



УДК 681.518.5:004.052.32

В.В. Сапожников, Вл.В. Сапожников, доктора техн. наук,
Д.В. Ефанов, канд. техн. наук, **М.Р. Черепанова**
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Петербургский государственный университет
путей сообщения Императора Александра I»
(Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9,
тел. (+7) 9117092164, (+7) (812) 4578579, e-mail: TrES-4b@yandex.ru)

Модульные коды с суммированием в системах функционального контроля. I. Свойства обнаружения ошибок кодами в информационных векторах

Выполнен анализ свойств модульных кодов с суммированием единичных информационных разрядов в системах функционального контроля при изменении длины информационного вектора. Установлены зависимости между ошибками различного вида при различных значениях модулей, которые непосредственно связаны с числом разрядов контрольных векторов и правилами вычисления их значений. Показано, что модульные коды с суммированием независимо от значения модуля не обнаруживают одинаковый процент ошибок кратностью d от общего числа ошибок данной кратностью при любых длинах информационных векторов. Экспериментально установлено, что уменьшение значения модуля для реальных логических схем во многих случаях не приводит к увеличению числа необнаруживаемых ошибок, возникающих на их выходах.

Проаналізовано властивості кодів з підсумовуванням одиничних інформаційних розрядів в системах функціонального контролю при змінюванні довжини інформаційного вектору. Встановлено залежності між різними похибками при різних значеннях модулів, які безпосередньо пов'язані з кількістю розрядів контрольних векторів і правилами їх обчислення. Показано, що модульні коди з підсумовуванням незалежно від значення модуля не виявляють однаковий процент похибок кратності d від загального числа похибок даної кратності при будь-якій довжині інформаційних векторів. Експериментально встановлено, що зменшення значення модуля для реальних логічних схем в багатьох випадках не приводить до збільшення числа похибок, що не виявляються, на виходах.

Ключевые слова: система функционального контроля, структурная избыточность, код с суммированием, код Бергера, код паритета, модульный код с суммированием, обнаружение ошибок в комбинационных схемах.

Для организации технического диагностирования устройства автоматики и вычислительной техники без отключения его от управляемых объектов используются системы функционального контроля (СФК) [1—4]. В таких

© В.В. Сапожников, Вл.В. Сапожников, Д.В. Ефанов, М.Р. Черепанова, 2016

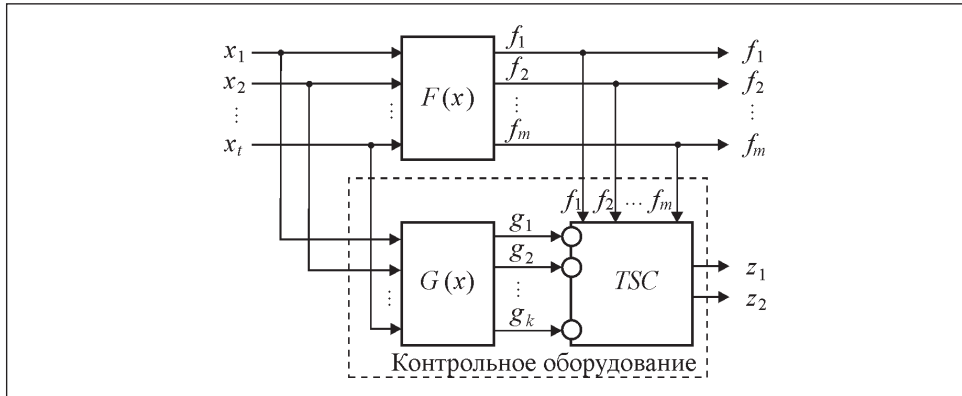


Рис. 1. Структурная схема системы функционального контроля

системах контролируемое логическое устройство $F(x)$ снабжается специализированным контрольным оборудованием (блоком контрольной логики $G(x)$ и тестером TSC), позволяющим в процессе функционирования всей системы обнаруживать неисправности ее компонентов (рис. 1) [5—7]. Эта задача решается посредством выявления несоответствия значений вычисляемых функций эталонным значениям, устанавливаемым при правильной работе системы на всех входных воздействиях [8].

При построении СФК часто используются принципы помехоустойчивого кодирования, т.е. в основе СФК лежит заранее выбранный помехоустойчивый код, как правило, с небольшой избыточностью [9—13]. Использование помехоустойчивого кода с небольшой избыточностью необходимо для получения СФК с невысокой структурной избыточностью (обычно ее определяют в условных единицах площади, занимаемой устройством на кристалле, и оценивают по отношению к сложности технической реализации системы дублирования).

Выходам контролируемого устройства f_1, f_2, \dots, f_m соответствуют разряды информационного вектора, который дополняется до кодового слова выбранного помехоустойчивого кода с помощью блока контрольной логики, вычисляющего функции разрядов контрольного вектора g_1, g_2, \dots, g_k . Тестер в составе контрольного оборудования решает задачу проверки соответствия значений разрядов информационного и контрольного векторов коду, установленному на этапе проектирования СФК. Тестер имеет вид самопроверяемой структуры и обнаруживает неисправности как в блоках $F(x)$ и $G(x)$, так и собственные неисправности. Если неисправности отсутствуют, в СФК на выходах тестера формируется парафазный сигнал $\langle 01 \rangle$ либо $\langle 10 \rangle$ [14, 15].

Системы функционального контроля обычно построены с учетом условия обнаружения всех одиночных константных неисправностей на выходах логических элементов внутренней структуры блока $F(x)$ [1]. Система функционального контроля, построенная в соответствии со структурной схемой, изображенной на рис. 1, ввиду отдельной реализации всех ее блоков имеет важную особенность, а именно: в произвольный момент времени неисправность может возникнуть только в одном из ее блоков. Следовательно, соответствие между значениями разрядов кодовых слов в СФК может быть нарушено только в информационном или только в контрольном векторе. Это позволяет рассматривать свойства обнаружения ошибок в информационных векторах кодов в условиях безошибочности контрольных разрядов, исследуя при этом свойства самой СФК.

От свойств кода, выбранного на этапе проектирования СФК, зависят ее основные характеристики — показатели структурной избыточности и обнаружения ошибок в контролируемом объекте [16—18].

Модульные коды с суммированием. Построение модульных кодов с суммированием, или $SM(m, k)$ -кодов, где m — длина информационного вектора, k — длина контрольного вектора, M — значение модуля, выполняется по следующим правилам:

1. Для данного значения m выбираем и фиксируем модуль $M \in \{2, 3, \dots, m, m+1\}$.
2. Определяем сумму единичных разрядов информационного вектора — вес r информационного вектора.
3. Определяем наименьший неотрицательный вычет числа r по модулю M : $W = r \pmod{M}$.
4. Число W представляем в двоичном виде и записываем в разряды контрольного вектора.

В табл. 1 приведены контрольные векторы для всех $SM(m, k)$ -кодов при длине информационного вектора $m = 4$. Для заданной длины информационного вектора m можно построить m различных $SM(m, k)$ -кодов. Это определяется значением максимального веса r информационного вектора: $r_{\max} = m$. Для представления в двоичном виде значения $r_{\max} = m$ требуется $k = \lceil \log_2(m+1) \rceil$, где $\lceil \dots \rceil$ — целое сверху от вычисляемого значения бит, или разрядов контрольного вектора. Поэтому, в зависимости от значения модуля M , коды с суммированием могут иметь $k = \{1, 2, \dots, \lceil \log_2(m+1) \rceil\}$ разрядов в контрольных векторах. Коды с минимальным числом контрольных разрядов, или $S2(m, 1)$ -коды, называются кодами паритета [19—21]. Коды с максимальным значением модуля $M = m + 1$ известны как коды Бергера [11, 15, 22].

Как видим, значение модуля M непосредственно влияет на число разрядов в контрольном векторе, а также на распределение контрольных

векторов между информационными векторами. Это, в свою очередь, является важным моментом, влияющим на сложность технической реализации кодирующего оборудования и СФК, а также на свойства кода и соответственно СФК по обнаружению ошибок в контролируемых схемах. Выбор значения модуля $SM(m, k)$ -кода при организации СФК имеет определяющее значение [23].

Обнаружение ошибок в информационных векторах модульными кодами с суммированием. При организации СФК логических схем важно знать свойства обнаружения ошибок кодами в информационных векторах. Эти свойства определяют и свойства обнаружения ошибок в разрядах вектора рабочих функций в СФК. Системы функционального контроля в устройствах управления ответственными технологическими процессами должны обеспечивать 100%-ное обнаружение одиночных неисправностей [24]. Учитывая свойства обнаружения ошибок кодами в информационных векторах, можно сформулировать требования к построению дискретных систем, обеспечивающих 100%-ное обнаружение одиночных неисправностей.

Рассмотрим свойства обнаружения ошибок $SM(m, k)$ -кодами в информационных векторах. Кратность возникающей в информационном векторе ошибки обозначим $d \in \{1, m\}$. Любая ошибка характеризуется не только

Таблица 1

Номер п.п.	Информационный вектор				r	$r \pmod{M}$				Контрольный вектор							
										$S2(4, 1)$		$S3(4, 2)$		$S4(4, 2)$		$SM(4, 3), M \geq 5$	
	f_4	f_3	f_2	f_1		2	3	4	≥ 5	g_1	g_2	g_1	g_2	g_1	g_3	g_2	g_1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	1	1	1	1	1	4	1	0	1	0	1	0	0	1
2	0	0	1	0	1	1	1	1	4	1	0	1	0	1	0	0	1
3	0	0	1	1	2	0	2	2	6	0	1	0	1	0	0	1	0
4	0	1	0	0	1	1	1	1	4	1	0	1	0	1	0	0	1
5	0	1	0	1	2	0	2	2	6	0	1	0	1	0	0	1	0
6	0	1	1	0	2	0	2	2	6	0	1	0	1	0	0	1	0
7	0	1	1	1	3	1	0	3	7	1	0	0	1	1	0	1	1
8	1	0	0	0	1	1	1	1	4	1	0	1	0	1	0	0	1
9	1	0	0	1	2	0	2	2	6	0	1	0	1	0	0	1	0
10	1	0	1	0	2	0	2	2	6	0	1	0	1	0	0	1	0
11	1	0	1	1	3	1	0	3	7	1	0	0	1	1	0	1	1
12	1	1	0	0	2	0	2	2	6	0	1	0	1	0	0	1	0
13	1	1	0	1	3	1	0	3	7	1	0	0	1	1	0	1	1
14	1	1	1	0	3	1	0	3	7	1	0	0	1	1	0	1	1
15	1	1	1	1	4	0	1	0	5	0	0	1	0	0	1	0	0

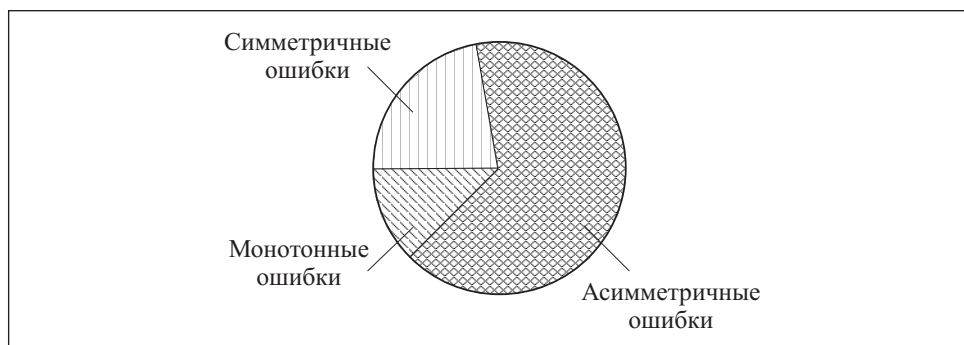


Рис. 2. Виды ошибок в информационных векторах систематических кодов

кратностью, но и видом, который определяется общим числом искажений нулевых и единичных разрядов. Пусть $e_{0 \rightarrow 1}$ — число искажений $0 \rightarrow 1$, а $e_{1 \rightarrow 0}$ — число искажений $1 \rightarrow 0$. Кратность возникающей ошибки есть сумма числа искажений нулевых и единичных разрядов:

$$d = e_{1 \rightarrow 0} + e_{0 \rightarrow 1}. \quad (1)$$

Соотношения между числами $e_{0 \rightarrow 1}$ и $e_{1 \rightarrow 0}$ однозначно определяют принадлежность возникшей ошибки в информационном векторе классу обнаруживаемых или необнаруживаемых $SM(m, k)$ -кодами ошибок.

Согласно теории функционального контроля все ошибки в информационных векторах делятся на несколько видов (рис. 2) [25].

Определение 1. Ошибка называется монотонной, или однонаправленной, если ее кратность составляет $d = e_{1 \rightarrow 0}$ либо $d = e_{0 \rightarrow 1}$.

Из данного определения следует, что монотонная ошибка возникает при искажении только нулевых или только единичных разрядов.

Определение 2. В случае, если $d \neq e_{1 \rightarrow 0}$ или $d \neq e_{0 \rightarrow 1}$, ошибка является немонотонной, или разнонаправленной.

В классе немонотонных ошибок выделяются особенные виды ошибок.

Определение 3. Ошибка называется симметричной, если $e_{1 \rightarrow 0} = e_{0 \rightarrow 1}$.

Определение 4. Если $e_{1 \rightarrow 0} \neq e_{0 \rightarrow 1}$ и $d \neq e_{1 \rightarrow 0}$ или $d \neq e_{0 \rightarrow 1}$, ошибка называется асимметричной.

Соотношения между числом монотонных, симметричных и асимметричных ошибок при различных длинах информационных векторов — различные. Например, при длине информационного вектора $m = 10$ имеется 17,54 % симметричных ошибок, 11,08 % монотонных и 71,38 % асимметричных ошибок. С увеличением длины информационного вектора доля монотонных и симметричных ошибок от общего числа ошибок в инфор-

мационных векторах уменьшается, а доля асимметричных ошибок увеличивается [25].

Теорема. Ошибка кратностью d в информационном векторе $SM(m, k)$ -кода будет необнаруживаемой тогда и только тогда, когда

$$|e_{1 \rightarrow 0} - e_{0 \rightarrow 1}| = iM, \quad (2)$$

где $i = 0, 1, \dots, q$ ($qM \leq m$).

Доказательство. Докажем необходимость условия теоремы. Для этого рассмотрим табличную форму задания любого $SM(m, k)$ -кода. Табличная форма задания систематического кода предполагает перечисление всех информационных векторов в столбцах, соответствующих всем контрольным векторам кода [26]. Например, в табл. 2 задан $S4(6, 2)$ -код.

Таблица 2

Вес r информационных векторов	0, 4	1, 5	2, 6	3, 0
Вес $t = r \pmod{M}$ (номер группы)	0	1	2	3
Двоичный номер контрольной группы	00	01	10	11
Информационный вектор	000000	000001	000011	000111
	001111	000010	000101	001011
	010111	000100	000110	001101
	011011	001000	001001	001110
	011101	010000	001010	010011
	011110	100000	001100	010101
	100111	011111	010001	010110
	101011	101111	010010	011001
	101101	110111	010100	011010
	101110	111011	011000	011100
	110011	111101	100001	100011
	110101	111110	100010	100101
	110110		100100	100110
	111001		101000	101001
	111010		110000	101010
	111100		111111	101100
			110001	
			110010	
			110100	
			111000	

Таблица 3

Вес t для контрольной группы					
0	1	...	s	...	$M-1$
C_m^0	C_m^1	...	C_m^s	...	C_m^{M-1}
C_m^M	C_m^{M+1}	...	C_m^{M+s}	...	C_m^{2M-1}
C_m^{2M}	C_m^{2M+1}	...	C_m^{2M+s}	...	C_m^{3M-1}
...
C_m^{iM}	C_m^{iM+1}	...	C_m^{iM+s}	...	$C_m^{(i+1)M-1}$

Табличная форма задания кода удобна для анализа его свойств обнаружения ошибок. Ошибка в информационном векторе не будет обнаружена кодом только в том случае, если переведет один информационный вектор в другой в пределах одной контрольной группы.

В табл. 3 указано число информационных векторов с весом r в каждой контрольной группе $SM(m, k)$ -кода (фактически, это количество наименьших неотрицательных вычетов весов всех информационных векторов $SM(m, k)$ -кода по модулю M). В контрольную группу с номером $t \in \{0, 1, \dots, s, \dots, M-1\}$ помещены векторы с весом $r = t$ (их число составляет C_m^t), векторы с весом $M + t$ (C_m^{M+t}), векторы с весом $iM + t$ (C_m^{iM+t} , $iM + t \leq m$). В результате в группе t размещается

$$p_t = C_m^t + C_m^{M+t} + C_m^{2M+t} + \dots + C_m^{iM+t} \quad (3)$$

информационных векторов [27].

Необнаруживаемая ошибка не меняет значения соответствующего вычета веса информационного вектора. Рассмотрим возможные случаи искажений информационных векторов внутри одной контрольной группы.

1. Перевод информационного вектора с весом r в информационный вектор с таким же весом. Такая ошибка является симметричной, так как при ее возникновении выполняется равенство $e_{1 \rightarrow 0} = e_{0 \rightarrow 1}$. Эта ошибка удовлетворяет выражению (2) при $i = 0$.

2. Переход информационного вектора с весом r в информационный вектор с отличным от r весом. Пусть данный переход происходит внутри контрольной группы с номером t . Тогда значение веса любого информационного вектора, представленного по модулю M , будет $r \pmod{M} = t$. В результате необнаруживаемой ошибки число t не изменится. Расстояние Хэмминга между информационными векторами внутри одной контрольной

ной группы будет всегда кратно значению M , так как веса информационных векторов в контрольной группе имеют только значения $r, r + M, \dots, r + iM$ ($r + iM \leq m$). Следовательно, обнаруживаемая ошибка имеет кратность $d = iM$, где $i = 1, \dots, q$ ($qM \leq m$). При $e_{1 \rightarrow 0} > e_{0 \rightarrow 1}$ ошибка будет обнаруживаемой только в случае, если $e_{1 \rightarrow 0} - e_{0 \rightarrow 1} = iM$. При $e_{1 \rightarrow 0} < e_{0 \rightarrow 1}$ ошибка будет обнаруживаемой только в случае, если $e_{0 \rightarrow 1} - e_{1 \rightarrow 0} = iM$. Следовательно, условие теоремы выполняется.

Достаточность условия теоремы доказывает тот факт, что никакая другая ошибка, кроме двух рассмотренных выше видов, не переводит произвольный информационный вектор рассматриваемой контрольной группы в другой информационный вектор той же контрольной группы.

Таким образом, теорема доказана.

Из этой теоремы, в частности, следует, что обнаруживаемые $SM(m, k)$ -кодами ошибки могут быть как монотонными, так и симметричными и асимметричными.

Следствие. Принадлежность обнаруживаемых $SM(m, k)$ -кодами ошибок к определенным ранее видам находим с помощью формулы (2):

1) если $d = e_{1 \rightarrow 0} = iM$ или $d = e_{0 \rightarrow 1} = iM$, где $i = 1, \dots, q$ ($qM \leq m$), то обнаруживаемая ошибка будет монотонной;

2) если $|e_{1 \rightarrow 0} - e_{0 \rightarrow 1}| = 0$, то обнаруживаемая ошибка будет симметричной;

3) если $|e_{1 \rightarrow 0} - e_{0 \rightarrow 1}| = iM$, где $i = 1, \dots, q$ ($qM \leq m$), то обнаруживаемая ошибка будет асимметричной.

Учитывая свойства обнаруживаемых ошибок в $SM(m, k)$ -кодах, нетрудно формализовать процесс их подсчета [27]. Число обнаруживаемых ошибок в одной контрольной группе

$$N_{m(t)} = 2C_{p_t}^2 = 2 \frac{p_t!}{2!(p_t - 2)!} = p_t(p_t - 1). \quad (4)$$

Общее число обнаруживаемых ошибок в информационных векторах $SM(m, k)$ -кодах равно сумме величин $N_{m(t)}$ по всем контрольным группам t :

$$N_m = \sum_{t=0}^{t=M-1} N_{m(t)} = \sum_{t=0}^{t=M-1} p_t(p_t - 1) = \sum_{t=0}^{t=M-1} (C_m^t + C_m^{M+t} + C_m^{2M+t} + \dots + C_m^{iM+t})(C_m^t + C_m^{M+t} + C_m^{2M+t} + \dots + C_m^{iM+t} - 1). \quad (5)$$

Таблица 4

m	Число необнаруживаемых ошибок в информационных векторах $SM(m, k)$ -кодов при M							
	2	3	4	5	6	7	8	
2	4	2	2	2	2	2	2	
3	24	14	12	12	12	12	12	
4	112	70	56	54	54	54	54	
5	480	310	240	222	220	220	220	
6	1984	1302	992	884	862	860	860	
7	8064	5334	4032	3486	3332	3306	3304	
8	32512	21590	16256	13734	12854	12646	12616	
9	130560	86870	65280	54228	49740	48414	48144	
10	523264	348502	261632	214742	193422	186012	184112	
11	2095104	1396054	1047552	852654	756052	718014	706464	
12	8384512	5588310	4192256	3392820	2969254	2785068	2721312	
13	33546240	22361430	16773120	13522158	11708060	10852868	10523968	
14	134201344	89462102	67100672	53954966	46317182	42468298	40853696	
15	536838144	357881174	268419072	215459796	183707172	166790662	159156352	
16	2147418112	1431590230	1073709056	860876262	730111254	657113446	622051456	
17	8589803520	5726491990	4294901760	3440943582	2906227180	2595743396	2438377728	
18	34359476224	22906230102	17179738112	13756987316	11582124142	10276601558	9583248128	
19	137438429184	91625444694	68719214592	55010018622	46199880692	40760693692	37751400960	
20	549754765312	366502827350	274877382656	219992807430	184413150854	161919602764	149019369984	

Например, для $S_4(6, 2)$ -кода подсчет общего числа необнаруживаемых ошибок по формуле (5) дает следующий результат:

$$\begin{aligned} N_6 &= \sum_{t=0}^{t=4-1} N_{6(t)} = N_{6(0)} + N_{6(1)} + N_{6(2)} + N_{6(3)} = (C_6^0 + C_6^{0+4})(C_6^0 + C_6^{0+4} - 1) + \\ &+ (C_6^1 + C_6^{1+4})(C_6^1 + C_6^{1+4} - 1) + (C_6^2 + C_6^{2+4})(C_6^2 + C_6^{2+4} - 1) + C_6^3(C_6^3 - 1) = \\ &= 16 \cdot 15 + 12 \cdot 11 + 16 \cdot 15 + 20 \cdot 19 = 240 + 132 + 240 + 380 = 992. \end{aligned}$$

Формула (5) справедлива для любых значений M .

В табл. 4 представлены результаты расчетов числа необнаруживаемых ошибок в информационных векторах $SM(m, k)$ -кодов для диапазона значений длин информационных векторов $m = 2 \div 20$ и некоторых модулей M . Как видим, с увеличением значения модуля для данной длины информационного вектора происходит уменьшение общего числа необнаруживаемых ошибок. При этом минимум достигается при различных значениях модуля для различных значений m . Например, минимальное значение общего числа необнаруживаемых ошибок при длине информационного вектора $m = 4$ имеет $S_5(4, 3)$ -код, а при $m = 6$ — $S_7(6, 3)$ -код. Нетрудно установить следующую закономерность.

Свойство 1. $SM(m, k)$ -код имеет минимальное общее число необнаруживаемых ошибок в информационных векторах длины m при значении модуля $M = m + 1$.

Это свойство модульных кодов с суммированием объясняется тем, что при указанном значении модуля в случае подсчета наименьшего неотрицательного вычета веса информационного вектора в одной контрольной группе не окажутся информационные векторы с различными весами t . Значение t будет находиться в диапазоне $t \in \{1, 2, \dots, m + 1\}$.

Абсолютные величины, характеризующие общее число необнаруживаемых кодом ошибок в информационных векторах, не очень удобны для сравнения свойств кодов. Намного удобнее анализировать относительные величины. Например, свойства обнаружения ошибок в информационных векторах $SM(m, k)$ -кодов можно сравнивать, используя специальный коэффициент γ_m , характеризующий долю необнаруживаемых кодом ошибок в информационных векторах от общего числа возможных в информационных векторах ошибок (в процентах) [23]. Число необнаруживаемых $SM(m, k)$ -кодами ошибок в информационных векторах определяется по формуле (5), а общее число ошибок в информационных векторах — по формуле

$$N = 2^m(2^m - 1). \quad (6)$$

Определим значение коэффициента γ_6 для рассмотренного выше S4(6,2)-кода, используя формулы (5) и (6). Применив формулу (6) для информационных векторов длины $m = 6$, получим $N = 4032$ и соответственно $\gamma_6 = 24,6 \%$. Это свидетельствует о том, что практически каждая четвертая ошибка в информационном векторе данного кода обнаружена не будет.

При увеличении длины информационного вектора значение коэффициента γ_m стремится к величине $1/M$. Это объясняется тем, что число контрольных разрядов модульных кодов является постоянным вне зависимости от длины информационного вектора. В табл. 5 приведены рассчитанные значения γ_m для модульных кодов с суммированием $M = 2 \div 8$ при $m = 2 \div 20$; в последней строке указаны значения, к которым стремится коэффициент γ_m с увеличением длины информационного вектора. Как видим из табл. 5, чем меньше значение M , тем быстрее достигается предельное значение γ_m для модульного кода с суммированием. Например, для S2(m, k)-кода минимальное значение $\gamma_m = 50 \%$ достигается при длине информационного

Таблица 5

m	Значение γ_m при M						
	2	3	4	5	6	7	8
2	33,33	16,67	16,67	16,67	16,67	16,67	16,67
3	42,86	25	21,43	21,43	21,43	21,43	21,43
4	46,67	29,17	23,33	22,5	22,5	22,5	22,5
5	48,39	31,25	24,19	22,38	22,18	22,18	22,18
6	49,21	32,29	24,6	21,92	21,38	21,33	21,33
7	49,61	32,81	24,8	21,44	20,5	20,34	20,32
8	49,8	33,07	24,9	21,04	19,69	19,37	19,33
9	49,9	33,2	24,95	20,73	19,01	18,5	18,4
10	49,95	33,27	24,98	20,5	18,46	17,76	17,58
11	49,98	33,3	24,99	20,34	18,03	17,13	16,85
12	49,99	33,32	24,99	20,23	17,7	16,6	16,22
13	49,99	33,33	25	20,15	17,45	16,17	15,68
14	50	33,33	25	20,1	17,26	15,82	15,22
15	50	33,33	25	20,07	17,11	15,53	14,82
16	50	33,33	25	20,04	17	15,3	14,48
17	50	33,33	25	20,03	16,92	15,11	14,19
18	50	33,33	25	20,02	16,85	14,95	13,95
19	50	33,33	25	20,01	16,81	14,83	13,73
20	50	33,33	25	20,01	16,77	14,73	13,55
$m \rightarrow \infty$	50	33,33	25	20	16,67	14,29	12,5

вектора $m = 14$. При данной длине информационного вектора для $S8(m, k)$ -кода будет $\gamma_m = 15,22\%$, что на $2,72\%$ больше, чем минимальное значение γ_m для $S8(m, k)$ -кодов.

Рассмотрим особенности обнаружения различных видов ошибок $SM(m, k)$ -кодами.

Утверждение 1. Любой $SM(m, k)$ -код не обнаруживает 100% симметричных ошибок в информационных векторах.

Утверждение 1 вытекает из того факта, что в информационном векторе $SM(m, k)$ -кодом не будет обнаружена любая ошибка, в результате возникновения которой сохраняется значение веса информационного вектора.

Используя полученные в [25] формулы для определения общего числа ошибок кратностью d в информационных векторах систематических кодов и утверждение 1, нетрудно доказать следующее свойство $SM(m, k)$ -кодов.

Свойство 2. Доля необнаруживаемых симметричных ошибок четной кратностью d в информационных векторах $SM(m, k)$ -кодов от общего числа ошибок данной кратностью является постоянной величиной и не зависит от длины информационного вектора и значения модуля:

$$\sigma_d = \frac{N_{m,d}^{\text{sym}}}{N_{m,d}} = 2^{-d} C_d^{d/2}.$$

Утверждение 2. Любой $SM(m, k)$ -код не обнаруживает 100% монотонных ошибок кратностью $d = iM$, $i = 1, \dots, q$ ($qM \leq m$), в информационных векторах.

Свойство 2 объясняется наличием в одной контрольной группе информационных векторов с различными значениями числа единичных разрядов $r, r + M, \dots, r + iM$ ($r + iM \leq m$), но с одинаковым весом $r \pmod{M}$. Переходы между информационными векторами с различными значениями числа единичных разрядов будут монотонными либо асимметричными. При этом все переходы кратностью $d = iM$, $i = 1, \dots, q$ ($qM \leq m$), будут внутри контрольных групп, а не между ними, что, в свою очередь, обуславливает появление монотонных необнаруживаемых ошибок.

Из утверждения 2 вытекает следующее свойство $SM(m, k)$ -кодов.

Свойство 3. Доля необнаруживаемых монотонных ошибок кратностью d в информационных векторах $SM(m, k)$ -кодов от общего числа ошибок данной кратностью является постоянной величиной и не зависит от длины информационного вектора и значения модуля:

$$\upsilon_d = \frac{N_{m,d}^{\text{uni}}}{N_{m,d}} = 2^{1-d}.$$

Таблица 6

M	Доля необнаруживаемых ошибок β_d от общего числа ошибок данной кратностью, %, при d															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
2	0	100	0	100	0	100	0	100	0	100	0	100	0	100	0	100
3	0	50	25	37,5	31,25	34,38	32,81	33,59	33,2	33,4	33,3	33,35	33,33	33,34	33,33	33,33
4	0	50	0	50	0	50	0	50	0	50	0	50	0	50	0	50
5	0	50	0	37,5	6,25	31,25	10,94	27,34	14,06	24,8	16,11	23,14	17,46	22,06	18,33	21,35
6	0	50	0	37,5	0	34,38	0	33,59	0	33,4	0	33,35	0	33,34	0	33,33
7	0	50	0	37,5	0	31,25	1,56	27,34	3,52	24,61	5,37	22,56	6,98	20,96	8,33	19,69
8	0	50	0	37,5	0	31,25	0	28,13	0	26,56	0	25,78	0	25,39	0	25,2
9	0	50	0	37,5	0	31,25	0	27,34	0,39	24,61	1,07	22,56	1,9	20,95	2,78	19,64
10	0	50	0	37,5	0	31,25	0	27,34	0	24,8	0	23,14	0	22,06	0	21,35
11	0	50	0	37,5	0	31,25	0	27,34	0	24,61	0,1	22,56	0,32	20,95	0,64	19,64
12	0	50	0	37,5	0	31,25	0	27,34	0	24,61	0	22,61	0	21,12	0	20
13	0	50	0	37,5	0	31,25	0	27,34	0	24,61	0	22,56	0,02	20,95	0,09	19,64
14	0	50	0	37,5	0	31,25	0	27,34	0	24,61	0	22,56	0	20,96	0	19,69
15	0	50	0	37,5	0	31,25	0	27,34	0	24,61	0	22,56	0	20,95	0,01	19,64
16	0	50	0	37,5	0	31,25	0	27,34	0	24,61	0	22,56	0	20,95	0,01	19,64
M_{\max}	0	50	0	37,5	0	31,25	0	27,34	0	24,61	0	22,56	0	20,95	0,01	19,64

С помощью разработанного программного обеспечения, реализующего алгоритм построения $SM(m, k)$ -кодов, было рассчитано число необнаруживаемых ими ошибок различной кратности в информационных векторах. Результаты расчетов подтверждают следующую закономерность.

Свойство 4. Доля необнаруживаемых асимметричных ошибок кратностью d в информационных векторах $SM(m, k)$ -кодов от общего числа ошибок данной кратностью является постоянной величиной и не зависит от длины информационного вектора и значения модуля.

Исходя из того факта, что все ошибки в информационных векторах классифицированы как монотонные, асимметричные и симметричные, на основании свойств 2—4 с учетом экспериментальных результатов можно сформулировать следующее свойство.

Свойство 5. Доля необнаруживаемых ошибок кратностью d в информационных векторах модульных кодов с суммированием от общего числа ошибок данной кратностью является постоянной величиной вне зависимости от длины информационного вектора для заданного значения модуля M : $\beta_d = \text{const}$.

В табл. 6 приведены относительные величины β_d , характеризующие способность $SM(m, k)$ -кодов обнаруживать ошибки в информационных векторах. Значение $M_{\max} = m + 1$ соответствует значению модуля кода Бергера. Полученные значения β_d можно сравнивать с соответствующими значениями β_d для различных модульных кодов с суммированием, так как для кода Бергера $\beta_d = \sigma_d$, а разница между значениями определяет доли необнаруживаемых им монотонных и асимметричных ошибок.

Проанализировав данные табл. 6, можно сформулировать следующие особенности $SM(m, k)$ -кодов в СФК:

1. $SM(m, k)$ -коды, в которых $M = m + 1$ (коды Бергера), обнаруживают максимальное число ошибок в информационных векторах при данном значении m по сравнению с остальными модульными кодами.
2. $SM(m, k)$ -коды с четными значениями M обнаруживают 100 % ошибок нечетной кратностью в информационных векторах.
3. В $SM(m, k)$ -кодах с нечетными значениями M присутствуют ошибки с нечетными кратностями, при этом $d \geq M$; ими обнаруживаются все ошибки с нечетными кратностями $d < M$ в информационных векторах.
4. $S2(m, k)$ -коды, или коды паритета, не обнаруживают 100 % ошибок с четными кратностями в информационных векторах.
5. $S4(m, k)$ -коды не обнаруживают 50 % ошибок с четными кратностями в информационных векторах.

6. Любой $SM(m, k)$ -код не обнаруживает одинаковую долю ошибок кратностью d в информационных векторах от общего числа ошибок данной кратностью при условии, что $d < M$.

7. Для любых $SM(m, k)$ -кодов с увеличением значения M значение коэффициента β_d стремится к значению σ_d .

8. Модульные коды с суммированием имеют плохую обнаруживающую способность при малой кратности ошибок: при $M > 2$ не обнаруживается 50 % двукратных ошибок, при $M > 4$ не обнаруживается 37,5 % четырехкратных ошибок, при $M > 6$ — 31,25 % шестикратных ошибок и так далее.

В результате экспериментальных исследований $SM(m, k)$ -кодов со значениями $m \leq 24$ подтверждены сформулированные выше свойства, а также установлены новые свойства $SM(m, k)$ -кодов по обнаружению различных видов ошибок в информационных векторах.

9. $SM(m, k)$ -коды, включая код Бергера, не обнаруживают одинаковое число симметричных ошибок четных кратностей d для данного значения m и любого M .

10. В $SM(m, k)$ -кодах доля необнаруживаемых асимметричных ошибок четной кратностью $d > M$ от общего числа ошибок данной кратностью не зависит от длины информационного вектора и является постоянной величиной.

11. $SM(m, k)$ -код не имеет необнаруживаемых асимметричных ошибок кратностей $d \leq M + 1$.

12. $S2(m, k)$ -коды не обнаруживают 100 % асимметричных ошибок четной кратностью $d > M$ при любых значениях m .

13. В $SM(m, k)$ -кодах доля необнаруживаемых ошибок четной кратностью d в информационных векторах от общего числа ошибок в информационных векторах данной кратностью не зависит от длины информационного вектора и является постоянной величиной.

Результаты экспериментов. Используя систему контрольных примеров, можно дать оценку практической применимости установленных при исследовании свойств $SM(m, k)$ -кодов. В СФК вместо классического кода Бергера ($M = m + 1$) для контроля реальных комбинационных схем может быть применен модульный код с меньшим значением модуля. Это дает возможность уменьшать число контрольных разрядов кода, а также менять функции вычисления значений разрядов контрольных векторов и таким образом влиять на значение показателя структурной избыточности системы технического диагностирования.

Согласно особенности 9 число необнаруживаемых симметричных ошибок по сравнению с кодом Бергера при уменьшении значения M не

может быть уменьшено. Однако согласно пунктам 2 и 11 особенности модульных кодов с суммированием позволяют подобрать такое значение M , при котором будут отсутствовать необнаруживаемые монотонные и асимметричные ошибки.

Эти утверждения сформулированы на основании проведенных экспериментов с контролируемой логической схемой, в результате которых определено значение d_{\max} , возможное на выходах схемы при внесении в нее одиночных неисправностей элементов.

Значение модуля M выбираем, исходя из следующих условий:

1. $M \neq pd_{\max}, p = 1, 2, 3, \dots$
2. $M \geq d_{\max} + 1$.

Практические результаты применения $SM(m, k)$ -кодов при организации контроля логических устройств получены в результате экспериментов с системой контрольных примеров LGSynth'89 [28]. Контрольные схемы данной системы представляют собой файлы в формате *.netblif, описывающие структуру определенной комбинационной схемы в виде net-листа. Каждая контрольная схема записана в базисе nor (ИЛИ-НЕ). При постановке экспериментов ставилась задача моделирования одиночных константных неисправностей $0 \rightarrow 1$ и $1 \rightarrow 0$ на выходах всех логических элементов во внутренней структуре контрольных схем и определения числа необнаруживаемых ошибок.

Таблица 7

Номер п.п.	Контрольный пример	Число выходов схемы	d_{\max}	Код		Кодовая скорость $R = m / (m + k)$		$\frac{R_{SM(m, k^*)}}{R_{SM_{\max}(m, k)}}$
				$SM_{\max}(m, k)$	$SM(m, k^*)$	$SM_{\max}(m, k)$	$SM(m, k^*)$	
1	cmb	4	2	S8 (4,3)	S3 (4,2)	0,571	0,667	1,168
2	z4ml	4	3	S8 (4,3)	S4 (4,2)	0,571	0,667	1,168
3	alu2	6	5	S8 (6,3)	S6 (6,3)	0,667	0,667	1
4	x2	7	5	S8 (7,3)	S6 (7,3)	0,7	0,7	1
5	cm138a	8	1	S16 (8,4)	S3 (8,2)	0,667	0,8	1,199
6	f51m	8	4	S16 (8,4)	S5 (8,3)	0,667	0,727	1,09
7	alu4	8	6	S16 (8,4)	S7 (8,3)	0,667	0,727	1,09
8	plce	9	8	S16 (9,4)	S9 (9,4)	0,692	0,692	1
9	cm42a	10	2	S16 (10,4)	S3 (10,2)	0,714	0,833	1,167
10	cu	11	4	S16 (11,4)	S5 (11,3)	0,733	0,786	1,072
11	pm1	13	4	S16 (13,4)	S5 (13,3)	0,765	0,813	1,063
12	set	15	10	S16 (15,4)	S11 (15,4)	0,789	0,789	1
13	ldd	19	10	S32 (19,5)	S11 (19,4)	0,792	0,826	1,043
14	cc	20	10	S32 (20,5)	S11 (20,4)	0,8	0,833	1,041
15	ttt2	21	7	S32 (21,5)	S8 (21,3)	0,808	0,875	1,083

Таблица 8

Код	Распределение необнаруживаемых ошибок по кратностям d							Число необнаруживаемых ошибок
	1	2	3	4	5	6	7	
<i>Общее число ошибок</i>								
S8(21,3) — S32(21,5)	0	11626352	0	2325168	0	32496	0	755063504
S7(21,3)	0	11626352	0	2325168	0	32496	5120	13989136
S6(21,3)	0	11626352	0	2325168	0	35568	0	13987088
S5(21,3)	0	11626352	0	2325168	120832	32496	5120	14109968
S4(21,2)	0	11626352	0	2700720	0	45808	0	14372880
S3(21,2)	0	11626352	319200	2325168	169984	32496	0	14473200
S2(21,1)	0	30023056	0	3484496	0	48880	0	33556432
В с е г о	712909472	30023056	7437760	3860048	757664	65264	10240	755063504
<i>Монотонные ошибки</i>								
S8(21,3) — S32(21,5)	0	0	0	0	0	0	0	0
S7(21,3)	0	0	0	0	0	0	5120	5120
S6(21,3)	0	0	0	0	0	3072	0	3072
S5(21,3)	0	0	0	0	120832	0	0	120832
S4(21,2)	0	0	0	375552	0	0	0	375552
S3(21,2)	0	0	319200	0	0	0	0	319200
S2(21,1)	0	18396704	0	0	0	0	0	18396704
В с е г о	712909472	18396704	319200	375552	120832	3072	5120	732129952
<i>Асимметричные ошибки</i>								
S8(21,3) — S32(21,5)	0	0	0	0	0	0	0	0
S7(21,3)	0	0	0	0	0	0	0	0
S6(21,3)	0	0	0	0	0	0	0	0
S5(21,3)	0	0	0	0	0	0	5120	5120
S4(21,2)	0	0	0	0	0	13312	0	13312
S3(21,2)	0	0	0	0	169984	0	0	169984
S2(21,1)	0	0	0	1159328	0	16384	0	1175712
В с е г о	0	0	7118560	1159328	636832	29696	5120	8949536
<i>Симметричные ошибки</i>								
S2(21,1) — S32(21,5)	0	11626352	0	2325168	0	32496	0	13984016
В с е г о	0	11626352	0	2325168	0	32496	0	13984016

В результате эксперимента рассчитаны число и кратности необнаруживаемых ошибок различных видов для ряда логических схем из системы контрольных примеров LGSynth`89 и определены значения d_{\max} для данных логических схем (табл. 7). Как указано выше, d_{\max} определяет значение модуля кода, применение которого позволяет идентифицировать все монотонные и асимметричные ошибки в схеме. Например, для схемы *ttt2* $d_{\max} = 7$. Тогда условиям 1 и 2 удовлетворяет значение $M = 8$, так как $M = 8 \geq d_{\max} + 1 = 7 + 1 = 8$ и $M = 8 \neq p \cdot 7$ ($p = 1, 2, 3, \dots$). В табл. 7 для $SM(m, k)$ -кодов приведено также значение кодовой скорости, которая косвенно влияет на показатели структурной избыточности СФК.

Для большинства логических схем более эффективным вариантом кодирования является использование модульных кодов с суммированием вместо кодов Бергера, так как число контрольных разрядов в них уменьшено. Следует заметить, что в 11 случаях из 15 рассмотренных контрольных примеров наилучшим вариантом кодирования оказался модульный код с нечетным значением модуля M .

В табл. 8 приведены результаты моделирования одиночных неисправностей на всех входных наборах контрольного примера *ttt2*, имеющего 24 входа и 21 выход. Полученные значения подтверждают установленные ранее свойства $SM(m, k)$ -кодов по обнаружению ошибок в информационных векторах. Например, любой $SM(m, k)$ -код, выбранный для организации контроля схемы *ttt2*, не обнаруживает все 100 % симметричных ошибок; в любых $SM(m, k)$ -кодах нет необнаруживаемых монотонных ошибок кратностей $d < M$ и так далее. Следует также заметить, что свойства обнаружения ошибок у всех кодов со значениями $M = 8 \div 32$ совпадают, и при организации контроля данной комбинационной схемы целесообразно выбрать $S8(21, 3)$ -код, имеющий на два контрольных разряда меньше, чем код Бергера $S32(21, 5)$.

Выводы

Установленные новые свойства модульных кодов с суммированием позволяют сформулировать критерии их применимости для организации СФК реальных комбинационных логических схем. При этом известные алгоритмы построения схем, обеспечивающие 100%-ное обнаружение одиночных неисправностей на выходах логических элементов внутренней структуры логических схем, реконфигурацию их структуры и внесение в нее избыточности, могут быть усовершенствованы с учетом особенностей обнаружения ошибок $SM(m, k)$ -кодами [24, 29]. Можно эффективно использовать $SM(m, k)$ -коды с модулями $M \neq 2^q$, $q = \{1, 2, \dots, \lceil \log_2(m+1) \rceil - 1\}$

для построения оптимальных СФК, анализируя топологию контролируемых схем и влияние установленного значения модуля на сложность технической реализации СФК. Методы уменьшения сложности технической реализации СФК, организованных с использованием $SM(m, k)$ -кодов, рассмотрены во второй части статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пархоменко П.П., Согомонян Е.С. Основы технической диагностики (оптимизация алгоритмов диагностирования, аппаратурные средства). — М. : Энергоатомиздат, 1981, 320 с.
2. McCluskey E.J. Logic Design Principles: With Emphasis on Testable Semicustom Circuits. — N.J. : Prentice Hall PTR, 1986. — 549 p.
3. Goessel M., Graf S. Error Detection Circuits. — London: McGraw-Hill, 1994. — 261 p.
4. Дрозд А.В., Харченко В.С., Антощук С.Г. и др. Рабочее диагностирование безопасных информационно-управляющих систем. Под ред. А.В. Дрозда и В.С. Харченко. — Харьков : Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», 2012. — 614 с.
5. Touba N.A., McCluskey E.J. Logic Synthesis of Multilevel Circuits with Concurrent Error Detection // IEEE Trans. Computer-Aided Design of Integrated Circuits and System. — 1997, Jul. — Vol. 16. — P. 783—789.
6. Nicolaidis M., Zorian Y. On-Line Testing for VLSI — A Compendium of Approaches // Journal of Electronic Testing: Theory and Applications. — 1998. — № 12. — P. 7—20.
7. Mitra S., McCluskey E.J. Which Concurrent Error Detection Scheme to Choose? // Proc. of Intern. Test Conf., 03—05 October, 2000. — USA, Atlantic City, NJ, 2000. — P. 985—994.
8. Дрозд А.В. Нетрадиционный взгляд на рабочее диагностирование вычислительных устройств // Проблемы управления. — 2008. — № 2. — С. 48—56.
9. Слабаков Е.В., Согомонян Е.С. Самопроверяемые вычислительные устройства и системы (обзор) // Автоматика и телемеханика. — 1981. — № 11. — С. 147—167.
10. Rao T.R., Fujiwara E. Error Control Coding for Computer Systems. — NY : Prentice Hall, 1989. — 584 p.
11. Согомонян Е.С., Слабаков Е.В. Самопроверяемые устройства и отказоустойчивые системы. — М. : Радио и связь, 1989. — 208 с.
12. Fujiwara E. Code Design for Dependable Systems: Theory and Practical Applications. — NJ : John Wiley & Sons, 2006. — 720 p.
13. Lala P.K. Principles of Modern Digital Design. — NJ : John Wiley & Sons, 2007. — 419 p.
14. Jha N.K. Totally Self-Checking Checker Designs for Bose-Lin, Bose and Blaum Codes // IEEE Trans. Computer-Aided Design. — 1991. — Vol. CAD-10. — P. 136—143.
15. Сапожников В.В., Сапожников Вл.В. Самопроверяемые дискретные устройства. — СПб: Энергоатомиздат, 1992. — 224 с.
16. Bose B., Lin D.J. Systematic Unidirectional Error-Detection Codes // IEEE Trans. Comput. — 1985. — Vol. C-34. — P. 1026—1032.
17. Das D., Touba N.A. Synthesis of Circuits with Low-Cost Concurrent Error Detection Based on Bose-Lin Codes // J. of Electronic Testing: Theory and Applications. — 1999. — Vol. 15, Issue 1-2. — P. 145—155.
18. Piestrak S.J. Design of Self-Testing Checkers for Unidirectional Error Detecting Codes. — Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 1995. — 111 p.

19. Аксёнова Г.П. Необходимые и достаточные условия построения полностью проверяемых схем свертки по модулю два // Автоматика и телемеханика. — 1979. — № 9. — С. 126—135.
20. Ghosh S., Basu S., Touba N.A. Synthesis of Low Power CED Circuits Based on Parity Codes // Proc. of 23rd IEEE VLSI Test Symposium (VTS'05), 1—5 May 2005. — Palm Springs California, USA. — P. 315—320.
21. Аксёнова Г.П. О функциональном диагностировании дискретных устройств в условиях работы с неточными данными // Проблемы управления. — 2008. — № 5. — С. 62—66.
22. Berger J.M. A Note on Error Detecting Codes for Asymmetric Channels // Information and Control. — 1961. — Vol. 4, Issue 1. — P. 68—73.
23. Sapozhnikov V., Sapozhnikov Vl., Efanov D. Modular Sum Code in Building Testable Discrete Systems // Proc. of 13th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2015). — Batumi, Georgia, September 26—29, 2015. — P. 181—187.
24. Сапожников В.В., Сапожников Вл.В., Ефанов Д.В. Применение кодов с суммированием при синтезе систем железнодорожной автоматики и телемеханики на программируемых логических интегральных схемах // Автоматика на транспорте. — 2015. — 1, № 1. — С. 84—107.
25. Сапожников В.В., Сапожников Вл.В., Ефанов Д.В. Классификация ошибок в информационных векторах систематических кодов // Изв. вузов. Приборостроение. — 2015. — 58, №5. — С. 333—343.
26. Ефанов Д.В., Сапожников В.В., Сапожников Вл.В. О свойствах кода с суммированием в схемах функционального контроля // Автоматика и телемеханика. — 2010. — № 6. — С. 155—162.
27. Ефанов Д.В., Сапожников В.В., Сапожников Вл.В. Применение модульных кодов с суммированием для построения систем функционального контроля комбинационных логических схем // Там же. — 2015. — № 10. — С. 152—169.
28. Collection of Digital Design Benchmarks. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://ddd.fit.cvut.cz/prj/Benchmarks/>.
29. Sapozhnikov V., Sapozhnikov Vl., Efanov D., Blyudov A. On the Synthesis of Unidirectional Combinational Circuits Detecting All Single Faults // Proc. of 12th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2014). — Kiev, Ukraine, September 26—29, 2014. — P. 116—125.

V.V. Sapozhnikov, Vl.V. Sapozhnikov, D.V. Efanov, M.R. Cherepanova

MODULO CODES WITH SUMMATION IN CONCURRENT ERROR DETECTION SYSTEMS. I. ABILITY TO DETECT ERRORS BY MODULO CODES IN DATA VECTORS

The analysis of modulo codes with summation of active bits properties in concurrent error detection systems for the data vector length change was performed. Dependence of errors of different types on different values of modulo, that are connected with the number of bits in data vectors and their calculation rules were determined. It was shown that modulo codes with summation do not detect the same rate of given multiplicity d errors for any data vector length without reference to modulo. It is shown in experiments that reduction of modulo value for real logic circuits does not result in the increase of the number of undetectable errors on its outputs in many cases.

Key words: concurrent error detection system, hardware redundancy, code with summation, Berger code, parity code, modulo code with summation, detection of errors in combinational circuits.

REFERENCES

1. Parkhomenko, P.P. and Sogomonyan, E.S. (1981), *Osnovy tekhnicheskoy diagnostiki (optimizatsiya algoritmov diagnostirovaniya, apparaturnye sredstva)* [Basics of technical diagnostics (optimization of diagnostic algorithms and equipment)], Energoatomizdat, Moscow, Russia.
2. McCluskey, E.J. (1986), *Design logic principles: with emphasis on testable demicustom circuits*, Prentice Hall PTR, New Jersey, USA.
3. Goessel, M. and Graf, S. (1994), *Error detection circuits*, McGraw-Hill, London, UK.
4. Drozd, A.V., Kharchenko, V.S., Antoshchuk, S.G., and et al. (2012), *Rabochee diagnostirovanie bezopasnykh informatsionno-upravlyayuschikh sistem* [On-line testing for safe instrumentation and control systems], National Aerospace University «KhAI», Kharkov, Ukraine.
5. Touba, N.A. and McCluskey, E.J. (1997), "Logic synthesis of multilevel circuits with concurrent error detection", *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, Vol. 16, pp. 783-789.
6. Nicolaidis, M. and Zorian, Y. (1998), "On-line testing for VLSI – A compendium of approaches", *Journal of Electronic Testing: Theory and Applications*, no. 12, pp. 7-20.
7. Mitra, S. and McCluskey, E.J. (2000), "Which concurrent error detection scheme to choose?", *Proceedings of International Test Conference*, Atlantic City, NJ, USA, October 3-5, 2000, pp. 985-994.
8. Drozd, A.V. (2008), "Untraditional view on operational diagnostics of computing devices", *Control sciences*, no. 2, pp. 48-56.
9. Slabakov, E.V. and Sogomonyan, E.S. (1981), "Self-checking computing devices and systems (review)", *Avtomatika i telemekhanika*, no. 11, pp. 147-167.
10. Rao, T.R. and Fujiwara, E. (1989), *Error control coding for computer systems*, Prentice Hall, New York, USA.
11. Sogomonyan, E.S. and Slabakov, E.V. (1989), *Samoproveryaemye ustroystva i otkazoustoichivye sistemy* [Self-checking devices and failover systems], Radio i svyaz, Moscow, Russia.
12. Fujiwara, E. (2006), *Code design for dependable systems: Theory and practical applications*, John Wiley & Sons, New Jersey, USA.
13. Lala, P.K. (2007), *Principles of modern digital design*, John Wiley & Sons, New Jersey, USA.
14. Jha, N.K. (1991), "Totally self-checking checker designs for Bose-Lin, Bose and Blaum Codes", *IEEE Trans. Computer-Aided Design*, Vol. CAD-10, pp.136-143.
15. Sapozhnikov, V.V. and Sapozhnikov, V.I. (1992), *Samoproveryaemye diskretnye ustroystva* [Self-checking digital devices], Energoatomizdat, St. Petersburg, Russia.
16. Bose, B. and Lin, D.J. (1985), "Systematic unidirectional error-detection codes", *IEEE Trans. Comput.*, Vol. C-34, pp. 1026-1032.
17. Das, D. and Touba, N.A. (1999), "Synthesis of circuits with low-cost concurrent error detection based on Bose-Lin codes", *Journal of Electronic Testing: Theory and Applications*, Vol. 15, Iss. 1-2, pp. 145-155.
18. Piestrak, S.J. (1995), *Design of self-testing checkers for unidirectional error detecting codes*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, Poland.
19. Aksyonova, G.P. (1979), "Necessary and sufficient conditions for the design of totally checking circuits of compression by modulo 2", *Avtomatika i telemekhanika*, no. 9, pp. 126-135.
20. Ghosh, S., Basu, S. and Touba, N.A. (2005), "Synthesis of low power CED circuits based on parity codes", *Proceedings of 23rd IEEE VLSI Test Symposium (VTS'05)*, Palm Springs, California, USA, May 1-5, 2005, pp. 315-320.
21. Aksyonova, G.P. (2008), "On functional diagnosis of discrete devices under imperfect data processing conditions", *Problemy upravleniya*, no. 5, pp. 62-66.
22. Berger, J.M. (1961), "A note on error detecting codes for asymmetric channels", *Information and Control*, Vol. 4, Iss. 1, pp. 68-73.

23. Sapozhnikov, V., Sapozhnikov, Vl. and Efanov, D. (2015), "Modular Sum Code in Building Testable Discrete Systems", *Proceedings of 13th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2015)*, Batumi, Georgia, September 26-29, 2015, pp. 181-187.
24. Sapozhnikov, V.V., Sapozhnikov, Vl.V. and Efanov, D.V. (2015), "Application of sum codes for synthesis of railway automation and remote control systems using programmable logic integrated circuits", *Avtomatika na transporte*, Vol. 1, no. 1, pp. 84-107.
25. Sapozhnikov, V.V., Sapozhnikov, Vl.V. and Efanov, D.V. (2015), "Errors classification in information vectors of systematic codes", *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroenie*, Vol. 58, no. 5, pp. 333-343.
26. Efanov, D.V., Sapozhnikov, V.V. and Sapozhnikov, Vl.V. (2010), "On sum code properties in concurrent error detection systems", *Avtomatika i telemekhanika*, no. 6, pp. 155-162.
27. Efanov, D.V., Sapozhnikov, V.V. and Sapozhnikov, Vl.V. (2015), "Applications of modular summation codes to concurrent error detection systems for combinational Boolean circuits", *Avtomatika i telemekhanika*, no. 10, pp. 152-169.
28. Collection of digital design Benchmarks, available at: <http://ddd.fit.cvut.cz/prj/Benchmarks/>.
29. Sapozhnikov, V., Sapozhnikov, Vl., Efanov, D. and Blyudov, A. (2014), "On the synthesis of unidirectional combinational circuits detecting all single faults", *Proceedings of the 12th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2014)*, Kyiv, Ukraine, September 26-29, 2014, pp. 116-125.

Поступила 21.12.15

САПОЖНИКОВ Валерий Владимирович, д-р техн. наук, профессор кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I. В 1963 г. окончил Ленинградский ин-т инженеров железнодорожного транспорта. Область научных исследований — надежность и синтез дискретных устройств, синтез безопасных систем, синтез самопроверяемых схем, техническая диагностика дискретных систем.

САПОЖНИКОВ Владимир Владимирович, д-р техн. наук, профессор кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I. В 1963 г. окончил Ленинградский ин-т инженеров железнодорожного транспорта. Область научных исследований — надежность и синтез дискретных устройств, синтез безопасных систем, синтез самопроверяемых схем, техническая диагностика дискретных систем.

ЕФАНОВ Дмитрий Викторович, канд. техн. наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I, который окончил в 2007 г. Область научных исследований — дискретная математика, надежность и техническая диагностика дискретных систем.

ЧЕРЕПАНОВА Мария Родионовна, студентка факультета «Автоматизация и интеллектуальные технологии» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I. Область научных исследований — автоматика и дискретная математика.