

## **МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ В УСЛОВИЯХ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ**

К.Е. Герасименко  
(ЗАО СНПО “Импульс”, Северодонецк)

*Изложены существующие подходы к решению задачи контроля технического состояния ИУС в условиях параметрической неопределенности. Разработан и протестирован на прикладном примере детерминированный метод, отличительной особенностью которого является отсутствие необходимости выполнения оптимизационных процедур и операций интервального анализа.*

***техническое состояние, информационно-управляющие системы, параметрическая неопределенность***

**Введение.** Одним из основных требований предъявляемых к современным информационно-управляющим системам (ИУС) является наличие в последних развитой системы контроля технического состояния (обнаружения неисправностей), позволяющей с высокой точностью идентифицировать неисправное состояние системы, т.е. определить наличие неисправности как в самом объекте, так и в средствах автоматизации (первичных преобразователях, исполнительных механизмах, программно-логических контроллерах). За последние 20 лет были предложены и исследованы различные подходы к обнаружению (fault detection) неисправностей [1 – 2], сводящиеся к трем базовым по принципу реализации: аппаратная избыточность, эвристические правила, аналитические модели. Первый из подходов предполагает обнаружение неисправностей по факту рассогласования значений одного и того же параметра, полученных от функционально избыточных частей аппаратуры ИУС. Второй подход предполагает использование неких правил, алгоритмов по которым должны функционировать объект и ИУС при отсутствии в них неисправностей. При использовании третьего подхода, который и будет рассмотрен в данной статье, задача состоит в определении неисправностей в объекте и ИУС за счет использования аналитических зависимостей между различными параметрами объекта, выражающимися его математической моделью.

Одна из основных проблем на пути практического применения математических моделей для обнаружения неисправностей является проблема неопределенности (uncertainty), выражающаяся в расхождениях между фактическими и измеренными значениями параметров и связан-

ная с погрешностью первичных преобразователей и исполнительных механизмов. Одним из методов, позволяющим учесть такого рода неопределенности является использование интервальных моделей [3 – 5].

**Постановка задачи.** В случае применения интервальных моделей диапазон изменения параметров модели может быть представлен в виде

$$Y_r(t) = [\min(y_r(t), \max(y_r(t))), \quad (1)$$

т.е. неисправность будет определена при несовпадении параметров реальной системы и соответствующих параметров модели:  $y(t) \notin Y_r(t)$ .

Расхождения между фактическим значением параметра и его измеренным значением, связанные с погрешностями в процессе измерения, можно представить в виде:  $y_m(t) \neq y(t)$ . Если данные расхождения не учитывать, то в системе будут обнаружены ложные неисправности:  $y_m(t) \notin Y_r(t)$ , в то время как  $y(t) \in Y_r(t)$ . Для того чтобы учесть данные рассогласования можно использовать интервальную модель системы такого вида:  $y(t) \in Y_m(t)$ . Тогда неисправность будет обнаружена если

$$Y_m(t) \cap Y_r(t) = 0. \quad (2)$$

где  $Y_m(t)$  – интервальное расширение (диапазон изменения) измеренного значения  $y_m(t)$ , определяемое нормированной погрешностью измерения соответствующего параметра.

Диапазоны изменения параметров в ИУС определяются их текущими измеренными значениями и соответствующими погрешностями их измерения, которые нормируются методиками и экспериментальными проверками при метрологической аттестации ИУС и затем периодически подтверждаются при поверках (калибровках) измерительных каналов ИУС, что гарантирует достоверность измерений в пределах погрешностей.

Выражения (1) и (2) предполагают необходимость вычисления интервального расширения  $Y_r(t)$  на каждом шаге моделирования. Для линейных функций  $Y_r(t)$ , выражающих соотношения между параметрами объекта, достаточно использовать методы интервальной арифметики. Для нелинейных функций, которыми описывается большинство реальных объектов, возникает необходимость использования оптимизационных процедур [6 – 10], а также применения специальных методов для решения проблемы мультиинцидента (multi-incident) на монотонных участках функций [11].

Проблема мультиинцидента возникает при применении операций интервального анализа к функциям в которых одна и та же переменная встречается более одного раза. В данном случае интервальный анализ дает так называемую «пессимистическую» оценку (overestimation) интервального расширения функции, например:

$$f(x) = \frac{x}{x+1}, X = [2,3]: F(X) = \frac{[2,3]}{[2,3]+1} = \frac{[2,3]}{[3,4]} = \left[ \frac{2}{4}, \frac{3}{3} \right] = \left[ \frac{1}{2}, 1 \right];$$

$$f(X) \subseteq F(X), \quad f(X) = \left[ \frac{2}{3}, \frac{3}{4} \right],$$

где на монотонном участке функции  $f(x)$  интервальный анализ дает результат  $\left[ \frac{1}{2}, 1 \right]$  при фактическом интервальном расширении  $\left[ \frac{2}{3}, \frac{3}{4} \right]$ .

**Анализ литературы.** Основные подходы к обнаружению неисправностей с использованием математических моделей изложены в [1, 2]. Данные подходы, применительно к использованию интервальных моделей, наиболее глубоко исследованы в работах [3, 4]. Предлагаемые в них методы решения задачи обнаружения неисправностей базируются на использовании модального интервального анализа (МИА), являющегося расширением классического интервального анализа, позволяющим решить проблему мультиинцидента целевой функции на монотонных участках и обеспечить гарантированные оценки точности решения задачи в целом. Базисом теории МИА является математический аппарат, гарантирующий определение на каждой итерации внешних и внутренних границ (overbound, underbound) интервального расширения функции цели. Разница между данными границами определяет точность полученного решения, в случае если точность неудовлетворительна, разбиение области определения должно быть продолжено.

Недостатками методов на основе МИА являются: ограниченная точность (недетерминированность), обязательное условие дифференцируемости функции цели для определения участков ее монотонности, а также необходимость применения специализированного математического аппарата для интервальных вычислений.

**Теоретическое обоснование и алгоритм решения.** Строго говоря, как следует из (2), для обнаружения неисправности необязательно знать диапазон изменения целевой функции, а следовательно и выполнять процедуры оптимизации, достаточно доказать, что не существует пересечений множеств из (2). Проведем некоторые логические и математические рассуждения.

Допустим, мы имеем некоторую непрерывную функцию  $f_1(x_2, x_3, \dots, x_n)$ , выражающую зависимость между измеренными значениями параметров  $x_2, x_3, \dots, x_n$  и  $x_1$  для каждого момента времени:

$$x_1 = f_1(x_2, x_3, \dots, x_n); \quad x_1, x_2, \dots, x_n \in \mathbb{R}. \quad (3)$$

Из выражения (3), без учета интервальных расширений измеренных значений параметров  $x_2, x_3, \dots, x_n$ , получим аналитическое выражение для исправного состояния в виде:

$$f_1(x_2, x_3, \dots, x_n) \in [x_{1\min}, x_{1\max}]; \quad x_2, x_3, \dots, x_n, x_{1\min}, x_{1\max} \in \mathbb{R}. \quad (4)$$

Истинность выражения (4) означает исправное состояние системы, несмотря на то, что интервальные расширения параметров  $x_2, x_3, \dots, x_n$  при этом не учитываются.

Неистинность выражения (4) означает, что необходимо продолжить исследование с учетом интервального расширения параметров  $x_2, \dots, x_n$ .

В том случае, если функция  $f_1$  в (3) – неоднозначная, количество выражений для исправного состояния аналогичных (4) будет соответствовать количеству аналитических отношений для параметра  $x_1$ .

Проанализируем выражение (4), предполагая, как и выше, непрерывность функции  $f_1(x_2, x_3, \dots, x_n)$ , а также то, что последняя является явной и однозначной (как более простой случай).

Применив обратное преобразование для функции  $f_1(x_2, x_3, \dots, x_n)$ , перепишем (4) в виде аналитической зависимости для параметра  $x_2$ :

$$f_2(x_1, x_3, \dots, x_n) \in [x_{2\min}, x_{2\max}];$$

$$x_i \in P, P = \{[x_{i\min}, x_{i\max}] \mid x_{i\min}, x_{i\max} \in \mathbb{R}\}. \quad (5)$$

Допустим, что в (4) для измеренных значений параметров  $x_2, x_3, \dots, x_n$  значение функции  $f_1(x_2, x_3, \dots, x_n) < x_{1\min}$  (рис. 1), тогда можно утверждать, что замена в (5)  $x_1$  на  $x_{1\min}$ , т.е. замена интервала  $[x_{1\min}, x_{1\max}]$  на детерминированное значение  $x_{1\min}$  гарантирует наличие хотя бы одной комбинации значений параметров  $x_3, \dots, x_n$ , при которой выражение (5) будет истинным, при условии, что выражение (5) вообще может быть истинным на всем диапазоне интервальных расширений значений параметров  $x_1, x_3, \dots, x_n$ . Таким образом, перепишем выражение (5) для параметра  $x_2$  в виде:

$$f_2(x_{1\min}, x_3, \dots, x_n) \in [x_{2\min}, x_{2\max}]; x_i \in P, P = \{[x_{i\min}, x_{i\max}] \mid x_{i\min}, x_{i\max} \in \mathbb{R}\}. \quad (6)$$

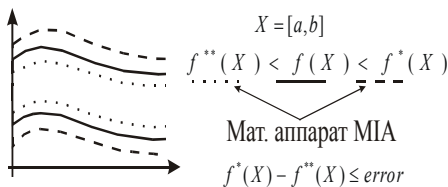


Рис. 1. Подход к решению задачи обнаружения неисправностей при использовании МИА

Проанализировав выражение (5) и (6) можно сделать вывод о том, что указанная замена  $x_1$  на  $x_{1\min}$  в последнем выражении, уменьшает область неопределенности значений аргументов функции  $f_2(\cdot)$ , поскольку  $x_{1\min}$  в отличие от  $x_1$  является детерминированным значением и

не содержит интервальной неопределенности. Выражение для исправного состояния через  $f_2(\cdot)$ , с учетом (4), примет вид:

$f_2(x_{1\min}, x_3, \dots, x_n) \in [x_{2\min}, x_{2\max}]$ ;  $x_{1\min}, x_3, \dots, x_n, x_{2\min}, x_{2\max} \in \mathbb{R}$ , (7)  
 где  $x_{1\min}$  – выбранное (рис. 1), крайнее (min) интервальное значение параметра  $x_1$ ;  $x_3, \dots, x_n$  – измеренные значения параметров  $x_3, \dots, x_n$ .

Истинность выражения (7) явилась бы признаком исправного состояния системы, в противном случае исследование по аналогии с предыдущей итерацией должно быть продолжено (рис. 2).

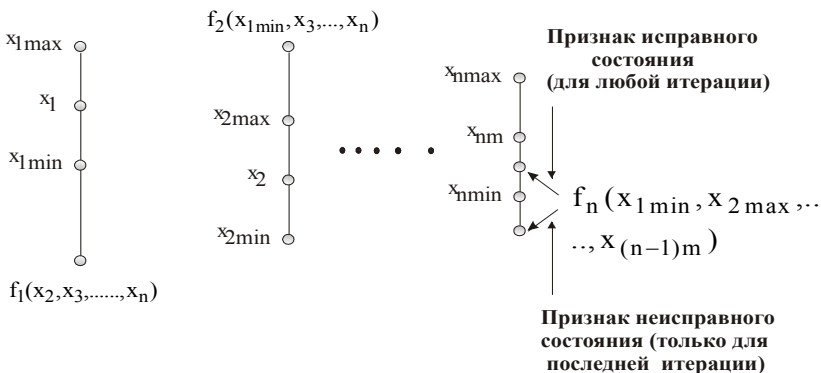


Рис. 2. Итерационная последовательность предлагаемого метода

Выведем выражение для исправного состояния в общем виде для  $i$ -й итерации, с учетом (4) и (7):

$$f_i(x_{1m}, \dots, x_{(i-1)m}, x_{i+1}, \dots, x_n) \in [x_{i\min}, x_{i\max}];$$

$$x_{1m}, \dots, x_{(i-1)m}, x_{i+1}, \dots, x_n, x_{i\min}, x_{i\max} \in \mathbb{R}, \quad (8)$$

где  $x_{1m}, \dots, x_{(i-1)m}$  – выбранные в соответствии с алгоритмом (см. рис. 2) крайние (max или min) интервальные значения параметров  $x_1, \dots, x_{i-1}$ ;  $x_{i+1}, \dots, x_n$  – измеренные значения параметров  $x_{i+1}, \dots, x_n$  без учета их интервального расширения.

Таким образом, данный алгоритм имеет максимальное число итераций –  $n$ , если же и на последней  $n$ -й итерации выражение (8) не будет истинным, то это является признаком наличия неисправности в системе.

**Прикладной пример.** Одним из наиболее крупных научных проектов по данной тематике является проект CHEM (Advanced Decision Support System for Chemical/Petrochemical Manufacturing Processes, [www.chem-dss.org](http://www.chem-dss.org)). В рамках данного проекта апробация новых методов и алгоритмов проводится на специализированных исследовательских полигонах, являющихся уменьшенными, но реально функционирующими физическими аналогами промышленных установок различного назначения. Технологическая схема одного из таких полигонов представлена на рис. 3 и включает в себя три ем-

кости (две из них с нагревателями), три теплообменника, а также насосы и запорные клапана, позволяющие изменять технологическую конфигурацию полигона и тем самым моделировать типовые неисправности объекта для тестирования алгоритмов обнаружения неисправностей в ИУС [12 – 13].

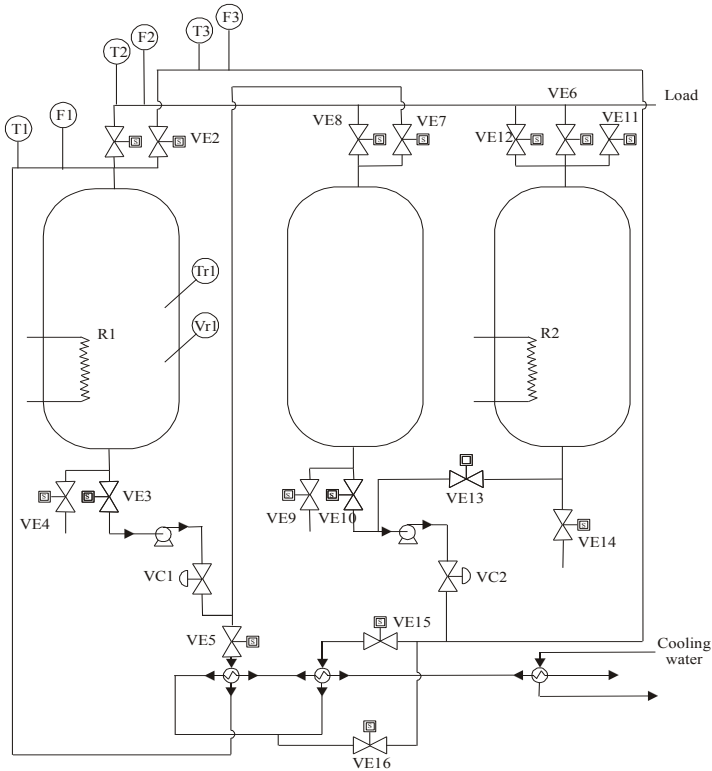


Рис. 3. Технологическая схема полигона PROCEL

Для данного полигона тестирование методов обнаружения неисправностей предполагается на двух моделях: баланса массы и энергетического баланса. Рассмотрим в качестве примера модель энергетического баланса применительно к емкости 1, при этом введем следующие обозначения и допущения:  $T_1, T_2, T_3, F_1, F_2, F_3$  – температура и расход жидкости на каждом из трех входов емкости 1;  $T_{R1}$  – температура жидкости внутри емкости 1;  $V_{R1}$  – объем жидкости в емкости 1; температурный коэффициент расширения (сжатия) жидкости не учитывается; нагреватель емкости 1 отключен; потери, связанные с теплопроводностью стенок емкостей с учетом времени дифференцирования ( $T_s$ ) 50 с [14], не учитываются; время дискретизации – 1 с; температуры жидкости на каждом из трех входов емкости 1 равны:  $T_1 = T_2 = T_3 = T_{in}$ ; ин-

тервалы параметров модели определяются относительными погрешностями измерения параметров: 5% для  $T_{R1}, T_{in}, F_1, F_2, F_3$ , 3% для  $V_{R1}$ .

Исходя из технологической схемы на рис. 3 и с учетом сделанных допущений, уравнение, выражающее аналитическую зависимость для значения температуры  $T_{R1}$  внутри емкости 1 в момент времени  $k$ , примет вид

$$T_{R1}(k) = T_{R1}(k-1) + \frac{(F_1(k) + F_2(k) + F_3(k)) \cdot (T_{in}(k) - T_{R1}(k-1))}{V_{R1}(k)} \cdot T_s. \quad (9)$$

В (9) значение температуры  $T_{R1}$  внутри емкости 1 в момент времени  $k$  определяется значением этой же температуры в предыдущий момент времени  $T_{R1}(k-1)$ , а также динамическим изменением температуры  $T_{R1}$  за период дифференцирования  $T_s$  по интегральной величине (через расходы  $F_1, F_2, F_3$ ) объема жидкости, поступившей за время  $T_s$  в емкость 1, приведенному к общему ее объему  $V_{R1}$  и умноженному на разность температур жидкости на входе  $T_m$  и внутри емкости  $T_{R1}(k-1)$ .

Выведем из (9) обратные аналитические зависимости для значений параметров  $T_{R1}(k-1), T_{in}, V_{R1}, F_1, F_2, F_3$ :

$$T_{R1}(k-1) = \frac{T_{R1}(k)V_{R1}(k) - T_{in}(k) \cdot (F_1(k) + F_2(k) + F_3(k)) \cdot T_s}{(V_{R1}(k) - (F_1(k) + F_2(k) + F_3(k)) \cdot T_s)}; \quad (10)$$

$$T_{in}(k) = \frac{(T_{R1}(k) - T_{R1}(k-1)) \cdot V_{R1}(k)}{(F_1(k) + F_2(k) + F_3(k)) \cdot T_s} + T_{R1}(k-1); \quad (11)$$

$$V_{R1}(k) = \frac{(F_1(k) + F_2(k) + F_3(k)) \cdot (T_{in}(k) - T_{R1}(k-1)) \cdot T_s}{T_{R1}(k) - T_{R1}(k-1)}; \quad (12)$$

$$F_1(k) = \frac{(T_{R1}(k) - T_{R1}(k-1)) \cdot V_{R1}(k)}{(T_{in}(k) - T_{R1}(k-1)) \cdot T_s} - F_2(k) - F_3(k); \quad (13)$$

$$F_2(k) = \frac{(T_{R1}(k) - T_{R1}(k-1)) \cdot V_{R1}(k)}{(T_{in}(k) - T_{R1}(k-1)) \cdot T_s} - F_1(k) - F_3(k); \quad (14)$$

$$F_3(k) = \frac{(T_{R1}(k) - T_{R1}(k-1)) \cdot V_{R1}(k)}{(T_{in}(k) - T_{R1}(k-1)) \cdot T_s} - F_1(k) - F_2(k). \quad (15)$$

Используем выражения (9) – (15) для реализации и тестирования алгоритма обнаружения неисправностей в среде моделирования MathLab 6.5.

Зависимости значений параметров  $T_{R1}, T_{in}, V_{R1}, F_1, F_2, F_3$  от времени представлены на рис. 4. В качестве тестовой неисправности смоделиру-

ем неисправность по параметру расхода  $F_3$  (утечка в импульсной трубке, подключенной к «минусовой» камере расходомерного устройства), при которой фактический расход был меньше, чем измеренное значение.

На нижней диаграмме рис. 5 представлена зависимость между временем и параметром, аналитическое значение которого в соответствии с (8) принадлежит интервалу его измеренного значения. Из диаграмм на рис. 4 (параметр  $F_3$ ) и рис. 5 прослеживается зависимость между «прогрессированием» неисправности и количеством итераций алгоритма (номером параметра). Неисправность определена в момент времени  $t = 422$  с.

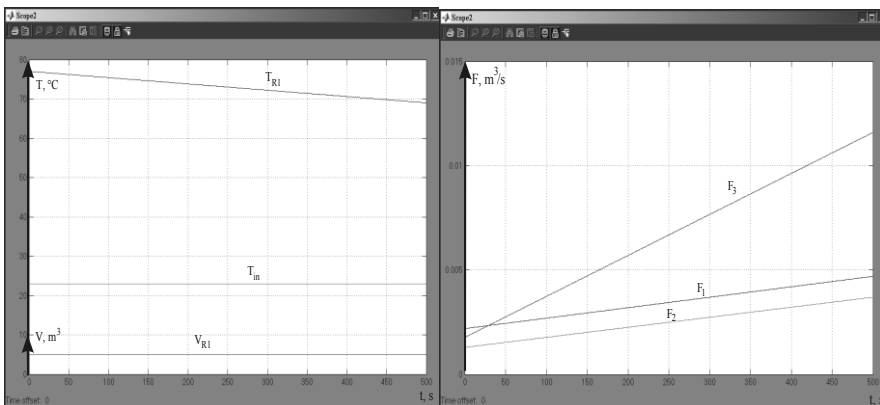


Рис. 4. Результаты моделирования параметров  $T_{R1}, T_{in}, V_{R1}, F_1, F_2, F_3$

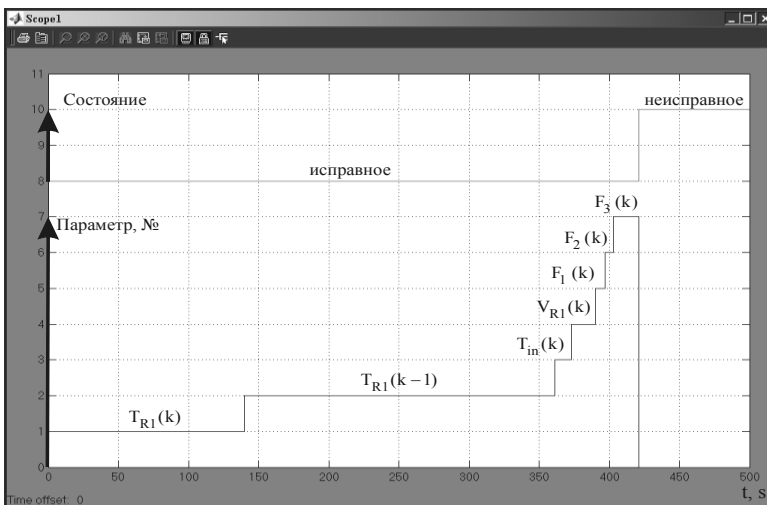


Рис. 5. Результаты моделирования обнаружения неисправности при использовании предлагаемого метода интервального контроля



**Выводы.** Отличительная особенность предлагаемого метода детерминированность и отсутствие операций интервального анализа. Результаты анализа основных отличий предлагаемого метода от оптимизационных методов на основе интервального анализа приведены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнительный анализ предлагаемого метода интервального контроля и оптимизационных методов на основе интервального анализа

Оцениваемый признак	Предлагаемый метод	Оптимизационные методы
1. Количество итераций при выполнении алгоритма	Не более $n$ – при однозначных функциях $x_i = f_i(x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n)$ Определяется количеством параметров и количеством аналитических отношений для каждого из параметров (для многозначных функций)	Ограничивается заданным значением точности. Таким образом, данный метод, в общем случае, не является детерминированным
2. Подход к решению проблемы мультиинцидента	Проблема снимается в виду отсутствия операций интервального анализа	Требуется применение специализированного математического аппарата MIA (Modal Interval Analysis)
3. Точность определения неисправности	Ограничивается только погрешностями вычислений	Задается явно, с увеличением точности увеличивается количество итераций (см. п.1 данной таблицы)
4. Зависимость количества итераций от области пересечения множеств измеренного и аналитического значений	По мере удаления от «идеального» поведения объекта (4) количество итераций возрастает, при появлении неисправности количество итераций – $n$ (см. п.1 данной таблицы)	Зависимость отсутствует, поскольку оптимизация выполняется на множествах возможных значений функции $f_1(\cdot)$ в (4) без учета измеренного значения параметра $x_1$
5. Трудоемкость разработки математического обеспечения под конкретную функцию цели	Должны быть определены в явном виде аналитические зависимости для каждого из $n$ параметров: $x_i = f_i(x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n)$	Должны быть определены выражения для первых частных производных по всем аргументам функции цели $f_1(\cdot)$ в (3)

На основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что данный метод может быть ориентирован на применение для наиболее широко распространенного класса систем – нелинейных динамических систем, описываемых многопараметрическими и многоэкстремальными

функциями цели, позволяющими выразить аналитические зависимости для всех параметров объекта через явные функции.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Reiter R. *A theory of diagnosis from first principles* // *Artificial Intelligence*. – 1987. – Vol. 32, n 1. – P. 57-95.
2. Isermann and Balle. *Trends in the application of model-based fault detection and diagnosis of technical processes* // *Control Eng. Practice*. – 1997. – Vol. 5. n. 5. – P. 707-719.
3. Armengol J., Travé-Massuyès L., Vehí J., Lluís de la Rosa J. *A survey on interval model simulators and their properties related to fault detection* // *Annual Review in Control* – 2000. – Vol. 24, n. 1. – P. 31-39.
4. Vehí J., Luo N., Rodellar J., Armengo J. *Digital control via interval analysis* // *Non-linear Analysis: Theory, Methods and Applications*. – 2001. – Vol. 47, n. 1. – P. 203-212.
5. Moore R. *Interval Analysis*. – Englewood Cliffs, N. J.: Prentice Hall, 1966. – 387 p.
6. Hansen E.R. *Global Optimization Using Interval Analysis*. – New York: Marcel Dekker, 1992. – 235 p.
7. Орлянская И.В. *Современные подходы к построению методов глобальной оптимизации* // *Электронный журнал «Исследовано в России»*. – 2002. – С. 2097-2108.
8. Evtushenko Yu.G., Potapov M.A., Korotkich V.V. *Recent advances in Global Optimization* // *Princeton University Press*. – 1992. – P. 247-297.
9. Venkataramanan Balakrishnan, Stephen Boyd. *Global Optimization in Control System. Analysis and Design*. – New York: C. T. Leondes, 1992. – 55 p.
10. Armengol J., Travé-Massuyès L., Vehí J., Sainz M. *Generation of error-bounded envelopes using Modal Interval Analysis* // *Materials of Tenth International Workshop on Principles of Diagnosis*. – 1999. – P. 20-26.
11. Armengol J., Vehí J., Herrero P. *Industrial applications of a fault detection tool based on interval models* // *Materials of International Conference on Integrated Modeling and Analysis in Applied Control and Automation*. – 2004. – P. 112-118.
12. Sainz M., Armengo J., Vehí J. *Fault detection and isolation of the three-tank system using the modal interval analysis* // *Journal of Process Control*. – 2002. – Vol. 12. – n. 2. – P. 325-338.
13. Armengol J., Vehí J., Herrero P. *Fault detection in a pilot plant using interval models and multiple sliding time windows* // *Materials of 5th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes*. – 2004. – P. 162.
14. Armengol J., Travé-Massuyès L., Vehí J., Sainz M. *Fault detection based on interval models and multiple sliding time windows* // *Journales Doctorales d'Automatique*. – 2001. – P. 159-164.

Поступила 14.06.2006

**Рецензент:** доктор технических наук, профессор В.С. Харченко,  
Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ».