

УДК 681.518.54; 004.3.001.4

К.В. ЕЛИСЕЕВ, А.С. ЕПИФАНОВ

*Институт проблем точной механики и управления РАН, Россия***МЕТОД АНАЛИЗА ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО ОБРАЗА АВТОМАТА  
ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТИ**

Рассматривается задача отказоустойчивости в форме восстановления конкретного требуемого поведения системы. Средством восстановления является замена входных воздействий, на которые система выработывает неправильные реакции, входными воздействиями, соответствующими работоспособному поведению системы. Вопросы существования решения задач и поиск решения задачи основываются на построении и анализе геометрических образов законов функционирования восстанавливаемого объекта. Процедурами восстановления являются поиск в геометрическом образе сечения, конгруэнтного заменяемой фазовой траекторией, и замена исключённых входных сигналов новыми.

**техническое диагностирование, автомат, интерполяция, отказоустойчивость, восстановление функций****Постановка задачи обеспечения  
отказоустойчивости**

Проблема отказоустойчивости связана с обеспечением работоспособности технической системы и решается при наличии в системе избыточности (структурной, функциональной). В классе задач, образующих эту проблему, содержится, в частности, задача восстановления работоспособности системы на основе изменения содержательной интерпретации состояний, сигналов и законов функционирования. Изменению интерпретации входных сигналов соответствует отображение  $\varphi$  вида  $\varphi: X \rightarrow Z$ , где  $X$  – множество входных сигналов работоспособной системы, а  $Z$  – введённая интерпретация сигналов. С использованием такой интерпретации в ряде случаев могут быть исключены входные сигналы, на которых нарушается требуемое функционирование системы.

Рассматривается задача обеспечения отказоустойчивости системы относительно неисправностей, проявляемых только при приложении входных сигналов из множества сигналов  $X' = \{x_{i_1}, x_{i_2}, \dots, x_{i_k}\}$ . Методом решения задачи является введение новой интерпретации входных сигналов, определяемой отображением  $\varphi': X \rightarrow (X/X')$ , и замена прикладываемой последовательности входных сигналов, содержащих сигналы из множества  $X'$ , последовательно-

стью сигналов множества  $(X/X')$ . Пусть система  $R$  в начальном состоянии  $s_0$  на входной последовательности  $p = x_{i_1} x_{i_2} \dots x_{i_k}$  выдавала выходную последовательность  $\lambda_0(s_0, p) = y_{j_1} y_{j_2} \dots y_{j_k}$  и в последовательности  $p$  есть входные сигналы множества  $X'$ . Требуется найти такую  $q$ , где  $q \in (X/X')$ , которая удовлетворяет условию  $\lambda_0(s_0, p) = \lambda_0(s_0, q)$ .

**Метод 1 решения задачи с использованием  
задания объекта диагностирования  
геометрическими образами законов  
функционирования**

*Этап 1.* По свойствам законов функционирования объектов диагностирования строится его модель в работоспособном состоянии а форме геометрического образа (структуру и содержание геометрического образа см., например, в [1 – 3])

*Этап 2.* Исходные данные задачи находятся на геометрическом образе  $\gamma_s$ :

- вершины в  $\gamma_s$  помечаются знаком "\*", если в её первой координате содержатся запрещённые входные сигналы;
- требующаяся к приложению по условиям задачи входная последовательность  $p$  покрывается последовательностью префиксов, префиксы выделяются на оси абсцисс и соответствующие им вершины геометрического образа  $\gamma_s$  помечаются как "○";

– помеченные знаком "○" вершины геометрического образа  $\gamma_s$  последовательно с лева на право соединяются в ломаную линию (рис. 1).

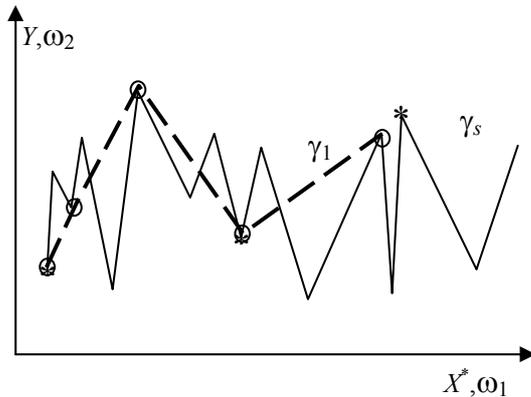


Рис. 1. Геометрический образ  $\gamma_s$  с помеченными вершинами и ломаная линия  $\gamma_1$ , показывающая работоспособное функционирование системы

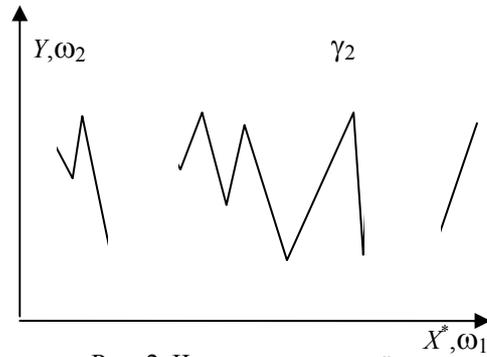


Рис. 2. Частично определённая ломаная линия  $\gamma_2$

*Этап 3.* Ломаная линия  $\gamma_1$  представляется последовательностью 2-х координат её вершин  $y_{j_1}, \dots, y_{j_k}$ .

*Этап 4.* В геометрическом образе  $\gamma_s$  исключаются вершины, помеченные знаком "\*". В результате получается частично определённая ломаная линия  $\gamma_s'$  (рис. 2).

*Этап 5.* Для частично определённой ломаной линии  $\gamma_s'$  производится поиск входной последовательности  $p' \in (X/X')^*$ , удовлетворяющей условиям  $p' = p'_1 p'_2, \lambda(\delta(s_0, p'_1), p'_2) = \lambda_0(s_0, p)$ .

**Метод 2 решения задачи с использованием задания объекта диагностирования геометрическим образом законов функционирования**

*Этап 1.* Преобразование геометрического образа с учетом исключения запрещенных входных сигналов.

Для осуществления преобразования геометрического образа  $\gamma_{s_0}$  инициального автомата  $A = (S, X, Y, \delta, \lambda, s_0)$  с учетом исключения запрещенных входных сигналов из множества  $X'$ ,  $X' \subset X$  необходимо осуществить следующие действия:

1. Определяется множество  $\tilde{X} = (X/X')$  входных сигналов, при приложении которых в системе не проявляется влияния неисправностей.

2. На множестве  $\tilde{X}^*$  вводится линейный порядок  $\omega'_1$ , аналогичный порядку  $\omega_1$  (в соответствии с которым  $(\forall p, p' \in \tilde{X}^*) (|p| < |p'| \rightarrow p < p')$ ), а для любых слов  $p, p' \in \tilde{X}^*$ , для которых  $|p| = |p'|$ , их отношение по порядку  $\omega'_1$  повторяет отношение ближайших слева несовпадающих букв  $p, p' \in \tilde{X}^*$ .

3. Каждой паре  $(p, \lambda(s_0, p))$ , где  $p \in \tilde{X}^*$ , сопоставляется точка геометрического образа с координатами  $(r'_1(p), r'_2(\lambda(s_0, p)))$ , где  $r'_1(p)$  – номер входного слова  $p \in \tilde{X}^*$  по порядку  $\omega'_1$ ,  $r'_2(\lambda(s_0, p))$  – номер последнего символа выходного слова  $\lambda(s_0, p)$  по порядку  $\omega_2$ .

Результатом применения данного метода к геометрическому образу  $\gamma_{s_0}$  инициального автомата  $A = (S, X, Y, \delta, \lambda, s_0)$  является геометрический образ  $\gamma'_{s_0}$ , в котором отсутствуют точки, первым координатам которых соответствуют входные слова, включающие запрещенные входные сигналы. Одним из возможных путей решения задачи отказоустойчивости является дальнейшая модификация полученного геометрического образа  $\gamma'_{s_0}$ . Она состоит в исключении из  $\gamma'_{s_0}$  вершин, первым координатам которого соответствуют входные последовательности  $p \in \tilde{X}^*$ , на которых автомат не вырабатывает реакции, удовлетворяющих условию поставленной в данной статье задачи.

*Этап 2.* Преобразование геометрического образа  $\gamma'_{s_0}$  с исключением входных последовательностей, не удовлетворяющих условию поставленной задачи. По условию поставленной задачи инициальный автомат

$A = (S, X, Y, \delta, \lambda, s_0)$  в начальном состоянии  $s_0$  на входную последовательность  $p = x_{i_1} x_{i_2} \dots x_{i_k}$  должен выдавать выходную последовательность  $\lambda(s_0, p) = y_{j_1} y_{j_2} \dots y_{j_k}$ . Для реализации указанного исключения точек геометрического образа  $\gamma'_{s_0}$  требуется:

1. Ввести отображение  $\eta: N \rightarrow \tilde{X}^*$ , с помощью которого возможно определить по первой координате точки геометрического образа  $\gamma'_{s_0}$  соответствующее ей входное слово  $p \in \tilde{X}^*$ .

2. Для полученного входного слова, соответствующего первой координате точки, определить длину  $n = |p|$ .

3. Проверить выполнение следующего условия:  $\tilde{\lambda}(s_0, p) = y_{j_n}$ , где  $\tilde{\lambda}(s_0, p)$  – последний выходной символ слова  $\lambda(s_0, p) = y_{j_1} y_{j_2} \dots y_{j_n}$ ,  $n = |p|$ .

4. Если условие не выполняется, то данная точка геометрического образа  $\gamma'_{s_0}$  исключается.

После исключения всех неудовлетворяющих условию задачи точек геометрического образа  $\gamma'_{s_0}$  вводится новый линейный порядок  $\omega''_1$ , а первым координатам оставшихся точек вводятся новые номера по порядку  $\omega''_1$ . В результате применения данного метода к геометрическому образу  $\gamma'_{s_0}$  получается новый геометрический образ  $\gamma''_{s_0}$ , в котором отсутствуют точки, первым координатам которых соответствуют входные слова, включающие запрещенные входные сигналы, а также нет точек, первым координатам которых соответствуют входные слова, не удовлетворяющие условию поставленной в статье задачи.

*Замечания к методу 2.* На этапах применения метода 2 решения задачи возможно использование «сквозной» нумерации точек, основанной на номерах (первых координатах) точек по порядку  $\omega_1$  в исходном геометрическом образе  $\gamma_{s_0}$ . Для этого требуется после каждого этапа хранить номера точек в геометрическом образе  $\gamma_{s_0}$ , а не изменять их на новые в соответствии с новыми вводимыми порядками  $\omega'_1$  и  $\omega''_1$ . Сохранение на этапе 1 метода 2

номеров точек в исходном геометрическом образе  $\gamma_{s_0}$  позволяет на этапе 1 не определять новые номера точек по порядку  $\omega'_1$  и не вводить на этапе 2 отображение  $\eta: N \rightarrow \tilde{X}^*$ .

*Пример.* Пусть инициальный автомат  $(A, s_1) = (\{s_1, s_2, s_3, s_4\}, \{0,1,2\}, \{0,1\}, \delta_0, \lambda_0, s_1)$  из класса (4, 3, 2) автоматов задан табл. 1, множество запрещенных входных сигналов  $X' = \{1\}$ . Пусть по условию задачи инициальный автомат  $(A, s_1)$  на входное слово  $p = p(1)p(2)p(3) = 011$  должен выдавать выходное слово  $q = \lambda_0(s_1, p) = y(1)y(2)y(3) = 000$ .

Таблица 1

Задание инициального автомата

$\lambda$	$s_1$	$s_2$	$s_3$	$s_4$
$\delta$				
$x_1 = 0$	0	0	1	1
$x_2 = 1$	1	0	0	1
$x_3 = 2$	1	1	0	1

Начальный отрезок геометрического образа инициального автомата  $(A, s_1)$  на словах длины 3 включительно изображен на рис. 3. После этапа 1 метода 2 из геометрического образа инициального автомата  $(A, s_1)$  исключаются точки, первым координатам которых соответствуют входные слова, содержащие символ 1. Начальный отрезок геометрического образа  $\gamma'_{s_0}$  (включающий точки, первым координатам которых соответствуют входные слова до длины 3 включительно) изображен на рис. 4.

Точки имеют номера в соответствии с линейным порядком  $\omega'_1$ . В табл. 2 приведены значения входных слов (до длины 3 включительно), соответствующих точкам геометрического образа  $\gamma'_{s_0}$ .

На этапе 2 из геометрического образа  $\gamma'_{s_0}$  (результата преобразования геометрического образа  $\gamma_{s_0}$  на этапе 1) исключаются точки, не удовлетворяющие условию задачи. В итоге получается геометрический образ  $\gamma''_{s_0}$ , все точки которого удовлетворяют условию поставленной задачи.

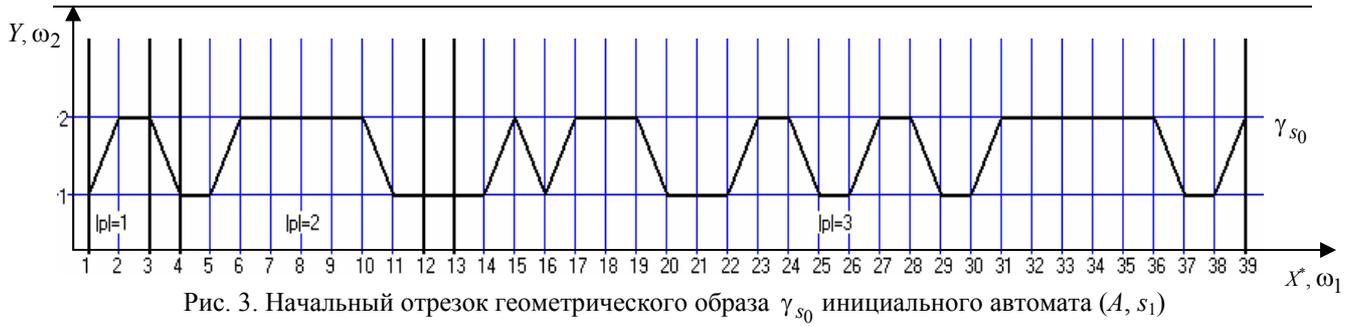


Рис. 3. Начальный отрезок геометрического образа  $\gamma_{s_0}$  инициального автомата  $(A, s_1)$

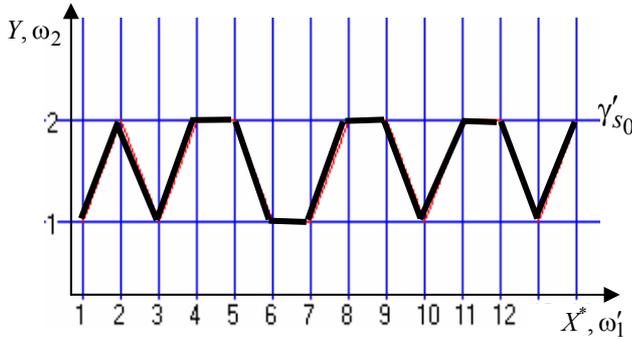


Рис. 4. Начальный отрезок геометрического образа  $\gamma'_{s_0}$  инициального автомата  $(A, s_1)$

Таблица 2  
Значения входных слов для  $\gamma'_{s_0}$

№ в $\gamma'_{s_0}$	$p$	№ в $\gamma'_{s_0}$	$p$
1	0	8	002
2	2	9	020
3	00	10	022
4	02	11	200
5	20	12	202
6	22	13	220
7	000	14	222

Начальный отрезок геометрического образа  $\gamma''_{s_0}$  приведен на рис. 5.

В табл. 3 приведены значения входных слов (до длины 3 включительно), соответствующих номерам точек геометрического образа  $\gamma''_{s_0}$ .

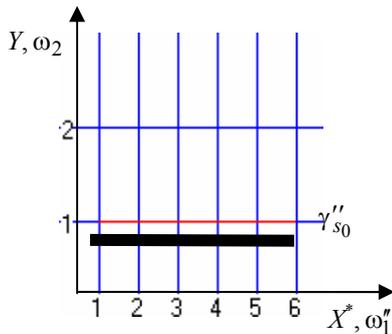


Рис. 5. Начальный отрезок геометрического образа  $\gamma''_{s_0}$  инициального автомата  $(A, s_1)$

Таблица 3  
Значения входных слов для  $\gamma''_{s_0}$

№ в $\gamma''_{s_0}$	$p$	№ в $\gamma''_{s_0}$	$p$
1	0	4	000
2	00	5	022
3	22	6	220

### Заключение

Рассмотрены 2 метода решения задачи обеспечения отказоустойчивости относительно воздействия неисправностей на законы функционирования объекта технического диагностирования. Предполагается, что влияние неисправностей проявляется только на подмножестве входных сигналов. На основании этого методы базируются на переносе требуемого процесса функционирования с общего множества входных сигналов на подмножества входных сигналов, на которые влияние неисправности отсутствует.

### Литература

1. Твердохлебов В.А. Геометрические образы конечных детерминированных автоматов // Известия Саратов. ун-та (Новая серия). – 2005. – Т. 5, вып. 1. – С. 141-153.
2. Твердохлебов В.А. Техническое диагностирование изменений параметров и свойств систем // Радиоэлектронні і комп'ютерні системи. – 2006. – № 6. – С. 119-123.
3. Твердохлебов В.А. Геометрические образы поведения дискретных детерминированных систем // Радиоэлектронні і комп'ютерні системи. – 2006. – № 5. – С. 161-165.

Поступила в редакцию 12.01.2007

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. А.М. Романкевич, Национальный технический университет Украины «КПИ», Киев.