

УДК 681.518.5:004.052.32

**М. Р. Черепанова****ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЗНАЧЕНИЯ МОДУЛЯ КОДА  
С СУММИРОВАНИЕМ НА СТРУКТУРНУЮ ИЗБЫТОЧНОСТЬ  
СИСТЕМ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ**

Дата поступления: 07.04.2016

Решение о публикации: 05.06.2016

**Цель:** Исследовать влияние значения модуля кода с суммированием на структурную избыточность систем функционального контроля. **Методы:** Используются методы теории информации и кодирования, теории дискретных устройств и технической диагностики дискретных систем. **Результаты:** Приведены преимущества модульных кодов с суммированием перед другими методами построения систем функционального контроля, поскольку у модульного кода меньшее количество контрольных разрядов, чем у классического кода Бергера, а площадь систем функционального контроля, организованных по модульным кодам с суммированием, меньше, чем у аналогичных систем, организованных по коду Бергера. Результаты экспериментов с набором контрольных комбинационных схем MCNC Benchmarks показали, что не всегда лучшее решение дает выбор значения модуля – степени числа 2. Для различных реальных схем эффективным может оказаться применение модульного кода с четными значениями модулей или вовсе с нечетными числами, что кажется не совсем очевидным. Приведены результаты сравнения занимаемой площади двух видов систем функционального контроля: при отдельной и при совместной реализации контролируемого и контрольного устройств. **Практическая значимость:** Использование модульных кодов с суммированием в системах функционального контроля позволяет организовать контролепригодные дискретные устройства с меньшей структурной избыточностью, чем дают известные подходы, например, дублирование. Это, в свою очередь, позволяет уменьшать затраты на техническую реализацию устройства и на его дальнейшую эксплуатацию.

Техническая диагностика, система функционального контроля, код Бергера, модульный код с суммированием, структурная избыточность, контрольная комбинационная схема.

**Mariya R. Cherepanova**, student, bugsbunny.k38@gmail.com (Petersburg State Transport University) A STUDY INTO INFLUENCE OF SUM CODE MODULE VALUE ON STRUCTURE REDUNDANCY OF CONCURRENT ERROR DETECTION SYSTEMS

**Objective:** To study the influence of sum code module value on structure redundancy of concurrent error detection systems. **Methods:** Information and coding theory, discrete devices theory, and discrete devices' technical diagnostics methods were applied. **Results:** Module sum codes' advantages over other methods for building concurrent error detection systems are outlined, as module code has fewer check bits than classic Berger code does, and two-dimensional extent of concurrent error detection systems organised by module sum codes is lesser than that of similar systems organised by Berger code. Results of experiments with MCNC Benchmarks testing combinational circuits indicated that the choice of module value as the power of number 2 does not always produce best solution. For various real schemes application of module code with even values of modules or odd numbers may prove efficient, which does not seem quite obvious. Results of comparison of two-dimensional extent of two types of concurrent error detection system are provided – in cases of discrete or joint implementation of unit under test and verifier. **Practical importance:** Use of module sum codes in concurrent error detection systems allows to organise

testable discrete devices with lesser structure redundancy than the known approaches like duplication. In its turn, that allows to cut expenses on technical implementation of a device and its further operation.

Technical diagnostics, concurrent error detection system, Berger code, module sum code, structure redundancy, testing combinational circuit.

В автоматике и вычислительной технике для определения технического состояния логических схем в процессе их функционирования применяют методы функционального контроля [12, 22]. В системе функционального контроля исходное устройство  $F(x)$  дополняется специализированной схемой контроля, в которую входят блок контрольной логики  $G(x)$  и самопроверяемый тестер [14, 19, 20]. В функции блока контрольной логики входит вычисление значений контрольных функций  $g_1, g_2, \dots, g_k$ , а в функции тестера – сравнение полученных значений контрольных функций со значениями рабочих функций  $f_1, f_2, \dots, f_m$ . Соответствие между значениями функций  $f_1, f_2, \dots, f_m$  и  $g_1, g_2, \dots, g_k$  устанавливается на этапе проектирования системы функционального контроля. Правила вычисления значений контрольных функций определяются свойствами помехоустойчивого кода [2, 5, 6, 8, 11, 17].

При построении систем функционального контроля наиболее важными характеристика-

ми являются структурная избыточность системы и обнаруживающая способность контролируемого устройства.

Есть два вида функционального контроля: функциональный контроль с отдельной реализацией блоков основной и контрольной логики и функциональный контроль с их совместной реализацией. Совместная реализация подразумевает такую оптимизацию структуры, при которой блоки контрольной и основной логики будут использовать часть одинаковых логических элементов. Такая реализация уменьшает структурную избыточность, но может ухудшить обнаруживающую способность, если неисправность повлияет на общие элементы блоков основной и контрольной логики. Соответственно, отдельная реализация означает, что блоки контрольной и основной логики не имеют общих элементов [13].

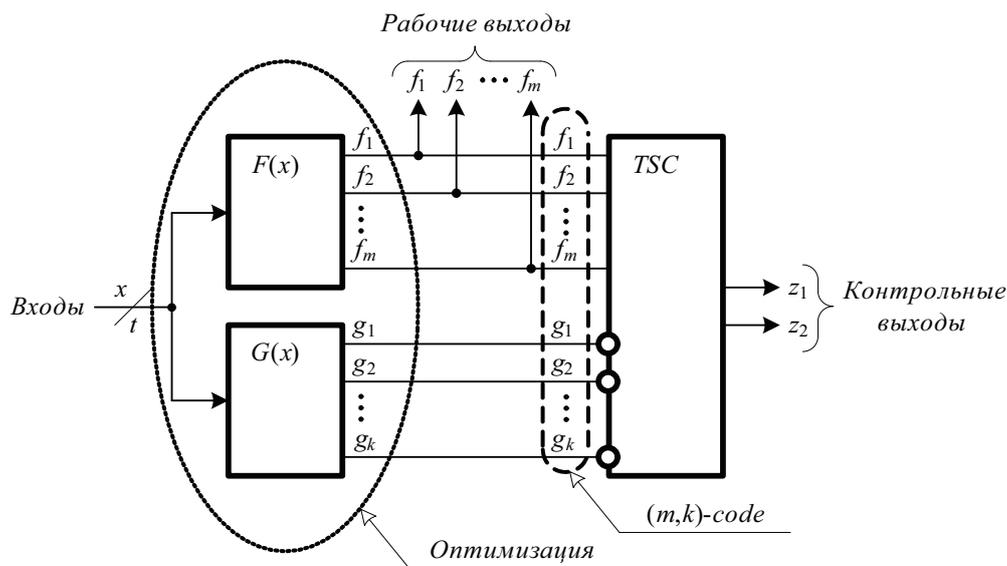


Рис. 1. Структурная схема системы функционального контроля

Наиболее просто организуются структуры систем функционального контроля на основе дублирования и паритета (рис. 2) [1, 9, 10, 18]. Метод паритета и метод дублирования дают стандартные структуры систем функционального контроля, диаметрально противоположные по свойствам. У метода паритета наименьшая структурная избыточность, но при этом и минимальная обнаруживающая способность, у метода дублирования высокая обнаруживающая способность при высокой структурной избыточности. Эффективное решение может быть получено путем использования кодов с суммированием [11].

### Модульные коды с суммированием

Классический код с суммированием, известный как код Бергера [15] – это разделимый код, у которого в контрольном векторе сумма единичных разрядов в информационном векторе записывается в виде двоичного числа. Будем далее обозначать код Бергера как  $S(m,k)$ -код, где  $m$  и  $k$  – длина информационного и контрольного вектора, соответственно.

$S(m,k)$ -кодом обнаруживаются однонаправленные ошибки любой кратности и не обнаруживаются разнонаправленные ошибки четной

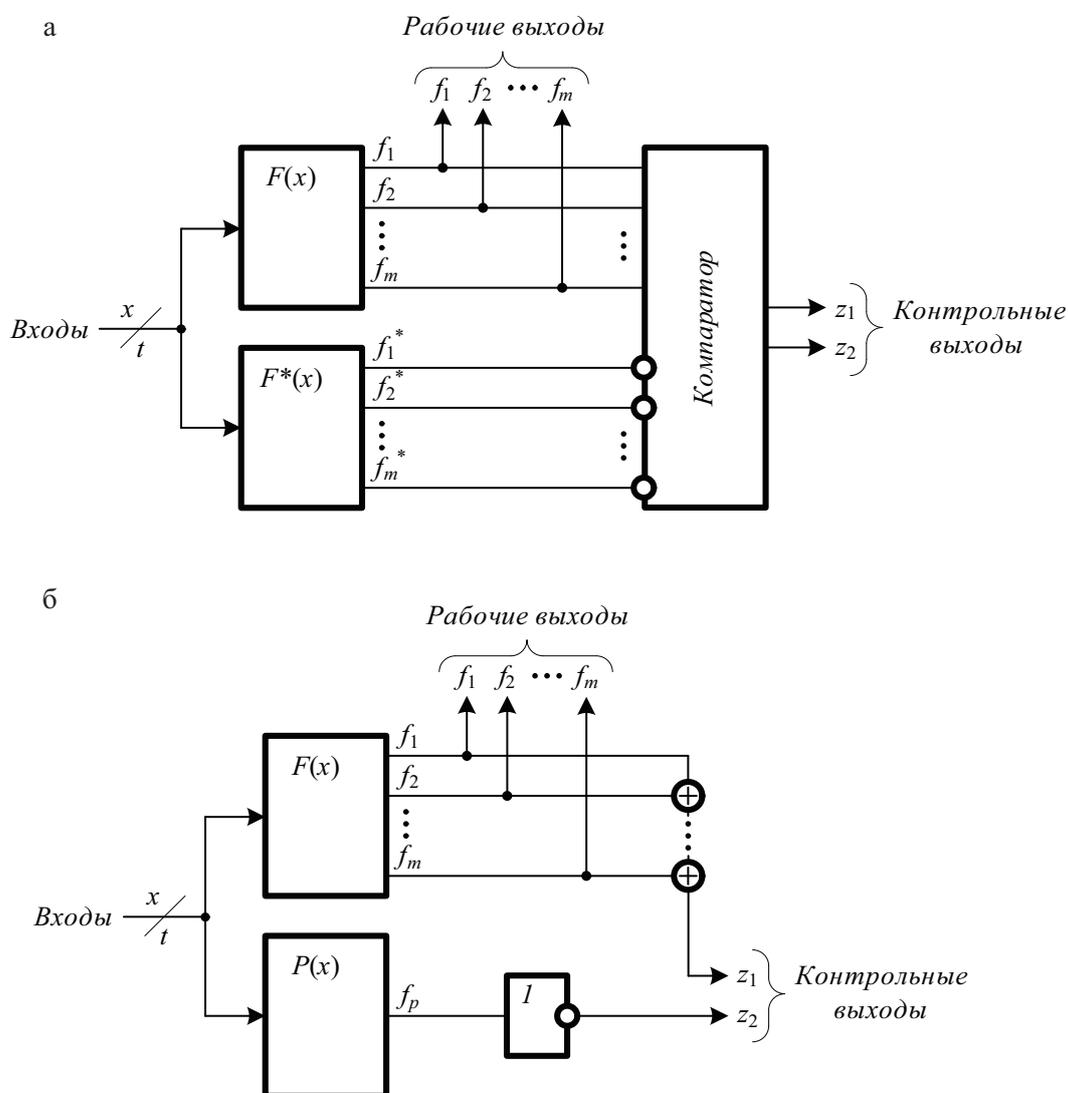


Рис. 2. Стандартные структуры систем функционального контроля:  
а) дублирование; б) паритет

кратности. Однонаправленные ошибки – это ошибки, которые преобразуют только нулевые разряды в единичные, или наоборот – единичные в нулевые. Относительно обнаруживающей способности и избыточности системы функционального контроля применение кода Бергера дает структуры, которые по своим характеристикам находятся между характеристиками структуры дублирования и паритета.

В [3] детально изучены свойства  $S(m,k)$ -кодов по обнаружению ошибок в системах функционального контроля. Например, найдена формула подсчета количества необнаруживаемых ошибок по каждой кратности  $d$ :

$$N_{m,d} = \sum_{r=\frac{d}{2}}^{\frac{m-d}{2}} C_m^r C_r^{\frac{d}{2}} C_{m-r}^{\frac{d}{2}}, \quad (1)$$

где  $d = \{2, 4, \dots, m-1\}$ , если  $m$  нечетно, и  $d = \{2, 4, \dots, m\}$  если  $m$  четно.

По выражению (1) можно рассчитать общее число искажений в коде с суммированием как сумму всех величин  $N_{m,d}$ :

$$N_m = \sum_{d=2}^{m(m-1)} N_{m,d}.$$

$S(m,k)$ -коды вне зависимости от длины информационного вектора не обнаруживают одинаковую долю ошибок четной кратности  $d$  от общего количества ошибок данной кратности:

$$\beta_d = \frac{\sum_{r=\frac{d}{2}}^{\frac{m-d}{2}} C_m^r C_r^{\frac{d}{2}} C_{m-r}^{\frac{d}{2}}}{2^m C_m^d} = 2^{-d} C_{\frac{d}{2}}^{\frac{d}{2}}.$$

Значение  $\beta_d$  с увеличением  $m$  уменьшается.

Применение кода Бергера в системах функционального контроля реальных логических схем не всегда оправданно, так как некоторые виды искажений никогда не возникают на рабочих выходах системы, сами же контрольные функции получаются весьма сложными.

Для уменьшения структурной избыточности системы функционального контроля можно применять коды с уменьшенным количеством разрядов в контрольных векторах, поэтому до сих пор разрабатываются коды, применение которых позволяет уменьшать избыточность схем при некотором ухудшении (а в некоторых случаях – и улучшении) обнаруживающей способности в информационных векторах [2, 5]. Среди таких кодов можно назвать модульные коды с суммированием ( $SM(m,k)$ -коды).

Число разрядов контрольных векторов в  $SM(m,k)$ -кодах уменьшается за счет использования модулей, тем самым уменьшается структурная избыточность системы функционального контроля.

Модульные коды с суммированием строятся по следующему алгоритму:

- 1) для конкретного значения длины информационного вектора выбирается модуль  $M$ ;
- 2) подсчитывается сумма  $r$  единичных разрядов информационного вектора – это вес информационного вектора;
- 3) рассчитывается значение  $W$  по формуле  $W = r \pmod{M}$ , т. е. определяется наименьший неотрицательный вычет числа  $r$  по модулю  $M$ .

Число  $W$ , представленное в двоичном виде, соответствует значениям разрядов контрольного вектора. Например, в табл. 1 представлены все контрольные векторы для разнообразных модульных кодов с суммированием с длиной информационного вектора  $m = 3$ . К примеру, для информационного вектора  $\langle 011 \rangle$   $r = 2$ . При построении  $S3(3,2)$ -кода определяем число  $W = 2 \pmod{3} = 2$ , что соответствует контрольному вектору  $\langle 10 \rangle$ .

В информационном векторе будут обнаружены все ошибки, изменяющие значение  $W$ . Характеристики обнаружения ошибок в информационных векторах  $SM(m,k)$ -кодов устанавливаются по специальным таблицам, в которых указывается распределение информационных векторов между контрольными векторами [3]. Например, в табл. 2 и 3 приведено распределение информационных векторов между контрольными векторами (они

ТАБЛИЦА 1. Контрольные векторы  $SM(3,k)$ -кодов

№	Информационный вектор			$r$	$r \pmod{M}$			Контрольный вектор				
								$S2(3,1)$		$S3(4,2)$		$SM(3,2), M \geq 4$
	$f_3$	$f_2$	$f_1$		2	3	$\geq 4$	$g_1$	$g_2$	$g_1$	$g_2$	$g_1$
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1
2	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1	0	1
3	0	1	1	2	0	2	2	0	1	0	1	0
4	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	0	1
5	1	0	1	2	0	2	2	0	1	0	1	0
6	1	1	0	2	0	2	2	0	1	0	1	0
7	1	1	1	3	1	0	3	1	0	0	1	1

ТАБЛИЦА 2. Распределение информационных векторов между контрольными векторами модульных кодов с  $M=3$  и  $M=4$ 

Контрольные группы			
00	01	10	11
Векторы $S4(3,2)$ -кода			
000	001	011	111
	010	101	
	100	110	
Векторы $S3(3,2)$ -кода			
000	001	011	
111	010	101	
	100	110	

ТАБЛИЦА 3. Распределение информационных векторов между контрольными векторами для кода паритета

Контрольные группы	
00	01
Векторы $S2(2,1)$ -кода	
000	001
011	010
101	100
110	111

образуют контрольные группы) в  $SM(3,k)$ -кодах с различными значениями модуля. По данным таблицам можно проследить, как изменяется состав контрольных групп. Например, в  $S4(3,2)$ -коде, являющемся кодом Бергера, распределение неравномерно. Уменьшение модуля приводит к сокращению задействованных контрольных групп и «уплотнению» распределения информационных векторов на контрольные группы. При изменении значения модуля от значения  $M = m + 1$  к значению  $M = 2^{\lceil \log_2(m+1) \rceil - 1}$  изменяется количество заполняемых контрольных групп: появляются пустые контрольные группы (см. распределение для  $S3(3,2)$ -кода). Однако при достижении значения  $M = 2^{\lceil \log_2(m+1) \rceil - 1}$  уменьшается на единицу количество разрядов в контрольном векторе, а также достигается распределение с заполнением всех контрольных групп (распределение, однако, неравномерно). Более равномерное распределение получается с дальнейшим уменьшением модуля и становится абсолютно равномерным для  $S2(m,1)$ -кода. Рассмотренные особенности справедливы и для модульных кодов с большими значениями длины информационных векторов.

Общее число необнаруживаемых искажений в информационных векторах  $SM(m,k)$ -

кодов равно сумме количества необнаруживаемых ошибок по каждой контрольной группе:

$$N_m = \sum_{t=0}^{t=M-1} N_{m(t)} = \sum_{t=0}^{t=M-1} p_t (p_t - 1), \quad (2)$$

где

$$p_t = C_m^t + C_m^{M+t} + C_m^{2M+t} + \dots + C_m^{iM+t} -$$

общее количество информационных векторов в контрольной группе с номером  $t \in [0; M - 1]$ .

Например, пользуясь формулой (2) для  $S3(3,2)$ -кода, получаем:

$$\begin{aligned} N_3 &= \sum_{t=0}^{t=3-1} N_{3(t)} = N_{3(0)} + N_{3(1)} + N_{3(2)} = \\ &= (C_3^0 + C_3^{0+3})(C_3^0 + C_3^{0+3} - 1) + \\ &+ (C_3^1)(C_3^1 - 1) + (C_3^2)(C_3^2 - 1) = \\ &= 2 \cdot 1 + 3 \cdot 2 + 3 \cdot 2 = 2 + 6 + 6 = 14. \end{aligned}$$

В [4, 7, 21] установлены свойства обнаружения ошибок  $SM(m,k)$ -кодами. Данная же статья представляет результаты исследования влияния значения модуля на показатель сложности технической реализации системы функционального контроля.

### Экспериментальные исследования

Для решения задачи был поставлен эксперимент с набором контрольных комбинационных схем MCNC Benchmarks [16]. Данные схемы известны во всем мире, их применяют для тестирования новых методов технической диагностики.

Автор работы использовал специально разработанный программный модуль Coding, который позволяет формировать файлы – описания блоков системы функционального контроля, построенной по правилам вычисления различных модульных кодов с суммированием. Получаемые файлы имеют формат \*.pla (он соответствует табличной форме задания схемы). Эти файлы обсчитывали в программе SIS для определения показателя слож-

ности технической реализации – условной площади, занимаемой модулем на кристалле [23]. Получаемые значения площадей блоков функционального контроля, построенных с использованием  $SM(m,k)$ -кодов, заносили в таблицы данных. В табл. 4–6 приведены некоторые результаты экспериментов.

Для оценки площади автор выбрал стандартную библиотеку функциональных элементов stdcell2\_2.genlib. Для каждой контрольной схемы был определен показатель площади при изменении значения модуля от  $M = 2$  до  $M = m + 1$ .

Оценим эффект от уменьшения значения модуля  $SM(m,k)$ -кода для конкретных контрольных схем. Для оценки используем коэффициент структурной избыточности – долю площади системы функционального контроля для данной комбинационной схемы  $F(x)$  от площади самой комбинационной схемы:

$$\theta = \frac{L_S}{L_{F(x)}},$$

где  $L_S$  – площадь системы функционального контроля;  $L_{F(x)}$  – площадь контрольной комбинационной схемы.

При этом в эксперименте оценивался показатель структурной избыточности системы функционального контроля на основе модульного кода с суммированием как при отдельной ( $S_{pp}$ ), так и при совместной ( $S_{cp}$ ) реализации блоков основной и контрольной логики. Как правило, наименьшей структурной избыточностью обладают системы функционального контроля, построенные по коду паритета, так как требуется вычислять всего один контрольный разряд. Анализируя табл. 4–6, можно подтвердить эту особенность. Интерес представляет сравнение между собой показателей  $\theta$  при одинаковом количестве контрольных разрядов в коде. Для модульных кодов с суммированием одинаковое количество контрольных разрядов будут иметь коды с модулями:

$$2^{k-1} + 1 \leq M \leq 2^k.$$

ТАБЛИЦА 4. Результаты экспериментов с контрольной схемой «m2»

M	k	Площадь, занимаемая системой функционального контроля, усл. ед.			Показатель структурной избыточности $\theta$ , %		
		По методу дублирования	По $SM(m,k)$ -коду		По методу дублирования	По $SM(m,k)$ -коду	
			$S_{pp}$	$S_{cp}$		$S_{pp}$	$S_{cp}$
2	1	24 048	11 440	4936	2,382	1,133	0,489
3	2	24 048	16 744	10 104	2,382	1,658	1,001
4	2	24 048	15 504	8872	2,382	1,536	0,879
5	3	24 048	23 256	17 768	2,382	2,303	1,76
6	3	24 048	74 824	68 168	2,382	7,411	6,752
7	3	24 048	66 104	60 600	2,382	6,548	6,002
8	3	24 048	21 560	15 240	2,382	2,135	1,51
9	4	24 048	32 728	27 384	2,382	3,242	2,712
10	4	24 048	87 608	82 368	2,382	8,677	8,158
11	4	24 048	150 552	145 160	2,382	14,912	14,378
12	4	24 048	83 632	78 272	2,382	8,284	7,753
13	4	24 048	34 736	29 440	2,382	3,441	2,916
14	4	24 048	32 880	27 520	2,382	3,257	2,726
15	4	24 048	35 456	30 136	2,382	3,512	2,985
16	4	24 048	29 536	24 160	2,382	2,926	2,393
17	5	24 048	30 000	24 624	2,382	2,971	2,439

ТАБЛИЦА 5. Результаты экспериментов с контрольной схемой «max1024»

M	k	Площадь, занимаемая системой функционального контроля, усл. ед.			Показатель структурной избыточности $\theta$ , %		
		По методу дублирования	По $SM(m,k)$ -коду		По методу дублирования	По $SM(m,k)$ -коду	
			$S_{pp}$	$S_{cp}$		$S_{pp}$	$S_{cp}$
2	1	36 928	22 912	20 344	2,073	1,286	1,142
3	2	36 928	26 016	24 120	2,073	1,46	1,354
4	2	36 928	26 264	25 552	2,073	1,474	1,434
5	3	36 928	27 928	28 848	2,073	1,568	1,619
6	3	36 928	26 976	28 864	2,073	1,514	1,62
7	3	36 928	27 456	28 816	2,073	1,541	1,617
8	3	36 928	27 456	28 816	2,073	1,541	1,617

Например, для схемы «m2», имеющей 16 выходов, с числом контрольных разрядов  $k = 3$  могут быть использованы коды с моду-

лями  $5 \leq M \leq 8$  (табл. 4). Для модульных кодов со значением  $M$  из приведенного диапазона получено, что минимальная структурная

ТАБЛИЦА 6. Результаты экспериментов с контрольной схемой «mlp4»

M	k	Площадь, занимаемая системой функционального контроля, усл. ед.			Показатель структурной избыточности $\theta$ , %		
		По методу дублирования	По $SM(m,k)$ -коду		По методу дублирования	По $SM(m,k)$ -коду	
			$S_{pp}$	$S_{cp}$		$S_{pp}$	$S_{cp}$
2	1	16256	9840	7680	2,25	1,362	1,063
3	2	16256	13712	11552	2,25	1,898	1,599
4	2	16256	14304	12336	2,25	1,98	1,708
5	3	16256	18952	16696	2,25	2,623	2,311
6	3	16256	16952	14632	2,25	2,347	2,025
7	3	16256	18216	16240	2,25	2,522	2,248
8	3	16256	16872	14896	2,25	2,336	2,062
9	4	16256	16600	14624	2,25	2,298	2,024

избыточность системы функционального контроля (как  $S_{pp}$ , так и  $S_{cp}$ ) достигается при значении  $M = 8$  (степень числа 2). Аналогичная закономерность имеется и для кодов с  $k = 2$  и  $k = 4$ .

На первый взгляд кажется очевидным результат, описанный выше, и система функционального контроля на основе  $SM(m,k)$ -кода должна иметь минимальную площадь при значении  $M$ , равном степени числа 2. Однако для многих реальных схем получаются иные результаты. Например, для схемы «max1024», у которой 6 выходов, при  $k = 3$  минимум показателя  $\theta$  ( $S_{pp}$ ) получен при выборе кода со значением  $M = 6$  (табл. 5).

Для контрольной схемы «mlp4», имеющей 8 выходов, применение модульных кодов вообще оказывается нецелесообразным при  $M \geq 5$ . А среди кодов с количеством контрольных разрядов  $k = 2$  минимальным значением коэффициента  $\theta$  обладает  $S3(8,2)$ -код.

## Заключение

Результаты экспериментов с системой контрольных комбинационных схем MCNC Benchmarks показали высокую эффективность применения  $SM(m,k)$ -кодов при организации систем функционального контроля по показа-

телю структурной избыточности. Подтверждено, что минимальным показателем структурной избыточности обладает стандартная структура контроля по коду паритета (по  $S2(m,1)$ -коду). Показано, что не всегда минимальное значение показателя структурной избыточности имеют системы функционального контроля, организованные по кодам с модулями, значения которых являются степенями числа 2.

Представленные результаты исследования позволяют расширить теорию функционального контроля на основе кодов с суммированием, а также дать разработчику возможность целесообразного выбора кода с учетом как свойств обнаружения ошибок, так и показателя структурной избыточности системы.

## Библиографический список

1. Аксенова Г. П. О функциональном диагностировании дискретных устройств в условиях работы с неточными данными / Г. П. Аксенова // Проблемы управления. – 2008. – № 5. – С. 62–66.
2. Блюдов А. А. О кодах с суммированием единичных разрядов в системах функционального контроля / А. А. Блюдов, Д. В. Ефанов, В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. – 2014. – № 8. – С. 131–145.

3. Ефанов Д. В. О свойствах кода с суммированием в схемах функционального контроля / Д. В. Ефанов, В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. – 2010. – № 6. – С. 155–162.
4. Ефанов Д. В. Применение модульных кодов с суммированием для построения систем функционального контроля комбинационных логических схем / Д. В. Ефанов, В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. – 2015. – № 10. – С. 152–169.
5. Сапожников В. В. Взвешенные коды с суммированием для организации контроля логических устройств / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов // Электронное моделирование. – 2014. – Т. 36, № 1. – С. 59–80.
6. Сапожников В. В. Исследование свойств кодов Хэмминга и их модификаций в системах функционального контроля / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов // Автоматика на транспорте. – 2015. – Т. 1, № 3. – С. 311–337.
7. Сапожников В. В. Модульные коды с суммированием в системах функционального контроля. I. Свойства обнаружения ошибок кодами в информационных векторах / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов, М. Р. Черепанова // Электронное моделирование. – 2016. – Т. 38, № 2. – С. 27–48.
8. Сапожников В. В. Обнаружение опасных ошибок на рабочих выходах комбинационных логических схем / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов // Автоматика на транспорте. – 2015. – Т. 1, № 2. – С. 195–211.
9. Сапожников В. В. Организация систем функционального контроля комбинационных схем на основе модифицированного кода с суммированием взвешенных переходов (начало) / Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В. и др. // Электронное моделирование. – 2015. – Т. 37, № 6. – С. 49–68.
10. Сапожников В. В. Основы технической диагностики / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников. – М. : Маршрут, 2004, 318 с.
11. Сапожников В. В. Предельные свойства кода с суммированием / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов // Изв. ПГУПС. – 2010. – Вып. 3. – С. 290–299.
12. Сапожников В. В. Применение кодов с суммированием при синтезе систем железнодорожной автоматики и телемеханики на программируемых логических интегральных схемах / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов // Автоматика на транспорте. – 2015. – Т. 1, № 1. – С. 84–107.
13. Сапожников В. В. Самодвойственные дискретные устройства / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, М. Гессель. – СПб. : Энергоатомиздат, Санкт-Петербург, отд., 2001. – 331 с.
14. Сапожников В. В. Самопроверяемые дискретные устройства / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников. – СПб. : Энергоатомиздат, 1992. – 224 с.
15. Berger J. M. A Note on Error Detecting Codes for Asymmetric Channels / J. M. Berger // Inf. and Control. – 1961. – Vol. 4, N 1. – P. 68–73.
16. Collection of Digital Design Benchmarks. – URL : <http://ddd.fit.cvut.cz/prj/Benchmarks>.
17. Das D. Synthesis of Circuits with Low-Cost Concurrent Error Detection Based on Bose-Lin Codes / D. Das, N. A. Touba // J. Electron. Testing: Theory Appl. – 1999. – Vol. 15, Is. 1–2. – P. 145–155.
18. Goessel M. Error Detection Circuits / M. Goessel, S. Graf. – L : McGraw-Hill, 1994. – 261 p.
19. Mitra S. Which Concurrent Error Detection Scheme to Choose? / S. Mitra, E. J. McClaskey // Proc. Int. Test Conf., USA, Atlantic City, NJ, Oct. 03–05 2000. – Atlantic City, NJ, 2000. – P. 985–994.
20. Piestrak S. J. Design of Self-Testing Checkers for Unidirectional Error Detecting Codes / S. J. Piestrak. – Wrocław : Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 1995. – 111 p.
21. Sapozhnikov V. Modular Sum Code in Building Testable Discrete Systems / V. Sapozhnikov, Vl. Sapozhnikov, D. Efanov // Proc. 13<sup>th</sup> IEEE East-West Design & Test Symp. (EWDTS'2015), Batumi, Georgia, Sept. 26–29, 2015. – Batumi, 2015. – P. 181–187.
22. Ubar R. Design and Test Technology for Dependable Systems-on-Chip (Premier Reference Source) / R. Ubar, J. Raik, H.-T. Vierhaus. – Inf. Sci. Ref., Hershey. – NY : IGI Global, 2011. – 578 p.
23. Yang S. Logic Synthesis and Optimization Benchmarks : User Guide : Version 3.0. – Microelectronics Center of North Carolina (MCNC), 1991. – 88 p.

## References

1. Aksenova G. P. *Problemy upravleniya – Management Problems*, 2008, no. 5, pp. 62-66.
2. Blyudov A.A., Yefanov D.V., Sapozhnikov V.V. & Sapozhnikov V.I. *Avtomatika i telemekhanika – Autom. Remote Control*, 2014, no. 8, pp. 131-145.
3. Yefanov D.V., Sapozhnikov V.V. & Sapozhnikov V.I. *Avtomatika i telemekhanika – Autom. Remote Control*, 2010, no. 6, pp. 155-162.
4. Yefanov D.V., Sapozhnikov V.V. & Sapozhnikov V.I. *Avtomatika i telemekhanika – Autom. Remote Control*, 2015, no. 10, pp. 152-169.
5. Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov V.I. & Yefanov D.V. *Elektronnoye modelirovaniye – Electronic Simulation*, 2014, T. 36, no. 1, pp. 59-80.
6. Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov V.I. & Yefanov D.V. *Avtomatika na transporte – Automatics at Transport*, 2015, T. 1, no. 3, pp. 311-337.
7. Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov V.I., Yefanov D.V., Dmitriyev V.V. & Cherepanova M.R. *Elektronnoye modelirovaniye – Electronic Modeling*, 2016, T. 38, no. 2, pp. 27-48.
8. Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov V.I. & Yefanov D.V. *Avtomatika na transporte – Automatics in Transport*, 2015, T. 1, no. 2, pp. 195-211.
9. Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov V.I., Yefanov D.V., Dmitriyev V.V. & Cherepanova M.R. *Elektronnoye modelirovaniye – Electronic Modeling*, 2015, T. 37, no. 6, pp. 49-68.
10. Sapozhnikov V.V. & Sapozhnikov V.I. *Osnovy tekhnicheskoy diagnostiki [Technical Diagnostics Basics]*. Moscow, Marshrut, 2004. 318 p.
11. Sapozhnikov V.V. & Sapozhnikov V.I. & Yefanov D.V. *Izvestiya PGUPS – Proc. Petersburg Transport Univ.*, 2010, Is. 3, pp. 290-299.
12. Sapozhnikov V.V. & Sapozhnikov V.I. & Yefanov D.V. *Avtomatika na transporte – Automatics at Transport*, 2015, Vol. 1, no. 1, pp. 84-107.
13. Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov V.I. & Gesel M. *Samodvoystvennyye diskretnyye ustroystva [Self-Dual Discrete Devices]*. St. Petersburg, Energoatomizdat, Sankt-Peterburgskoye otdeleniye, 2001. 331 p.
14. Sapozhnikov V.V. & Sapozhnikov V.I. *Samoproveryayemyye diskretnyye ustroystva [Self-checking Discrete Devices]*. St. Petersburg, Energoatomizdat, 1992. 224 p.
15. Berger J.M. *A Inf. and Control*, 1961, Vol. 4, no. 1, pp. 68-73.
16. Collection of Digital Design Benchmarks, available at: <http://ddd.fit.cvut.cz/prj/Benchmarks>.
17. Das D. & Toubia N.A. *J. Electron. Testing: Theory Appl.*, 1999, Vol. 15, Is. 1-2, pp. 145-155.
18. Goessel M. & Graf S. *Error Detection Circuits*. L, McGraw-Hill, 1994. 261 p.
19. Mitra S. & McClaskey E.J. Which Concurrent Error Detection Scheme to Choose? *Proc. Int. Test Conf.*, USA, Atlantic City, NJ, 2000, 03–05 Oct. Atlantic City, NJ, 2000. Pp. 985-994.
20. Piestrak S.J. *Design of Self-Testing Checkers for Unidirectional Error Detecting Codes*. Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 1995. 111 p.
21. Sapozhnikov V., Sapozhnikov V.I. & Yefanov D. Modular Sum Code in Building Testable Discrete Systems. *Proc. 13<sup>th</sup> IEEE East-West Design & Test Symp. (EWDTS'2015)*, Batumi, Georgia, Sept. 26–29, 2015. Batumi, 2015. Pp. 181-187.
22. Ubar R., Raik J. & Vierhaus H.-T. *Design and Test Technology for Dependable Systems-on-Chip (Premier Reference Source)*. Inf. Sci. Ref., Hershey, NY, IGI Global, 2011. 578 p.
23. Yang S. *Logic Synthesis and Optimization Benchmarks: User Guide: Version 3.0*. Microelectronics Center of North Carolina (MCNC), 1991. 88 p.

ЧЕРЕПАНОВА Мария Родионовна – студент, [bugsbunny.k38@gmail.com](mailto:bugsbunny.k38@gmail.com) (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).