

МЕТОДЫ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ КОМПЬЮТЕРНЫХ МОДЕЛИРУЮЩИХ СИСТЕМ

© Верлань А.Ф., Одокиенко С.Н., 2004

Пропонується метод діагностування, заснований на ідентифікації системи, яка перевіряється і який визначає несправності, що змінюють не тільки параметри моделі, а й структуру деякої частини математичного опису процесу. Метод застосовується при тестовому та функціональному діагностуванні комп'ютерних моделювальних систем.

The method of diagnostics based on identification of the testable system and determining malfunctions, which change not only the model characteristics but the structure of some part of the process mathematical description as well is introduced at the work. The method is applied in test and functional diagnostics of the computer analogous systems.

Введение. Для моделирования сложных объектов и процессов в реальном времени используются вычислительные системы различных типов: аналоговые, мультипроцессорные, цифро-аналоговые. Особенностью рассматриваемых вычислительных систем является то, что они состоят из подсистем, реализующих некоторую часть математического моделируемого процесса. Примером таких систем могут служить аналоговые вычислительные машины, в которых при решении системы обыкновенных дифференциальных уравнений подсистемами даются интеграторы, функциональные преобразователи, сумматоры и т.д. или мультипроцессорные системы, в которых каждый из процессоров решает соответствующее дифференциальное уравнение.

В вычислительных системах возможны неисправности, на которые в данной работе накладываются следующие ограничения: неисправной может быть только одна подсистема, неисправная вычислительная система функционирует, неисправности могут изменять достаточно произвольно выходные сигналы подсистемы, что эквивалентно произвольному изменению части математического описания моделируемого процесса, реализуемого неисправной подсистемой. Задача состоит в том, чтобы по входным и выходным сигналам вычислительной моделирующей системы определить неисправную подсистему. Данная задача решается путем определения части математического описания моделируемого процесса, в которой произошли изменения. При этом используются положения, развитые в теории идентификации [1–4]. Однако, в отличие от принятого использования идентификации в диагностике, когда допускаются только неисправности, изменяющие параметры модели процесса [5, 6], в данной работе рассматривается случай, когда возможны изменения структуры некоторой части математического описания процесса.

Постановка задачи. На вычислительной системе моделируется процесс, который описывается зависимостью

$$Y = A(u), \quad (1)$$

где A – некоторый оператор; u , Y – соответственно входные и выходные сигналы процесса.

Вычислительная система состоит из подсистем S_i , $i = \overline{1, m}$, каждая из которых реализует соответственно зависимость $Z_i = A_i(x_i)$, где A_i – оператор, принадлежащий классу операторов G^*_i ; x_i , Z_i – входные и выходные сигналы части моделируемого процесса. Если подсистема S_i охвачена обратной связью, то $x_i = \psi_i^*(u, Z_i)$; если не охвачена, то $x_i = \psi_i(u)$, где ψ_i^* , ψ_i –

некоторые операторы, определяющие зависимость входных сигналов подсистемы S_i от входных сигналов моделируемого процесса.

Описание вычислительной системы, моделирующий процесс (1), с выделенной подсистемой S_i представим следующим образом:

$$Y = F_i(u) \cdot [A_i(x_i)],$$

где $F_i(u)$ – оператор, в котором u играет роль переменных параметров с областью определения V_i , $A_i(u) \in V_i$.

Неисправная подсистема, например S_j , изменяет зависимость, которая на ней моделируется.

При этом входные и выходные сигналы подсистемы связаны отношением $Z_j = B_j(x_j)$, где Z_j – выходной сигнал неисправной подсистемы, $B_j \neq A_j$, $B_j \in G$, G , – некоторый класс операторов, причем возможно $G_j \notin G_j^*$.

Моделируемый процесс при неисправной подсистеме S_j можно представить в виде

$$Z = F_j(u) \cdot [B_j(x_j)], \quad (2)$$

где Z – выходной сигнал процесса, моделируемого на неисправной вычислительной системе.

Необходимо, располагая моделью (1), сигналами u , Z определить неисправную подсистему.

Результаты. Поиск неисправной подсистемы осуществляется последовательной проверкой гипотез

$$H_k : \hat{Z} = F_k(u) \cdot [\hat{B}_k(X_k)], \quad k = \overline{1, m}. \quad (3)$$

Гипотеза H_k представляет собой предположение о том, что подсистема S_k неисправна и зависимость, которая на ней реализуется, описывается оператором B_k , принадлежащим классу операторов G_k . Класс операторов G_k определяет класс допустимых неисправностей в подсистеме S_k .

Для проверки гипотезы H_k выделяются обучающая $N_{об.}$ и проверочная $N_{пр.}$ последовательности, которые представляют собой совокупности входных и выходных сигналов моделируемого процесса, удовлетворяющие условию

$$N_{об.} \cap N_{пр.} \neq N_{пр.} \quad (4)$$

Последовательности $N_{об.}$, $N_{пр.}$ отличаются либо входными сигналами моделируемого процесса, либо интервалом наблюдения его выходных сигналов, либо контролируемыми выходами (контрольными точками в вычислительной системе), либо тем и другим в зависимости от вида моделируемого процесса, условий проведения диагностического эксперимента, типа вычислительной системы и диагностических свойств ее подсистем.

Можно выделить два подхода к построению методов и алгоритмов диагностирования [2]:

1) подход, основанный на получении оценки \hat{B}_k оператора B_k , реализуемого проверяемой подсистемой;

2) подход, основанный на получении оценок \hat{X}_k , \hat{Z}_k входного X_k и выходного Z_k сигналов проверяемой подсистемы.

В результате проверки гипотез H_k , $k = \overline{1, m}$ определяется множество подсистем подозреваемых на неисправность.

Важнейшей характеристикой методов диагностирования является глубина диагностирования. Глубина диагностирования показывает до какого множества неразличимых между собой подсистем определяется неисправная подсистема. Для выделения множества неразличимых подсистем необходимо установить условия его образования. При этом достаточно установить условия неразличимости двух подсистем. В рамках излагаемого подхода подсистемы S_j, S_k неразличимы, если при проверке гипотез H_j, H_k обе гипотезы принимаются.

Пусть неисправная подсистема S_j описывается оператором $B_j \in G_j$. Подсистемы S_j, S_k неразличимы в том и только том случае, если существует физически реализуемый оператор $B_k \in G_k$ такой, что выполняется равенство

$$F_k(u) \cdot [B_k(x_k)] \equiv F_j(u) \cdot [B_j(x_j)]. \quad (5)$$

Различимость подсистем обуславливается их диагностическими свойствами, которые можно выделить путем анализа условий, при которых не выполняется (5).

В общем случае вычислительная система имеет несколько контрольных точек. При этом моделируемый процесс в неисправной системе (2) можно представить следующим образом

$$Z_i = F_{ji}(u) \cdot [B_j(x_j)], \quad i = \overline{1, M},$$

где F_{ji} – оператор, описывающий моделируемый процесс с выделенной подсистемой S_j , относительно выхода (контрольной точки) Z_i , M – число контролируемых выходов.

Равенство (3) преобразуется к виду

$$F_{ki}(u) \cdot [B_k(x_k)] \equiv F_{ji}(u) \cdot [B_j(x_j)], \quad i = \overline{1, M}. \quad (6)$$

Рассмотрим случай, когда подсистемы S_j, S_k реализуют зависимости, имеющие скалярные выходные величины. Предположим, что существуют два выхода системы, без потери общности будем считать, что это выходы Z_1, Z_2 относительно которых существуют операторы $F_{kn}^{-1}(u)$, $F_{jm}^{-1}(u)$ для n, m , принимающих хотя бы одно из значений множества $\{1, 2\}$. Существование оператора $F_{kn}^{-1}(u)$ определяет наблюдаемость подсистемы S_k относительно выхода Z_n . В данном случае требуется, чтобы подсистемы S_j, S_k были наблюдаемы при соответствующих гипотезах H_j, H_k относительно хотя бы одного выхода системы.

Из (6) следует существование операторов $\alpha_{jk}^n(u): v_j \rightarrow v_k$, $\alpha_{kj}^m(u): v_k \rightarrow v_j$, имеющих вид

$$\alpha_{jk}^n(u) = F_{kn}^{-1}(u) F_{jn}(u),$$

$$\alpha_{kj}^m(u) = \begin{cases} F_{jm}^{-1}(u) F_{km}(u) & \text{при } m \neq n, \\ [\alpha_{jk}^n(u)]^{-1} & \text{при } m = n. \end{cases}$$

Для широкого класса неисправностей справедливо следующее утверждение.

Подсистемы S_j, S_k различимы, если выполняется хотя бы одно из следующих условий:

1) не выполняется хотя бы одно из равенств

$$F_{km}(u) \alpha_{jk}^n(u) = F_{jm}(u),$$

$$F_{jm}(u) \alpha_{kj}^m(u) = F_{kn}(u)$$

(при $n = m$ уравнения (6), (7) равносильны);

2) не существует взаимно однозначного оператора η такого, что $x_k = \eta(x_j)$;

3) не существует однозначного оператора β_k (или β_j), обеспечивающего равенство $\alpha_{jk}^n(u) = \beta_k(x_k)$ (соответственно $\alpha_{kj}^n(n) = \beta_j(x_j)$).

Подсистемы S_j, S_k удовлетворяющее условию 1), будем называть независимо наблюдаемыми подсистемами, условию 2) подсистемами с независимым управлением, условие 3) – подсистемам с независимым отношением функций чувствительности.

Диагностические свойства подсистем во многом определяют принципы построения методов их диагностирования.

В рамках подхода, основанного на получении оценки оператора, описывающего проверяемую подсистему, процедура проверки гипотезы H_k содержит следующие этапы:

1) на последовательности $N_{об.}$ из условия минимума некоторой меры близости процесса (2), реализуемого неисправной вычислительной системой и модели (3) определяется оценка \hat{B}_k оператора, описывающего проверяемую подсистему S_k ;

2) на последовательности $N_{нр.}$ оценивается адекватность полученной модели (3) процессу, реализуемому вычислительной системой.

Гипотеза H_k принимается и подсистема S_k считается неисправной, если удовлетворяются условия физической реализуемости оператора \hat{B}_k и модель, полученная на $N_{об.}$, адекватна $N_{нр.}$ процессу, реализуемому вычислительной системой.

Последовательности $N_{об.}, N_{нр.}$ формируются исходя из диагностических свойств подсистем. Условие (4) для независимо наблюдаемых подсистем S_j, S_k будет выполняться, если в последовательности $N_{об.}, N_{нр.}$ входят сигналы с разных выходов системы. В этом случае

$$N_{об.} = \{u, Z_n, n \in I_{об.}\}, N_{нр.} = \{u, Z_n, n \in I_{нр.}\}$$

где $I_{об.}, I_{нр.}$ – подмножества множества выходов системы $I_{об.} \cap I_{нр.} \neq I_{нр.}$.

Если подсистемы S_j, S_k – имеют независимые управления, то

$$N_{об.} = \{u_{об.}, Z(u_{об.})\}, N_{нр.} = \{u_{нр.}, Z(u_{нр.})\} \quad (7)$$

где $u_{об.}, u_{нр.}$ – входные сигналы системы соответственно на последовательностях $N_{об.}, N_{нр.}$, причем при проверке гипотезы H_k

$$x_j(u_{об.}) \neq x_j(u_{нр.}) \quad (8)$$

Если подсистемы S_j, S_k – подсистемы с независимым отношением функций чувствительности, то $N_{об.}, N_{нр.}$ имеют вид (6), но (7) заменяется на условие $\alpha_{jk}^n(u_{об.}) \neq \alpha_{jn}^n(u_{нр.})$ или $\alpha_{kj}^n(u_{об.}) \neq \alpha_{kj}^n(u_{нр.})$.

Выводы. Изложенный метод диагностирования, основанный на идентификации проверяемой подсистемы, может применяться при тестовом и функциональном диагностировании подсистем, обладающих любыми из перечисленных выше диагностическими свойствами. Однако сложность получения оценки \hat{B}_k может оказаться высокой.

Существенно упростить процедуры диагностирования позволяют методы, ориентированные на конкретные диагностические свойства подсистем. Идея, положенная в основу этих методов, состоит в таком формировании последовательностей $N_{об.}$, $N_{нр.}$, при которых входные сигналы проверяемой подсистемы на $N_{об.}$, $N_{нр.}$ совпадают.

В качестве примера приведем процедуру проверки гипотезы H_k для подсистем с независимым управлением:

1) на последовательности $N_{об.}$ из условия минимума некоторой меры близости процесса (2), реализуемого неисправной вычислительной системой и модели (3) определяются оценки \hat{Z}_k , \hat{x}_k ;

2) формируются входные сигналы моделируемого процесса $u_{нр.}$, обеспечивающие выполнение условий (6), (7) и условия

$$x_k(u_{об.}) = x_k(u_{нр.}); \quad (9)$$

3) из полученных в п.2 значений $u_{нр.}$ и соответствующих выходных сигналов неисправной системы $Z(u_{нр.})$ формируется последовательность $N_{нр.}$;

4) на $N_{нр.}$ проверяется адекватность полученной модели, моделируемому процессу.

В изложенном методе этап получения оценки оператора \hat{B}_k заменяется получением оценок \hat{Z}_k , \hat{x}_k , что значительно проще. Но при этом на последовательности $N_{об.}$, $N_{нр.}$ накладывается дополнительное условие (8). Аналогично при построении процедур диагностирования учитываются и остальные диагностические свойства подсистем.

Таким образом, отображение моделируемого процесса на вычислительную систему позволяет задачу определения неисправной подсистемы свести к задаче определения фрагмента модели процесса, изменившегося в результате неисправностей. Задача определения изменившегося фрагмента модели решена в общем виде. Ее конкретная интерпретация зависит от типа вычислительной системы, класса неисправностей и условий проведения диагностического эксперимента, что в рамках излагаемого подхода приводит к широкому многообразию алгоритмов диагностирования, которые строятся и оцениваются согласно общим схемам и положениям, изложенным в настоящей работе.

1. Гроп Д. Методы идентификации систем. – М.: Мир, 1979. – 302 с. 2. Верлань А.Ф., Ефимов И.Е., Латышев А.В. Вычислительные процессы в системах управления и моделирования. – Л.: Судостроение, 1981. – 248 с. 3. Эйкофф П. Основы идентификации систем управления. – М.: Мир, 1975. – 683 с. 4. Кузнецов П.И., Пчелинцев Л.А. Последовательное обучение систем диагностики. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 112 с. 5. Калявин В.П., Мозгалеvский А.В. Технические средства диагностирования. – Л.: Судостроение, 1984. – 210 с. 6. Мозгалеvский А.В., Гаскаров Д.В. Техническая диагностика. – М.: Высш. школа, 1975. – 207 с.