УДК 681.518.54;004.3.001.4

**В.А. ТВЕРДОХЛЕБОВ**

***Институт проблем точной механики и управления РАН, Россия***

# ТЕХНИЧЕСКОЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЕ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ЗАКОНОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

*Символьная форма диагностических моделей существенно ограничивает их использование для сложных систем. В статье изложен метод технического диагностирования, включающий преобразование символьного задания автоматов в числовые структуры, размещение дискретных числовых структур на геометрических кривых и построение процедур диагностирования на основе решения неравенств для уравнений, задающих такие кривые.*

***Ключевые слова:*** *автомат, геометрический образ законов функционирования, фазовая картина, техническое диагностирование, процедуры диагностирования.*

## Введение

Общая схема технического диагностирования включает анализ объекта диагностирования включает анализ объекта диагностирования (а также средств диагностирования, условий и ограничений для процесса диагностирования) и выбор учитываемого множества неисправностей объекта, разработку правил (тактики и стратегии) диагностирования и реализацию процесса диагностирования. К средствам технического диагностирования относятся измерение физических параметров, тестирование, визуальный осмотр и наблюдение контрольных и диагностических сигналов, решение объектом диагностирования диагностических задач.

Алгоритм диагностирования основывается на последовательном пополнении диагностической информации и исключении из рассматриваемого множества таких неисправностей, которые противоречат моделям неисправностей. При техническом диагностировании сложных систем, в которых взаимосвязаны и взаимодействуют различные по природе процессы, диагностическая информация формируется различными средствами диагностирования. Полученную так информацию трудно, а точнее невозможно, совмещать с моделями неисправностей, которые, как правило, имеют вид преобразователей информации. В связи с этим предлагается диагностическую информацию совмещать не с моделями преобразователей информации, а совмещать ее с специфическими для неисправностей показателями и характеристиками свойств.

Сделаем содержательную постановку задач. Для этого введем понятие события как объекта, определяемого конкретными значениями конкретного набора свойств $<R_1, R_2, \ldots, R_\omega>$, где для каждого $R_i$, $1 \le i \le \omega$, задано множество $M_i$ значений свойства. Множество $M = \underset{i=1}{\overset{\omega}{\times}} M_i$ полагаем множеством точек фазового пространства ([2]), последовательности точек – фазовыми траекториями, а совокупность фазовых траекторий, ассоциированных с выбранными начальными точками будем рассматривать как фазовые картины. Метод фазового пространства исследования динамических систем "состоит либо в определении отдельных траекторий, либо всей фазовой картины движения, характеризующих такие свойства системы, как … характер переходных движений…([2], с. 573)".

Пусть :- R={ $R_1, R_2, \ldots, R_k$ } – конечный набор свойств и для каждого свойства $R_i \in R$ определено множество значений $M_i$, $1 \le i \le k$; - в множестве $M = M_1 \times M_2 \times \ldots \times M_k$ выделено непустое множество $U \subset M$. Требуется найти конечный набор сил X={$x_1$, $x_2$, … , $x_m$} и такое представление сил отображениями вида $f_{X_i} : M \to M$, чтобы определялся граф $G_R = (W, \rho)$ с множеством вершин W и множеством дуг ρ, обладающий следующими свойствами:

1. $U \subset W \subset M$;
2. Из каждой вершины $w \in W$ исходит точно $m$ дуг взаимнооднозначно помеченных метками из множества меток X.
3. Граф $G_R = (W, \rho)$ был связным.
4. Отображения вида $f_{X_i}$, $1 \le i \le \omega$, определялись достаточно простыми математическими средствами.

Рассмотренный в статье метод ориентирован на построение фазовой картины, определяющей "переходные движения" между точками множества точек U. Метод конструктивно задает связи фазовых точек из множества U непосредственно или через промежуточные точки. В качестве моделей неисправностей используются частично заданные (частично известные) фазовые картины, для которых разработан метод доопределения в полные фазовые картины. Общая методическая схема технического диагностирования сохраняется.

Принципиально важным является расширение возможностей как для построения диагностических моделей сложных дискретных систем, так и для анализа свойств представленных моделями неисправностей.

## 1. Геометрическая форма законов функционирования дискретных детерминированных автоматов

Таким образом, геометрические образы законов функционирования автоматов позволяют явно и неявно представлять пары, составляющие автоматное отображение при бесконечном и конечном множестве состояний автомата.

Как известно, конечным детерминированным автоматом типа Мили называется система пяти объектов $A = (S, X, Y, \delta, \lambda)$, где S – множество состояний, X – множество входных сигналов, Y – множество выходных сигналов, а $\delta: S\times X \rightarrow S$ – функция переходов и $\lambda: S\times X \rightarrow Y$ – функция выходов.

Автомат функционирует по тактам в абстрактном целочисленном неотрицательном времени $t \in N$ в соответствии с уравнениями динамики: $s(t+1) = \delta(s(t),x(t)),\ y(t) = \lambda(s(t),x(t))$

Законы функционирования автомата, то есть, функции δ и λ распространяются до функций вида: $\delta: S\times X^* \rightarrow S$ и $\lambda: S\times X^* \rightarrow Y$ или $\lambda: S\times X^* \rightarrow Y^*$ в соответствии с правилами:

$$(\forall x\in X)(\forall s\in S)(\forall p\in X^*)\ \lambda(s, px) = \lambda(\delta(s, p), x)$$

или

$$(\forall s\in S)(\forall x\in X)(\forall p\in X^*)\ \{\delta(s, xp) = \\ = \delta(\delta(s, x), p)\ \&\ \lambda(s, xp) = \lambda(s, x)\lambda(\delta(s, x), p)\}.$$

Удобным способом задания функции переходов автоматов является определение функции δ равенством с множеством состояний $S=\{s_p\}_{p\in X^*}$: для любых $p \in X^*$ и $x \in X : \delta(s_p,x) = s_{px}$.

Наблюдаемое функционирование (наблюдаемое поведение) автомата *A* систематизируется в двух вариантах автоматных отображений: $\rho_s = \bigcup\limits_{p\in X^*}\{(p,\lambda(s,p))\}$ и $\rho'_s = \bigcup\limits_{p'x\in X^*}\{(p'x,\lambda(\delta(s,p'),x))\}$.

Множества пар $\rho_s$ и $\rho'_s$ рассмотрим как точки и преобразуем в графики. Для этого на множестве всех последовательностей $X^*$ (на множестве всех слов в алфавите $X$) определим линейный порядок $\omega_1$.

В соответствии с этим порядком получаем линейно упорядоченные множества пар $(\rho_s, \omega_1)$ и $(\rho'_s, \omega_1)$. Дополняя эти множества линейными порядками $\omega_0$ на $Y^*$ и $\omega_2$ на $Y$, получаем графики: $(\rho_s, \omega_1, \omega_0)$ и $(\rho'_s, \omega_1, \omega_2)$. Построенные графики размещены в системах координат с осью абсцисс $(X^*, \omega_1)$ и осями ординат соответственно $(Y^*, \omega_0)$ и $(Y, \omega_2)$.

Линейные порядки $\omega_0$ и $\omega_2$ выбираются на основе учитываемых свойств выходных сигналов, а линейный порядок $\omega_1$ определяется условиями и ограничениями, предполагаемыми для взаиморасположения на оси абсцисс последовательностей входных сигналов. Основной вариант линейного порядка $\omega_1$ определяется следующими правилами:

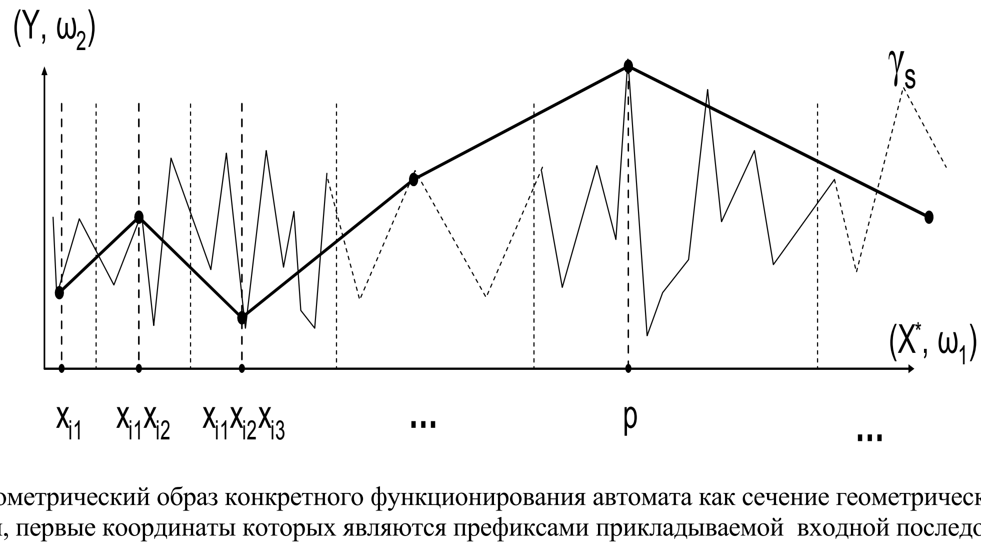


Рис. 1. Геометрический образ конкретного функционирования автомата как сечение геометрического образа $\gamma_s$ по точкам, первые координаты которых являются префиксами прикладываемой входной последовательности

Правило 1. На множестве $X$ вводится некоторый линейный порядок $\omega_1 \left(\prec_1\right)$

$$x_1 \prec_1 x_2 \prec_1 \ldots \prec_1 x_k$$

Правило 2. Порядок $\omega_1$ на $X$ распространяется до линейного порядка на множестве $X^*$:

- для любых слов $p_1, p_2 \in X^*$ неодинаковой длины ($|p_1| \neq |p_2|$) $|p_1| < |p_2| \rightarrow |p_1| \prec_1 |p_2|$;

- для любых слов $p_1, p_2 \in X^*$, для которых $|p_1| = |p_2|$ и $p_1 \neq p_2$ их отношение по порядку $\omega_1$ повторяет отношение ближайших слева несовпадающих букв в словах $p_1$ и $p_2$.

Аналогично определяется порядок $\omega_2$ на множестве слов $Y^*$.

## 2. Метод совмещения геометрических образов с произвольными геометрическими кривыми

Определение геометрическими образами (ломаными линиями в специальной системе координат) законов функционирования дискретных конечных и бесконечных по числу состояний автоматов позволяет без рекурсивных построений извлекать требуемую часть геометрического образа.

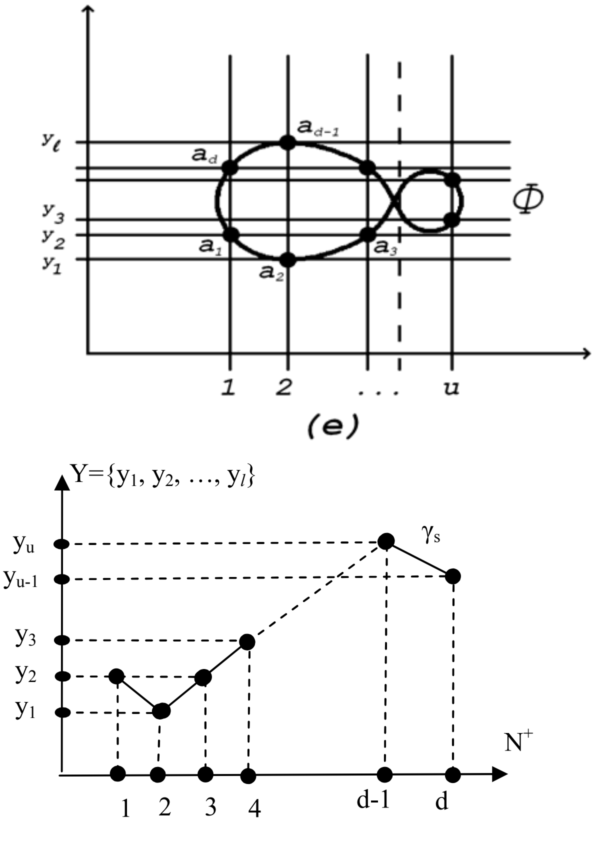


Рис. 2. Иллюстрация этапов синтеза автомата по геометрической фигуре

Для этого используется кривая линия, на которой расположены вершины ломаной линии и, например, задание кривой линии уравнением. На рис.3 изображено размещение точек геометрического образа на непрерывной геометрической кривой g для случаев, когда кривая определяет график, которому соответствует отображение.

Координаты точек геометрического образа совпадают с координатами соответствующих точек кривой и могут определяться с использованием уравнения, определяющего кривую. Более сложная зависимость возникает, когда на произвольной кривой выбираются точки, которые полагаются прообразами точек геометрического образа.

На рис.2 показано, что выбор точек на произвольной кривой, направления обхода кривой и порядка построения последовательности вторых координат точек позволяет преобразовать полученную конструкцию в геометрический образ в форме графика с осью абсцисс $N^+$ и осью ординат $\{y_1, y_2, \ldots, y_l\}$.

Преобразование законов функционирования, представленных автоматным отображением, сначала в символьный график, а затем в числовой график позволяет частично заданные законы функционирования автомата доопределять до полностью заданных законов с использованием классических методов интерполяции (методов Ньютона, Лагранжа, Гаусса, Бесселя, наименьших квадратов и др.).

## 3. Задача технического диагностирования автоматов, заданных геометрическими образами функционирования

Реальная система R в задаче технического диагностирования (контроля и определения неисправности) представлена множеством неисправностей I и соответствующим семейством частичных или полностью заданных геометрических образов неисправностей $\alpha = \{\gamma_i\}_{i \in I}$.

Теорема . Пусть $p \in X^*$ и $p = x_{i_1} x_{i_2} \ldots x_{i_k}$, где $k \in N^+$. Тогда номер r(p) слова p по порядку ω1 определяется равенством:

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

Доказательство см. в работах [3 4].

В работе [1] показано, что входной сигнал $x \in X$ может рассматриваться не только как тестовый, а как любое диагностическое воздействие с целью получения диагностической информации (измерение физического параметра, визуальный осмотр и т.п.).

Если ограничиваться диагностированием на основе простого безусловного эксперимента, то главным теоретическим вопросом является поиск последовательности входных сигналов $p \in X^*$, удовлетворяющей условию: любая полученная выходная последовательность определяет точки только одного геометрического образа $\gamma i$.

Техническое диагностирование сложного объекта само является сложной проблемой. В границах рассматриваемых средств диагностирования сложность диагностирования исключить невозможно, но существуют примеры существенно повышающие эффективность решения задачи на основе изменения средств решения. (Например, измерение объема камня геометрическими выражениями в ряде случаев эффективно заменяется действиями лаборанта с мерной ванной и камнем.). В данной статье средства технического диагностирования расширяются включением в них разнородных диагностических процедур, принципиальным изменением символьных моделей объекта диагностирования на математические структуры и использовании средств непрерывной математики. Переход к таким новым представлениям о техническом диагностировании порождает новые (возможно трудно решаемые) задачи. В частности, задача размещения точек геометрического образа на кривой требует разработки специального математического аппарата. Первым и фундаментальным решением этой задачи является использование классических методов интерполяции частично заданных графиками функций. При построении моделей неисправностей для реальной системы требуется иметь модель работоспособной системы, так как только на основе анализа системы и ее модели могут быть определены изменения. полагаемые неисправностями.

### 4.1. Метод технического диагностирования сложных систем

1 этап. Выбор и обоснование выбора конечного набора свойств $R=\{R_1, R_2, \ldots, R_k\}$ и множеств их значений $\{M_1, M_2, \ldots, M_k\}$, используемых для построения диагностических моделей в форме фазовых картин поведения объекта диагностирования.

2 этап. Выбор и обоснование выбора конечного набора сил $X=\{x1, x2, \ldots, xm\}$, последовательности действий которых связывают элементы множества $M = \overset{\omega}{\underset{i=1}{\times}} M_i$. Математическое определение функции $\delta$ вида $\delta: M \times X \to M$.

3 этап. Построение функции $\lambda$ вида $\lambda: M \times X \to Y$, где Y – множество диагностических признаков, получаемых процедурами диагностирования (показатели измерений параметров, тестирование, визуальный осмотр и т.п.)

4 этап. Построение автоматных моделей для работоспособной системы и рассматриваемого множества неисправностей I: $A0=(M,X,Y,\delta 0,\lambda 0)$, $\beta = \{A_i\}_{i \in I}$, где $Ai=(M,X,Y,\delta i,\lambda i)$.

5 этап. Преобразование автоматов A и $\beta$ в геометрические образы $\gamma 0$ и $\gamma = \{\gamma_i\}_{i \in I}$ частично или полностью определенные.

6 этап. Выбор (или построение методами интерполяции) геометрических кривых g0 и $g = \{g_i\}_{i \in I}$, на которых размещены точки геометрических образов $\gamma 0$ и $\gamma$. Предполагается, что кривые g0 и g задаются уравнениями $y0=g0(z)$, $y_i=g_i(z)$, где $i \in I$, и $z=r_1(p)$, $p \in X^*$, а $r_1(p)$ – номер p по порядку $\omega_1$.

7 этап. Построение последовательности $p \in X^*$, удовлетворяющей условиям:

- $g0(r1(\overline{p})) \neq gi(r1(\overline{p}))$, $i \in I$ (задача контроля),

- $gi(r1(\overline{p})) \neq gj(r1(\overline{p}))$, $i, j \in I$ и $i \neq j$ (задача диагностирования), где для $p = x_{i_1} x_{i_2} \ldots x_{i_t}$ переменная $\overline{p}$ принимает значения $x_{i_1}, x_{i_1} x_{i_2}, x_{i_1} x_{i_2} \ldots x_{i_t}$, а неравенства рассматриваются как выполнение неравенства хотя бы для одного значения переменной $\overline{p}$.

## Заключение

Рассмотрен разработанный метод технического диагностирования сложных дискретных систем, включающий расширение средств технического диагностирования, преобразование символьной формы законов функционирования автоматов в числовые структуры (геометрические образы с числовыми координатами точек), размещение геометрических образов на геометрических кривых линиях, заданных уравнениями, и построение общей процедуры диагностирования на основе определения по уравнениям кривых точек, не являющихся для них общими.

## Литература


1. *Резчиков А.Ф. Техническое диагностирование мехатронных систем / А.Ф. Резчиков, В.А Твердохлебов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2003. – № 2. – С. 2-6.*

2. *Словарь по кибернетике / Под ред. В.М. Глушкова. – К.: Наук. думка, 1979. – 623 с.*

3. *Твердохлебов В.А. Геометрические образы законов функционирования автоматов / В.А.Твердо-*

*хлебов. – Саратов: ООО Издательство «Научная книга», 2008. 183 с.*

*4. Твердохлебов В.А. Геометрические образы конечных детерминированных автоматов // Известия Саратовского ун-та (Новая серия). - Т.5. - Вып. 1. - Саратов, 2005. - С.141-153.*

*5. Твердохлебов В.А. Методы определения воздействий в дискретных фазовых картинах при техническом диагностировании / В.А. Твердохлебов // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. - 2008. – № 6 (35). - С. 164-170.*

*Поступила в редакцию 21.01.2009*

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., проф. кафедры А.В. Дрозд, Одесский национальный политехнический университет, Одесса.

## ТЕХНІЧНЕ ДІАГНОСТУВАННЯ СИСТЕМ З ВИКОРИСТАННЯМ ГЕОМЕТРИЧНОГО ПРЕДСТАВЛЕННЯ ЗАКОНІВ ФУНКЦІОНУВАННЯ

***В.О. Твердохлєбов***

Символьна форма діагностичних моделей суттєво обмежує їх використання для складних систем. В статті викладено метод технічного діагностування, що містить перетворення символьного завдання автоматів в числові структури, розміщення дискретних числових структур на геометричних кривих і побудову процедур діагностування на основі розв'язання нерівностей для рівнянь, що задають такі криві.

**Ключові слова:** автомат, геометричний образ законів функціонування, фазова картина, технічне діагностування, процедури діагностування.

## TECHNICAL DIAGNOSING OF SYSTEMS WITH USE OF GEOMETRICAL REPRESENTATION LAWS OF FUNCTIONING

***V.A. Tverdokhlebov***

The symbolical form of diagnostic models essentially limits their use for complex systems. In clause is stated the method of technical diagnosing including transformation of the symbolical task of automatic devices in numerical structures, accommodation of discrete numerical structures on geometrical curves and construction of procedures of diagnosing on the basis of the decision of inequalities for the equations setting such curves.

**Key words:** finite state machine, a geometrical image of laws of functioning, a phase picture, technical diagnosing, procedures of diagnosing.

**Твердохлебов Владимир Александрович** – д-р техн. наук, проф., главный научный сотрудник Институт проблем точной механики и управления Российской Академии Наук, Саратов, Россия, e-mail: tverdokhlebovva@list.ru.