

УДК 681.518.54;004.3.001.4

В.А. ТВЕРДОХЛЕБОВ*Институт проблем точной механики и управления РАН, Россия***МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЙ В ДИСКРЕТНЫХ ФАЗОВЫХ КАРТИНАХ ПРИ ТЕХНИЧЕСКОМ ДИАГНОСТИРОВАНИИ**

Фазовые картины представляют поведение объектов технического диагностирования и управления. Для этого дуги и вершины графов, являющихся фазовыми картинами, имеют метки состояний и воздействий, изменяющих состояния. Для сложных систем фазовые картины определены не полностью. В статье изложены методы доопределения частично заданных фазовых картин до таких фазовых картин, в которых представлены все допускаемые для анализа фазовые траектории. В данной статье используется материал, содержащийся в статье [1].

фазовая картина, фазовая траектория, дискретная детерминированная динамическая система, дискретный детерминированный автомат, геометрический образ законов функционирования, состояния, воздействие на систему и состояния, входной сигнал, выходной сигнал

Введение

Систематизация воздействий и взаимосвязей между процессами, событиями, явлениями и т.п. на уровне моделей может быть представлена фазовой картиной в соответствующем пространстве (топологическом, метрическом и т.д.). Для этого в качестве модели используются динамические системы. Состояния полагаются точками пространства, и фазовые картины рассматриваются как множество траекторий в пространстве, формируемых на основе законов функционирования системы. Точки пространства являются статическими моделями рассматриваемых и учитываемых свойств и параметров системы и характеризуют систему в отдельные моменты времени. Фазовой траекторией представлена последовательность точек, а связь соседних точек рассматривается как результат воздействия на систему, представленную предшествующей точкой. В случае функционирования дискретной детерминированной динамической системы в форме автомата фазовая картина представлена диаграммой Мура и точки используемого топологического пространства интерпретируются как состояния автомата. В задачах технического диагностирования больших систем соответствующие фазовые траектории могут быть час-

точно заданы и построены с не полностью определенными метками дуг. Возникают задачи доопределения меток дуг в фазовых картинах и доопределения структуры фазовой картины. Если полагать, что каждая дуга в графе, представляющем структуру фазовой картины, соответствует конкретному воздействию (конкретной силе, формирующей ориентированную связь точек), то доопределение дугами структуры фазовой картины может интерпретироваться как уточнение действующих воздействий на систему. Разработанные методы относятся к методам (дискретных) фазовых пространств для дискретных детерминированных динамических систем, одним из фундаментальных классов которых является конечные и бесконечные по числу состояний детерминированные автоматы.

Рассматриваются задачи, в условиях которых задана полностью или частично структура фазовой картины без указания воздействий, определяющих переход в фазовой картине от одной точки к другой. Требуется дополнить частично заданную фазовую картину такими метками дуг, которые представляют воздействия. При этом определяется минимальный базовый набор воздействий.

При техническом диагностировании дискретных

детерминированных динамических систем, имеющих в качестве моделей дискретные детерминированные автоматы, фазовые картины могут быть представлены геометрическими образами с символическими и числовыми координатами (см. работы [2 - 7]). Такое представление позволяет доопределять фазовые картины с использованием классических методов интерполяции. В простейшем случае фазовой картины для автомата рассматриваемая задача имеет достаточно простое решение. В задаче диаграмма Мура (диаграмма автомата) представлена без меток входных сигналов и, возможно, не полностью, то есть не всеми дугами. Требуется восстановить диаграмму автомата в некотором полном варианте, удовлетворяющем дополнительным требованиям и ограничениям. Для так поставленной задачи очевидно простое решение перебором возможных вариантов и их анализом, которые практически реализуемы только для небольших диаграмм.

Метод определения воздействий в частично заданных диаграммах Мура

Предполагается, что дискретная фазовая картина частично определённого конечного детерминированного автомата типа Мура $B = (S, X, Y, \delta, \mu)$, где S, X и Y – множества состояний, входных и выходных сигналов, а $\delta: S \times X \rightarrow S$ и $\mu: S \rightarrow Y$ функции переходов и отметок состояний, задана частичной диаграммой Мура $D = (s, \rho)$, где $\rho \subset S \times S$. Структура диаграммы D определена функцией δ и интерпретацией связей состояний автомата B в фазовых траекториях на основе уравнения динамики $s(t+1) = \delta(s(t), x(t))$. Входные сигналы полагаются воздействиями, формирующими фазовые траектории. Предполагается, что в диаграмме D символами входных сигналов помечены все имеющиеся в D дуги или помечены только некоторые дуги, включая возможный вариант отсутствия в диаграмме D меток входных сигналов.

Введём следующие обозначения:

X – множество входных сигналов, представленных в частично заданной диаграмме D ;

$v(s)$ – число дуг, исходящих из s в диаграмме D ;

$$v_D = \max_{s \in S} v(s);$$

$$v_A = \max(|X|, v_D);$$

$$\bar{v}(s) = v_A - v(s).$$

Метод определения воздействий по частично заданной фазовой картине законов функционирования конечного детерминированного автомата состоит из реализации следующих этапов:

1. для заданной диаграммы D определяются величины X и $v(s)$ для всех $s \in S$, вычисляются величины v_D, v_A и $\bar{v}(s)$ для всех $s \in S$.

2. Диаграмма D дополняется новыми дугами по правилу:

- если $v_D \leq |X|$, то для каждой вершины $s \in S$ добавляется $v_D - |X|$ новых, исходящих из s , дуг;

- если $v_D > |X|$, то для каждой вершины $s \in S$ добавляется $|X| - v_D$ новых, исходящих из s , дуг;

- при выполнении отношения $v_D > |X|$ множество X дополняется новыми $|X| - v_D$ входными сигналами.

3. На добавленных в диаграмму D дугах для каждого $s \in S$ взаимнооднозначно размещаются символы таких входных сигналов из множества X , которых нет в исходном варианте диаграммы D .

4. Методом, изложенным в работах [2 - 7], полученная диаграмма автомата Мура может быть преобразована в геометрический образ с символическим и с числовыми координатами точек. На основании этого множество воздействий, формирующих фазовую картину, линейно упорядочивается всем геометрическим образом для фазовой картины, а сечениями геометрического образа – для отдельных фазовых траекторий.

В рассмотренном методе доопределения диа-

граммы Мура для конечного детерминированного автомата включены процедуры выбора связей вершин новыми дугами и выбор размещения меток входных сигналов по дугам, не имеющим таких меток. Эти процедуры могут быть уточнены как на основе формальных критериев, так и с использованием имеющейся интерпретации частично заданной фазовой картины. Примерами таких критериев являются дублирование новыми дугами уже имеющих связей вершин диаграммы, то есть преобразование графа в мультиграф, и дублирование связей вершин, представленных в диаграмме путями, отдельными дугами. Размещение меток входных сигналов по введённым в диаграмму новым дугам должно представлять воздействия (силы), преобразующие содержательные свойства вершин. Включение в диаграмму дуг, образующих новые связи вершин, и воздействий (входных сигналов), которые отсутствуют в первоначальной диаграмме, должно согласовываться с содержательной интерпретацией вершин и дуг в фазовой картине.

Метод определения воздействий в частично заданной фазовой картине

В простейшем варианте этого метода (восстановлении диаграммы Мура) реализованы некоторые основные положения общего метода.

Постановка задачи

Задан ориентированный граф $G = (W, \rho)$, где W – множество вершин, а $\rho \subset W \times W$ – множество дуг, с выделенной начальной вершиной $w_0 \in W$. В графе G для каждой вершины w имеется путь, начинающийся с вершины w_0 и проходящий через вершину w . (Таким графом может быть дерево, сеть или структура из сети, дополненной контурами). Вершины графа G помечены наборами наблюдаемых меток, обозначающих специфику свойств конкретных вершин. Предполагается, что нет вершин с одинаковыми метками и воздействия (силы), изменяющие совокупности свойств, представленных в вер-

шинах метками, по их ориентации соответствует ориентации дуг. Требуется:

1. доопределить граф G до полностью определенной структуры фазовой картины и полной разметки дуг символами, обозначающими воздействия из некоторого базового варианта воздействий с наименьшим числом элементов;
2. найти числовую функцию, определяющую связь вершин графа, т.е. точек фазовой картины, задаваемую структурой доопределенного графа.

На основании линейных порядков ω_1 на множестве X^* и ω_2 на множестве Y и существовании наименьшего по порядку элемента $x_1 \in X^*$ определяется линейный порядок ω на автоматном отображении $\rho'_s = \bigcup_{p \in X^*} \{(p, \lambda'(s, p))\}$. Линейно упорядоченное множество (ρ'_s, ω) рассматривается как график в прямоугольной системе координат с осями абсцисс (X^*, ω_1) и ординат (Y^*, ω_2) . Каждый элемент $p \in X^*$ и $y \in Y$ имеют, соответственно, номер $r_1(p) \in \mathbb{N}^+$ по порядку ω_1 и $r_2(y) \in \{1, 2, \dots, l\}$. Это позволяет размещать геометрический образ законов функционирования автомата (см. [2 - 7]) как в символьной системе координат, так и в прямоугольной декартовой системе координат на плоскости.

Метод состоит из реализации следующих этапов:

1. Преобразование частично заданной фазовой картины дискретной детерминированной динамической системы в частично определённый геометрический образ законов её функционирования.
2. Доопределение частичного геометрического образа законов функционирования системы до полного, выборочной длины, начального отрезка геометрического образа.
3. Построение интерпретации первых координат точек геометрического образа как воздействий, формирующих фазовую картину.
4. Построение числовых функций, определяю-

щих связи точек в фазовых траекториях. Для этого используется геометрический образ с точками, имеющими числовые координаты, методы интерполяции геометрических образов на основе числовых последовательностей вторых координат точек образов, и методы размещения точек геометрических образов на кривых линиях на плоскости (см.[1 - 7]).

Преобразование фазовой картины дискретной детерминированной системы в геометрический образ

Фазовая картина законов функционирования дискретной детерминированной системы преобразуется в график с точками, имеющими символьные координаты (см. рис. 1.), и в график с числовыми координатами точек (см. рис. 2.)

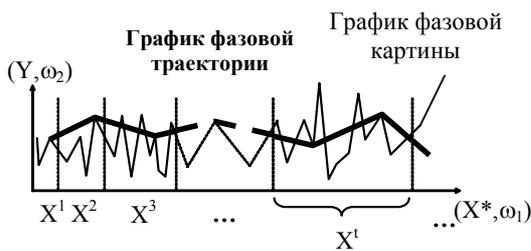
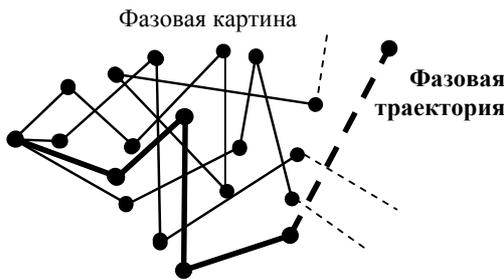


Рис. 1. Фазовая картина и её преобразование в график с точками, имеющими символьные координаты

Имеются теоремы, дающие простые процедуры вычисления по символьным координатам их числовых аналогов.

Размещение фазовых траекторий как сечений фазовых картин позволяет представлять фазовые картины и траектории графиками (см. рис. 1, 2).

Доопределение частичного геометрического образа, представляющего частичную фазовую картину

Частично заданному геометрическому образу законов функционирования дискретной системы соответствуют:

- частично определённый числовой график в первом квадранте декартовой прямоугольной системы координат;

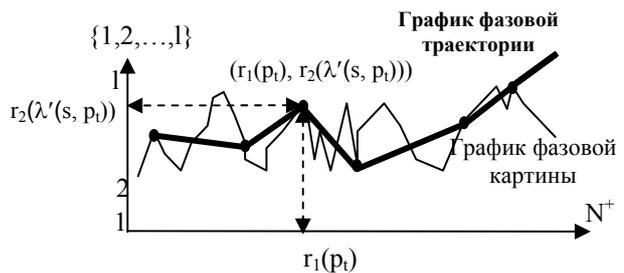


Рис. 2. Числовые графики фазовой картины и фазовой траектории для конечного детерминированного автомата $A = (S, X, Y, \delta, \lambda, s_0)$.

- числовая (цифровая) последовательность, содержащая символ e , обозначающий неизвестные элементы в последовательности.

Как уже отмечалось, частично заданный геометрический образ законов функционирования при известном множестве воздействий может быть доопределён с использованием классических методов интерполяции и экстраполяции. В этом случае множество воздействий, имеющееся в исходной частичной фазовой картине не расширяется, а только "расшифровываются" воздействия, совмещённые с новыми дугами. Более сложный случай доопределения геометрического образа связан с расширением множества воздействий (множества входных сигналов системы). Для этого в частично определённой фазовой картине должна иметься хотя бы одна точка, из которой исходит дуг больше чем число взаимодействий, которые представлены метками в (исходной) фазовой картине. Это означает, что на оси абсцисс системы координат, в которой будет изображён геометрический образ, размещены элементы

множества U^* , где $U = X \cup Z$, X – множество имеющих в исходной фазовой картине меток воздействий, а Z – множество меток дополняющих воздействий. На множестве U определяется линейный порядок ω_1 , распространяемый на множество U^* . Множество U^* или его подмножество, использованное при преобразовании фазовой картины в геометрический образ, полагается множеством воздействий, формирующих фазовую картину. Для точек, первые координаты которых содержат элементы из множества Z , вторые координаты требуют задания.

При доопределении частично заданной фазовой картины системы используется:

- введение новых дуг для представления связей точек имевшимися в исходной фазовой картине воздействиями;
- введение новых воздействий для определения связей точек такими дугами, которые не имеют меток воздействий;
- выбор размещения меток воздействий по дугам.

Введение новых дуг и размещение меток воздействий по дугам порождают варианты доопределения фазовых картин. Систематизацию действий по доопределению фазовых картин предлагается проводить в три этапа:

1. построение частичного геометрического образа законов функционирования системы по частичной фазовой картине;
2. доопределение частичного геометрического образа до полного (по выбранному условию полноты);
3. построение фазовой картины по полному геометрическому образу.

В рассматриваемых фазовых картинах предполагается, что точки и дуги имеют интерпретацию и представляют состояния и входные сигналы дискретных детерминированных динамических систем. Процессы изменений состояний определяются фазовыми траекториями. В задачах технического диаг-

ностирования и задачах управления обязательно предполагается, что фазовая траектория наблюдается по диагностическим признакам (при техническом диагностировании) и по обратной связи (при управлении). В связи с этим в фазовых картинах имеются предполагаемые для наблюдений или метки состояний (например, в графах для автоматов типа Мура), или метки дуг (например, в графах для автомата Мили).

В геометрических образах законов функционирования автоматов (см. [2 - 7]) связь входных и выходных сигналов представлена явно, так как геометрические образы являются результатов введения линейного порядка на автоматном отображении. В геометрических образах законов функционирования дискретных детерминированных динамических систем (то есть дискретных детерминированных автоматов с конечным или бесконечным множеством состояний) функция изменения состояний определяется явно и точно, если в качестве множества состояний рассматривать множество $S = \{s_p\}_{p \in X^*}$, а функцию изменения состояний $\delta: S \times X \rightarrow S$ определять правилом: для любых $x \in X$ и $p \in X^*$ $\delta(s_p, x) = s_{px}$, а s_ε – начальное состояние, для которого $\delta(s_\varepsilon, p) = s_p$. В соответствии с правилами построения геометрических образов законов функционирования систем с дискретными множествами состояний, входных и выходных сигналов на оси абсцисс системы координат, в которой изображается геометрический образ, для каждого состояния s_p системы имеется взаимнооднозначно определяемый отрезок из m точек, где $m = |X|$. Такими точками являются px_1, px_2, \dots, px_m . Для каждой из этих точек $px_i, 1 \leq i \leq m$, геометрический образ определяет точку $y_{ji} = \tilde{\lambda}(s_\varepsilon, px_i)$, где $\tilde{\lambda}(s_\varepsilon, px_i)$ – последний выходной сигнал в последовательности выходных сигналов $\lambda(s_\varepsilon, px_i)$, определяемый

расширенной функцией выходов λ . (Если выходные сигналы являются метками состояний, как в автоматах типа Мура, то $y_{j_i} = v(s_{px_i})$, где v – функция отметок состояний). На рис.3 показаны связь состояний системы с отрезками оси абсцисс и представление фазовой траектории $s_\varepsilon, \delta(s_\varepsilon, x_{i_1}), \delta(\delta(s_\varepsilon, x_{i_1}), x_{i_2}), \dots, \delta(\delta(s_\varepsilon, p), x_{i_3}), \dots$ последовательностью точек $(x_{i_1}, y_{j_1}), (x_{i_1}x_{i_2}, y_{j_2}), \dots, (px_{i_3}, y_{j_3}), \dots$ геометрического образа законов функционирования системы. После преобразования частичной фазовой картины в частичный геометрический образ поиск решения задачи определения всех воздействий, формирующих полную фазовую картину, может быть осуществлён на основе доопределения геометрического образа законов функционирования системы. Такое доопределение без дополнительных условий и ограничений неоднозначно. В связи с большим разнообразием условий и ограничений на процесс

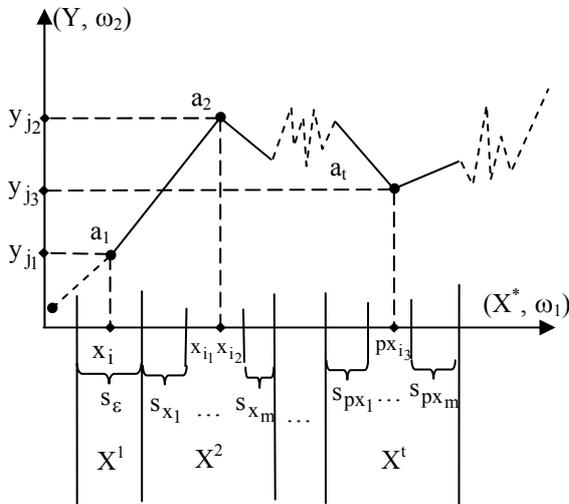


Рис. 3. Схема связи фазовой траектории $a_1, a_2, \dots, a_t, \dots$ с последовательностью состояний системы и геометрическим образом законов функционирования

(и результат) доопределения фазовой картины, рассмотрим формальную схему действий.

Для фазовой картины определяется количество используемых воздействий $v_A = \max(v_D, |X|)$.

Множество $U = X \cup Z$, где X – множество представленных в частичной фазовой картине воздействий, а Z – некоторое множество, удовлетворяющее условию $|Z| = v_A - |X|$, полагается множеством формирующих фазовую картину воздействий. Дополнительными воздействиями являются воздействия из Z .

Для вершины $s \in S$ условием введения новой, исходящей из s , дуги является выполнение неравенства $v_A \neq v(s)$. Если вершине s в геометрическом образе законов функционирования соответствует вершина s_p , то новые дуги должны быть введены для связей вершины s_p с каждой вершиной s_{pz} , где $z \in Z$.

Для решения задач технического диагностирования к объекту диагностирования прикладываются диагностические или рабочие воздействия и наблюдаются внешние реакции объекта (см. [8]). На основе наблюдаемых связей воздействий и реакций для множества состояний, например, дискретного детерминированного автомата $A=(S, X, Y, \delta, \lambda)$ вводится отношение эквивалентности состояний: состояния $s, s' \in S$ эквивалентны, если для любой последовательности входных сигналов $p \in X^*$ $\lambda(s, p) = \lambda(p, s')$. Заданная (и, возможно, доопределенная) структура частичной фазовой картины позволяет использовать отношение равенства, как частный случай отношения эквивалентности, при построении классов эквивалентных состояний для множества $S = \{s_p\}_{p \in X^*}$: состояния s_{p_1} и s_{p_2} – эквивалентны, если в фазовой картине им соответствует одна и та же вершина, в которую ведут пути из вершины s_ε , помеченные последовательностями воздействий p_1 и p_2 . Это простое условие существенно упрощает построение классов эквивалентных состояний системы.

На рис. 4 показаны варианты возможных связей точек в фазовой картине, которые могут возникать после введения новых дуг. В первом варианте (см.

рис. 4 (1)) вершина, соответствующая состоянию s_p , связана с вершиной, соответствующей состоянию s_{px_a} дугой, имеющейся в исходной частично заданной фазовой картине и помеченной знаком y_i . Во втором варианте аналогичная дуга не имеет метки. Третий и четвертый варианты соответствуют новым дугам с меткой (3) и без метки (4). При доопределении частично заданной фазовой картины знаки $z_{\beta+1}, \dots, z_m$ заменяются символами воздействий, а вхождения знака e заменяются метками наблюдаемых выходных сигналов.

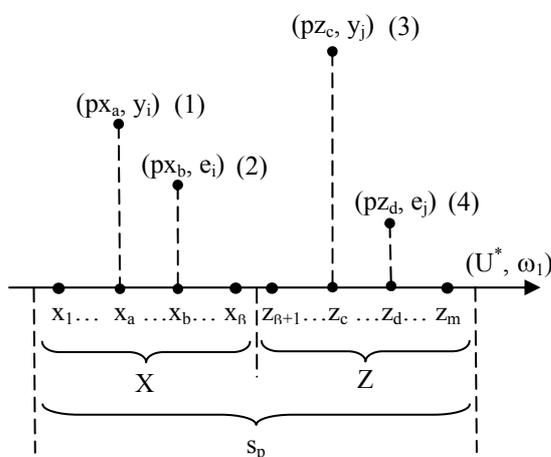


Рис. 4. Варианты связей точек, возникающие после доопределения фазовой картины дугами.

Таким образом, задача доопределения частично заданной фазовой картины преобразованием ее в геометрический образ законов функционирования системы сведена к доопределению последовательности вторых координат точек геометрического образа на основе замены в этой последовательности вхождения символа e наблюдаемыми выходными сигналами, имеющими диагностическую интерпретацию.

Краткие выводы

В статье [1] сформулированы особенности технического диагностирования сложных систем и приведен аппарат для построения геометрических образов законов функционирования систем. В данной статье приведены методы использования геометрических образов для дополнения фазовых картин не указан-

ными в них воздействиями, формирующими фазовые траектории. Полученные результаты ориентированы на решение задач технического диагностирования.

Литература

1. Твердохлебов В.А. Техническое диагностирование на основе геометрических структур законов функционирования. // *Радиоелектронні і комп'ютерні системи*. – 2007. – №. 7. – С. 158-167.
 2. Твердохлебов В.А. Геометрические образы конечных детерминированных автоматов. // *Известия Саратовского ун-та*. – Саратов, 2005. – Т.5. – С.141-153.
 3. Твердохлебов В.А. Геометрические образы поведения дискретных детерминированных систем. // *Радиоелектронні і комп'ютерні системи*. – 2006. – № 5. – С.161-165.
 4. Твердохлебов В.А. Рекуррентно-автоматные характеристики динамических систем. // *Материалы 9-й межд. конф. «Интеллектуальные системы и компьютерные науки»*. – М., 2006. – Т. 1., Ч. 2. – С. 168-171.
 5. Твердохлебов В.А. Методы интерполяции в техническом диагностировании. // *Проблемы управления*. – М., 2007 – № 2. – С. 28-34.
 6. Твердохлебов В.А. Классификация законов функционирования для синтеза дискретных систем // *Материалы VI Международной конференции "Автоматизация проектирования дискретных систем"*. – Минск, 2007. – Т. 1. – С. 65-72.
 7. Твердохлебов В.А. Специфика технического диагностирования сложных дискретных систем // *Материалы VI Международной конференции "Автоматизация проектирования дискретных систем"*. – Минск, 2007. – Т. 2. – С. 207-212.
 8. Резчиков А.Ф., Твердохлебов В.А. Техническое диагностирование мехатронных систем // *Мехатроника. Автоматизация. Управление*. – 2003. – № 2. – С. 2-6.
- Поступила в редакцию 21.01.2008*
Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.Ю. Соколов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.