

Проектирование и тестирование логических устройств

УДК 681.518.5:004.052.32

**Вал. В. Сапожников, д-р техн. наук,
Вл. В. Сапожников, д-р техн. наук,
Д. В. Ефанов, канд. техн. наук,
В. В. Дмитриев, канд. техн. наук**

Кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах»,
Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I

КОД С СУММИРОВАНИЕМ ВЗВЕШЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ РАЗРЯДОВ БЕЗ ПЕРЕНОСОВ В СИСТЕМАХ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ

Описывается разделимый код, который может быть эффективно использован при организации систем функционального контроля комбинационных логических схем. Данный код принадлежит к классу кодов с суммированием взвешенных информационных разрядов и строится по простым правилам, что соответственно определяет и простые структуры кодирующей аппаратуры. Приведенный код имеет такое же количество контрольных разрядов, как и классический код Бергера, однако при этом обнаруживает большее количество ошибок в информационных векторах при установленных значениях длин информационных и контрольных векторов. Что немаловажно, новый код с суммированием обнаруживает любые двукратные искажения в информационных векторах, что определяет перспективы его применения в задачах технической диагностики. В статье также дается сравнение описываемого кода с классическим кодом Бергера. Приводятся результаты экспериментов с набором контрольных комбинационных схем MCNC Benchmarks по организации систем функционального контроля.

техническая диагностика; система функционального контроля; комбинационная схема; кодовое слово; код Бергера; взвешенный код с суммированием; информационный вектор; ошибка в информационном векторе; структурная избыточность

Введение

Для определения технического состояния комбинационных логических схем в процессе их работы используются системы функционального контроля [1–4]. Неисправности в структуре комбинационной схемы $F(x)$ приводят

к искажениям значений вычисляемых ею булевых функций f_1, f_2, \dots, f_m , что фиксируется схемой контроля (рис. 1). Таким образом, осуществляется косвенный контроль неисправностей по проявлениям их на выходах объекта диагностирования. В структуре схемы контроля выделяются два блока – блок контрольной логики $G(x)$ и самопроверяемый тестер (TSC). Блок контрольной логики формирует на тех же входных воздействиях $\langle x_1, x_2, \dots, x_t \rangle$, что и контролируемая схема значения рабочих функций, систему контрольных булевых функций g_1, g_2, \dots, g_k . Самопроверяемый тестер предназначен для проверки соответствия между рабочими и контрольными функциями в процессе работы системы функционального контроля. При определении несоответствия тестер вырабатывает защитный непарафазный сигнал $\langle 00 \rangle$ или $\langle 11 \rangle$. Сам тестер, будучи «последним сторожем», является самопроверяемым и обладает свойствами формирования защитных значений на выходе и обнаружения любых внутренних ошибок, хотя бы на одном входном наборе [5, 6].

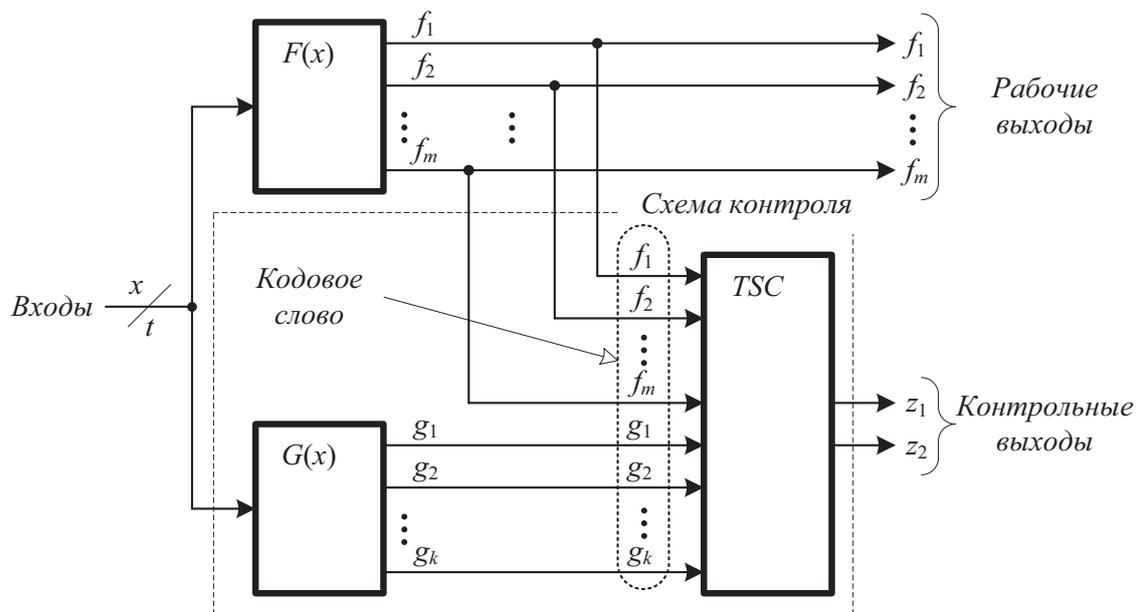


Рис. 1. Структурная схема системы функционального контроля

В основе системы функционального контроля, структура которой приведена на рис. 1, лежит заранее выбранный разделимый код с обнаружением ошибок [7–9]. Значения разрядов информационного вектора данного кода формируются блоком $F(x)$, а значения разрядов контрольного вектора вычисляются блоком $G(x)$. Таким образом, в системе функционального контроля формируется кодовое слово $\langle f_1, f_2, \dots, f_m, g_1, g_2, \dots, g_k \rangle$ заранее выбранного кода, имеющее t информационных и k контрольных разрядов. Тестер фактически осуществляет проверку соответствия разрядов информационного и контрольного векторов друг другу.

Как правило, в структуре схемы $F(x)$ рассматриваются одиночные константные неисправности на выходах логических элементов [1]. В процессе работы системы функционального контроля, ввиду отдельной реализации всех ее блоков, одновременно возможно возникновение неисправности только в одном из блоков [10]. Неисправности блока $G(x)$ искажают значения разрядов контрольного вектора, что обнаруживается схемой тестера. Неисправности же в структуре контролируемого объекта искажают значения разрядов информационного вектора и в общем случае могут быть обнаружены или не обнаружены схемой тестера в зависимости от вида возникшей ошибки. Так, например, кодом паритета не обнаруживается никакой ошибки четной кратностью в информационных векторах [11, 12].

В системах управления структура, изображенная на рис. 1, должна удовлетворять требованию 100%-го обнаружения одиночных константных неисправностей в контролируемом объекте. Это свойство обеспечивается путем разделения выходов на группы и использования соответствующего кода для обнаружения в группе любых неисправностей или же реконфигурацией структуры контролируемого объекта в контролепригодную структуру по определенным правилам [5, 13, 14]. Эти правила определяются свойствами разделимых кодов, используемых для организации системы функционального контроля.

Изучая свойства разделимых кодов, можно формулировать алгоритмы построения систем функционального контроля со 100%-м обнаружением ошибок в контролируемых схемах. В данной статье описывается новый разделимый код, обладающий рядом полезных особенностей, что говорит о хороших перспективах его применения при организации систем функционального контроля.

1 Классический код Бергера

В системах функционального контроля часто используют классические коды с суммированием, или коды Бергера [15]. В коде Бергера разряды контрольного вектора содержат двоичное число, равное числу единичных разрядов в информационном векторе (равное весу r информационного вектора). Количество контрольных разрядов определяется выражением $k = \lceil \log_2(m+1) \rceil$, где запись $\lceil \dots \rceil$ обозначает целое сверху от вычисляемого значения. Обозначим код Бергера как $S(m,k)$ -код.

Из правил построения $S(m,k)$ -кода следует, что все информационные векторы с одинаковым весом будут иметь одинаковые контрольные векторы. Например, в табл. 1 дается распределение информационных векторов на группы с одинаковыми контрольными векторами (на контрольные группы).

Таблица 1. Распределение информационных векторов между контрольными векторами $S(4,3)$ -кода

Контрольные группы							
000	001	010	011	100	101	110	111
0000	0001	0011	0111	1111			
	0010	0101	1011				
	0100	0110	1101				
	1000	1001	1110				
		1010					
		1100					

Эта форма задания кода удобна тем, что позволяет достаточно просто анализировать его характеристики по обнаружению ошибок в информационных векторах. Так, любая ошибка, переводящая информационный вектор, расположенный в одной контрольной группе, в информационный вектор той же контрольной группы, обнаружена не будет. Все остальные ошибки кодом обнаруживаются. Поскольку в одной контрольной группе у $S(m,k)$ -кода присутствуют только информационные векторы с одинаковым весом, им обнаруживается любая монотонная ошибка, что эффективно используется при построении контролепригодных систем автоматики и вычислительной техники [5, 14].

Количество информационных векторов с весом r равно C_m^r . Отсюда следует, что с увеличением значения r до величины $\left\lfloor \frac{m}{2} \right\rfloor$ (запись $\lfloor \dots \rfloor$ обозначает

целое снизу от вычисляемого значения) количество информационных векторов с одинаковым контрольным вектором увеличивается. С дальнейшим увеличением числа r до величины m количество информационных векторов с одинаковым контрольным вектором уменьшается. Некоторые контрольные группы в $S(m,k)$ -коде вообще оказываются незаполненными (см. табл. 1). Такая неравномерность в распределении информационных векторов между контрольными векторами обуславливает наличие большого количества необнаруживаемых $S(m,k)$ -кодом ошибок – любая разнонаправленная ошибка в информационном векторе, содержащая группу искажений $\{0 \rightarrow 1; 1 \rightarrow 0\}$ (симметричная ошибка [16–18]), данным кодом обнаружена не будет. Более того, кодом Бергера не обнаруживается большое количество ошибок с малой кратностью d . В табл. 2 даются значения величины β_d – доли необнаруживаемых ошибок кратностью d от общего количества ошибок данной кратностью в информационных векторах для $S(m,k)$ -кодов. В [19] доказано, что вне зависимости от длины информационного вектора для кодов Бергера значение величины β_d постоянно для каждого значения d .

Таблица 2. Значения величины β_d для $S(m,k)$ -кодов

Значения величины β_d %									
2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
50	37,5	31,25	27,344	24,609	22,559	20,947	19,638	18,547	17,62

$S(m,k)$ -код не обнаруживает половину двукратных ошибок и более трети четырехкратных ошибок в информационных векторах.

Известно достаточно большое количество алгоритмов модификации кода Бергера, позволяющих уменьшить количество необнаруживаемых ими ошибок [10, 20–26]. При модификации фактически меняется распределение информационных векторов между контрольными векторами. Во многих случаях уменьшение количества ошибок достигается за счет внесения в класс необнаруживаемых некоторого количества монотонных ошибок.

В [26, 27] рассматривается абстрактный оптимальный разделимый код, обладающий для данных значений m и k минимальным общим количеством необнаруживаемых ошибок в информационных векторах:

$$N_{m,k}^{\min} = 2^m (2^{m-k} - 1). \quad (1)$$

В оптимальном разделимом коде все 2^m информационных вектора равномерно распределены между всеми 2^k контрольными векторами. «Близость» любого разделимого кода к оптимальному коду оценивается коэффициентом эффективности [26, 27]:

$$\xi_{m,k} = \frac{N_{m,k}^{\min}}{N_{m,k}}, \quad (2)$$

где $N_{m,k}$ – количество необнаруживаемых кодом ошибок в информационных векторах.

Чем ближе $\xi_{m,k}$ к 1, тем эффективнее код обнаруживает ошибки в информационных векторах при заданных значениях m и k .

Коды Бергера не обнаруживают следующее количество ошибок в информационных векторах [19]:

$$N_{m,k} = \sum_{d=2}^{m,(m-1)} 2^{m-d} C_m^d C_d^{\frac{d}{2}} = 2^m \sum_{d=2}^{m,(m-1)} \beta_d C_m^d, \quad (3)$$

где суммируются ошибки только четной кратностью $d = 2, 4, \dots, m$ – при четном значении m и $d = 2, 4, \dots, (m-1)$ – при нечетном m .

Коэффициент эффективности $S(m,k)$ -кодов:

$$\xi_{m,k} = \frac{2^m (2^{m-k} - 1)}{2^m \sum_{d=2}^{m,(m-1)} \beta_d C_m^d} = \frac{2^{m-k} - 1}{\sum_{d=2}^{m,(m-1)} \beta_d C_m^d}. \quad (4)$$

$S(m,k)$ -коды далеки от оптимальных разделимых кодов (рис. 2). Для большинства кодов Бергера значение $\xi_{m,k} < 0,5$, и только для кодов при m , равном 3, 6 и 7, превышает данное значение.

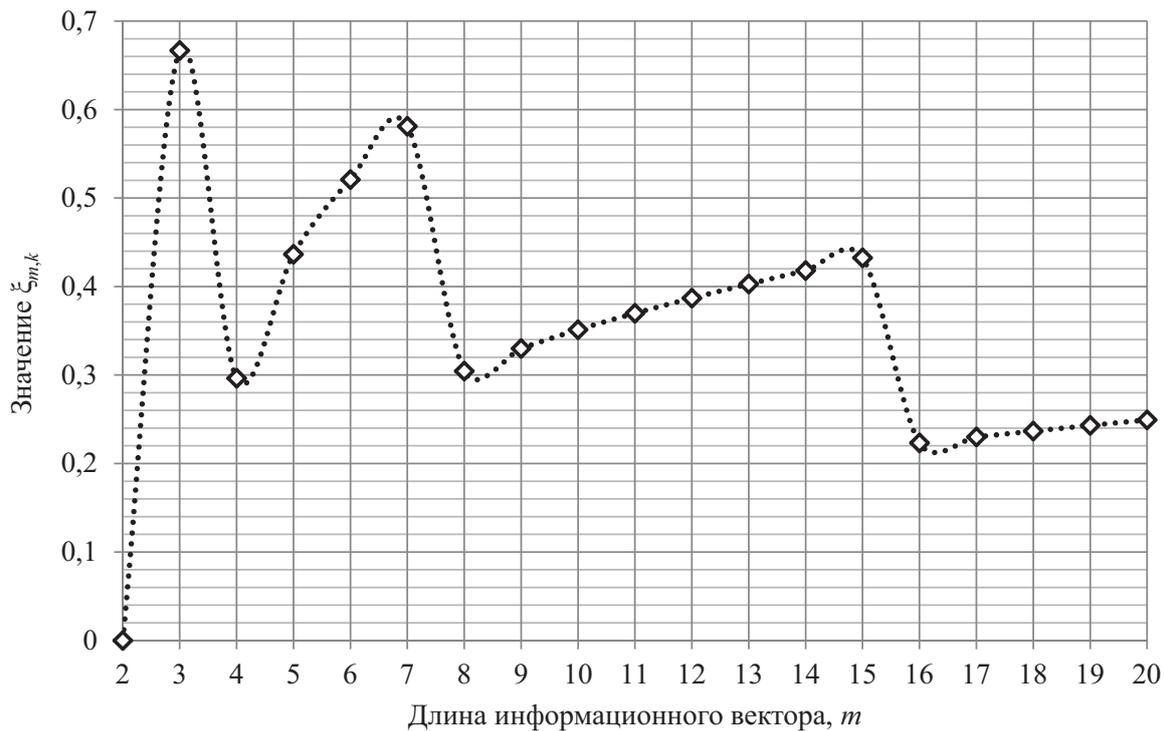


Рис. 2. Значения коэффициента $\xi_{m,k}$ для $S(m,k)$ -кодов

Таким образом, при достаточно большом количестве необнаруживаемых ошибок в информационных векторах, в том числе ошибок с малой кратностью, коды Бергера также неэффективно используют свои контрольные разряды. Возникает задача построения оптимального разделимого кода, у которого максимум ошибок будет смещен в сторону бóльшей кратности.

2 Код с суммированием взвешенных информационных разрядов без переносов

Оптимальный разделимый код с улучшенными по сравнению с кодом Бергера характеристиками обнаружения ошибок в информационных векторах при таком же количестве контрольных разрядов может быть построен

на принципе приписывания весовых коэффициентов разрядам информационного вектора [15, 25, 28] и последующих операциях с ними.

Приведем алгоритм построения оптимального кода с суммированием [29, 30].

1. Разрядам информационного вектора, начиная с младшего, приписываются весовые коэффициенты, образующие ряд последовательно возрастающих натуральных чисел: $[m; m - 1; \dots; 2; 1]$.

2. Значение каждого весового коэффициента w_i представляется в двоичном виде: $[w_i]_2$.

3. Определяется число $[W]_2$ – сумма двоичных чисел $[w_i]_2$ весовых коэффициентов единичных разрядов информационного вектора без переносов:

$$[W]_2 = \bigoplus_{i=1}^m f_i[w_i]. \quad (5)$$

4. Число $[W]_2$ записывается в разряды контрольного вектора.

Данный код обозначим как $SWC(m,k)$ -код. В табл. 3 представлены векторы $SWC(4,3)$ -кода, а в табл. 4 – распределение информационных векторов

Таблица 3. Получение разрядов контрольного вектора $SWC(4,3)$ -кода

№	Разряды информационного вектора				Суммируемые весовые коэффициенты		Разряды контрольного вектора		
	f_4	f_3	f_2	f_1	В десятичном виде	В двоичном виде	g_3	g_2	g_1
	$w_4=4$	$w_3=3$	$w_2=2$	$w_1=1$					
0	0	0	0	0	–	–	0	0	0
1	0	0	0	1	1	001	0	0	1
2	0	0	1	0	2	010	0	1	0
3	0	0	1	1	1+2	001+010	0	1	1
4	0	1	0	0	3	011	0	1	1
5	0	1	0	1	1+3	001+011	0	1	0
6	0	1	1	0	2+3	010+011	0	0	1
7	0	1	1	1	1+2+3	001+010+011	0	0	0
8	1	0	0	0	4	100	1	0	0
9	1	0	0	1	1+4	001+100	1	0	1
10	1	0	1	0	2+4	010+100	1	1	0
11	1	0	1	1	1+2+4	001+010+100	1	1	1
12	1	1	0	0	3+4	011+100	1	1	1
13	1	1	0	1	1+3+4	001+011+100	1	1	0
14	1	1	1	0	2+3+4	010+011+100	1	0	1
15	1	1	1	1	1+2+3+4	001+010+011+100	1	0	0

Таблица 4. Распределение информационных векторов $SWC(4,3)$ -кода на контрольные группы

Контрольные группы							
000	001	010	011	100	101	110	111
Информационные векторы							
0000	0001	0010	0011	1000	1001	1010	1011
0111	0110	0101	0100	1111	1110	1101	1100

между контрольными векторами. Из анализа табл. 4 следует, что $SWC(4,3)$ -код не обнаруживает 16 трехкратных ошибок в информационных векторах.

В табл. 5 приведены рассчитанные значения количества необнаруживаемых ошибок в $SWC(m,k)$ -кодах в сравнении с аналогичной величиной для $S(m,k)$ -кодов. В каждой клетке таблицы приведено два числа – верхнее число соответствует количеству необнаруживаемых ошибок в $SWC(m,k)$ -коде, нижнее – в $S(m,k)$ -коде. $SWC(m,k)$ -код гораздо эффективнее обнаруживает ошибки любой четной кратностью в информационных векторах, чем $S(m,k)$ -код. Однако $SWC(m,k)$ -кодом не обнаруживается некоторое количество ошибок нечетной кратностью. На рис. 3 сравниваются $SWT(16,5)$ - и $S(16,5)$ -коды по количеству необнаруживаемых ошибок каждой кратностью. Из рисунка видно, насколько эффективен новый код в сравнении с кодом Бергера. На рис. 4 приводятся графики величин β_p , %, для $SWC(m,k)$ -кода при малых значениях d . При $m > 8$ значения β_3 , β_4 и β_5 не превышают 10%.

3 Применение кодов Бергера и кодов с суммированием взвешенных информационных разрядов без переносов при организации систем функционального контроля

Оценим эффективность использования $SWC(m,k)$ -кодов при организации систем функционального контроля на стандартных контрольных комбинационных схемах MCNC Benchmarks [31].

Контрольные комбинационные схемы в MCNC Benchmarks представлены, в том числе, в формате *.pla, фактически содержащем в сжатом виде таблицу истинности функций, вычисляемых схемой. С использованием интерпретатора SIS можно определять различные параметры контрольной комбинационной схемы, реализованной в том или ином базисе, который задается библиотекой функциональных элементов [32]. Одним из ключевых параметров является площадь L , занимаемая устройством на кристалле. С использованием разработанного программного обеспечения для ряда контрольных комбинационных схем в формате *.pla были получены все блоки системы

Таблица 5. Необнаруживаемые ошибки в информационных векторах $SWC(m, k)$ - и $S(m, k)$ -кодов

m	k	Количество необнаруживаемых ошибок кратностью d_i, N_d														$N_{m,k}$		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14		15	16
2	2	0	0															0
3	2	0	2															2
3	2	0	0	8														8
4	3	0	12	0														12
4	3	0	0	16	0													16
5	3	0	48	0	6													54
5	3	0	0	64	32	0												96
6	3	0	160	0	60	0												220
6	3	0	0	256	192	0	0											448
7	3	0	480	0	360	0	20											860
7	3	0	0	896	896	0	0	128										1920
8	4	0	1344	0	1680	0	280	0										3304
8	4	0	0	1792	1792	0	0	256	0									3840
9	4	0	3584	0	6720	0	2240	0	70									12614
9	4	0	0	4096	5120	2048	2048	2048	512	0								15872
10	4	0	9216	0	24192	0	13440	0	1260	0								48108
10	4	0	0	10240	16384	12288	12288	10240	3072	0	0							64512
11	4	0	23040	0	80640	0	67200	0	12600	0	252							183732
11	4	0	0	26624	53248	49152	49152	53248	26624	0	2048							260096
12	4	0	56320	0	253440	0	295680	0	92400	0	5544							703384
12	4	0	0	69632	155648	180224	212992	221184	135168	49152	16384	4096						1044480
13	4	0	135168	0	760320	0	1182720	0	554324	0	66528	0						2699984
13	4	0	0	180224	450560	589824	786432	950272	712704	327680	131072	49152	8192	0				4186112
14	4	0	319488	0	2196480	0	4392960	0	2882880	0	576576	0	24024	0				10392408
14	4	0	0	458752	1261568	1835008	2752512	3801088	3325952	1835008	917504	458752	114688	0	0			16760832
15	4	0	745472	0	6150144	0	15375360	0	13453440	0	4036032	0	336336	0	3432			40100216
15	4	0	0	1146880	3440640	5505024	9175040	14254080	14254080	9175040	5505024	3440640	1146880	0	0	32768		67076096
16	5	0	1720320	0	16773120	0	51251200	0	57657600	0	24216192	0	3363360	0	102960	0		155084752
16	5	0	0	2293760	6881280	11010048	18350080	28508160	28508160	18350080	11010048	6881280	2293760	0	0	65536	0	134152192
		0	3932160	0	44728320	0	164003840	0	230630400	0	129153024	0	26906880	0	1647360	0	12870	601014854

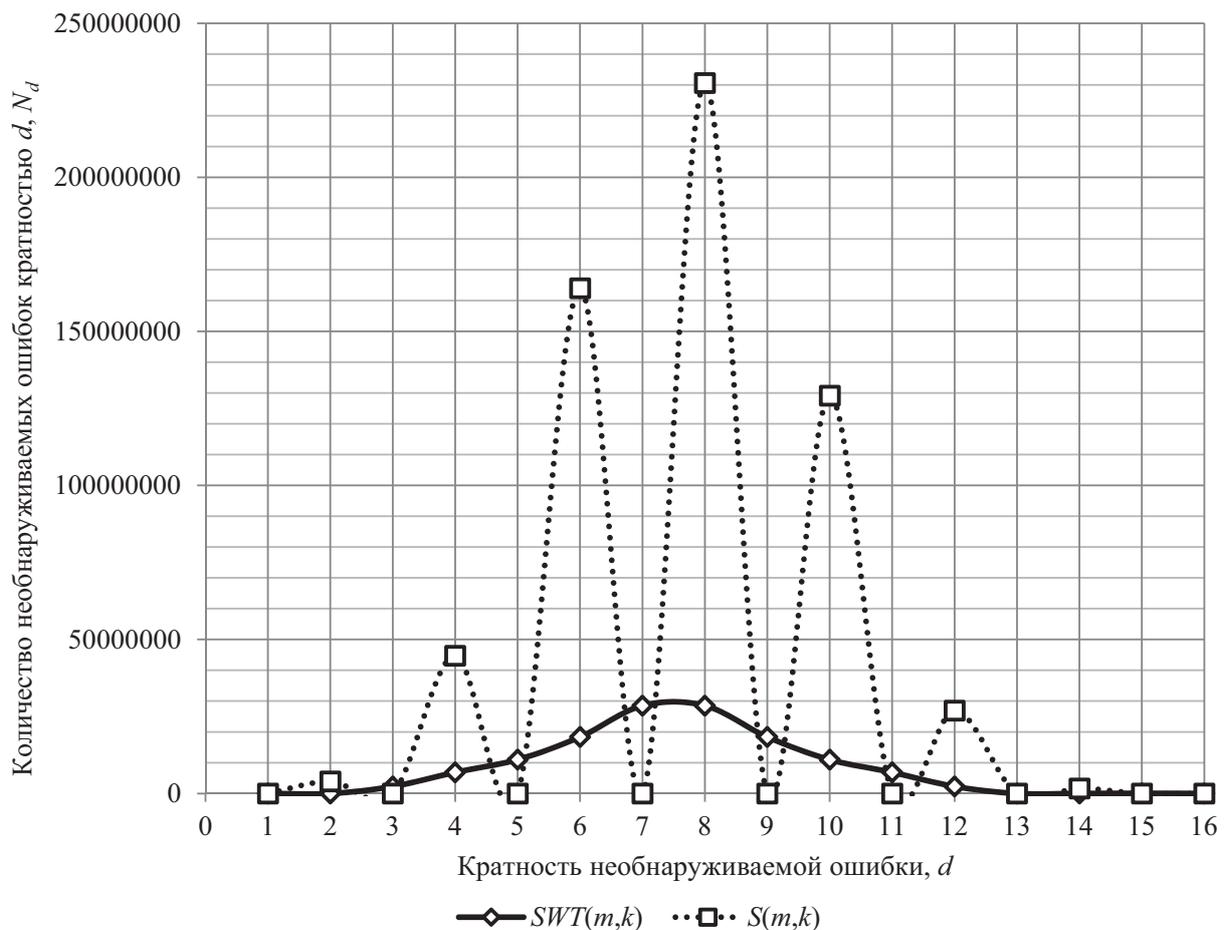


Рис. 3. Сравнение $WSH(16,5)$ и $S(16,5)$ кодов по обнаружению ошибок каждой кратностью

функционального контроля (см. рис. 1), а затем для каждого из них определены показатели площади в условных единицах SIS. При этом произведена оценка площади как при отдельной реализации контролируемой схемы $F(x)$ и $G(x)$, так и при совместной их реализации и последующей оптимизации структур. Эксперименты по определению площадей структур систем функционального контроля произведены как при использовании в основе $SWC(m,k)$ -кода, так и при использовании $S(m,k)$ -кода. На основании результатов абсолютных значений площадей структур систем функционального контроля получены относительные показатели их структурной избыточности, %:

1. Коэффициент δ_f – отношение площади системы функционального контроля к площади контролируемой комбинационной схемы.

2. Коэффициент δ_D – отношение площади системы функционального контроля к площади системы дублирования.

3. Коэффициент δ_s' – отношение площади системы функционального контроля к площади системы контроля по коду Бергера при отдельной реализации блоков $F(x)$ и $G(x)$.

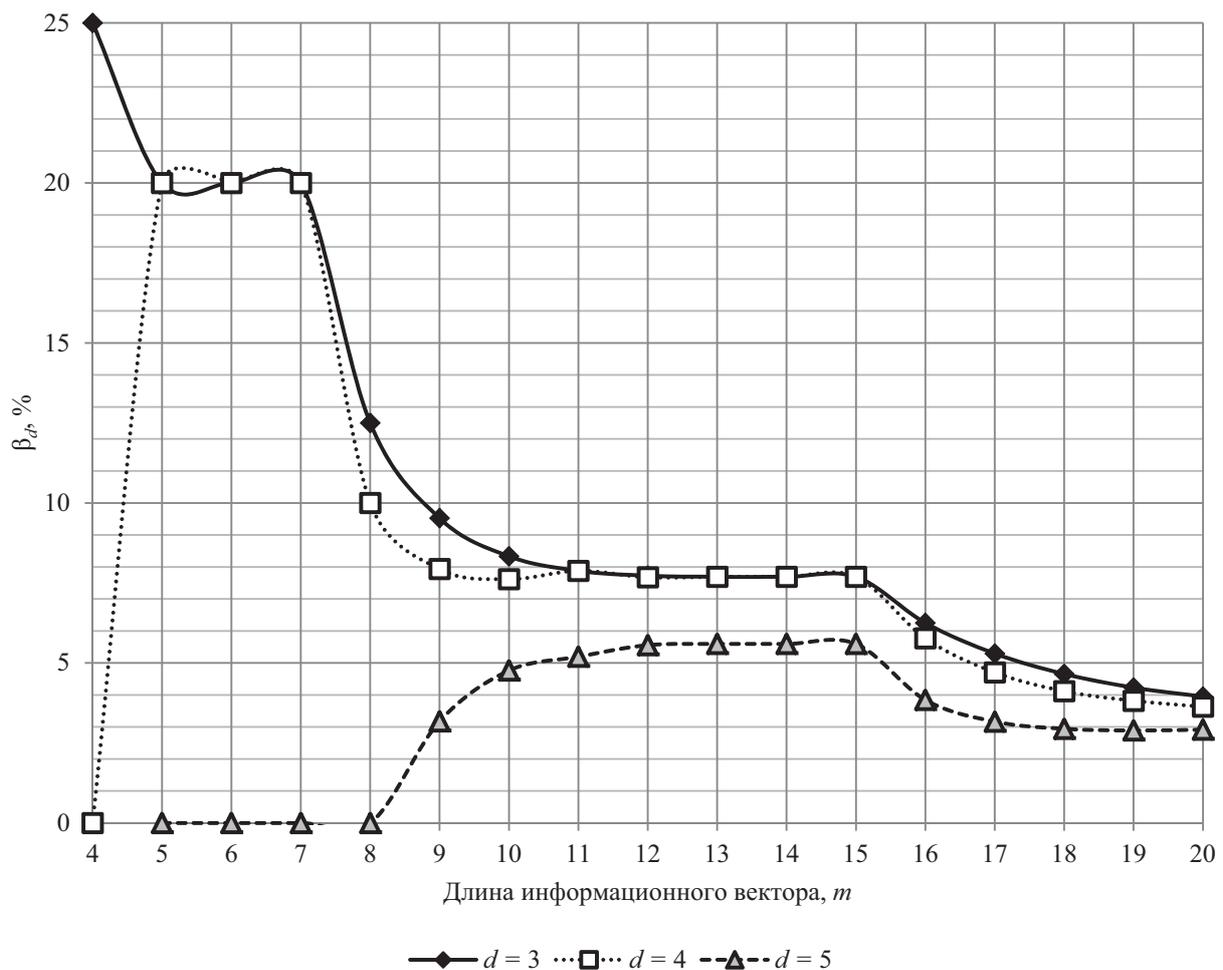


Рис. 4. Значения коэффициента β_d для $SWT(m,k)$ -кодов

4. Коэффициент δ_s'' — отношение площади системы функционального контроля к площади системы контроля по коду Бергера при совместной реализации блоков $F(x)$ и $G(x)$.

5. Коэффициент μ — коэффициент «сжатия» для системы функционального контроля с совместной реализацией блоков $F(x)$ и $G(x)$ по отношению к системе функционального контроля с отдельной реализацией блоков $F(x)$ и $G(x)$.

Результаты экспериментов и обработки полученных данных для 25 контрольных примеров сведены в табл. 6. Коэффициенты «сжатия» получены как для структур, организованных по $S(m,k)$ -коду, так и для структур, организованных по $SWC(m,k)$ -коду. Остальные коэффициенты (δ_f , δ_D , δ_s) определены для систем функционального контроля по $SWT(m,k)$ -коду с двумя вариантами реализации: а) с отдельной реализацией блоков $F(x)$ и $G(x)$; б) с совместной реализацией блоков $F(x)$ и $G(x)$. В данной таблице вид реализации обозначен нижними индексами cl и ji — классическая структура (*classic, cl*) и структура с совместной реализацией блоков основной и контрольной логики (*with joint implementation, ji*).

Таблица 6. Оценка параметров площадей структур систем функционального контроля, организованных по $SWC(m,k)$ - и $S(m,k)$ -кодам

Контроль-ная схема	Число входов	Число выходов	Double System	$S(m,k)$ -код			$SWC(m,k)$ -код			Показатели системы контроля по $SWC(m,k)$ -коду, %					
				L_{ci}	L_{ji}	$\mu, \%$	L_{ci}	L_{ji}	$\mu, \%$	$\delta_{i,ci}$	$\delta_{j,ji}$	$\delta_{D,ci}$	$\delta_{D,ji}$	$\delta'_{s,ci}$	$\delta''_{s,ji}$
mixex1	8	7	4064	4176	3280	78,544	2904	2144	73,829	207,429	153,143	71,457	52,756	69,54	65,366
table3	14	14	81664	65992	58232	88,241	53968	49648	91,995	136,725	125,78	66,085	60,795	81,78	85,259
table5	17	15	78688	66760	54944	82,301	52840	39456	74,671	139,493	104,161	67,151	50,142	79,149	71,811
tcheck	3	3	672	584	432	73,973	536	408	76,119	446,667	340	79,762	60,714	91,781	94,444
newtpla2	10	4	2320	2024	1736	85,771	1848	1496	80,952	220	178,095	79,655	64,483	91,304	86,175
newswp	4	5	1728	1952	1712	87,705	1360	1088	80	309,091	247,273	78,704	62,963	69,672	63,551
root	8	5	7840	6200	6224	100,387	5880	4872	82,857	168,192	139,359	75	62,143	94,839	78,278
max512	9	6	20320	15512	14960	96,441	14992	10344	68,997	155,648	107,392	73,78	50,906	96,648	69,144
max1024	10	6	36688	27408	35688	130,21	28384	22144	78,016	159,317	124,293	77,366	60,358	103,561	62,049
dc1	4	7	3216	3424	2872	83,879	2328	1856	79,725	238,525	190,164	72,388	57,711	67,991	64,624
dekoder	4	7	2736	3104	1224	39,433	2040	1808	88,627	277,174	245,652	74,561	66,082	65,722	147,712
wim	4	7	2688	3160	1568	49,62	2024	1568	77,47	284,27	220,225	75,298	58,333	64,051	100
br1	12	8	8688	9048	5160	57,029	6440	3448	53,54	178,492	95,565	74,125	39,687	71,176	66,822
br2	12	8	7376	8024	5936	73,978	5448	3152	57,856	184,553	106,775	73,861	42,733	67,896	53,1
newbyte	5	8	2656	4368	4360	99,817	2072	1928	93,05	350	325,676	78,012	72,59	47,436	44,22
inc	7	9	6432	9112	8328	91,396	5088	3800	74,686	214,141	159,933	79,104	59,08	55,838	45,629
b10	15	11	20432	32824	18576	56,593	17192	16192	94,183	187,522	176,614	84,143	79,248	52,376	87,166
m1	6	12	8432	13224	2512	18,996	5568	3216	57,759	181,723	104,961	66,034	38,14	42,105	128,025
p82	5	14	7456	16568	15648	94,447	5312	4432	83,434	224,324	187,162	71,245	59,442	32,062	28,323
m2	8	16	23328	29984	8640	28,815	14672	6952	47,383	145,325	68,859	62,894	29,801	48,933	80,463
m3	8	16	30064	33984	9624	28,319	18544	8296	44,737	137,73	61,616	61,682	27,594	54,567	86,201
m4	8	16	40544	40152	14280	35,565	25464	13376	52,529	136,142	71,514	62,806	32,991	63,419	93,669
tms	8	16	16704	26352	7840	29,751	10936	6936	63,424	161,203	102,241	65,469	41,523	41,5	88,469
b2	16	17	85248	74992	42040	56,059	51400	27408	53,323	125,513	66,927	60,295	32,151	68,541	65,195
in1	16	17	85248	74992	57328	76,445	51400	27408	53,323	125,513	66,927	60,295	32,151	68,541	47,809
Средние значения			-	-	-	69,749	-	-	71,299	203,788	150,812	71,647	51,781	67,617	76,14

Для 25 контрольных комбинационных схем в среднем получен следующий результат: структура системы функционального контроля на основе $SWC(m,k)$ -кода при отдельной реализации блоков $F(x)$ и $G(x)$ занимает площадь на кристалле, равную 71,647% площади системы дублирования и 67,617% площади системы функционального контроля, построенной на основе кода Бергера. Для некоторых комбинационных схем было получено уменьшение площади структуры на основе $SWC(m,k)$ -кода в сравнении с дублированием более чем на четверть, а в сравнении с системой на основе кода Бергера – более чем вдвое.

Структура с совместной реализацией блоков основной и контрольной логики в сравнении с дублированием оказывается в среднем проще системы дублирования – 51,781% (уменьшение площади практически вдвое). Для 9 схем из 25 достигнуто значительное уменьшение – от 27,594 до 42,733% от площади системы дублирования. При сравнении структур с совместной реализацией блоков основной и контрольной логики, построенных на основе кода Бергера и нового кода, выигрыш в площади системы на основе нового кода составляет 76,14%.

Результаты экспериментов позволяют говорить о высокой эффективности $SWC(m,k)$ -кода в задачах технической диагностики и, прежде всего, при организации систем функционального контроля комбинационных логических схем.

Заключение

В статье предложен способ построения оптимального разделимого кода, эффективного для решения задач технической диагностики. Идея построения нового $SWC(m,k)$ -кода базируется на идее приписывания весовых коэффициентов разрядам информационного вектора из последовательности возрастающих натуральных чисел, начиная с младшего разряда, и последующих операций суммирования весовых коэффициентов. При этом суммируются двоичные эквиваленты десятичных чисел весовых коэффициентов, операция переноса при суммировании не используется. Такой подход к построению кода позволяет не только получить разделимый код с равномерным распределением информационных векторов между контрольными векторами (так называемый оптимальный код [26]), но и наделить его таким важным свойством, как обнаружение любых двукратных ошибок в информационных векторах при любой их длине.

В ходе исследования проведено детальное сравнение свойств $SWC(m,k)$ -кода с классическим кодом Бергера, имеющим аналогичное количество контрольных разрядов для соответствующих значений длин информационных векторов. Показаны преимущества $SWC(m,k)$ -кода в обнаружении оши-

бок с малыми значениями кратностей. Например, на рис. 5 показаны графики изменения средних значений величин β_d для диапазона длин информационных векторов $m = 2 \div 20$ для $SWC(m,k)$ - и $S(m,k)$ -кодов, по которым видно, что $SWC(m,k)$ -код имеет достаточно высокий процент обнаруживаемых ошибок по каждой кратности в сравнении с кодом Бергера. Однако в классе необнаруживаемых у нового кода имеются не только симметричные ошибки, как в классическом коде Бергера, а значит, для решения схожих задач при построении контролепригодных устройств автоматики и вычислительной техники требуется учет свойств обнаружения ошибок $SWC(m,k)$ -кодом.

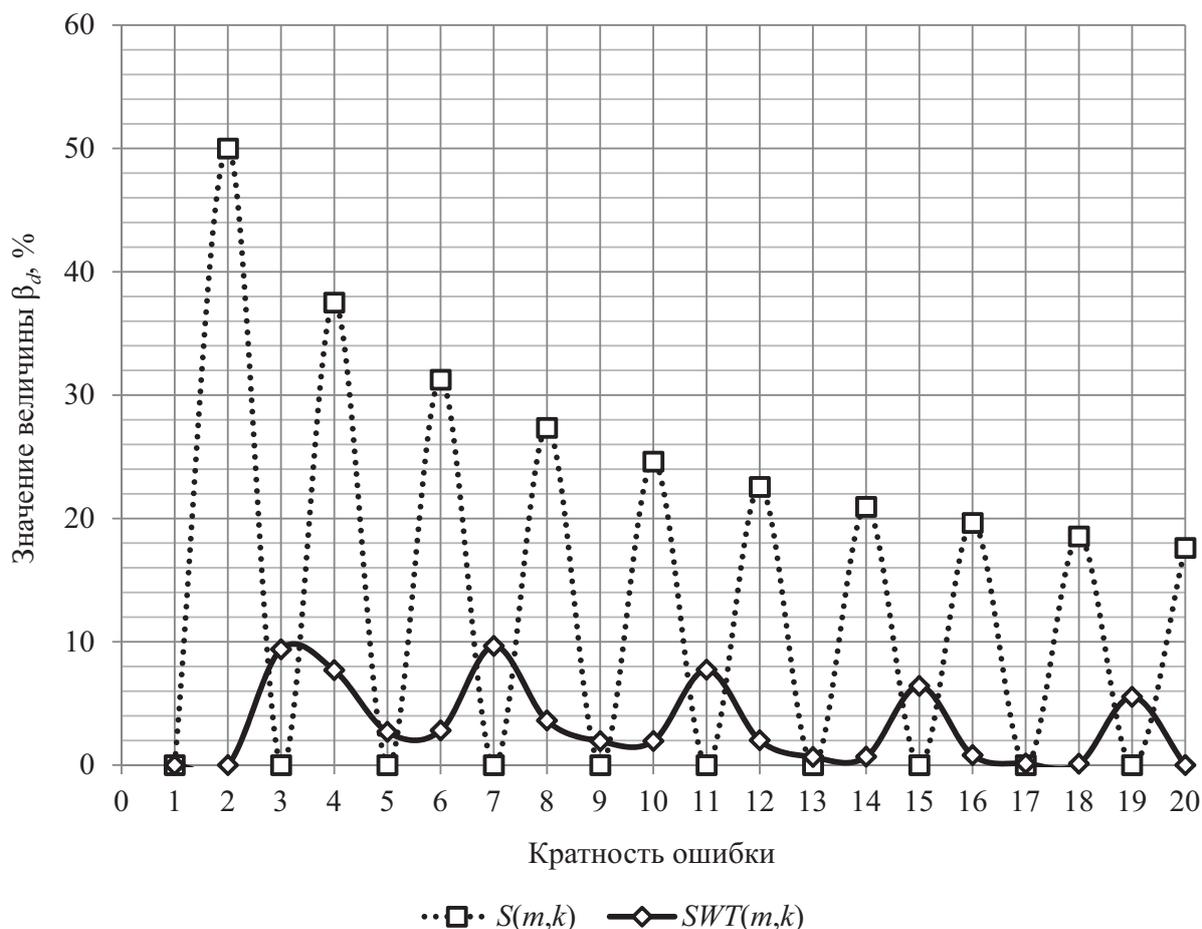


Рис. 5. Средние значения коэффициента β_d для $SWT(m,k)$ - и для $S(m,k)$ -кода в диапазоне длин информационных векторов $m = 2 \div 20$

В работе, с использованием набора контрольных комбинационных схем MCNC Benchmarks, показано, что использование $SWC(m,k)$ -кода для построения систем функционального контроля более эффективно, чем использование системы дублирования и классического кода Бергера.

Новый код с суммированием «без переноса» весовых коэффициентов единичных информационных разрядов в алгебре сложения по модулю два — перспективный код для решения задач технической диагностики.

Библиографический список

1. Пархоменко П. П. Основы технической диагностики (оптимизация алгоритмов диагностирования, аппаратурные средства) / П. П. Пархоменко, Е. С. Согомоян. – М. : Энергоатомиздат, 1981. – 320 с.
2. McCluskey E. J. Logic design principles : With emphasis on testable semicustom circuits / E. J. McCluskey. – New Jersey : Prentice hall PTR, 1986. – 549 p.
3. Mitra S. Which concurrent error detection scheme to choose? / S. Mitra, E. J. McCluskey // Proceedings of International test conference. 2000. USA, Atlantic city, NJ, 03–05 October 2000. – Pp. 985–994.
4. Дрозд А. В. Нетрадиционный взгляд на рабочее диагностирование вычислительных устройств / А. В. Дрозд // Проблемы управления. – 2008. – № 2. – С. 48–56.
5. Согомоян Е. С. Самопроверяемые устройства и отказоустойчивые системы / Е. С. Согомоян, Е. В. Слабаков. – М. : Радио и связь, 1989. – 208 с.
6. Сапожников Вал. В. Самопроверяемые дискретные устройства / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников. – СПб. : Энергоатомиздат, 1992. – 224 с.
7. Nicolaidis M. On-line testing for VLSI – A compendium of approaches / M. Nicolaidis, Y. Zorian // Journal of electronic testing : theory and applications. – 1998. – № 12. – Pp. 7–20.
8. Fujiwara E. Code design for dependable systems : Theory and practical applications / E. Fujiwara. – New Jersey : John Wiley & Sons, 2006. – 720 p.
9. Lala P. K. Principles of modern digital design / P. K. Lala. – New Jersey : John Wiley & Sons, 2007. – 419 p.
10. Блюдов А. А. О кодах с суммированием единичных разрядов в системах функционального контроля / А. А. Блюдов, Д. В. Ефанов, Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. – 2014. – № 8. – С. 131–145.
11. Аксёнова Г. П. Необходимые и достаточные условия построения полностью проверяемых схем свертки по модулю два / Г. П. Аксёнова // Автоматика и телемеханика. – 1979. – № 9. – С. 126–135.
12. Ghosh S. Synthesis of low power CED circuits based on parity codes / S. Ghosh, S. Basu, N. A. Touba // Proceedings of 23rd IEEE VLSI test symposium (VTS'05). – 2005. – Pp. 315–320.
13. Busaba F. Y. Self-checking combinational circuit design for single and unidirectional multibit errors / F. Y. Busaba, P. K. Lala // Journal of electronic testing : Theory and applications. – 1994. – Vol. 5. – Issue 5. – Pp. 19–28.
14. Saposhnikov Val. V. A New design method for self-checking unidirectional combinational circuits / Val. V. Saposhnikov, A. Morosov, Vl. V. Saposhnikov, M. Göessel // Journal of electronic testing : Theory and applications. – 1998. – Vol. 12. – Issue 1–2. – Pp. 41–53.
15. Berger J. M. A note on error detecting codes for asymmetric channels / J. M. Berger // Information and control. – 1961. – Vol. 4. – Issue 1. – Pp. 68–73.
16. Lin D. J. Unidirectional error correcting/detecting codes / D. J. Lin // Ph. D. Thesis, Oregon state university. – July 2. – 1987. – 104 p.
17. Jha N. K. A t-unidirectional error-detecting systematic code / N. K. Jha, M. B. Vora // Computers & mathematics with application. – 1988. – Vol. 16. – Issue 9. – Pp. 705–714.

18. Сапожников Вал. В. Классификация ошибок в информационных векторах систематических кодов / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов // Известия вузов. Приборостроение. – 2015. – Т. 58. – № 5. – С. 333–343.
19. Ефанов Д. В. О свойствах кода с суммированием в схемах функционального контроля / Д. В. Ефанов, Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. – 2010. – № 6. – С. 155–162.
20. Berger J. M. A note on burst detecting sum codes / J. M. Berger // Information and control. – 1961. – Vol. 4. – Issue 2–3. – Pp. 297–299.
21. Dong H. Modified berger codes for detection of unidirectional errors / H. Dong // IEEE transactions on computers. – June 1984. – Vol. C-33. – Pp. 572–575.
22. Jha N. K. A systematic code for detecting t-unidirectional errors / N. K. Jha, M. V. Vora // Proceedings of International symposium «Fault-Tolerant Computers», Pittsburg, PA, June 1987. – Pp. 96–101.
23. Parhami B. New class of unidirectional error-detection codes / B. Parhami // Proceedings of IEEE International conference on computer design : VLSI in computers and processors, 14–16 October 1991 (ICCD '9), Cambridge, MA. – Pp. 574–577.
24. Piestrak S. J. Design of self-testing checkers for unidirectional error detecting codes / S. J. Piestrak. – Wrocław : Oficyna wydawnicza politechniki wrocławskiej, 1995. – 111 p.
25. Das D. Weight-based codes and their application to concurrent error detection of multilevel circuits / D. Das, N. A. Touba // Proceedings of 17th IEEE test symposium, USA, California, 1999. – Pp. 370–376.
26. Блюдов А. А. Построение модифицированного кода Бергера с минимальным числом необнаруживаемых ошибок информационных разрядов / А. А. Блюдов, Д. В. Ефанов, Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Электронное моделирование. – 2012. – Т. 34. – № 6. – С. 17–29.
27. Blyudov A. Properties of code with summation for logical circuit test organization / A. Blyudov, D. Efanov, Val. Sapozhnikov, Vl. Sapozhnikov // Proceedings of 10th IEEE east-west design & test symposium (EWDTS'2012), Kharkov, Ukraine, September 14–17, 2012. – Pp. 114–117.
28. Das D. Low cost concurrent error detection based on modulo weight-based codes / D. Das, N. A. Touba, M. Seuring, M. Gossel // Proceedings of IEEE 6th International on-line testing workshop (IOLTW), Spain, Palma de Mallorca, July 3–5, 2000. – Pp. 171–176.
29. Сапожников Вал. В. Оптимальный систематический код на основе взвешивания разрядов информационных векторов и суммирования без переносов для систем функционального контроля / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов, В. В. Дмитриев, Ц. Хуан // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2016. – № 1. – С. 75–84.
30. Sapozhnikov Val. Weighted sum code without carries – is an optimum code with detection of any double errors in data vectors / Val. Sapozhnikov, Vl. Sapozhnikov, D. Efanov, V. Dmitriev // Proceedings of 14th IEEE east-west design & test symposium (EWDTS'2016), Yerevan, Armenia, October 14–17, 2016. – Pp. 134–141.
31. Collection of digital design benchmarks. – URL : <http://ddd.fit.cvut.cz/prj/Benchmarks>.
32. Yang S. Logic synthesis and optimization benchmarks : User guide : Version 3.0 / S. Yang. – Microelectronics center of north carolina (MCNC), 1991. – 88 p.

*Valery V. Sapozhnikov,
Vladimir V. Sapozhnikov,
Dmitry V. Efanov,
Vyacheslav V. Dmitriev,*

«Automation and remote control on railways» department
Emperor Alexander I St. Petersburg state transport university

Code with summation of weighted data bits without transitions within concurrent error detection systems

The article describes the systematic code, that can be effectively used for organizing the concurrent error detection systems for combinational logic circuits. This systematic code belongs to the class of codes with summation of weighted data bits and has a simple rules of formation, that, respectively, provides a simple structure of encoding hardware. The above mentioned systematic code has the same number of check bits as a classic Berger code, however, it has a minimum total amount of undetectable errors in data vectors with set values of data and check vectors lengths. Importantly, the new sum code detects any double distortion in data vectors, which determines the prospects of its implementation for technical diagnostics problems. The article also compares the described systematic code with the classic code Berger. The article provides the results of tests with a set of MCNC Benchmarks reference combinational circuits for the organization of the concurrent error detection systems.

technical diagnostics; concurrent error detection systems; combinational circuit; code word; Berger code; weight-based sum code; data vector; error in data vector; structure redundancy

References

1. Parkhomenko P. P., Sogomonyan E. S. (1981). Basics of technical diagnostics (optimization of diagnostic algorithms and equipment) [Osnovy tekhnicheskoy diagnostiki (optimizatsiya algoritmov diagnostirovaniya, apparaturnyye sredstva)]. Moscow, Energoatomizdat. – 320 p.
2. McCluskey E. J. (1986). Logic design principles: With emphasis on testable semi-custom circuits. New Jersey, Prentice hall PTR. – 549 p.
3. Mitra S., McCluskey E. J. (2000). Which concurrent error detection scheme to choose? Proceedings of International test conference, 2000, USA, Atlantic City, NJ, 03–05 October 2000. – Pp. 985–994.
4. Drozd A. V. (2008). Non-conventional point of view at operational diagnostics of computing devices [Netraditsionnyy vzglyad na rabocheye diagnostirovaniye vychislitel'nykh ustroystv], Management problems [Problemy upravleniya], issue 2. – Pp. 48–56.

5. Sogomonyan E. S., Slabakov E. V. (1989). Self-checking devices and fault-tolerant systems [Samoproveryayemyye ustroystva i otkazoustoychivyye sistemy]. Moscow, Radio and communication (Radio i svyaz'). – 208 p.
6. Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V. (1992). Self-checking discrete devices [Samoproveryayemyye diskretnyye ustroystva]. St. Petersburg, Energoatomizdat. – 224 p.
7. Nicolaidis M., Zorian Y. (1998). On-Line Testing for VLSI – A Compendium of approaches. Journal of electronic testing: Theory and applications, issue 12. – Pp. 7–20.
8. Fujiwara E. (2006). Code design for dependable systems: Theory and practical applications. New Jersey, John Wiley & Sons. – 720 p.
9. Lala P.K. (2007). Principles of modern digital design. New Jersey, John Wiley & Sons. – 419 p.
10. Blyudov A.A., Efanov D. V., Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V. (2014). On sum codes of unit bits in concurrent error detection systems [O kodakh s summirovaniyem yedinichnykh razryadov v sistemakh funktsional'nogo kontrolya]. Automation and remote control [Avtomatika i telemekhanika], issue 8. – Pp. 131–145.
11. Aksenova G.P. (1979). Necessary and sufficient conditions for design of fully testable convolution modulo 2 schemes [Neobkhodimyye i dostatochnyye usloviya postroyeniya polnost'yu proveryayemykh skhem svertki po modulyu 2]. Automation and remote control [Avtomatika i telemekhanika], issue 9. – Pp. 126–135.
12. Ghosh S., Basu S., Toubia N.A. (2005). Synthesis of low power CED circuits based on parity codes. Proceedings of 23rd IEEE VLSI test symposium (VTS'05). – Pp. 315–320.
13. Busaba F.Y., Lala P.K. (1994). Self-checking combinational circuit design for single and unidirectional multibit errors. Journal of electronic testing: Theory and applications, vol. 5, issue 5. – Pp. 19–28.
14. Sapozhnikov Val. V., Morosov A., Sapozhnikov Vl. V., Göessel M. (1998). A new design method for self-checking unidirectional combinational circuits. Journal of electronic testing: Theory and applications, vol. 12, issue 1–2. – Pp. 41–53.
15. Berger J.M. (1961). A note on error detecting codes for asymmetric channels. Information and control, vol. 4, issue 1. – Pp. 68–73.
16. Lin D.J. (1987). Unidirectional error correcting/detecting codes. Ph. D. Thesis, Oregon state university, July 2. – 104 p.
17. Jha N.K., Vora M.B. (1988). A t-unidirectional error-detecting systematic code. Computers & mathematics with application, 1988, vol. 16, issue 9. – Pp. 705–714.
18. Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V., Efanov D. V. (2015). Classification of errors in data vectors of systematic codes [Klassifikatsiya oshibok v informatsionnykh vektorakh sistemicheskikh kodov]. Journal of instrument engineering [Izvestiya vuzov. Priborostroyeniye], vol. 58, issue 5. – Pp. 333–343.
19. Efanov D. V., Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V. (2010). On sum code properties in concurrent error detection systems [O svoystvakh koda s summirovaniyem v skhemakh funktsional'nogo kontrolya]. Automation and remote control [Avtomatika i telemekhanika], issue 6. – Pp. 155–162.

20. Berger J. M. (1961). A note on burst detecting sum codes. *Information and control*, vol. 4, issue 2–3. – Pp. 297–299.
21. Dong H. (1984). Modified Berger codes for detection of unidirectional errors. *IEEE transactions on computers*, vol. C-33. – Pp. 572–575.
22. Jha N. K., Vora M. B. (1987). A systematic code for detecting t-unidirectional errors. *Proceedings of International symposium «Fault-Tolerant Computers»*, Pittsburg, PA, June. – Pp. 96–101.
23. Parhami B. (1991). New class of unidirectional error-detection codes. *Proceedings of IEEE International conference on computer design: VLSI in computers and processors*, 14–16 Oct 1991 (ICCD '9), Cambridge, MA. – Pp. 574–577.
24. Piestrak S. J. (1995). Design of self-testing checkers for unidirectional error detecting codes. *Wrocław, Oficyna wydawnicza politechniki wrocławskiej*. – 111 p.
25. Das D., Touba N. A. (1999). Weight-based codes and their application to concurrent error detection of multilevel circuits. *Proceedings of 17th IEEE test symposium*, USA, California. – Pp. 370–376.
26. Blyudov A. A., Efanov D. V., Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V. (2012). Formation of modified Berger code with minimum number of undetectable errors of data bits [Postroyeniye modifitsirovannogo koda Bergera s minimal'nym chislom neobnaruzhivayemykh oshibok informatsionnykh razryadov]. *Electronic simulation [Elektronnoe modelirovanie]*, vol. 34, issue 6. – Pp. 17–29.
27. Blyudov A., Efanov D., Sapozhnikov Val., Sapozhnikov Vl. (2012). Properties of code with summation for logical circuit test organization. *Proceedings of 10th IEEE east-west design & test symposium (EWDTS'2012)*, Kharkov, Ukraine, September 14–17. – Pp. 114–117.
28. Das D., Touba N. A., Seuring M., Gossel M. (2000). Low cost concurrent error detection based on modulo weight-based codes. *Proceedings of IEEE 6th International on-line testing workshop (IOLTW)*, Spain, Palma de Mallorca, July 3–5. – Pp. 171–176.
29. Sapozhnikov Val., Sapozhnikov Vl., Efanov D., Dmitriev V., Jie H. (2016). Optimised systematic code based on weighting orders of data vectors and false add for functional control systems [Optimal'nyj sistemicheskiy kod na osnove vzveshivaniya razryadov informacionnykh vektorov i summirovaniya bez perenosov dlya sistem funkcional'nogo kontrolya]. *Proceedings of Petersburg state transport university [Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya]*, issue 1. – Pp. 75–84.
30. Sapozhnikov Val., Sapozhnikov Vl., Efanov D., Dmitriev V. (2016). Weighted sum code without carries – is an optimum code with detection of any double errors in data vectors. *Proceedings of 14th IEEE east-west design & test symposium (EWDTS'2016)*, Yerevan, Armenia, October 14–17. – Pp. 134–141.
31. Collection of digital design benchmarks. – URL: <http://ddd.fit.cvut.cz/prj/Benchmarks>.
32. Yang S. (1991). *Logic synthesis and optimization benchmarks: User guide: Version 3.0*. Microelectronics center of North Carolina (MCNC). – 88 p.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии Р. Убаром
Поступила в редакцию 18.01.2016, принята к публикации 29.09.2016*

САПОЖНИКОВ Валерий Владимирович – доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I.

e-mail: port.at.pgups1@gmail.com

САПОЖНИКОВ Владимир Владимирович – доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I.

e-mail: sapozhnikov-at@yandex.ru

ЕФАНОВ Дмитрий Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I.

e-mail: TrES-4b@yandex.ru

ДМИТРИЕВ Вячеслав Владимирович – кандидат технических наук, ассистент кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I.

e-mail: webus@pisem.net

© Сапожников Вал. В., Сапожников Вл. В., 2017

© Ефанов Д. В., Дмитриев В. В., 2017