

# ПОИСК КРАТНЫХ ДЕФЕКТОВ В НЕПРЕРЫВНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ<sup>1</sup>

## SEARCH FOR MULTIPLE DEFECTS IN CONTINUOUS DYNAMIC SYSTEMS

*Shalobanov S.  
Shalobanov S.*

*Summary.* This work is about an algorithm for searching for multiple defects in a continuous dynamic system, with a depth of up to a dynamic block, based on trial deviations of model parameters using normalized diagnostic features.

*Keywords:* trial deviations of model parameters, diagnostic model, integral estimates of signal deviations, integration parameter, diagnostic sign.

**Шалобанов Сергей Викторович**

д.т.н., профессор, Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск  
shalobanov@mail.ru

**Шалобанов Сергей Сергеевич**

к.т.н., доцент, Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск  
shalobanov\_ne@mail.ru

*Аннотация.* Эта работа об алгоритме поиска кратных дефектов в непрерывной динамической системе, с глубиной до динамического блока на основе пробных отклонений параметров модели с использованием нормированных диагностических признаков.

*Ключевые слова:* пробные отклонения параметров модели, диагностическая модель, интегральные оценки отклонений сигналов, параметр интегрирования, диагностический признак.

### Постановка задачи

В качестве объекта диагностирования (ОД) рассматривается непрерывный динамический объект, состоящий из отдельных динамических элементов (ДЭ) [1,2]. Под одиночным структурным дефектом будем понимать произвольное изменение передаточной функции одного ДЭ.

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

### Алгоритм поиска дефектов

Алгоритм поиска дефектов основан на определении интегральных оценок отклонений сигналов номинальной модели от сигналов ОД. Для получения интегральных оценок отклонений сигналов будем использовать интегральные преобразования временных функций в области вещественных значений параметра интегрирования  $\alpha$ , который лежит в пределах  $0 \leq \alpha \leq \infty$ . Применение интегральных оценок [1,2] позволяет перейти от обработки временных функций к анализу численных значений функционалов:

$$\begin{cases} \Delta F_i(t) = F_{Mi}(t) - F_{oi}(t), \\ \Delta F_i(\alpha) = L\{\Delta F_i(t)\} = \int_0^{T_k} \Delta F_i(t) e^{-\alpha t} dt, \quad i = \overline{1, k}, \end{cases} \quad (1)$$

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;  $\alpha$  — параметр интегрирования.

В процессе диагностирования вычисляются интегральные оценки отклонений сигналов номинальной модели от сигналов модели с пробными отклонениями параметров [1,2]:

$$\begin{cases} \Delta P_{ij}(t) = P_{Mi}(t) - P_{ij}(t), \\ \Delta P_{ij}(\alpha) = L\{\Delta P_{ij}(t)\} = \int_0^{T_k} \Delta P_{ij}(t) e^{-\alpha t} dt, \quad i = \overline{1, k}; \quad j = \overline{1, n}, \end{cases} \quad (2)$$

где  $j$  — номер одиночного или кратного дефекта,  $P_{ij}(t)$  — сигнал модели с пробным отклонением  $j$ -го одиночного или кратного дефекта для  $i$ -й контрольной точки,  $n$  — число всех рассматриваемых одиночных и кратных дефектов.

Выражения (1) и (2) позволяют вычислить элементы векторов  $\Delta F$  и  $\Delta P$ , размерность которых определяется количеством контрольных точек.

<sup>1</sup> Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 24-21-20064, <https://rscf.ru/project/24-21-20064/>

Диагностический признак наличия одиночного либо кратного дефекта при использовании интегральных оценок сигналов определяется формулой:

$$J_j = 1 - \frac{\left[ \sum_{i=1}^k \Delta P_{ij}(\alpha) \cdot \Delta F_i(\alpha) \right]^2}{\sum_{i=1}^k \Delta P_{ij}^2(\alpha) \cdot \sum_{i=1}^k \Delta F_i^2(\alpha)}, \quad j = \overline{1, n}. \quad (3)$$

Для нормированных векторов  $\hat{\Delta F}$  и  $\hat{\Delta P}$  формула (3) запишется в следующем виде:

$$J_j = 1 - \left[ \sum_{i=1}^k \hat{\Delta P}_{ij}(\alpha) \cdot \hat{\Delta F}_i(\alpha) \right]^2, \quad j = \overline{1, n}, \quad (4)$$

где

$$\hat{\Delta F}_i(\alpha) = \frac{\Delta F_i(\alpha)}{\sqrt{\sum_{r=1}^k \Delta F_r^2(\alpha)}},$$

$$\hat{\Delta P}_{ij}(\alpha) = \frac{\Delta P_{ij}(\alpha)}{\sqrt{\sum_{r=1}^k \Delta P_{ij}^2(\alpha)}}.$$

Диагностические признаки (3) или (4) могут принимать значения от 0 и до 1. Минимальное значение признака указывает на наличие дефекта в блоке или сразу в нескольких блоках.

Индекс  $j$  пробного отклонения, которое минимизирует значение диагностического признака (3) или (4), определяет наличие одиночного или кратного дефектов.

Поиск неисправного блока или сразу нескольких блоков, согласно предлагаемому алгоритму, сводится к выполнению следующих операций:

1. В качестве ОД рассматривают динамическую систему, состоящую из произвольно соединённых динамических блоков, с общим количеством рассматриваемых одиночных и кратных дефектов блоков  $n$ .
2. Путём анализа графиков номинальных переходных характеристик ОД, определяют время переходного процесса ОД. Фиксируют время контроля  $T_k \geq T_{III}$ .
3. Определяют значение параметра интегрирования  $\alpha = \frac{5}{T_k}$ .
4. Фиксируют число контрольных точек на выходах блоков  $k$ .
5. Предварительно находят элементы векторов  $\Delta P_{ij}(\alpha)$  отклонений выходных сигналов модели, полученные в результате пробных отклонений  $i$ -го номера каждого из  $n$  одиночных и кратных дефектов блоков и определённого выше параметра

интегрального преобразования  $\alpha$ , для чего выполняют пункты 6–10. Величину пробных отклонений выбирают в диапазоне 10–20 %.

6. Находят нормированные векторы  $\Delta P_{ij}(\alpha)$  отклонений сигналов модели, полученные в результате пробных отклонений  $i$ -го номера каждого из  $n$  одиночных и кратных дефектов блоков.
7. Определяют отклонения выходных сигналов ОД от номинальных значений  $\Delta F_i(\alpha)$ .
8. Вычисляют нормированные значения отклонений сигналов ОД  $\hat{\Delta F}_i(\alpha)$ .
9. Вычисляют диагностические признаки наличия неисправного структурного блока или нескольких блоков по формуле (3 или 4).
10. По минимуму значения диагностического признака определяют дефектный блок или дефектные блоки.

Поскольку диагностические признаки лежат в фиксированном интервале значений [0,1], различимость двух дефектов может оцениваться как разность значений соответствующих признаков. Фактическая различимость  $j$ -го одиночного или кратного дефекта определяется по формуле:

$$\Delta J_j = J_k - J_j,$$

где  $J_j$  — значение признака  $j$ -го присутствующего в объекте одиночного либо кратного дефекта,  $J_k$  — значение ближайшего к нему по величине признака.

Введём также понятие кратной различимости  $j$ -го одиночного либо кратного дефекта как разность:

$$\Delta J_{cj} = J_b - J_j,$$

где  $J_j$  — значение признака  $j$ -го присутствующего в объекте одиночного либо кратного дефекта,  $J_b$  — значение ближайшего к нему по величине признака одиночного либо кратного дефекта, содержащего хотя бы один такой же структурный блок ОД как и  $J_j$ .

### Пример применения метода

Рассмотрим реализацию предлагаемого алгоритмов поиска кратного структурного дефекта для системы, структурная схема которой представлена на рис. 1.

Передаточные функции блоков:

$$W_1 = \frac{k_1(T'_1 p + 1)}{T''_1 p}; \quad W_2 = \frac{k_2}{T_2 p + 1}; \quad W_3 = \frac{k_3}{T_3 p + 1},$$

номинальные значения параметров:  $T'_1=5$  с;  $T''_1=1$  с;  $K_2=1$ ;  $T_2=1$  с;  $K_3=1$ ;  $T_3=5$  с. Определим варианты ( $n=7$ ) пробных отклонений в виде уменьшения коэффициентов усиления ( $k_1, \dots, k_3$ ) каждого динамического блока

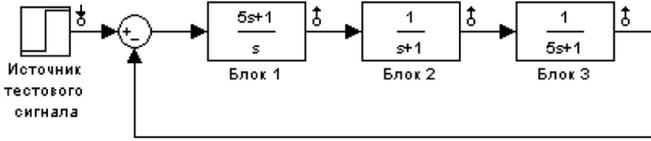


Рис. 1. Структурная схема объекта диагностирования

и комбинаций блоков на 10 %:  $k_1=0.9$  ( $i=1$ );  $k_2=0.9$  ( $i=2$ );  $k_3=0.9$  ( $i=3$ );  $k_1=0.9$  и  $k_2=0.9$  ( $i=4$ );  $k_2=0.9$  и  $k_3=0.9$  ( $i=5$ );  $k_1=0.9$  и  $k_3=0.9$  ( $i=6$ );  $k_1=0.9$ ,  $k_2=0.9$  и  $k_3=0.9$  ( $i=7$ ). При поиске кратного дефекта в виде отклонения коэффициентов усиления на 20 %  $k_1=0.8$ ,  $k_2=0.8$  и  $k_3=0.8$  (кратный дефект №7) в первом, втором и третьем звене, при подачи ступенчатого тестового входного сигнала единичной амплитуды и интегральных оценок сигналов для параметра  $\alpha = 0,5$  и  $T_K=10$  с, при использовании трёх контрольных точек, расположенных на выходах блоков, используя пробные отклонения величиной 10 %, получены значения диагностических признаков по формуле (3):  $J_1=0.9262$ ;  $J_2=0.08897$ ;  $J_3=8552$ ;  $J_4=0.4849$ ;  $J_5=0.398$ ;  $J_6=0.7402$ ;  $J_7=0.03559$ . Анализ значений диагностических признаков показывает, что кратный дефект в первом, втором и третьем структурных блоках контролируемой системы ( $J_7 = \min$ ) находится правильно. Следует отметить, что способ работоспособен и при больших значениях величин пробных отклонений параметров (10–40 %). Ограничением на величину пробного отклонения является необходимость сохранения устойчивости моделей с пробными отклонениями.

Моделирование процессов поиска кратного дефекта при других случаях его проявления для данного объекта диагностирования, при том же параметре интегрального преобразования  $\alpha$  и при единичном ступенчатом

входном сигнале даёт следующие значения диагностических признаков.

При наличии дефектов в блоках №1 и №3 (в виде уменьшения параметров  $k_1$  и  $k_3$  на 20 %, кратный дефект №6):  $J_1=0.9973$ ;  $J_2=0.9474$ ;  $J_3=896$ ;  $J_4=0.9661$ ;  $J_5=0.8994$ ;  $J_6=0.1254$ ;  $J_7=0.7995$ .

При наличии дефектов в блоках №2 и №3 (в виде уменьшения параметров  $k_2$  и  $k_3$  на 20 %, дефект №5):  $J_1=0.3599$ ;  $J_2=0.2114$ ;  $J_3=2875$ ;  $J_4=0.9719$ ;  $J_5=0.001142$ ;  $J_6=0.6733$ ;  $J_7=0.2007$ .

При наличии дефектов в блоках №1 и №2 (в виде уменьшения параметров  $k_1$  и  $k_2$  на 20 %, дефект №4):  $J_1=0.7204$ ;  $J_2=0.7441$ ;  $J_3=0.7929$ ;  $J_4=0.009458$ ;  $J_5=0.9985$ ;  $J_6=0.9989$ ;  $J_7=0.7533$ .

При наличии одиночных структурных дефектов алгоритм даёт следующие результаты.

При наличии дефекта в блоке №3 (в виде уменьшения параметра  $k_3$  на 20 %, дефект №3):  $J_1=0.07426$ ;  $J_2=0.7469$ ;  $J_3=0$ ;  $J_4=0.8629$ ;  $J_5=0.2574$ ;  $J_6=0.5945$ ;  $J_7=0.7014$ .

При наличии дефекта в блоке №2 (в виде уменьшения параметра  $k_2$  на 20 %, дефект №2):  $J_1=0.7842$ ;  $J_2=0$ ;  $J_3=0.747$ ;  $J_4=0.6549$ ;  $J_5=0.2397$ ;  $J_6=0.8593$ ;  $J_7=0.05451$ .

При наличии дефекта в блоке №1 (в виде уменьшения параметра  $k_1$  на 20 %, дефект №1):  $J_1=0$ ;  $J_2=0.7841$ ;  $J_3=0.07425$ ;  $J_4=0.8032$ ;  $J_5=0.3313$ ;  $J_6=0.8379$ ;  $J_7=0.8003$ .

Минимальное значение диагностического признака во всех случаях правильно указывает на дефектные блоки.

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. Способ поиска неисправных блоков в динамической системе. Патент на изобретение №2453898 от 20.06.2012 по заявке №2010148468/08(070039).
4. Шалобанов С.В., Шалобанов С.С. Способ поиска неисправных блоков в непрерывной динамической системе. Патент на изобретение №2519435 от 10.06.2014 по заявке №2012153311/08.

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