

УДК 519.725, 625.7, 681.3

## Компактное тестирование на основе минимальных полиномов в цифровых схемах с самотестированием

Дяченко В.О., Дяченко О.Н.

Донецкий национальный технический университет

do@donntu.org

### Введение

Стремительные темпы разрастания всемирной паутины приводят к формированию цифровой цивилизации: если в 2000 году было 359 млн. пользователей сети Интернет, то в марте 2017 года количество пользователей уже 3732 млн. – это половина населения земного шара. В средствах массовой информации все чаще объявляют грядущую (а некоторые – уже наступившую) зеттабайтную эпоху развития человечества. Зеттабайт или зебибайт (ЗБ) – это  $10^{21}$  или  $2^{70}$  байт. Оценки самые разные, нередко, противоречивые. По оптимистическим прогнозам – в период с 2012 по 2020 годы ежегодно будет происходить удвоение объема данных и на конец этого периода он составит примерно 37 ЗБ [1]. Все чаще говорят об искусственном интеллекте. Наша планета постепенно оказывается в своеобразном информационном “коконе”. Достоинства информационной революции трудно переоценить. Вместе с тем, увеличение количества информации, которая передается, хранится и обрабатывается, приводит к требованиям обеспечения ее достоверности и надежности используемых аппаратных и программных средств. От успешного решения этих задач, с одной стороны, зависит процветание нынешней цивилизации, или, с другой стороны – ее саморазрушение, например, из-за случайного или намеренного сбоя в военных приложениях. Поэтому для устранения возможных ошибок или дефектов аппаратных средств используется весь арсенал методов и средств помехоустойчивого кодирования, встроенного самотестирования [1-19].

Одним из способов повышения тестопригодности СБИС микропроцессоров, устройств на ПЛИС является применение встроенных средств контроля, реализующих методы компактного тестирования. Метод сквозного сдвигового регистра (LSSD - level sensitive scan design) - другой широко известный способ снижения трудоемкости тестирования дискретных устройств. Метод LSSD, по принципу “разделяй и властвуй”, сводит задачу тестирования к проверке нескольких регистров сдвига и комбинационных схем. Наиболее совместимым с методом LSSD из широкого ряда методов компактного тестирования является сигнатурный анализ, поскольку основой анализатора тестовых реакций (АТР) в этом случае является регистр сдвига с линейными обратными связями (РСЛОС). С помощью незначительных аппаратных затрат сдвиговые регистры преобразуются в РСЛОС, которые выполняют роль генераторов тестовых последовательностей (ГТП) и АТР для тестирования комбинационных схем (КС).

Реализация методов компактного тестирования ставит задачу определения достоверности результатов контроля. В одной из первых работ, посвященных вопросу зависимости тестируемости схемы в зависимости от вида ГТП и АТР, предлагается синдромное тестирование [7]. В этом случае в качестве ГТП используется любой счетчик, АТР – двоичный счетчик. В работах [9- 12] рассматривается сигнатурно-синдромное исчерпывающее тестирование, при котором ГТП - двоичный счетчик, АТР – РСЛОС. В работах [3, 4, 8, 9, 14, 15] рассматриваются вопросы комплексной оценки достоверности тестирования КС при применении ГТП и АТР в виде РСЛОС, которая учитывает не только обнаруживающие способности АТР, но также структуру ГТП и характер тестовых реакций объекта диагностики. В частности, получен вывод о значительной зависимости эффективности сигнатурного анализа от выбора того или иного сочетания порождающих полиномов РСЛОС ГТП и АТР. Данная работа представляет собой продолжение исследований в этом направлении для случая тестирования на основе минимальных полиномов.

### Реализация самотестирования СБИС и ЭВМ

Применение принципов псевдослучайного и вероятностного диагностирования позволило эффективно диагностировать типовые элементы замены (ТЭЗ) и модули серийно выпускаемых в СССР ЭВМ серии ЕС, таких как: ЕС-1036, ЕС-1061, ЕС-1130, ЕС-1842 и др. Высокая эффективность компактного тестирования с использованием псевдослучайных тестовых воздействий и синтезированных генераторов псевдослучайных исчерпывающих тестов позволила применить его для реализации тестирования всех 108 типовых элементов замены ЭВМ ЕС-1130. [8]

Анализ диагностического обеспечения микропроцессорных СБИС ведущих зарубежных фирм: IBM (S/390, метод LSSD); Hewlett Packard (сигнатурный анализ); альянс компаний Apple, IBM и Motorola

(Power PC); Motorola (MC 202-206); Intel Corporation (микропроцессоры 80386, Pentium Pro); Advanced Micro Devices (AMD-K6), показывает, что 5-8 % площади кристалла СБИС занимают встроенные схемы тестирования, которые позволяют обнаружить практически 100% дефектов. Например, диагностическое обеспечение микропроцессора S/390 включает: ОЗУ, кэш, память, схемы их управления со встроенными схемами самотестирования; триггеры, регистровые сети, образующие в режиме тестирования сканируемый путь по методу LSSD; встроенные ГТП; встроенный АТР - многоканальный сигнатурный анализатор; порт JTAG в соответствии со стандартом IEEE 1149.1.

Методы исчерпывающего тестирования КС и сканирования позволяют вместе обнаруживать 95% неисправностей. Применение разных псевдослучайных последовательностей, обеспечивает 99,9 % покрытия всех неисправностей СБИС.

### **Цель статьи**

Цель статьи – провести анализ эффективности компактного тестирования цифровых схем при предположении, что ГТП и АТР - РСЛОС с минимальными порождающими полиномами. На основе такого анализа можно выбрать наиболее оптимальное сочетание порождающих полиномов для исчерпывающего тестирования комбинационных схем.

### **Аналитический метод вычисления сигнатур**

Предположим, что ГТП и АТР реализованы в виде РСЛОС с внутренними сумматорами в цепях обратной связи с порождающими полиномами соответственно  $h(X)$  и  $g(X)$ , причем оба полинома примитивные, а их корни связаны равенством  $\beta = \alpha^k$ ,  $m = \deg h(X) = \deg g(X)$ .

Тестовые наборы, которые поступают на входы исследуемой КС, представляют собой ненулевые элементы поля  $GF(2^m)$ , являющегося расширением поля  $GF(2)$  над полиномом  $h(X)$ . Эти элементы поля могут быть представлены в двоичном, полиномиальном и степенном обозначениях. Каждому ненулевому элементу  $\alpha^k$  поля  $GF(2^m)$  соответствует минимальный полином, причем, если минимальный полином примитивный, то его степень равна  $m$ . Если в качестве порождающего полинома РСЛОС АТР выбрать минимальный полином, соответствующий элементу  $\alpha^k$ , то между корнями полиномов  $h(X)$  и  $g(X)$  будет выполнено равенство  $\beta = \alpha^k$ . Анализ таблицы минимальных полиномов [13] показывает, что для любой степени  $m < 5$  существует только два примитивных полинома, причем  $\beta = \alpha^{-1}$ , т. е. эти полиномы являются двойственными (взаимобратными). Поэтому для примеров будем рассматривать  $h(X)$  степени  $m=12$ .

Основное отличие предлагаемого метода расчета сигнатур от известного [4] заключается в выборе степенного обозначения тестовых наборов вместо двоичного. В этом случае значение сигнатуры для конъюнкции с рангом  $m$  может быть вычислено согласно следующему выражению:  $S = M_k X^{-Ak}$ , где  $X^A$  - степенное обозначение тестового набора,  $M$  - матрица для перехода от значений РСЛОС ГТП к значениям РСЛОС АТР.

### **Параметр оценки эффективности сигнатурного анализа**

В общем случае для  $k=-1$  сигнатура конъюнкции с рангом  $r=m-1$  равна произведению матрицы  $M_i$  и  $X^i$ , где  $i$  - индекс отсутствующей переменной, уменьшенный на единицу; сигнатура конъюнкции с  $r < m-1$  равна нулю.

Аналогично, для произвольных примитивных полиномов  $h(X)$  и  $g(X)$  степени  $m$ , корни которых связаны равенством  $\beta = \alpha^{-3}$ , для конъюнкции с рангом  $r < m-2$   $S = M_{-3}(0) = 0$ . Сигнатура равна нулю в следующих случаях:  $k=-5$ ,  $r < m-3$ ;  $k=-7$ ,  $r < m-4$ ;  $k=-9$ ,  $r < m-3$ ;  $k=-11$ ,  $r < m-4$ ;  $k=-13$ ,  $r < m-4$ ; для произвольного  $k$   $r < m-1-w$ , где  $w$  - вес двоичной записи  $-k$ .

Если рассматривать полученный результат при конкретных значениях  $m$ , условие равенства сигнатуры нулю можно сформулировать иначе:  $r < w[(k)_0]$ , где  $w[(k)_0]$  - вес двоичной записи  $k$  в обратном коде.

Таким образом, если неисправность в КС, описываемой функцией  $F$ , приводит к тестовой реакции  $F_n$ , и в представлении  $F + F_n$  в виде полинома Жегалкина присутствуют только конъюнкции с рангом  $r < w[(k)_0]$ , то  $S(F + F_n) = S(F) + S(F_n) = 0$ , или  $S(F) = S(F_n)$ , т.е. неисправность будет необнаруженной.

Число  $w$  (вес двоичной записи  $-k$ ) представляет собой параметр, с помощью которого можно оценить эффективность сигнатурного анализа при применении в качестве ГТП и АТР РСЛОС с порождающими примитивными полиномами одинаковой степени. Параметр  $w$  принимает минимальное значение 1 при  $k=-1$ , и максимальное значение  $m-1$  при  $k=1$ .

Несмотря на трудоемкость операций, предлагаемый метод аналитического расчета значений сигнатур позволяет сформулировать важный вывод: при любом начальном состоянии РСЛОС ГТП и РСЛОС АТР с порождающими примитивным полиномом  $h(X)$  и неприводимым полиномом  $g(X)$ ,

корни которых связаны равенством  $b=a^k$ ,  $\text{deg}h(X)=m$ ,  $\text{deg}g(X)=n$ , значение сигнатуры конъюнкции с рангом  $r < m - w$ , где  $w$  - вес  $m$ -разрядного двоичного числа  $-k$ , равна нулю.

### Сравнительная оценка различных сочетаний порождающих полиномов

На основании приведенных утверждений можно выполнить простую сравнительную оценку различных сочетаний порождающих полиномов РСЛОС ГТП и АТР.

Например, для  $h(X)=X^{12}+X^6+X^4+X+1$  при  $g(X)=X^{12}+X^6+X^4+X+1$   $z=1$ , сигнатура конъюнкции с рангом  $r < 1$  равна нулю;

при  $g(X)=X^6+X^5+1$   $z=2$ ,  $k=(2^{12}-1)/(2^6-1)=65$ , поэтому  $w$  принимает максимальное значение для  $\text{deg}g(X)=6$  и  $\text{deg}h(X)=12$ , равное  $12-2=10$ , сигнатура конъюнкции с рангом  $r < 2$  равна нулю.

Эти и другие результаты анализа для различных сочетаний минимальных полиномов, выбранных из таблицы неприводимых полиномов для степени 12 [13], приведены в таблице 1, а в таблице 2 аналогичные результаты для соответствующих двойственных полиномов.

Таблица 1 – Результаты анализа для различных сочетаний минимальных полиномов

k	k 2 c/c	g(X) 8 c/c	g(X) 2 c/c	g(X)	z	w(-k)	m-w=r<
1	1	10123	1 000 001 010 011	$X^{12}+X^6+X^4+X+1$	1	12-1=11	12-11=1
65	1000001	00141	1 100 001	$X^6+X^5+1$	2	12-2=10	12-10=2
195	11000011	00165	1110101	$X^6+X^5+X^4+X^2+1$	2	12-4=8	12-8=4
273	100010001	00023	10 011	$X^4+X+1$	3	12-3=9	12-9=3
455	111000111	00111	1 001 001	$X^6+X^3+1$	2	12-6=6	12-6=6
585	1001001001	00013	1 011	$X^3+X+1$	4	12-4=8	12-8=4
715	1011001011	00133	1 011 011	$X^6+X^4+X^3+X+1$	2	12-6=6	12-6=6
819	1100110011	00037	11 111	$X^4+X^3+X^2+X+1$	3	12-6=6	12-6=6
1365	10101010101	00007	111	$X^2+X+1$	6	12-6=6	12-6=6

Таблица 2 – Результаты анализа для различных сочетаний двойственных минимальных полиномов

k	k 2 c/c	g*(X) 8 c/c	g*(X) 2 c/c	g*(X)	z	w(-k)	m-w=r<
-1	1	14501	1 100 101 000 001	$X^{12}+X^{11}+X^8+X^6+1$	1	1	12-1=11
-65	1000001	00103	1 000 011	$X^6+X+1$	2	2	12-2=10
-195	11000011	00127	1 010 111	$X^6+X^4+X^2+X+1$	2	4	12-4=8
-273	100010001	00031	11 001	$X^4+X^3+1$	3	3	12-3=9
-455	111000111	00111	1 001 001	$X^6+X^3+1$	2	6	12-6=6
-585	1001001001	00013	1 011	$X^3+X+1$	4	4	12-4=8
-715	1011001011	00155	1 101 101	$X^6+X^5+X^3+X^2+1$	2	6	12-6=6
-819	1100110011	00037	11 111	$X^4+X^3+X^2+X+1$	3	6	12-6=6
-1365	10101010101	00007	111	$X^2+X+1$	6	6	12-6=6

### Выводы

Из приведенных вариантов сочетаний порождающих полиномов наилучшим с точки зрения обеспечения максимальной эффективности сигнатурного анализа является первый из таблицы 1 и наихудшим - из таблицы 2, при этом разрядность РСЛОС АТР равна 12. При разрядности РСЛОС АТР равной 6 из рассмотренных девяти вариантов минимальных полиномов наихудшими являются пятый, седьмой (табл. 1), причем все варианты являются хуже второго (разрядность РСЛОС АТР равна 6) и четвертого (разрядность РСЛОС АТР равна 4). Как правило, для минимальной аппаратной реализации порождающие полиномы для РСЛОС ГТП и АТР выбирают с минимальным количеством ненулевых коэффициентов. Такие полиномы, в частности, в таблице неприводимых полиномов [13] расположены на первом месте. Рассмотренный пример показывает, что для разрядности РСЛОС ГТП и АТР соответственно 12 и 6, выбор первых минимальных полиномов (табл. 1) для исчерпывающего тестирования КС является наиболее эффективным, а выбор первых двойственных минимальных полиномов (табл. 2) является наихудшим. Эти и другие варианты выбора порождающих полиномов были проверены с помощью имитационного моделирования на основе САПР Active-HDL.

Полученные результаты могут найти применение при реализации самотестирования цифровых схем, проектировании схем встроенного контроля и диагностирования, например, для ПЛИС, при компактном тестировании КС, в том числе, при сочетании с методом сквозного сдвигового регистра.

## **Список источников**

1. Гладких, А. А. Методы эффективного декодирования избыточных кодов и их современные приложения / А. А. Гладких, Р. В. Климов, Н. Ю. Чилихин. – Ульяновск : УлГТУ, 2016. – 258 с.
2. Richard E. Blahut. Algebraic Codes for Data Transmission/ Cambridge University Press, 2012. – 498p.
3. Дяченко, О.Н. Альтернативный метод укорачивания циклических кодов / Дяченко О.Н., Дяченко В.О. // Электронные информационные системы. 2017. № 1 (12). С. 94–100.
4. Ярмолик, В.Н. Эффективность сигнатурного анализа в само-тестирующихся СБИС / Ярмолик В.Н., Калоша Е.П. // Электрон. моделирование.- 1992.- 14, №3. - С.51-56.
5. Ершов, А.Н. Улучшение радиационной стойкости памяти с помощью помехоустойчивых кодов / Ершов А.Н., Петров С. В., Пятюшин Ю.П., Коханько Д. В., Зяблов В.В. и др. // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2014, том 1, выпуск 4, с. 42–49.
6. Дяченко, В.О. Циклическое кодирование цифровой информации на основе двойственных полиномов/ Дяченко В.О., Дяченко О.Н. // Современные тенденции развития и перспективы внедрения инновационных технологий в машиностроении, образовании и экономике: материалы II Международной научно-практической конференции (Азов, 19 мая 2015 г.) – Ростов н/Д, ДГТУ, 2015. – С. 71-76.
7. Savir, J. Syndrome-testable design of combinational circuits / Savir J. // IEEE Trans. Com-put. – 1980. – С-29. – P. 442-451.
8. Ярмолик, В.Н. Тестовое диагностирование аппаратного и программного обеспечения вычислительных систем / Ярмолик В.Н., Иванюк А.А. // Доклады БГУИР, № 2 (80), 2014. – С.127-142.
9. Дяченко, О.Н. Сравнительная оценка эффективности методов компактного тестирования комбинационных схем / Дяченко О.Н. // Сборник трудов факультета вычислительной техники и информатики. Выпуск 1. Донецкий государственный технический университет.- Донецк: ДонГТУ, 1996.- С.103-110.
10. Дяченко, О.Н. Анализ сигнатурной тестируемости комбинационных схем / Дяченко О.Н. // Автоматика и вычислительная техника. - 1990. - № 5. С.85-89.
11. Дяченко, О.Н. Спектральный метод компактного тестирования в области сигнатурного анализа / Дяченко О.Н., Тарасенко А.Н. // Электрон. моделирование.- 1992.- 14, №6.- С.60-65.
12. А.с. 1829035 СССР, МКИ<sup>5</sup> G06F 11/00. Сигнатурно-синдромный анализатор / О.Н.Дяченко (СССР) № 4864016/24; Оpubл. 23.07.93.Бюл. № 27. – 2с.
13. Питерсон, У. Коды, исправляющие ошибки / Питерсон У., Уэлдон Э. - М.:Мир. - 1976.- 594с., ил.
14. Дяченко, В.О. Циклическое кодирование цифровой информации на основе двойственных полиномов / Дяченко В.О., Дяченко О.Н. // Современные тенденции развития и перспективы внедрения инновационных технологий в машиностроении, образовании и экономике: материалы II Международной научно-практической конференции (Азов, 19 мая 2015 г.) – Ростов н/Д, ДГТУ, 2015. – С. 71-76
15. Дяченко, В.О. Особенности применения двойственных полиномов для аппаратной реализации циклических кодов / Дяченко В.О., Дяченко О.Н. // Информационные управляющие системы и компьютерный мониторинг в рамках форума “Инновационные перспективы Донбасса” (ИУС КМ-2015): VI Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых, 20-22 мая 2015, г.Донецк: / Донец. национал. техн. ун-т; сост.: К.Н.Маренич (председатель) и др. – Донецк: ДонНТУ, 2015. - С. 130–136.
16. Дяченко, В.О. Альтернативный способ построения укороченных кодов Файра / Дяченко В.О., Дяченко О.Н. // Компьютерная и программная инженерия. Сборник материалов международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных 15-16 декабря 2015 года. - Донецк, ДонНТУ - 2015. – С. 86–89.
17. Дяченко, О.Н. Укорачивание циклических кодов на основе альтернативного деления полиномов / Дяченко О.Н., Дяченко В.О. // Современные тенденции развития и перспективы внедрения инновационных технологий в машиностроении, образовании и экономике: материалы III Международной научно-практической конференции (Азов, 25 мая 2016 г.). / Азов: Изд-во: ООО "АзовПечать", 2016. – С. 45-50
18. Дяченко, О.Н. Альтернативный метод укорачивания циклических кодов / Дяченко О.Н., Дяченко В.О. // Электронные информационные системы. 2017. № 1 (12). С. 94–100.
19. Дяченко, О.Н. Аппаратная реализация кодов БЧХ и кодов Рида-Соломона / Дяченко О.Н., Дяченко В.О. // Современные тенденции развития и перспективы внедрения инновационных технологий в машиностроении, образовании и экономике: материалы IV Международной научно-практической конференции (Азов, 25 мая 2017 г.). – Ростов н/Д, ДГТУ, 2017. – С. 30-34.

*Дяченко В.О., Дяченко О.Н. Компактное тестирование на основе минимальных полиномов в цифровых схемах с самотестированием. Выполнен анализ эффективности компактного тестирования комбинационных схем, учитывающего характер распределения ошибок в тестовой реакции и структуру генератора тестовых последовательностей и анализаторов тестовых реакций, построенных на основе минимальных полиномов. Предложены рекомендации по выбору порождающих полиномов регистров сдвига с линейными обратными связями для различных вариантов компактного тестирования.*

*Ключевые слова:* минимальные полиномы, генератор тестовых последовательностей, анализатор тестовых реакций, порождающий полином.

*Dyachenko O. V., Dyachenko O. N. Compact testing based on minimal polynomials in digital circuits with self-test. The efficiency of compact testing of combinational circuits based on the nature of the error distribution in the test reaction and the structure of the generator of test sequences and analyzers test reactions based on minimal polynomial, under study. Recommendations on the choice of the generator polynomials of linear feedback shift register for different variants of compact testing are proposed.*

*Keywords:* minimal polynomials, generator of test sequence, analyzer of test reactions, generating polynomial.