



МЕТОДЫ ИНТЕРПОЛЯЦИИ В ТЕХНИЧЕСКОМ ДИАГНОСТИРОВАНИИ¹

В. А. Твердохлебов

Институт проблем точной механики и управления РАН, г. Саратов

Рассмотрены основные положения технического диагностирования больших и сложных систем. Изложен метод построения диагностических моделей с использованием интерполяции на базе частичной диагностической информации. Ограничение на применение моделей неисправностей и возможности средств диагностирования определяются свойствами сложных объектов диагностирования оказываться недоступными для полного и точного их описания.

ВВЕДЕНИЕ

Техническое диагностирование систем, которые характеризуются как большие или сложные системы, осуществляется в условиях ограничений на математические модели и средства диагностирования. Из результатов исследований по постановкам и решениям задач технического диагностирования таких систем следует актуальность принципиального изменения теоретических положений, представленных, например, в основополагающих работах Э. Мура [1] (полное решение установочной задачи для автомата), А. Гилла [2] (сведение диагностирования к установочной задаче), в двухтомной монографии под редакцией П. П. Пархоменко [3] (систематизация задач и методов технического диагностирования интуитивно обозримых и формально представимых объектов). Развитие теории технического диагностирования до настоящего времени, несмотря на переход от абстрактных моделей к структурным, еще не вышло на включение в область приложений теории больших и сложных объектов. Относительный характер понимания терминов *сложная* и *большая* система не рассматривается как предмет обсуждения, а непосредственно конкретизируется по некоторым выбранным их свойствам, определяющим исследуемый класс задач технического диагностирования. К ним относятся следующие свойства (положения).

1. Объект диагностирования не допускает достаточно полного и точного интуитивного обозрения и формального представления традиционными средствами: таблицами, графами, логическими уравнениями.

2. Возможности средств диагностирования в каждом используемом интервале времени ограничены наблюдением

только части структуры объекта и наблюдением только некоторых функций объекта.

Совмещение ограничений, указанных в п. 1 и 2, усложняет постановки и методы решения задач диагностирования.

3. Анализ работоспособности и локализация дефектов могут потребоваться на интервале времени, как угодно удаленном от начала функционирования объекта.

4. К традиционным вопросам технического диагностирования — обнаружение наличия дефекта и его локализация по месту или функциональному влиянию — добавляется поиск цепочек причинно-следственных связей, заканчивающихся появлением дефекта.

5. Техническое диагностирование выделяемых для рассмотрения объектов не может быть осуществлено однородными средствами диагностирования. Только совмещение тестирования, измерения физических параметров, анализа процессов «решения» объектами диагностических задач, визуального осмотра, сигнализации и других средств должно образовывать средства диагностирования.

Положение 1 исключает достаточность применения аппарата только символьной математики с ее комбинаторно-логическими идеями, перечислительным и явным табличным, матричным, графовым конструктивизмом.

Положение 2 отражает свойства объектов диагностирования как материальных тел (непрерывное изменение неограниченного множества параметров и характеристик) и представляет собой реальные ограничения процедур диагностирования по показателям времени, ресурсов, возможностей аппаратуры и т. п.

В положении 3 исключается рекурсия как основа построения моделей как конкретных вариантов функционирования, так и явного представления законов функционирования. Например, наличие в объекте диагностирования регистра, счетчика или эквивалентных устройств на 128 двоичных разрядов при заполнении устройств вариантами заполнений со скоростью 1 млн. ва-

¹ Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 05-08-49999.



риантов/с для перебора всех вариантов потребуется 2^{82} лет. Никакой рекурсивный процесс анализа и синтеза не будет эффективным для такого (очень простого, с практической точки зрения) формирования памяти объекта диагностирования. Заметим, что практическое использование из 2^{128} вариантов представления памяти только некоторого числа вариантов не снимает границ эффективности рекурсии, так как неисправности включают в функционирование даже не предусмотренные разработчиками ситуации.

Положение 4 фактически связано рассмотрением в процессах функционирования для каждого такта поведения системы на некоторых представляющих интервалах времени, т. е. не предполагается, что предыдущее функционирование достаточно полно и точно выражается в сформировавшемся следующем состоянии (памяти) модели.

Положение 5 является следствием представлений об объекте диагностирования как о системе, в которой взаимосвязаны и взаимодействуют процессы различной природы: физические, электронные, информационные, механические, процессы с участием человека и т. д. Требуемое разнообразие диагностических средств необходимо для получения диагностической информации и повышения эффективности технического диагностирования (например, в некоторых случаях лаборант с ванной для измерения объема тел работает эффективнее, чем группа математиков-вычислителей, решающих задачу определения объема тел математическими методами).

Результаты исследований, начиная с работ [4, 5] и продолженные, например, работами [6—11], показывают, что принципиальное изменение формы задания модели (задание законов функционирования и конкретных вариантов функционирования автоматов геометрическими фигурами), замена символьной рекурсии вычислительными (числовыми) процедурами (на основе изоморфного вложения словарных геометрических образов автоматов в числовые геометрии), применение как основных методов интерполяции и экстраполяции позволяют получать решения задач из указанного класса задач, по крайней мере, в частных случаях.

Определяющие и разрабатываемые идеи следующие:

- представление законов функционирования и конкретных вариантов функционирования автоматов соответственно геометрическими фигурами на основе интерполяции координат точек;

- применение математического аппарата интерполяции и экстраполяции для удовлетворения условий и ограничений, определяемых положениями 1—4;

- использование (почти очевидное) приведения разнородных средств технического диагностирования (тестирование, измерение физических параметров, решение диагностических задач, визуальный осмотр и сигнализация) к единой форме: связи входных и выходных сигналов автомата (см. работу [12]).

Исследование класса выделенных задач технического диагностирования не только не завершено, но и в принципе не может быть окончательным в связи с объемом класса, сложностью задач, необходимостью выделения из класса подклассов задач. Этим объясняется актуальность данной публикации.

1. ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ОБРАЗЫ КОНЕЧНЫХ ДЕТЕРМИНИРОВАННЫХ АВТОМАТОВ

Поведение инициального конечного детерминированного автомата $A = (S, X, Y, \delta, \lambda, s)$, где S, X, Y — конечные непустые множества состояний, входных и выходных сигналов, а $\delta: S \times X \rightarrow S$ и $\lambda: S \times X \rightarrow Y$ — функции переходов и выходов, определяется как отображение $\rho_s =$

$$= \bigcup_{p \in X^*} \{(p, \lambda(s, p))\}, \text{ где } X^* \text{ — множество всех конечных}$$

слов в алфавите X .

В задании отображения ρ_s отсутствует упорядочение, которое можно ввести на основании выбора линейного порядка ω_1 на множестве X^* первых элементов пар. Определим линейный порядок ω_1 .

Правило 1. На множестве X вводим некоторый линейный порядок (который будем обозначать $<_1$): $x_1 <_1 x_2 <_1 \dots <_1 x_k <_1 \dots$

Правило 2. Порядок ω_1 на множестве X распространим до линейного порядка на множестве X^* , полагая, что:

- для любых слов $p_1, p_2 \in X^*$ не одинаковой длины $|p_1| < |p_2| \rightarrow p_1 <_1 p_2$;

- для любых слов $p_1, p_2 \in X^*$, для которых $p_1 \neq p_2$ и $|p_1| = |p_2|$, их отношение по порядку ω_1 повторяет отношение ближайших слева несовпадающих букв слов p_1 и p_2 .

Аналогично определяется порядок ω_2 на множестве слов Y^* .

Для изображения (представления) связей между упорядоченными множествами (X^*, ω_1) и (Y, ω_2) выберем прямоугольную систему координат с осью абсцисс (X^*, ω_1) и осью ординат (Y, ω_2) . Тогда поведение инициального автомата (A, s) изображается как ломаная линия с вершинами, являющимися парами из ρ_s (рис. 1).

Геометрический образ γ_s определяет законы функционирования автомата (A, s) . Конкретное функционирование автомата, соответствующее приложению к автомату входной последовательности $p = x_{i_1} x_{i_2} \dots x_{i_k}$, представлено сечением геометрического образа по точкам с первыми координатами $x_{i_1}, x_{i_1} x_{i_2}, \dots, x_{i_1} x_{i_2} \dots x_{i_k}$ (рис. 2).

Интерполяция ломаной линии γ_s , представленной в системе координат (X^*, ω_1) и (Y, ω_2) без пропусков связей вершин линии с элементами множества X^* и взаим-

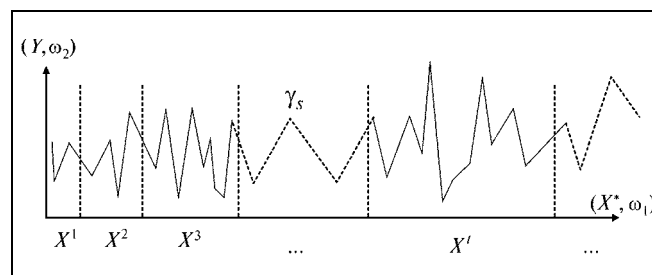


Рис. 1. Геометрический образ γ_s как изображение автоматного отображения ρ_s с использованием порядков ω_1 и ω_2 ; X^i — конкатенация i -й степени множества X

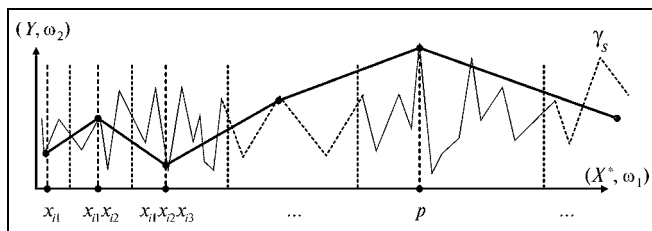


Рис. 2. Геометрический образ конкретного функционирования автомата как сечение геометрического образа γ_s по точкам, первые координаты которых являются префиксами, прикладываемой входной последовательности

нооднозначностью таких связей, позволяет по ломаной линии определять функцию переходов δ и функцию выходов λ автомата вида $A = (S, X, Y, \delta, \lambda)$ с бесконечным множеством состояний $S = \{s_p\}_{p \in X^*}$.

Определение 1. Ломаную линию z в прямоугольной системе координат с осью абсцисс (X^*, ω_1) и осью ординат (Y, ω_2) будем называть автоматной линией, если множество вершин U_z линии z удовлетворяет условиям:

- $U_z \subset X^* \times Y$;
- для каждого элемента $p \in X^*$ ($p \neq \epsilon$) существует единственный элемент $y \in Y$, для которого $(p, y) \in U_z$.

Определение 2. Пусть $A = (S, X, Y, \delta, \lambda)$ — детерминированный автомат с конечным или бесконечным множеством состояний S и конечными множествами входных сигналов X и выходных сигналов Y . Тогда:

- для каждого $s \in S$ множество $S(s) = \{s_p\}_{p \in X^*}$, определяемое правилом $s_\epsilon = s$ и для любого $p \in X^*$ ($p \neq \epsilon$) $s_p = \delta(s, p)$, будем называть множеством состояний, ассоциированных с инициальным автоматом (A, s) ;
- инициальный автомат $(F_s(A), s)$ будем называть геометрическим представлением автомата (A, s) , если $F_s(A) = (S(s), X, Y, \delta_F, \lambda_F)$, где для любых $x \in X$ и $p \in X^*$ $\delta_F(s_p, x) = s_{px}$ и $\lambda_F(s_p, x) = \lambda(\delta(s, p), x)$.

Теорема 1. Любая автоматная линия в системе координат с осью абсцисс (X^*, ω_1) и осью ординат (Y, ω_2) однозначно определяет геометрического представителя $F_s(A) = (S(s), X, Y, \delta_F, \lambda_F)$ некоторого инициального автомата вида (A, s) , где $A = (S, X, Y, \delta, \lambda)$.

Доказательство. Покажем, что автоматная линия z однозначно определяет функции $\delta_F: S(s) \times X \rightarrow S(s)$ и $\lambda_F: S(s) \times X \rightarrow Y$. Вершины $(x_1, y_{j_1}), (x_2, y_{j_2}), \dots, (x_m, y_{j_m})$ автоматной линии z определяют функции δ_F и λ_F на парах $(s_\epsilon, x_1), (s_\epsilon, x_2), \dots, (s_\epsilon, x_m)$ по правилам: $\delta_F(s_\epsilon, x_i) = s_{x_i}$, $\lambda_F(s_\epsilon, x_i) = y_{j_i}$, $1 \leq i \leq m$. Для любых $p \in X^*$ и $x \in X$ $\delta_F(s_p, x) = s_{px}$ по определению функции δ_F . По свойству автоматной линии z только одна точка линии имеет координаты (px, y) при некотором $y \in Y$. Тогда $\lambda_F(s_p, x) = y$, т. е. линией z функции δ_F и λ_F определены однозначно и на всем множестве X^* . ♦

По положению 2 для любого фиксированного интервала (t_1, t_2) диагностирования в реальном времени возможно наблюдение только в части $\gamma_s(t_1, t_2; k_1, k_2)$ образа γ_s . Эта часть определяется значением t_1 реального времени, прошедшего от начала функционирования объек-

та диагностирования, и номером k_1 такта функционирования, с которого предполагается диагностирование. Размеры интервала (t_1, t_2) задают число тактов функционирования объекта диагностирования, которое можно использовать для диагностирования. Числа $a(t_1, k_1)$ и $b(t_2, k_2)$ являются номерами входных последовательностей соответственно с которой можно начать диагностические процедуры, и после которой диагностирование исключается (рис. 3).

Таким образом, интервалом (t_1, t_2) реального времени выделяется множество W последовательностей входных сигналов, где $W = \{p: p \in X^* \& a(t_1, k_1) \leq r(p) < b(t_2, k_2)\}$, продолжение которых можно использовать при техническом диагностировании. Возможные наблюдаемые реализации на такие диагностические процедуры представлены отдельными точками части $\gamma_s(t_1, t_2; k_1, k_2)$ геометрического образа γ_s .

Частью $\gamma_s(t_1, t_2; k_1, k_2)$ определяется множество возможных вариантов функционирования, из которого при каждом конкретном варианте $p = p'x_{i_1}x_{i_2}\dots x_{i_\omega}$ наблюдаются только связи $(p'x_{i_1}, Y_{j_1}), (p'x_{i_1}x_{i_2}, Y_{j_2}), \dots, (p'x_{i_1}x_{i_2}\dots x_{i_\omega}, Y_{j_\omega})$ (рис. 3).

Проведенные рассуждения позволяют сделать вывод о том, что математический формализм в определении функционирования объектов диагностирования, ограниченных положениями 1 и 2, представляет процесс получения диагностической информации как конечное множество точек геометрического образа γ_s . Эти точки извлечены из частей вида $\gamma_s(t_1, t_2; k_1, k_2)$ образа γ_s и определяют диагностическую информацию как промежуточную, так и заключительную для логических выводов. Из принимаемого положения 3 следует, что свободный выбор интервала времени для получения диагностической информации требует, чтобы известные и подтверждаемые в процессе диагностирования отдельные точки геометрического образа были явно представлены математической моделью объекта диагностирования на любом (достаточно большом) интервале абстрактной оси времени. Ось абсцисс (X^*, ω_1) преобразуется в ось абстрактного времени на основе замены элементов множества X^* их номерами по линейному порядку ω_1 . Для этого используются следующие теоремы 2—4.

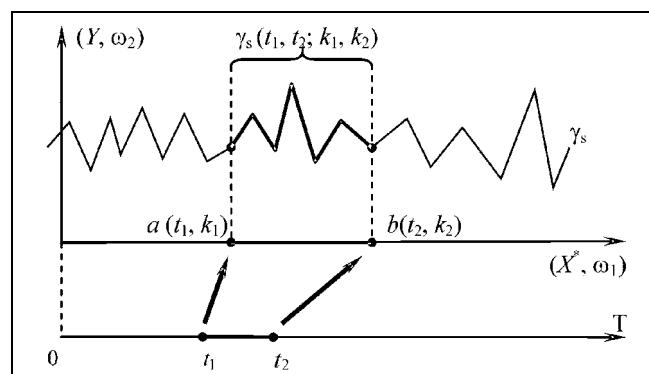


Рис. 3. Схема связи интервалов (t_1, t_2) и (k_1, k_2) с частью $\gamma_s(t_1, t_2; k_1, k_2)$ геометрического образа γ_s



Теорема 2. Пусть $p \in X^*$ и $p = x_{i_1} x_{i_2} \dots x_{i_k}$, где $k \in N^+$. Тогда номер $r(p)$ слова p по порядку ω_1 определяется равенством

$$r(p) = \sum_{j=1}^k r(x_{i_j}) |X|^{j-1} - 1. \blacklozenge$$

Теорема 3. Пусть $p \in X^*$ и $x \in X$. Тогда разность номеров по порядку ω_1 $r_1(px) - r_1(p)$ определяется по формуле

$$r_1(px) - r_1(p) = (|X| - 1)r_1(p) + r_1(x). \blacklozenge$$

Теорема 4. Пусть γ_{s_0} — геометрический образ в геометрии Γ_1 некоторого инициального конечного детерминированного автомата (A, s_0) с множеством входных сигналов X , $p \in X^*$ ($p \neq \varepsilon$) и $s = \delta(s_0, p)$. Тогда образ γ_s инициального автомата (A, s) образован точками, первые координаты которых имеют номера r , определяемые неравенствами

$$\sum_{j=0}^v |X|^j + r_1(p) |X|^v \leq r \leq \sum_{j=0}^{v-1} |X|^j + (r_1(p) + 1) |X|^v - 1. \blacklozenge$$

Доказательства теорем см., например, в работе [6].

Основной задачей, решение которой удовлетворяет положению 3, является разработка идеи и основанного на ней метода размещения некоторых точек геометрического образа γ_s на всей неограниченной оси времени. Для этого разработаны три подхода:

- применение принципа: у любого конечного детерминированного автомата имеются такие его подавтоматы, с помощью которых на любом, как угодно удаленном, интервале времени достаточно просто определяются некоторые точки геометрического образа;
- замена функциональной связи от оси (X^*, ω_1) к оси (Y, ω_2) связью только между упорядоченными значениями функции, т. е. рассмотрением рекуррентной зависимости в последовательности вторых координат точек геометрического образа γ_s ;
- изоморфное вложение словарного геометрического образа γ_s в главный квадрант декартовой системы координат на евклидовой плоскости на основании числовых номеров элементов множеств X^* и Y (соответственно по порядкам ω_1 и ω_2) и использование развитого математического аппарата интерполяции и экстраполяции.

2. ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИЕ АВТОНОМНЫЕ ПОДАВТОМАТЫ ИНИЦИАЛЬНЫХ АВТОМАТОВ

Рассмотрим инициальный конечный детерминированный автомат (A, s) , где $A = (S, X, Y, \delta, \lambda)$, и бесконечное семейство ассоциированных с ним инициальных автономных подавтоматов $\alpha = \{a_p\}_{p \in X^*}$, определяемых правилом $a_p = (S, \{p\}, Y, \delta_p, \lambda_p)$, где для любого $s \in S$ $\delta_p(s, p) = \delta(s, p)$ и $\lambda_p(s, p) = y$, где y — последняя буква выходного слова $\lambda(s, p)$.

Предлагаемые интерполяция и экстраполяция разработаны на основе теоремы 23 из работы [13]. Ее анало-

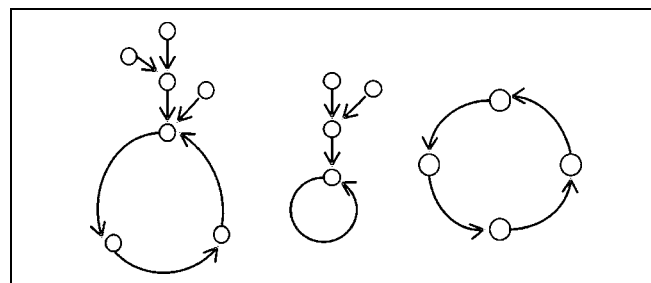


Рис. 4. Пример структуры диаграммы Мура автомата вида $a = (S, \{p\}, Y, \delta_a, \lambda_a)$

гом для случая инициальных автономных подавтоматов заданного автомата является

Теорема 5. Пусть $A = (S, X, Y, \delta, \lambda)$ — конечный детерминированный автомат и $p \in X^*$. Тогда диаграмма Мура автономного автомата $a_p = (S, \{p\}, Y, \delta_p, \lambda_p)$, где для любого $s \in S$ $\delta_p(s, p) = \delta(s, p)$, $\lambda_p(s, p)$ — последняя буква выходного слова $\lambda(s, p)$, имеет следующую структуру:

- диаграмма состоит из конечного множества изолированных связанных графов;
- каждый граф имеет точно один цикл или петлю;
- вершины цикла (или вершина петли) могут быть корнями деревьев. $\blacklozenge$

Диаграмма Мура инициального автономного автомата имеет точно одну компоненту связности (рис. 4).

Теорема 5 позволяет использовать специфическую структуру автономных подавтоматов типа a_p для достаточно простого и без рекурсивных вычислений размещения пар вида (p^v, y_{jv}) , где v — целое положительное число, на всей оси абстрактного времени. На рис. 5 показано размещение точек геометрического образа, определяемых циклами в диаграммах Мура для автономных подавтоматов.

Точкам $p^1, p^2, \dots, p^k, \dots$, где $p \in X^*$, начиная с некоторого числа k_0 , соответствуют только обходы цикла в диаграмме Мура инициального автономного подавтомата $a_p = (S, \{p\}, Y, \delta_p, \lambda_p, s_0)$. Для любого числа $n \in N$ бесконечное множество точек геометрического образа того автомата, подавтоматом которого является a_p , определяемых циклами диаграммы Мура для подавтомата a_p .

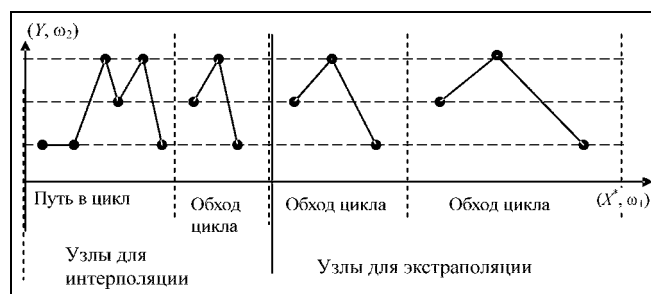


Рис. 5. Схема размещения узлов интерполяции, определяемых циклами в диаграммах Мура для инициальных автономных подавтоматов

Множество точек геометрического образа γ_s , первыми координатами которых являются элементы последовательности $p^{k_0}, p^{k_0+1}, \dots$, может использоваться как множество интерполяционных узлов для методов приближенного представления законов функционирования автоматов.

3. МЕТОДЫ ИНТЕРПОЛЯЦИИ И ЭКСТРАПОЛЯЦИИ ЗАКОНОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

Конструктивизм аппарата символьной математики, представленный табличными, матричными и графовыми средствами задания автоматов, ограничен для практического применения. Основными препятствиями оказываются большие размеры математических описаний и нереализуемость их рекурсивной расшифровки. Для других, недиагностических, целей в математике разработаны методы интерполяции и экстраполяции, позволяющие по неполным данным определять математические структуры. Основные задачи заключаются в выборе узлов интерполирования и построении интерполяционных функций. Перевод словарных координат (p, y) точек геометрического образа γ_s в целочисленные координаты $(r_1(p), r_2(y))$, где $r_1(p)$ и $r_2(y)$ номера $p \in X^*$ и $y \in Y$ соответственно по порядкам ω_1 и ω_2 , позволяет применять интерполяцию и экстраполяцию для диагностических моделей в полном объеме. Если выбор узлов интерполяции свести к построению диаграмм Мура для инициальных автономных подавтоматов типа a_p , где $p \in X^*$, и использованию циклов соответствующих компонент связности диаграмм, то одной из основных задач становится выбор семейства подавтоматов $\{a_u\}_{u \in U}$, где $U \subset X^*$. Вторая основополагающая задача — это выбор и разработка интерполяционных функций. Здесь первичными решениями могут быть классические методы интерполяции.

Новой задачей оказывается интерполирование на всей оси (X^*, ω_1) , точнее, оси номеров входных последовательностей, при условии, что «расстояние» между узлами обхода цикла увеличивается (см. рис. 5). Интерполирование при техническом диагностировании больших и сложных систем необходимо как для расширения модели на интервалы неопределенных связей входных и выходных сигналов объекта диагностирования, так и для замены попыток точно описать объект приближенной моделью.

4. ИНТЕРПОЛЯЦИЯ НА ОСНОВЕ РЕКУРРЕНТНЫХ ФОРМ

Как уже отмечалось, связь элементов упорядоченного множества (X^*, ω_1) с элементами множества Y может быть заменена связью элементов в последовательности вторых координат точек геометрического образа γ_s . В этом случае для начальной части любой конечной длины из геометрического образа существует рекуррентная форма конечного порядка, определяющая эту начальную часть образа. При зафиксированном порядке рекуррентной формы определяемая формой последовательность состоит из начальной части конечной длины и бесконечной периодической части.

Пусть $u = y_{i_1}, y_{i_2}, \dots, y_{i_t}, \dots$ последовательность вторых координат точек геометрического образа γ_s и $F(z_1, z_2, \dots, z_m) = z_{m+1}$ — рекуррентная форма порядка m для последовательности u , т. е. для любого $k \geq m$ для последовательности u выполняется равенство

$$y_{j_{k+1}} = F(y_{j_{k-m+1}}, y_{j_{k-m+2}}, \dots, y_{j_k}). \quad (1)$$

Рекуррентная форма $F(z_1, z_2, \dots, z_m) = z_{m+1}$ может рассматриваться как интерполяционная функция частного типа и использоваться для приближенного задания законов поведения объекта диагностирования.

Существенным увеличением эффективности при интерполяции геометрического образа автомата является задание последовательности вторых координат точек геометрического образа рекуррентными формами для некоторых подпоследовательностей точек геометрического образа.

5. МЕТОДЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

Сформулированные во Введении положения 1—5 характеризуют класс задач технического диагностирования, решение которых требует отказа от традиционных и распространенных взглядов и методов технического диагностирования. Известный формальный аппарат с представлением объектов диагностирования таблицами, матрицами, графами и логическими уравнениями и почти очевидными методами построения тестов перестает быть определяющим. Методическое и вспомогательное значение этого аппарата сохраняется.

Основу предлагаемых методов решения задач технического диагностирования составляют результаты анализа и разработок, изложенные в § 1—3 и в работах [4—13]. Эти методы обеспечены конструктивизмом (точными процедурами, моделями, формальными критериями и т. п.) фрагментарно, и в них включаются еще не полученные решения некоторых вопросов, что является следствием новизны методов. Отметим, что принципиальные математические структуры (таблицы, графы и т. п.) остаются не только как элементы в предметном языке теории, но и необходимы с методической и конструктивной точки зрения.

Исходными данными для рассматриваемых методов технического диагностирования являются полностью или частично определенные геометрические образы конечных или бесконечных детерминированных автоматов. Получение диагностической информации с помощью экспериментов с автоматами ограничивается возможностями взаимодействия средств диагностирования с объектами, выделенными положениями 1—5 (см. Введение). Алгоритмизация методов в данной статье не представлена.

5.1. Метод технического диагностирования сложных систем с использованием геометрических образов автоматов

1 этап. Построение математических моделей средств технического диагностирования в форме связи диагностических взаимодействий с реакциями на них объекта диагностирования. Сведение моделей разнородных диагностических средств (тестирования, измерения физи-



ческих параметров, решения диагностических задач, визуального осмотра, автоматической сигнализации) к единой общей модели.

II этап. Построение математических моделей в форме геометрических образов для объекта диагностирования, включающее в себя разработку геометрических образов на основе интерполяции и экстраполяции:

- выбор узлов интерполяции, представляющих известные фрагменты поведения объекта диагностирования;
- разработку интерполяционных функций, описывающих объект диагностирования в работоспособном состоянии и при учитываемых неисправностях;
- построение моделей объекта диагностирования, базирующихся на интерполяционных функциях.

III этап. Разработка стратегии поведения диагностического эксперимента на основе анализа геометрических образов, позволяющей эффективно получить диагностическую информацию для решения задачи.

IV этап. Реализация диагностического эксперимента в соответствии со стратегией, разработанной на этапе III.

5.2. Пример схемы реализации метода технического диагностирования

На **этапе I** решаются две задачи: совмещение разнородных средств технического диагностирования в единую процедуру и представление в этой процедуре ресурсов, режимов, ограничений на процесс диагностирования. Для решения первой задачи используется структурное представление входных x и выходных y сигналов объекта диагностирования: $x = (x^1, x^2, \dots, x^a)$ и $y = (y^1, y^2, \dots, y^a)$, где для каждого i , $1 \leq i \leq a$, связь x^i и y^i соответствует конкретному средству диагностирования (тестированию, измерению физических параметров, решению диагностической задачи, визуальному осмотру и т. п.). Одним из частных решений второй задачи является выделение на оси (X^*, ω_1) или в геометрическом образе γ_s точек и частей, выбираемых для получения диагностической информации (рис. 6). На этом рисунке показаны части геометрических образов автоматов, доступные для наблюдения рассматриваемыми средствами диагностирования.

Этап 2 метода включает в себя решения задач построения математических моделей, описывающих работоспособное состояние объекта и учитываемые его не-

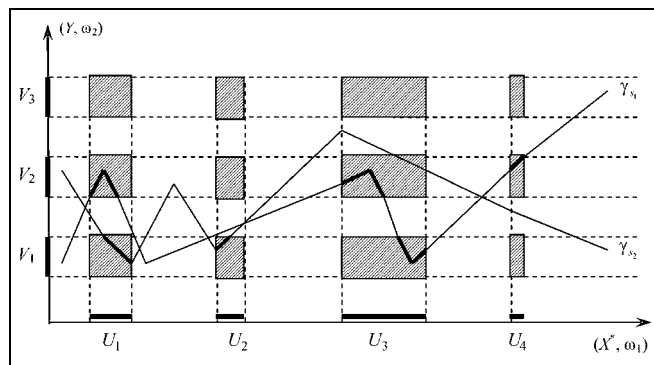


Рис. 6. Выделение областей (U_i, V_j) диагностической информации, доступной для применяемых средств диагностирования

исправности. Основными идеями, на которых конструируются модели:

- построение интерполяционных узлов по неполной информации об объекте диагностирования, базирующееся на размещении узлов на всей оси (X^*, ω_1) , определяемых как вершины циклов диаграмм инициальных автоматов подавтоматов (см. рис. 6);
- построение интерполяционной функции традиционными средствами (интерполяционные формулы Лагранжа, Ньютона, Гаусса, Стирлинга, Бесселя) или в виде рекуррентной формы (1).

На **этапе III** определяется стратегия проведения эксперимента с объектом диагностирования для получения диагностической информации. Достаточная полнота диагностической информации зависит от размещения частей геометрических образов выделенных на этапе I областей потенциальной диагностической информации. Критерием существования решения диагностической задачи является существование для каждой пары геометрических образов выделенной на этапе I области, в которой образы не совпадают. Для поиска стратегии проведения диагностического эксперимента можно использовать построение и анализ частично определяемого дерева вариантов функционирования расщепляемого автомата. Входные и выходные сигналы расщепляемого автомата определяются реализацией I этапа метода. Структура расщепляемого автомата неявно и только частично разрабатывается на втором этапе реализации метода. В дереве вариантов функционирования расщепляемого автомата, построенного для семейства автоматов, задающего модель работоспособного объекта и его учитываемые неисправности, должны быть представлены положениями 1—5 (см. Введение).

Этап IV в рассматриваемом методе выделен из теоретических разработок моделей и стратегии получения диагностической информации и является этапом получения фактических данных в условиях реального эксперимента. Правила логического вывода, дающие результаты эксперимента, представлены в стратегии технического диагностирования.

6. КЛАССИФИКАЦИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ОБРАЗОВ ЗАКОНОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

Новый способ геометрического задания законов функционирования дискретных детерминированных объектов технического диагностирования позволяет построить классификацию геометрических образов на основе рекуррентного представления последовательностей вторых координат точек геометрического образа. Введение линейного порядка ω_1 на множестве последовательностей входных сигналов X^* линейно упорядочивает автоматное отображение $p_s = \bigcup_{p \in X^*} \{(p, \lambda(s, p))\}$ и по-

рождает последовательность $\xi = \langle pr_1 \lambda(s_1, x_1), pr_1 \lambda(s, x_2), \dots, pr_1 \lambda(s, x_m), pr_2 \lambda(s_1, x_1 x_1), \dots, pr_a \lambda(s, p), \dots \rangle$, где $a = |p|$ и $pr_i(q)$ обозначает i -ю букву слова q . Любая рекуррентная форма $F(z_1, z_2, \dots, z_m) = z_{m+1}$, $z_i \in U$, любого порядка m при конечном множестве U определяет последовательность, которая, начиная с некоторого элемента, яв-

ляется периодической. Упростим представление последовательности ξ до вида $\xi = \langle u(1), u(2), \dots, u(i), \dots \rangle$ и ограничимся рассмотрением ее начального отрезка $\xi = \langle u(1), u(2), \dots, u(k_0) \rangle$.

В качестве базовых параметров и характеристик для классификации последовательностей вида ξ будем использовать:

1) наименьший порядок m_0 рекуррентной формы, определяющей последовательность ξ ;

2) последовательность $|\xi_1|, |\xi_2|, \dots, |\xi_{m_0}| = |\xi|$ длин префиксов последовательности ξ , определяемых рекуррентными формами порядков 1, 2, ..., m_0 при наименьших возможных порядках форм;

3) набор из m_0 последовательностей

$$\begin{aligned} &|\xi_{11}|, |\xi_{12}|, \dots, |\xi_{1k_1}| \\ &|\xi_{21}|, |\xi_{22}|, \dots, |\xi_{2k_2}| \\ &\dots \\ &|\xi_{m_0}| = |\xi| \end{aligned}$$

длин отрезков последовательности ξ , определяемых правилами: $|\xi_{ij}|$ — наибольшая длина отрезка, определяемого рекуррентной формой порядка i и не определяемого рекуррентной формой, использованной для отрезка ξ_{ij-1} .

Параметры и характеристики, введенные в п. 1—3, можно дополнить на основе учета сложности используемых рекуррентных форм. Для этого определим сложность каждого отрезка $\xi_i(\xi_{ij})$ суммой весов всех наборов значений аргументов рекуррентной формы, использованных при определении отрезка $\xi_i(\xi_{ij})$ последовательности ξ .

Пусть $\bar{u} = (u(t - m), u(t - m + 1), \dots, u(t - 1))$. Вес $d(\bar{u})$ набора $\bar{u}$ представим формулой: $d(\bar{u}) = m_0 + \alpha$, где m_0 — наименьший порядок рекуррентной формы, определяющей последовательность $\langle \bar{u} \rangle$ или обратную к ней $\langle \bar{u}^{-1} \rangle$. Тогда весом рекуррентной формы при определении отрезка $\xi_i(\xi_{ij})$ полагаем сумму весов всех использованных на отрезке наборов аргументов. Это позволяет углубить классификацию последовательностей, построенную на основе пунктов 1—3, дополнением к этим пунктам значений весов использованных рекуррентных форм. Следовательно, основными положениями предлагаемой классификации автоматных моделей объекта диагностирования (модели работоспособного объекта и модели его неисправностей) оказываются спектры характеристик, построенные в соответствии с пунктами 1—3, и их расширений с использованием весовых характеристик. Такая классификация позволит выделить классы объектов диагностирования и разрабатывать для них эффективные методы поиска стратегий технического диагностирования сложных систем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье предложен метод технического диагностирования больших и сложных систем, относительно которых выделены специфические свойства (положения 1—5). На основе этих свойств обоснована необходимость диагностических моделей, базирующихся на

интерполяции и экстраполяции. Для этого разработаны символьные геометрические образы законов функционирования автоматов и геометрические образы конкретных вариантов функционирования.

Частичная диагностическая информация, имеющаяся и полученная в процессе эксперимента (процессе диагностирования), преобразуется в узлы интерполяции в результате замены словарных координат точек геометрического образа числовыми координатами. Оказываются применимыми стандартные приемы интерполяции и экстраполяции. Разработано рекуррентное задание геометрических образов. Кроме этого, найден прием, как при частично определенной автоматной модели формировать узлы интерполяции на всей абстрактной оси времени функционирования объекта диагностирования. Для этого используется найденная специфика структуры диаграмм Мура для инициальных автономных подавтоматов, задающих работоспособную систему и рассматриваемые ее неисправности. Предложенные принципы классификации дискретных детерминированных объектов диагностирования на основе свойств геометрических образов автоматов могут стать основой для разработки стратегии диагностирования сложных систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мур Э. Умозрительные эксперименты с последовательными машинами // В кн.: Автоматы. — М.: ИИЛ, 1956.
2. Гилл А. Введение в теорию конечных автоматов. — М.: Наука, 1966.
3. Основы технической диагностики / Под ред. П. П. Пархоменко. — М., 1976. Вып. 1.
4. Твердохлебов В. А. Распознавание автоматов на основе геометрической интерпретации // Тез. докл. XI Международной конференции «Проблемы теоретической кибернетики». — Москва, 1996. — С. 191.
5. Твердохлебов В. А. Техническое диагностирование в геометрической интерпретации задач, моделей и методов // Материалы Междунар. конф. «Автоматизация проектирования дискретных систем». — Минск, 1995. — Т. 1. — С. 97.
6. Твердохлебов В. А. Построение и анализ геометрических образов конечных автоматов // Сб. науч. тр. ИПТМУ РАН «Проблемы точной механики и управления». — Саратов, 2002. — С. 94—100.
7. Твердохлебов В. А. Дискретные пространства в задачах управления и диагностирования // Докл. Академии военных наук. — 2003. — № 9. — С. 102—108.
8. Tverdohlebov V. A. The general features of geometrical images of finite state machines // Proc. of East-West Design & Test Workshop (EWDTW2004). — Alushta, 2004. — P. 243—247.
9. Твердохлебов В. А. Геометрические образы конечных детерминированных автоматов // Изв. Саратовского университета (Новая серия) 2005. — Т. 5, вып. 1. — С. 141—153.
10. Твердохлебов В. А. Техническое диагностирование изменений параметров и свойств систем // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. — 2006. — № 6. — С. 119—123.
11. Твердохлебов В. А. Геометрические образы поведения дискретных детерминированных систем // Там же. — 2006. — № 5. — С. 161—165.
12. Резчиков А. Ф., Твердохлебов В. А. Техническое диагностирование мехатронных систем // Мехатроника. Автоматизация. Управление. — 2003. — № 2. — С. 2—6.
13. Богомолов А. М., Твердохлебов В. А. Диагностика сложных систем. — Киев: Наукова думка, 1974. — С. 103.

☎ (8452) 22-10-42

e-mail: Tverdohlebov-VA@yandex.ru

Статья представлена к публикации членом редколлегии О. П. Кузнецовым. □