УДК 681.32

КОРОЛЕВА Я. Ю., канд. техн. наук, доцент кафедры мультимедийных информационных технологий и систем (Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»)

Синтез проверяющих тестов на основе циклических отличительных последовательностей

Автором на основе теоретического обобщения и работ в области тестового диагностирования представлен метод синтеза проверяющих тестов однородной сети с наблюдаемыми выходами, у которых автоматные модели ячеек имеют отличительные последовательности и являются сильносвязными автоматами. Определена нижняя и верхняя границы длины полного проверяющего теста, обнаруживающего множество константных неисправностей ячейки сети. Разработан алгоритм процесса генерации тестовых последовательностей для однородной сети с наблюдаемыми выходами, ячейка которой вписывается таблицей переходов-выходов сильносвязного автомата, имеющего отличительную последовательность.
Ключевые слова: *однородная сеть, наблюдаемые выходы, тестируемость, циклическая отличительная последовательность.*

Введение

В работах зарубежных авторов развиваются методы тестового диагностирования, основанные на функциональном подходе и использовании автоматных моделей ячеек сети [1 - 4]. На уровне сети рассматриваются две модели неисправностей: модель одиночной неисправности сети (допускается неисправной одна ячейка сети F_1); модель кратной неисправности сети (допускается неисправным произвольное множество ячеек сети F_k).

Первая модель представляет класс неисправностей, которые искажают таблицу переходов-выходов автоматной модели ячейки сети при ограничении: неисправность не изменяет числа состояний ячейки, является устойчивой на время прохождения проверяющего теста и допускается неисправной в момент проверки лишь одна произвольная ячейка сети. Данный класс неисправностей включает полное множество константных неисправностей ячейки, подкласс перемычек и коротких замыканий, перепутываний и инверсий, не увеличивающих числа состояний ячейки.

Вторая модель кратной неисправности ячеек сети представляет класс неисправностей, когда при тех же ограничениях на изменения автоматной диаграммы ячейки сети допускается неисправным произвольное множество ячеек сети.

В зависимости от свойств однородной сети различают сети, у которых длина проверяющих тестов постоянна и не зависит от числа ячеек сети - С-тестируемые сети. Если же длина проверяемого теста линейно зависит от числа ячеек сети, то L-тестируемые сети.

Анализ последних исследований и публикаций

Анализ работ в области тестового диагностирования позволяет определить необходимые и достаточные условия L и С-тестируемости сети, обнаружить неисправности класса, F_1 и F_k, определить длину проверяющих экспериментов, преобразовывать ячейки сети для упрощения процедуры тестового диагностирования.

Определение цели и задачи исследования

Целью статьи является получить оценки нижних и верхних границ длины проверяющей последовательности для однородных сетей. Разработать методику проектирования С-тестируемых однородных сетей и алгоритм построения проверяющего эксперимента, генерирующий тестовые наборы, обнаруживающие любые неисправности, приводящие к искажению автоматной диаграммы ячейки, при ограничении, что в момент проверки допускается неисправной только одна ячейка сети.

Основная часть исследования

Рассмотрим одномерную сеть с наблюдаемыми выходами x_i', которая состоит из p ячеек комбинационного типа. Входы однородной сети $z(1), x(1), x(2),...x(p)$ запитываются логическими переменными, а реакция на их приложение наблюдается непосредственно на выходах $x'(1), x'(2),...x'(p), z'(p)$.

Введем следующие обозначения. Пусть $\alpha_1 \sim x(1)$ обозначает приложение логической переменной (набора логических переменных при наличии нескольких входных полюсов x в ячейке сети) к входному полюсу (полюсам) $x(1)$.

Вектор $V_j = \{z_1, \alpha_1, \alpha_2, ..., \alpha_p\}$ представляет двоичный входной набор, в котором $z_1 \sim z(1)$, $\alpha_1 \sim x(1)$, $\alpha_2 \sim x(2)$,…, $\alpha_p \sim x(p)$.

Вектор $V_i = \{z_1, (\alpha_1, \alpha_2, ..., \alpha_k)^*\}$ представляет двоичный входной набор, в котором $z_1 \sim z(1)$, $\alpha_1 \sim x(1)$, $\alpha_2 \sim x(2) \dots \alpha_k, \alpha_1 \sim x(k+1)$. Таким образом, входные полюсы сети записываются циклическими повторяющимися логическими переменными (или наборами переменных) $\alpha_1, \alpha_2, ...\alpha_k$.

Пусть необходимо проверить правильность перехода $\delta_{ij}(z_i, x_j) = z_a$ в ячейке $C(1)$ сети, которая имеет отличительную последовательность X_0. Проверяющий входной набор построим в следующем виде:

$$V(\delta_{ij}) = \{z_i, (x_j X_0 T(z_i))^*\}, \qquad (1)$$

где $T(z_i)$ – переводящая последовательность, которая переводит автомат из состояния $\delta(z_i, x_j x_0) = q_0$ в состояние z_i;

$V(\delta_{ij})$ - входной набор циклической отличительной последовательности ЦОП одномерной сети с наблюдаемыми выходами x_i'.

Действительно, состояние z_a на выходе ячейки $C(1)$ различается от множества других состояний Z/z_a по реакции последующих ячеек, к которым приложена отличительная последовательность X_0, что обеспечивается наличием в сети наблюдаемых выходов x_i' и свойствами отличительных последовательностей.

Пусть входной набор $x_j X_0 T(z_i)$, прикладываемый к входам x сети, состоит из «k» входных символов. Так как этот набор циклически повторяется и состояние k-й ячейки $z'_k = \delta(x_j, X_0 T(z_i)) = z_i$, то приложение $V(\delta_{ij})$ к входам сети позволяет проверить правильность переходов δ_{ij} в ячейках $C(1), C(k+1), C(2k+1), C(3k+1)$.

Известно, что в любом сильносвязном автомате с n состояниями существует множество переводящих последовательностей $T(z_i), i = \overline{1,n}$, длина которых не превышает $(n-1)$ (теорема 4.1 [5]).

Учитывая, что минимальная верхняя граница длины отличительной последовательности не превышает $\frac{n \cdot (n-1)}{2}$, а минимальная нижняя граница $\left\lceil \frac{\log_2 n}{\log_2 r} \right\rceil$, где $r = |y|$ [1], из (1) верхняя граница длины ЦОП $|V(\delta_{ij})|$ определяется неравенством

$$|V(\delta_{ij})| \le 1 + \frac{n(n-1)}{2} + (n-1) \le \frac{n}{2}(n+1). \qquad (2)$$

Минимальная нижняя граница длины ЦОП $|V(\delta_{ij})|$ равна

$$|V(\delta_{ij})| \ge \left\lceil \frac{\log_2 n}{\log_2 r} \right\rceil + n, \qquad (3)$$

где $r = |y|$ – число выходных символов ячейки сети.

Тест $V(\delta_{ij})$ проверяет правильность перехода δ_{ij} в ячейках сети $C(1), C(k+1), C(2k+1), \dots$. Свойство сильносвязности автоматной модели ячейки сети упрощает процедуру нахождения множества тестов, проверяющих этот переход во всех ячейках сети. Эта процедура сводится к циклическому сдвигу входного слова $x_j X_0 T(z_i)$. Циклический сдвиг вправо на один символ обеспечивает во второй ячейке переход $z_i \xrightarrow{x_j} z_a$ и приложение X_0 к последующим ячейкам сети. Следовательно, переход δ_{ij} в этом случае проверяется в ячейках $C(2), C(k+2), C(2k+2), \dots$. Циклический сдвиг $(|V(\delta_{ij})| - 1)$ раз теста $V(\delta_{ij})$ позволяет получить $|V(\delta_{ij})|$ входных ЦОП, проверяющих правильность перехода во всех ячейках сети. При этом верхняя и нижняя граница длины полного теста, проверяющего правильность всех $(m \times n)$ переходов ячейки сети, с учетом неравенств (2) и (3) равны соответственно

$$\lambda(T) \le \frac{1}{2} mn^2 (n+1) \approx mn^3, \qquad (4)$$

$$\lambda(T) \ge mn \left(\left\lceil \frac{\log_2 n}{\log_2 r} \right\rceil + n \right) \approx mn^2. \qquad (5)$$

Из (3) следует, что длина проверяющего теста не зависит от размерности сети (числа p ячеек сети). Таким образом, сети рассматриваемого класса являются С-тестируемыми.

Алгоритм поиска ЦОП. Процесс генерации тестовых последовательностей для однородной сети с наблюдаемыми выходами x_i', ячейка которой вписывается ТПВ сильносвязного автомата, имеющего отличительную последовательность, можно представить в виде алгоритма.

Алгоритм 1

1. Построить таблицу переходов-выходов автомата Мили по заданной логической схеме ячейки сети. Пусть ТПВ имеет n строк и m столбцов.
2. Построить отличительное дерево-преемников автомата и найти отличительную последовательность X_0.
3. Для каждого перехода ТПВ $\delta_{ij}(z_i, x_j) = z_a$, $i = \overline{1,n}$, $j = \overline{1,m}$ найти множество конечных состояний $\delta(z_a, x_0) = z_k$.
4. Найти множество переводящих последовательностей $T(z_k, z_i)$ по ТПВ для каждого перехода, где множество состояний $\{z_k\}$ определено на шаге 3.
5. Построить множество ЦОП $V(\delta_{ij})$ для каждого перехода автоматной диаграммы, используя X_0 и $T(z_k, z_i)$. Пусть длина ЦОП $|V(\delta_{ij})| = t$.
6. Для каждого проверяющего теста $V(\delta_{ij})$ заполнить $(t-1)$ циклических сдвигов, которые определяют ЦОП, проверяющих правильность всех $(m \times n)$ переходов ТПВ в каждой ячейке сети.
7. Конец алгоритма.

Применение ЦОП, полученных в соответствии с алгоритмом 1, к однородной сети рассматриваемого класса позволяет проверить соответствие таблицы истинности каждой ячейки сети таблице истинности исправной ячейки.

Рассмотрим схему многоразрядного параллельного сумматора с последовательным переносом. Такая схема представляет однородную сеть с наблюдаемыми выходами x_i', у которой каждая ячейка выполняет функцию полного одноразрядного сумматора. В таблице 1 представлена ТПВ ячейки полного одноразрядного сумматора (x – входы суммируемых переменных, x_i' – выход суммы, z – функция переноса).

Из табл. 1 легко определить, что автомат является сильносвязным и каждый входной символ – отличительная последовательность. В соответствии с процедурой алгоритма 1 можно найти для каждого перехода ЦОП, представленные на рис. 1, а, по которым легко построить восемь тестов, проверяющих схему сумматора любой размерности (рис. 1, б).

Таблица 1

ТПВ ячейки полного одноразрядного сумматора

$Z(t)$	x	$Z(t+1)$, $x'(t)$			
		$x_1 = 00$	$x_2 = 01$	$x_3 = 10$	$x_4 = 11$
z_1	00	0, 0	0,1	0, 1	1, 0
z_2	11	0, 1	1, 0	1, 0	1,1

Проверяющий тест, построенный по алгоритму 1 (рис. 1), обнаруживает кратную неисправность, задаваемую таблицами 2 и 3. В частности, циклический тест $V(\delta_{12})$ для исправной и неисправной сети вызывает различную реакцию на наблюдаемых выходах x_i' ячеек $C(2)$, $C(3)$,….

Таблица 2

ТПВ ячейки $C(1)$

$Z(t)$	x	$Z(t+1)$, $x'(t)$			
		$x_1 = 00$	$x_2 = 01$	$x_3 = 10$	$x_4 = 11$
z_1	0	0, 0	1, 1	1, 1	1, 0
z_2	1	0, 1	0, 0	0, 0	1, 1

Таблица 3

ТПВ ячейки $C(2)$

$Z(t)$	x	$Z(t+1)$, $x'(t)$			
		$x_1 = 00$	$x_2 = 01$	$x_3 = 10$	$x_4 = 11$
z_1	0	0, 0	0, 1	1, 0	1, 1
z_2	1	0, 1	1, 0	0, 1	1, 0

$$V(\delta_{1,1}) = \{z_1,(x_1)^*\},\ V(\delta_{1,2}) = \{z_1,(x_2)^*\};\ V(\delta_{1,3}) = \{z_1,(x_3)^*\},\ V(\delta_{1,4}) = \{z_1,(x_4x_1)^*\};$$
$$V(\delta_{2,1}) = \{z_2,(x_1x_4)^*\},\ V(\delta_{2,2}) = \{z_2,(x_2)^*\};\ V(\delta_{2,3}) = \{z_2,(x_3)^*\},\ V(\delta_{2,4}) = \{z_2,(x_4)^*\}.$$

а)

$$V_1 : z_1 \xrightarrow{00} z_1 \xrightarrow{00} z_1 \xrightarrow{00} z_1 \xrightarrow{00} z_1 ...; \quad V_5 : z_2 \xrightarrow{00} z_1 \xrightarrow{11} z_2 \xrightarrow{00} z_1 \xrightarrow{11} z_2 ...$$

$$V_2 : z_1 \xrightarrow{01} z_1 \xrightarrow{01} z_1 \xrightarrow{01} z_1 \xrightarrow{01} z_1 ...; \quad V_6 : z_2 \xrightarrow{01} z_2 \xrightarrow{01} z_2 \xrightarrow{01} z_2 \xrightarrow{01} z_2 ...$$

$$V_3 : z_1 \xrightarrow{10} z_1 \xrightarrow{10} z_1 \xrightarrow{10} z_1 \xrightarrow{10} z_1 ...; \quad V_7 : z_2 \xrightarrow{10} z_2 \xrightarrow{10} z_2 \xrightarrow{10} z_2 \xrightarrow{10} z_2 ...$$

$$V_4 : z_1 \xrightarrow{11} z_2 \xrightarrow{00} z_1 \xrightarrow{11} z_2 \xrightarrow{00} z_1 ...; \quad V_8 : z_2 \xrightarrow{11} z_2 \xrightarrow{11} z_2 \xrightarrow{11} z_2 \xrightarrow{11} z_2 ...$$

б)

Рис. 1. Полный проверяющий тест однородной сети многоразрядного сумматора:
а) – множество ЦОП; б) – множество циклических тестов

Таким образом, предложенная выше процедура синтеза проверяющих тестов (алгоритм 1) для однородной сети с наблюдаемыми выходами x_i', у которой автоматная модель ячейки имеет отличительную последовательность и является сильносвязным автоматом, позволяет получить множество тестовых наборов, которые обнаруживают любую неисправность, приводящую к искажению автоматной диаграммы ячейки, при ограничении, что в момент проверки допускается неисправной только одна ячейка сети (класс неисправностей F_1).

Выводы

В статье разработан алгоритм построения проверяющего эксперимента для однородной сети с наблюдаемыми выходами x_i', у которой автоматная модель ячейки является сильносвязным автоматом и имеет отличительную последовательность. Показано, что такая сеть является С-тестируемой. Определена нижняя и верхняя границы длины полного проверяющего теста, обнаруживающего класс неисправностей F_1 однородной сети.

Список использованной литературы

1. Cheng, W. T. Testing in two-dimensional iterative logic arrays [Text] / W. T. Cheng, J. N. Patel // Proc. 16-th Annu Int. Symposium on Fault-Tolerant Computing sistems, Vienna. – 1986. – P. 76–81.
2. Dias, F. J. Truth-table verification of an iterative logic array [Text] / F. J. Dias // IEEE Trans. Computers. – 1976. – № 6. – P. 605–613.
3. Friedman, A. D. Easily testable iterative systems [Text] / A. D. Friedman // IEEE Trans. Comput. – 1973. – №12. – P. 1061–1064.
4. Parthasarathy, R. A testable design of iterative logic array [Text] / R. Parthasarathy, S. M. Reddy // IEEE Trans. Comput. – 1981. – № 11. – P. 833–841.
5. Гилл, Н. Введение в теорию конечных автоматов [Текст] / Н. Гилл. – М. : Наука, 1966. – 272 с.

Корольова Я. Ю. Синтез перевіряючих тестів на основі циклічних відмітних послідовностей. Автором на основі теоретичного узагальнення і робіт у галузі тестового діагностування, а саме функціонального підходу і використання автоматних моделей осередків мережі, подано метод синтезу перевіряючих тестів однорідної мережі з виходами, що спостерігаються, у яких автоматні моделі осередків мають відмітні послідовності і є сильнозв’язними автоматами. Властивість сильнозв’язності автоматної моделі осередку мережі спрощує процедуру знаходження множини тестів, які перевіряють правильність переходу у всіх осередках одновимірної мережі.

Визначено нижню і верхню межі довжини повного перевіряючого тесту, який виявляє множину константних несправностей осередків, підклас перемичок і коротких замикань, змішування і інверсій, що не збільшують числа станів осередку однорідної мережі.

Розроблено алгоритм процесу генерації тестових послідовностей для однорідної мережі з виходами, що спостерігаються, осередок якої вписується таблицею переходів-виходів сильнозв'язного автомата, що має відмінну послідовність. Застосування циклічних відмітних послідовностей, отриманих відповідно до розробленого алгоритму, до однорідної мережі розглянутого класу дозволяє перевірити відповідність таблиці істинності кожного осередку мережі таблиці істинності справного осередку.

Розглянуто схему багаторозрядного паралельного суматора з послідовним переносом, яка подана однорідною мережею з виходами, що спостерігаються, у якій кожен осередок виконує функцію повного однорозрядного суматора. Відповідно до алгоритму для кожного переходу знайдена циклічна відмітна послідовність і побудовано вісім тестів, що перевіряють схему суматора будь-якої розмірності. Тестові набори дозволяють виявити будь-яку несправність, що приводить до спотворення автоматної діаграми осередку, при обмеженні, що в момент перевірки допускається несправною тільки одна комірка мережі.

Ключові слова: однорідна мережа, виходи, що спостерігаються, тестований, циклічна відмітна послідовність.

Koroleva Y. U. Synthesis of test tests based on cyclic distinctive sequences. The author on the basis of theoretical generalization and work in the field of test diagnostics, namely the functional approach and the use of automatic models of grid cells, presents a method for the synthesis of testing tests for a homogeneous network with observable outputs, in which the automatic cell models have distinctive sequences and are strongly connected automata. The strongly coupled property of the network model of the network cell simplifies the procedure for finding a set of tests that verify the correctness of the transition in all cells of a one-dimensional network.

The lower and upper limits of the length of the full test test are detected, which reveals a set of constant cell faults, a subclass of jumpers and short circuits, entanglements and inversions that do not increase the number of cell states of a homogeneous network.

An algorithm is developed for the generation of test sequences for a homogeneous network with observable outputs, the cell of which is inscribed by the transition-output table of a strongly connected automaton having a distinctive sequence. The use of cyclic distinctive sequences obtained in accordance with the developed algorithm to the homogeneous network of the considered class makes it possible to verify the correspondence of the truth table of each cell of the network to the truth table of a valid cell.

A scheme of a multi-bit parallel adder with sequential transfer is presented, represented by a homogeneous network with observable outputs, in which each cell performs the function of a complete single-digit adder. In accordance with the algorithm, for each transition, a cyclic distinctive sequence is found and 8 tests are constructed that verify the adder circuit of any dimension. Test kits allow you to detect any malfunction resulting in a distortion of the automatic cell diagram, with the restriction that at the time of testing only one cell of the network is allowed to malfunction.

Key words: homogeneous network, observed outputs, testability, cyclic distinctive sequence.

Надійшла 23.04.2018 р.

Королева Яна Юрьевна, *канд. техн. наук, доцент кафедры мультимедийных информационных технологий и систем, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт». E-mail: Yanakoroleva815@gmail.com. ORCID ID https://orcid.org/0000-0002-7203-5603*

Корольова Яна Юріївна, *канд. техн. наук, доцент кафедри мультимедійних інформаційних технологій і систем, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». E-mail: Yanakoroleva815@gmail.com. ORCID ID https://orcid.org/0000-0002-7203-5603*

Korolova Yana Urevna, *PhD, Associate Professor, department of multimedia information technologies and systems, National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute». E-mail: Yanakoroleva815@gmail.com. ORCID ID https://orcid.org/0000-0002-7203-5603*