УДК 004.415 : 681.3

МЕТОД ОБНАРУЖЕНИЯ НЕИСПРАВНОСТЕЙ В НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНТЕРВАЛЬНЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

К.Е. Герасименко
(«СНПО «Импульс», Северодонецк)

Изложен подход к решению задачи обнаружения неисправностей в нелинейных системах с использованием интервальных математических моделей. Разработан и протестирован на прикладном примере детерминированный метод, гарантирующий решение задачи за конечное число итераций и обеспечивающий большее быстродействие и точность по сравнению с традиционными численными методами обнаружения неисправностей, использующими процедуры оптимизации.

неисправность, нелинейные системы, интервальные математические модели

Введение. Одним из основных требований предъявляемых к современным информационно-управляющим системам (ИУС) является наличие в последних развитой системы обнаружения неисправностей, позволяющей с высокой точностью идентифицировать неисправное состояние системы, то есть 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) и диагностированию (fault diagnosis) неисправностей с использованием математических моделей [1, 2]. Задача состоит в определении неисправностей в системе за счет использования аналитических зависимостей между различными параметрами объекта, выражающимися его математической моделью. Одной из основных проблем на пути практического применения математических моделей для обнаружения неисправностей является проблема неопределенности (uncertainty), выражающаяся в расхождениях между реальной зависимостью параметров системы при ее функционировании и их аналитической зависимостью и связанная с неточностями самой модели, погрешностью первичных преобразователей, исполнительных механизмов. Одним из методов, позволяющих учесть такого рода неопределенности, является использование интервальных моделей [3 – 5].

Постановка задачи. В случае применения интервальных моделей диапазон изменения параметров может быть представлен в виде: $Y_r(t) = [\min(y_r(t), \max(y_r(t))]$. Таким образом, неисправность будет определена при несовпадении параметров реальной системы и соответствующих параметров модели $y(t) \notin Y_r(t)$.

Поскольку в реальных системах всегда присутствуют расхождения между фактическим значением параметра и его измеренным значением, которые связаны с погрешностями в процессе измерения, то можно принять, что $y_m(t) \neq y(t)$.

Если данные расхождения не учитывать, то в системе будут обнаружены ложные неисправности: $y_m(t) \notin Y_r(t)$, хотя $y(t) \in Y_r(t)$.

Для того, чтобы учесть данные рассогласования можно использовать интервальную модель системы такого вида: $y(t) \in Y_m(t)$. Тогда неисправность будет обнаружена если

$$Y_m(t) \cap Y_r(t) = 0. \tag{1}$$

Выражение (1) предполагает необходимость вычисления интервалов на каждом шаге моделирования, что в свою очередь приводит к необходимости решения в режиме реального времени функционирования объекта задач глобальной оптимизации целевых функций, которые являются наиболее трудоемкими в вычислительной математике [6 – 10], в особенности для многопараметрических и многоэкстремальных целевых функций, что создает существенные проблемы для внедрения оптимизационных алгоритмов обнаружения неисправностей на практике, в особенности для систем с повышенными требованиями к надежности и безопасности.

Анализ литературы. Основные подходы к обнаружению неисправностей с использованием математических моделей изложены в [1, 2]. Эти подходы применительно к использованию интервальных моделей получили развитие в работах [3, 4, 10]. Проведенный анализ показал, что практически все разработанные на сегодняшний день численные методы обнаружения неисправностей, учитывающие интервальные расширения значений параметров, используют глобальные или локальные процедуры оптимизации с заданным (конечным) значением точности определения интервального расширения функции цели и по сути не являются детерминированными.

Теоретическое обоснование и алгоритм решения. Строго говоря, как следует из (1), для обнаружения неисправности необязательно знать диапазон изменения целевой функции, а следовательно и выполнять процедуры оптимизации, достаточно доказать, что не существует пересечений множеств из выражения (1). Проведем некоторые логические и математические рассуждения.

Допустим, мы имеем некоторую функцию $F_1(x_2, x_3,...,x_n)$, выражающую зависимость между значениями измеренных параметров $x_2, x_3,...,x_n$ и x_1 для каждого момента времени:

$$x_1 = F_1(x_2, x_3,...,x_n),\ x_1, x_2,...,x_n \in R. \tag{2}$$

С учетом интервальных расширений параметров $x_1, x_2,...,x_n$ выражение (2) примет вид:

$$F_1(x_2, x_3,...,x_n) \in [x_{1min}, x_{1max}];$$
$$x_i \in P, P = \{[x_{imin}, x_{imax}] \mid x_{imin}, x_{imax} \in R\}. \tag{3}$$

Подставив в выражение (3) измеренные значения параметров $x_2, x_3,...,x_n$ без учета их интервальных расширений, получим аналитическое выражение для функции исправности в виде:

$$F_1(x_2, x_3,...,x_n) \in [x_{1min}, x_{1max}],\ x_2, x_3,...,x_n, x_{1min}, x_{1max} \in R. \tag{4}$$

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

Неистинность выражения (4) означает, что необходимо продолжить исследование с учетом интервального расширения параметров $x_2,...,x_n$. Проанализируем выражение (4), предполагая непрерывность функции $F_1(x_2, x_3,...,x_n)$, а также то, что последняя является однозначной и явной.

Применив обратное преобразование для функции $F_1(x_2, x_3,...,x_n)$, перепишем (3) в виде аналитической зависимости для параметра x_2:

$$F_2(x_1, x_3,...,x_n) \in [x_{2min}, x_{2max}];$$
$$x_i \in P, P = \{[x_{imin}, x_{imax,}] \mid x_{imin}, x_{imax} \in R\}. \tag{5}$$

Допустим, что в (4) для измеренных значений параметров $x_2, x_3,...,x_n$ значение функции $F_1(x_2, x_3,...,x_n) < x_{1min}$(рис. 1), тогда можно утверждать, что замена в (5) x_1 на x_{1min}, то есть замена интервала $[x_{1min}, x_{1max}]$ на конкретное значение x_{1min} гарантирует наличие хотя бы одной комбинации интервальных значений параметров $x_3,...,x_n$, при которой выражение (5) будет истинным, если выражение (5) вообще может быть истинным на всем диапазоне интервальных расширений параметров $x_1, x_3,...,x_n$. Таким образом, перепишем выражение (5) для параметра x_2 в виде:

$$F_2(x_{1min}, x_3,...,x_n) \in [x_{2min}, x_{2max}];$$
$$x_i \in P, P = \{[x_{imin}, x_{imax,}] \mid x_{imin}, x_{imax} \in R\}. \tag{6}$$

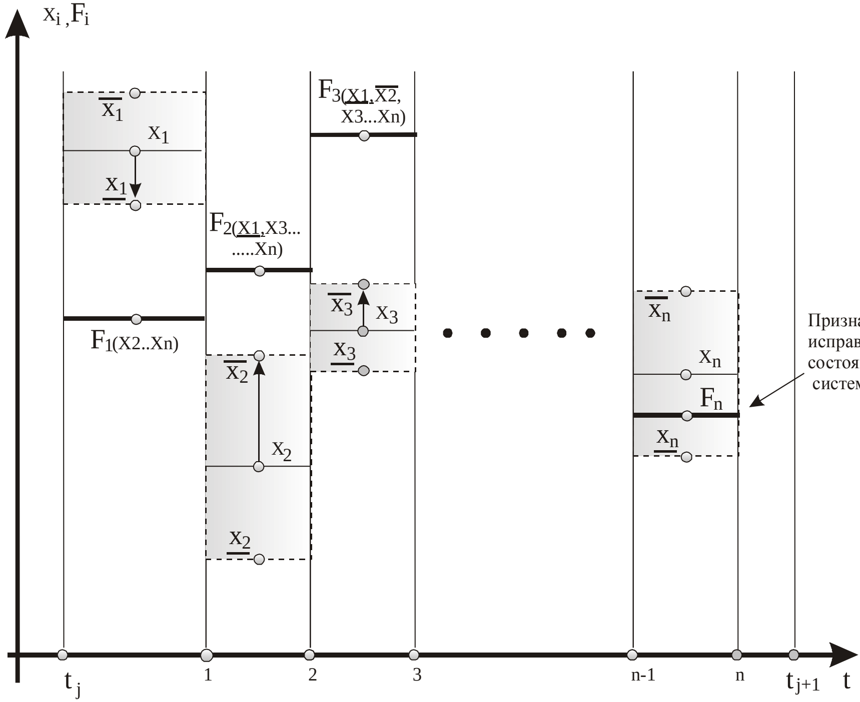

Рис. 1. Итерационная последовательность предлагаемого метода

Проанализировав выражения (5) и (6) можно сделать вывод о том, что указанная замена x_1 на x_{1min} в последнем выражении уменьшает область неопределенности значений аргументов функции $F_2(\cdot)$, поскольку x_{1min}, в отличие от x_1, является детерминированным значением и не содержит интервальной неопределенности.

Выражение для функции исправности через $F_2(\cdot)$, с учетом (4), примет вид:

$$F_2(x_{1min}, x_3, \ldots, x_n) \in [x_{2min}, x_{2max}];$$
$$x_{1min}, x_3, \ldots, x_n, x_{2min}, x_{2max} \in R, \qquad (7)$$

где x_{1min} – выбранное (рис. 1), крайнее (min) интервальное значение параметра x_1; $x_3,\ldots,x_n$ – измеренные значения параметров $x_3,\ldots,x_n$.

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

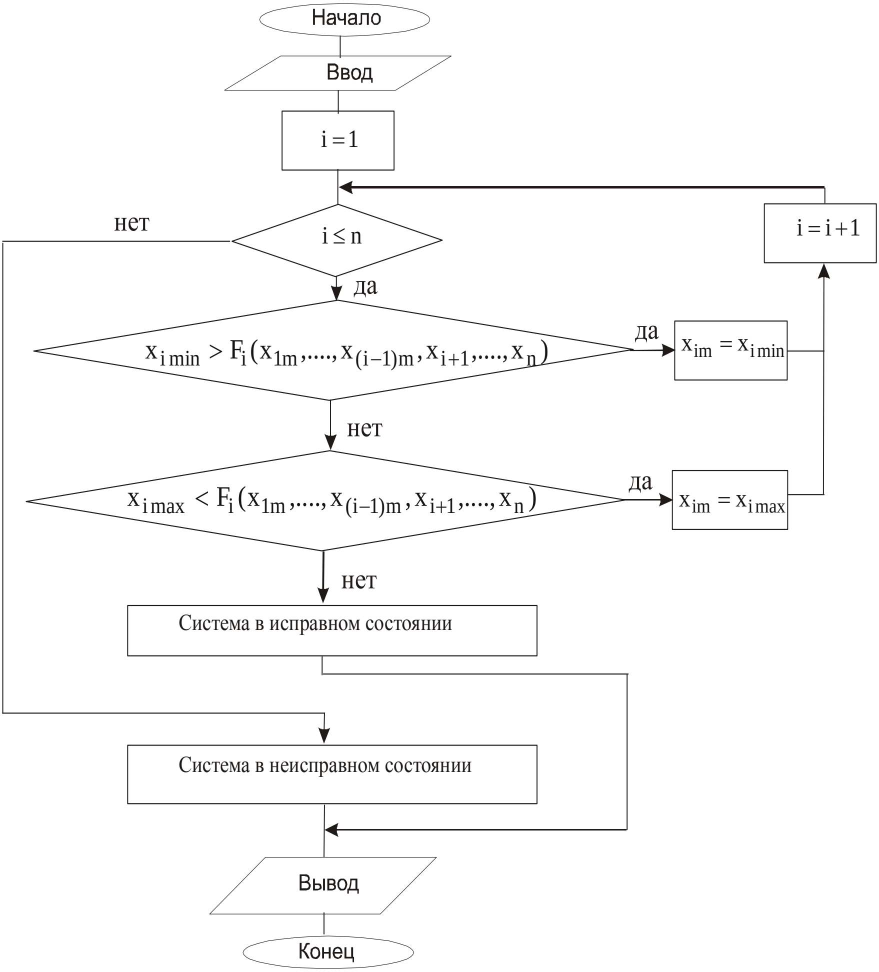

Рис. 2. Логическая схема алгоритма работы предлагаемого метода

Выведем выражение для функции исправности в общем виде для i-й итерации, с учетом (4) и (7):

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

$$x_{1m},\ldots,x_{(i-1)m}, x_{i+1},\ldots,x_n, x_{i\,min}, x_{i\,max} \in R, \qquad (8)$$

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

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.

Выводы. На основании, проведенных исследований можно сделать предварительный вывод о том, что предлагаемый метод применим и наиболее эффективен, по сравнению с оптимизационными методами, для нелинейных систем, описываемых многопараметрическими и многоэкстремальными функциями цели, позволяющими выразить в явном виде обратные аналитических зависимости для всех параметров.

Новизна разработанного метода заключается в возможности реализации на его основе детерминированных алгоритмов обнаружения неисправностей, гарантирующих определение неисправного (исправного) состояния системы за фиксированное (конечное) количество итераций и не требующих при этом выполнения затратных по времени и вычислительной трудоемкости процедур оптимизации.

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 // Nonlinear 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 // Prinston 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.*

Поступила 24.11.2005

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