differential weight, normalized diagnostic feature.

*Аннотация.* Рассматривается алгоритм поиска дефекта в динамической системе, с глубиной до динамического блока на основе пробных отклонений параметров модели с использованием дифференциального веса для интегральных оценок отклонений сигналов.

*Ключевые слова:* пробные отклонения параметров модели, диагностическая модель, интегральные оценки отклонений сигналов, дифференциальная вес, нормированный диагностический признак.

### Постановка задачи

В качестве объекта диагностирования (ОД) рассматривается непрерывный динамический объект, состоящий из отдельных динамических элементов (ДЭ). Под одиночным структурным дефектом будем понимать произвольное изменение передаточной функции одного ДЭ.

Примем гипотезу о возможности появления в ОД одиночных структурных дефектов, и синтезируем алгоритм поиска дефектов с использованием дифференциальной весовой функции для интегральных оценок отклонений сигналов номинальной модели от сигналов ОД и сигналов модели при наличии пробных отклонений параметров ДЭ.

### Способ поиска дефектов

Определяют отклонения интегральных оценок сигналов модели, полученные в результате пробных отклонений параметров соответствующих блоков

$$\Delta P_{ji}(d) = P_{ji}(d) - F_{j\text{ном}}(d), j = 1, \dots, k; i = 1, \dots, m,$$

определяют нормированные значения отклонений интегральных оценок сигналов модели, полученные в результате пробных отклонений параметров соответствующих блоков [1]

$$\hat{\Delta P}_{ji}(d) = \frac{\Delta P_{ji}(d)}{\sqrt{\sum_{r=1}^k \Delta P_{ri}^2(d)}}, \quad (1)$$

определяют отклонения интегральных оценок сигналов контролируемой системы для  $k$  контрольных точек  $\Delta F_j(d) = F_j(d) - F_{j\text{ном}}(d), j = 1, \dots, k$ , определяют нормированные значения отклонений интегральных оценок сигналов контролируемой системы [2]

$$\hat{\Delta F}_j(d) = \frac{\Delta F_j(d)}{\sqrt{\sum_{r=1}^k \Delta F_r^2(d)}}, \quad (2)$$

<sup>1</sup> Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 24–21–20064, <https://rscf.ru/project/24-21-20064/> и Министерства образования и науки Хабаровского края (Соглашение № 126C/2024)

<sup>2</sup> The research was supported by RSF (project No. 24-21-20064), <https://rscf.ru/project/24-21-20064/> and the Ministry of Education and Science of Khabarovsk Krai (Agreement No. 126C/2024)

определяют диагностические признаки [3]:

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

по минимуму значения диагностического признака определяют неисправный блок.

Сущность предлагаемого способа заключается в следующем.

Способ основан на использовании пробных отклонений параметров модели непрерывной динамической системы. Для получения диагностических признаков динамических элементов используются интегральные оценки на временном интервале  $T_k$  в  $k$  контрольных точках

$$F_j(d) = \int_0^{T_k} f_j(t) \cdot \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \left| \frac{d}{dt} (f_i(t)) \right| dt, j = \overline{1, k}. \quad (4)$$

Весовая функция в формуле (1) в виде среднего значения модулей производных сигналов в контрольных точках несет информацию о важности момента времени с точки зрения скорости изменения сигналов во всех контрольных точках. Чем больше средняя скорость изменения сигналов, тем с большим весом интегрируется выходной сигнал. Используя векторную интерпретацию выражения (3), запишем его в следующем виде

$$J_i = 1 - \cos^2 \phi_i(d) = \sin^2 \phi_i(d), i = 1, \dots, m, \quad (5)$$

где  $\phi_i(d)$  — угол между нормированным вектором (вектором единичной длины) отклонений интегральных оценок сигналов объекта с элементами  $\Delta \hat{F}_j(d)$  и нормированным вектором (единичной длины) отклонений интегральных оценок сигналов модели с элементами  $\Delta \hat{P}_{ji}(d)$ , полученными в результате пробного отклонения параметра  $i$ -го блока.

Таким образом, нормированный диагностический признак (3) представляет собой значение квадрата синуса угла, образованного в  $k$  — мерном пространстве (где  $k$  — число контрольных точек) нормированными векторами пробных отклонений интегральных оценок сигналов модели и реальной деформации интегральных оценок сигналов объекта диагностирования.

Пробное отклонение параметра блока, минимизирующее значение диагностического признака (3), указывает на наличие дефекта в этом блоке. Область возможных значений диагностического признака лежит в интервале  $[0, 1]$ .

Таким образом, предлагаемый способ поиска неисправного блока сводится к выполнению следующих операций:

1. В качестве динамической системы рассматривают систему, состоящую из произвольно соединенных  $m$  динамических элементов.
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. Фиксируют число контрольных точек  $k$ .
4. Одновременно подают тестовый сигнал  $x(t)$  (единичный ступенчатый) или рабочий сигнал на вход системы управления с номинальными параметрами, на вход контролируемой системы, на входы  $m$  моделей с номинальными параметрами, в каждую из которых введены пробные отклонения параметров одного блока так, что в  $i$ -ую систему введены пробные отклонения в  $i$ -й блок.
5. Одновременно регистрируют реакцию системы с номинальными характеристиками  $f_{j_{\text{НОМ}}}(t)$ , реакцию контролируемой системы  $f_j(t)$ , реакции моделей с пробными отклонениями в  $i$ -ом блоке  $p_{ji}(t)$  в  $k$  контрольных точках  $j=1, 2, \dots, k$  на интервале  $t \in [0, T_k]$ .
6. Одновременно определяют интегральные оценки выходных сигналов  $F_{j_{\text{НОМ}}}(d)$ ,  $j = 1, \dots, k$  системы с номинальными характеристиками, контролируемой системы  $F_j(d)$ ,  $j = 1, \dots, k$ , моделей с пробными отклонениями в  $i$ -ом блоке  $P_{ji}(d)$ ,  $j = 1, \dots, k; i = 1, \dots, m$  (формула 4). Для этого в момент подачи входного сигнала одновременно начинают интегрирование сигналов в каждой из  $k$  контрольных точек системы с номинальными характеристиками, контролируемой системы, моделей с пробными отклонениями параметров блоков с весовой функцией, равной среднему арифметическому значению модулей производных сигналов в контрольных точках, где усреднение производится по числу контрольных точек, для чего выходные сигналы каждой системы подают на первые входы  $k$  блоков перемножения, на вторые входы блоков перемножения подают среднее арифметическое значение модулей производных сигналов системы в контрольных точках, где усреднение производится по числу контрольных точек выходных сигналов системы, выходные сигналы  $k$  блоков перемножения подают на входы  $k$  блоков интегрирования, интегрирование завершают в момент времени  $T_{\text{к}}$  полученные в результате интегрирования оценки выходных сигналов  $F_{j_{\text{НОМ}}}(d)$ ,  $j = 1, \dots, k$ ,  $F_j(d)$ ,  $j = 1, \dots, k$ ,  $P_{ji}(d)$ ,  $j = 1, \dots, k; i = 1, \dots, m$  регистрируют.
7. Определяют отклонения интегральных оценок сигналов модели, полученные в результате проб-

ных отклонений параметров соответствующих блоков

$$\Delta P_{ji}(d) = P_{ji}(d) - F_{j_{ном}}(d), j = 1, \dots, k; i = 1, \dots, m.$$

8. Определяют нормированные значения отклонений интегральных оценок сигналов модели, полученные в результате пробных отклонений параметров соответствующих блоков по формуле:

$$\Delta \hat{P}_{ji}(d) = \frac{\Delta P_{ji}(d)}{\sqrt{\sum_{r=1}^k \Delta P_{ri}^2(d)}}, j = 1, \dots, k; i = 1, \dots, m.$$

9. Определяют отклонения интегральных оценок сигналов контролируемой системы для  $k$  контрольных точек от номинальных значений  $\Delta F_j(d) = F_j(d) - F_{j_{ном}}(d), j = 1, \dots, k$
10. Вычисляют нормированные значения отклонений интегральных оценок сигналов контролируемой системы по формуле:

$$\Delta \hat{F}_j(d) = \frac{\Delta F_j(d)}{\sqrt{\sum_{r=1}^k \Delta F_r^2(d)}}, j = 1, \dots, k.$$

11. Вычисляют диагностические признаки наличия неисправного блока по формуле (3).
12. По минимуму значения диагностического признака определяют дефектный блок.

### Пример применения алгоритма

Рассмотрим реализацию предлагаемого способа поиска одиночного структурного дефекта для непрерывной линейной системы, структурная схема которой представлена на рис.1.

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.

При моделировании в качестве входного сигнала будем использовать псевдослучайный сигнал (при моде-

лировании использовался блок Band-Limited White Noise в среде Matlab). Время контроля выберем  $T_{\text{к}}$  равным 10 с.

Величину пробных отклонений параметров модели выбираем равной 10 %.

Моделирование процессов поиска дефектов в первом блоке (в виде уменьшения параметра  $T_1$  на 20 %) приводит к вычислению диагностических признаков по формуле (3):  $J_1=0, J_2=0.2067, J_3=0.2266$ . Различимость дефекта:  $\Delta J = J_3 - J_1 = 0.2067$ .

Для сравнения приведём диагностические признаки наличия неисправного блока с использованием экспоненциального веса при одном параметре интегрирования  $\alpha=0.5$  [1]:  $J_1=0, J_2=0.7828, J_3=0.07399$ . Различимость дефекта  $\Delta J = J_3 - J_1 = 0.07399$ .

Приведённые результаты показывают, что фактическая различимость нахождения дефектов этим способом выше, следовательно, выше будет и помехоустойчивость способа.

Моделирование процессов поиска дефектов во втором блоке (в виде уменьшения параметра  $T_2$  на 20 %) для данного объекта диагностирования с использованием дифференциального веса и при таком же входном сигнале даёт следующие значения диагностических признаков:

$$J_1=0.2752, J_2=0.006981, J_3=0.7004.$$

Различимость дефекта  $\Delta J = J_3 - J_2 = 0.2682$ .

Для сравнения приведём диагностические признаки наличия неисправного блока с использованием экспоненциального веса при одном параметре интегрирования  $\alpha=0.5$ :  $J_1=0.7828, J_2=0, J_3=0.7462$ . Различимость дефекта:  $\Delta J = J_3 - J_2 = 0.7462$ .

Моделирование процессов поиска дефектов в третьем блоке (в виде уменьшения параметра  $T_3$  на 20 %) для данного объекта диагностирования при тех же состояниях даёт следующие значения:

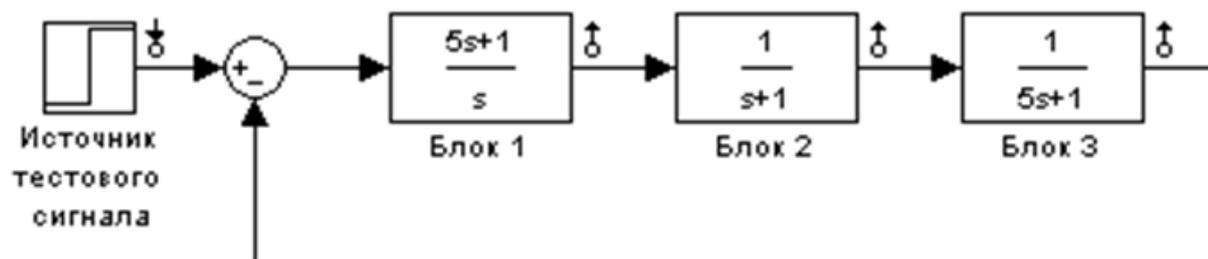


Рис.1. Структурная схема объекта диагностирования

$$J_1=0.1824, J_2=0.5691, J_3=0.003594.$$

Различимость дефекта:  $\Delta J = J_1 - J_3 = 0.1788$ .

Для сравнения приведём диагностические признаки наличия неисправного блока при одном параметре интегрирования  $\alpha=0.5$ :

$$J_1=0.07403, J_2=0.7463, J_3=0.$$

Различимость дефекта  $\Delta J = J_1 - J_3 = 0.07403$ .

Минимальное значение диагностического признака во всех случаях правильно указывает на дефектный блок, а данный способ в двух случаях из трёх улучшает фактическую различимость дефектов, следовательно, увеличивает помехоустойчивость диагностирования.

Кроме того, заявляемый способ позволяет осуществлять диагностирование в условиях реального функционирования объекта диагностирования (рабочее диагностирование).

---

#### ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Шалобанов С.С. Улучшение различимости дефектов в непрерывных динамических системах путём многократного интегрирования сигналов // Информатика и системы управления. — 2010. — № 3(25). — С. 88-94.
3. Шалобанов С.С. Поиск параметрических дефектов в непрерывных динамических системах методом пробных отклонений параметров модели // Датчики и Системы. — 2011. №4. С. 34-37.
4. Воронин В.В., Шалобанов С.С. Способ поиска неисправного блока в динамической системе. Патент на изобретение №2451319 от 20.05.2012 по заявке №2011129533/08.

---

© Шалобанов Сергей Викторович (shalobanov@mail.ru); Шалобанов Сергей Сергеевич (shalobanov\_ne@mail.ru)  
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»