



УДК 681.518.5:004.052.32

**В.В. Сапожников**, д-р техн. наук,  
**Вл.В. Сапожников**, д-р техн. наук, **Д.В. Ефанов**, канд. техн. наук  
Петербургский государственный университет  
путей сообщения Императора Александра I  
(Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр-т, 9,  
тел. (+7) 9117092164, (+7) (812) 4578579; e-mail: TrES-4b@yandex.ru)

### **Коды с суммированием, обнаруживающие любые симметричные ошибки**

Рассмотрены особенности ошибок, возникающих в информационных векторах разделимых кодов. Сформирована классификация кодов, ориентированных на 100%-ное обнаружение ошибок определенного вида. Проанализированы разделимые коды, обнаруживающие любые симметричные ошибки в информационных векторах. Определены условия построения кодов, обнаруживающих любые симметричные ошибки, и приведены их примеры.

*К л ю ч е в ы е с л о в а: техническая диагностика дискретных систем, разделимый код, код Бергера, классификация ошибок в информационных векторах.*

Розглянуто особливості похибок, які з'являються в інформаційних векторах розділених кодів. Сформовано класифікацію кодів, орієнтованих на 100%-не виявлення похибок визначеного типу. Проаналізовано розділимі коди, що виявляють будь-які симетричні похибки в інформаційних векторах. Визначено умови побудови кодів, що виявляють будь-які симетричні похибки, та наведено їх приклади.

*К л ю ч о в і с л о в а: технічна діагностика дискретних систем, розділений код, код Бергера, класифікація похибок в інформаційних векторах.*

При построении надежных дискретных систем часто используют принципы обнаружения отказов. На рис. 1 приведена структурная схема системы рабочего (функционального) контроля (СФК) [1, 2], в которой блок основной логики  $F(x)$ , вычисляющий значения системы рабочих функций  $f_1, f_2, \dots, f_m$ , снабжен специальным контрольным оборудованием, позволяющим контролировать неисправности по их проявлениям в виде искажений значений рабочих функций [3]. Основой СФК, как правило, является какой-либо разделимый код, или  $(m, k)$ -код, где  $m$  и  $k$  — длины информационных и контрольных векторов [4—8]. Информационный вектор выбранного  $(m, k)$ -кода отождествляют с вектором значений рабочих функций, вычисляемых блоком  $F(x)$ , и согласно правилам формирования значений контрольных функций строят контрольное оборудование.

© В.В. Сапожников, Вл.В. Сапожников, Д.В. Ефанов, 2017

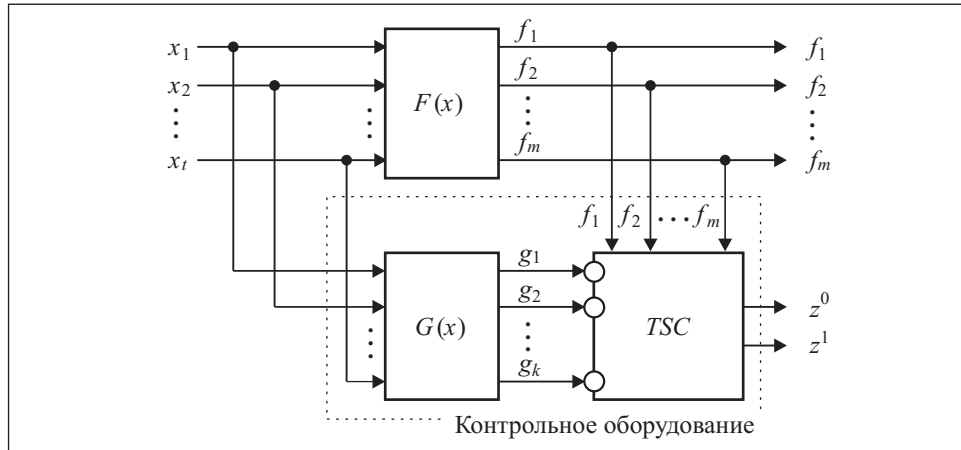


Рис. 1. Структурная схема СФК на основе  $(m, k)$ -кода

В состав контрольного оборудования входит блок контрольной логики  $G(x)$  и тестер  $TSC$ . На выходах блока  $G(x)$  вычисляются значения контрольных функций  $g_1, g_2, \dots, g_k$ , а тестер проверяет факт принадлежности кодового слова  $\langle f_1 f_2 \dots f_m g_1 g_2 \dots g_k \rangle$  слову выбранного  $(m, k)$ -кода. При установлении принадлежности поступающего вектора на входы тестера кодовому слову выбранного  $(m, k)$ -кода на контрольных выходах  $z^0$  и  $z^1$  СФК формируется парафазный сигнал  $\langle 01 \rangle$  или  $\langle 10 \rangle$ . Нарушение парафазности значений выходов  $z^0$  и  $z^1$  является сигналом ошибки [9].

Свойства обнаружения ошибок в информационных векторах  $(m, k)$ -кода определяют характеристики СФК по обнаружению ошибок в векторе значений рабочих функций, которые влияют также на методы синтеза СФК с заранее установленными показателями (например, на возможность построения СФК с обнаружением 100 % одиночных константных неисправностей на выходах логических элементов структуры блока  $F(x)$  при уменьшенной структурной избыточности) [10, 11].

**Ошибки в информационных векторах.** Различные  $(m, k)$ -коды имеют различные характеристики обнаружения ошибок в информационных векторах. На свойствах обнаружения ошибок  $(m, k)$ -кодами основаны алгоритмы построения логических устройств со 100 %-ной идентификацией одиночных неисправностей на выходах элементов внутренней структуры [12, 13].

Ошибки в информационных векторах  $(m, k)$ -кодов принято делить на четыре класса (рис. 2): одиночные (single errors), монотонные (unidirectional errors), симметричные (symmetrical errors) и асимметричные (asymmetrical errors) [14].

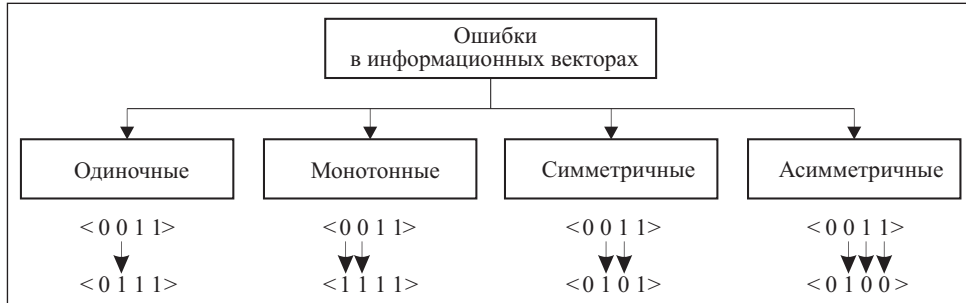


Рис. 2. Классификация ошибок в информационных векторах  $(m, k)$ -кодов

При различной длине информационных векторов  $m$  доли ошибок различных видов от общего числа ошибок различны (рис. 3). Например, при  $m = 4$  ошибки различных видов распределяются примерно поровну. При  $m < 4$  доминируют одиночные ошибки, а при  $m > 4$  — асимметричные. При этом доля асимметричных ошибок от общего числа ошибок с увеличением длины информационного вектора существенно возрастает. При  $m = 10$  более 70 % составляют асимметричные ошибки, более 17 % — симметричные и немного более 10 % — монотонные ошибки. На долю одиночных ошибок приходится менее 1 % общего числа ошибок в информационных векторах. При дальнейшем увеличении длины информационного вектора доля асимметричных ошибок сохраняется, тогда как доли ошибок всех остальных видов постепенно уменьшаются: наиболее быстро сокращается доля одиночных ошибок, затем — монотонных, а затем — симметричных ошибок. Так, при  $m = 20$  асимметричные ошибки составляют приблизительно 87 % общего числа ошибок, на симметричные ошибки приходится более 12 % общего числа ошибок, а монотонные и одиночные ошибки в сумме составляют менее 1%.

Коды, обнаруживающие любые одиночные ошибки в информационных векторах, называются помехоустойчивыми  $(m, k)$ -кодами (error-detection codes). Далее будем рассматривать только помехоустойчивые  $(m, k)$ -коды.

При решении задач технической диагностики дискретных систем наиболее часто используются разделимые коды с особыми свойствами, например, связанными с обнаружением любых ошибок определенного вида или любых ошибок определенного вида до установленного значения их кратности. Примером является классический код Бергера [15], или  $S(m, k)$ -код, идентифицирующий 100 % монотонных и асимметричных ошибок в информационных векторах [16]. Возникающая при этом избыточность определяется выражением  $k = \lceil \log_2(m+1) \rceil$ , где  $\lceil \dots \rceil$  означает целое сверху от вычисляемого значения. Для класса кодов, например Боуза—Лина, или  $S4(m, k)$ - и  $S8(m, k)$ -кодов, где 4 и 8 — модули вычисления веса информа-

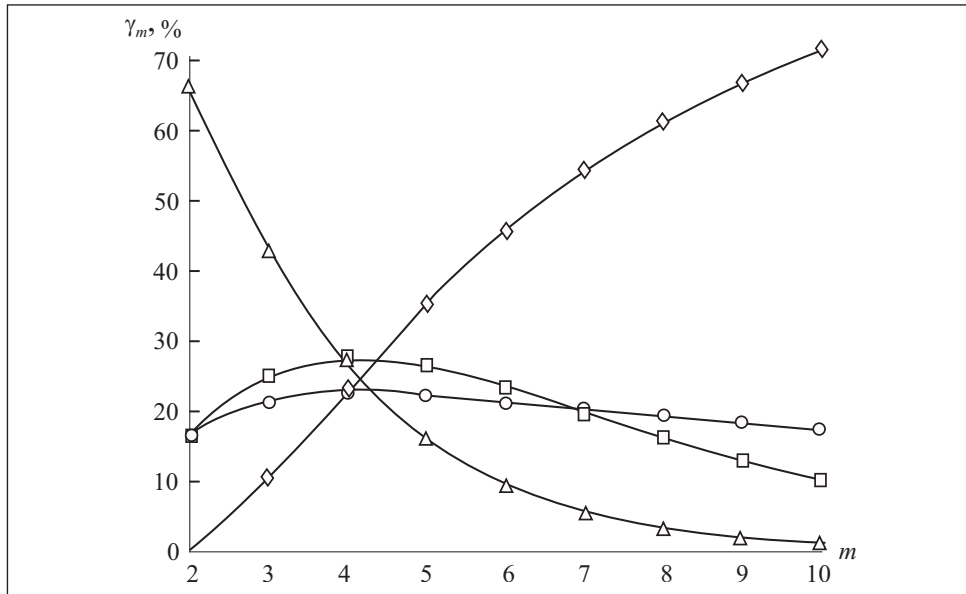


Рис. 3. Соотношения между различными видами ошибок в информационных векторах  $(m, k)$ -кодов различной длины:  $\Delta$  — одиночные ошибки;  $\square$  — монотонные;  $\diamond$  — асимметричные;  $\circ$  — симметричные

ционного вектора [17], установлено значение минимальной кратности для необнаруживаемых монотонных и асимметричных ошибок [10, 18]. Снижение эффективности обнаружения монотонных и асимметричных ошибок  $S4(m, k)$ - и  $S8(m, k)$ -кодами связано с тем, что для них число разрядов в контрольных векторах составляет соответственно  $k = 2$  и  $k = 3$  и не зависит от длины информационного вектора. Следует, однако, заметить, что кодами Бергера и Боуза—Лина не обнаруживаются 100 % симметричных ошибок в информационных векторах [10, 19].

Среди неединичных ошибок в информационных векторах выделяются монотонные ошибки. Их доля в общем количестве ошибок в информационных векторах, начиная с  $m = 7$  — самая низкая, а при дальнейшем увеличении значения  $m$  она уменьшается. Известно большое число  $(m, k)$ -кодов, ориентированных на обнаружение только монотонных ошибок [17, 18, 20—25]. Построить такие коды относительно просто. Кодов, ориентированных на 100 %-ное обнаружение асимметричных или симметричных ошибок, значительно меньше. На рис. 4 представлены классы  $(m, k)$ -кодов, обладающие свойством 100%-ного обнаружения одного из видов ошибок: UED  $(m, k)$ -коды (unidirectional error-detection codes), AED  $(m, k)$ -коды (asymmetrical error-detection codes) и SED  $(m, k)$ -коды (symmetrical error-detection codes).

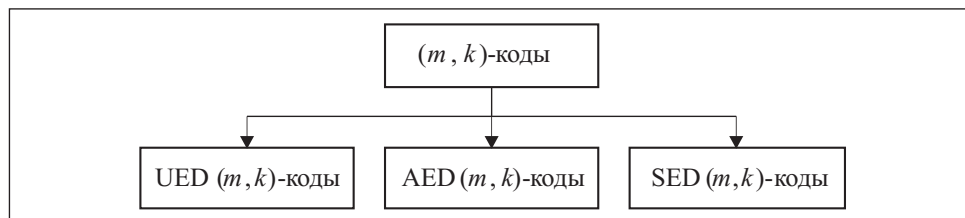


Рис. 4. Классификация  $(m, k)$ -кодов

**Код, обнаруживающий 100 % симметричных ошибок** в информационных векторах, или  $SED(m, k)$ -код, построить намного сложнее, чем код, обнаруживающий ошибки любых других видов. Это следует из того факта, что при построении  $SED(m, k)$ -кода для всех информационных векторов с одинаковым весом  $r$  потребуется выделить различные контрольные векторы. При различных значениях веса  $r$  распределение всех  $C_m^r$  информационных векторов между контрольными векторами будет различным. По этой причине в первую очередь при построении  $SED(m, k)$ -кода необходимо выбрать максимальное подмножество информационных векторов с одним и тем же контрольным вектором и для каждого информационного вектора этого подмножества выделить собственный контрольный вектор. Максимальное число информационных векторов с одинаковым весом равно  $C_m^r$ , где  $r = \lfloor m/2 \rfloor$ . Таким образом, для распределения по различным контрольным группам всех векторов с одинаковым весом необходимо, как минимум, присвоить различные контрольные векторы следующему количеству информационных векторов:

$$N_{\min}^g = C_m^{\lfloor m/2 \rfloor}. \quad (1)$$

С учетом (1) можно определить нижнюю границу числа разрядов в контрольных векторах, необходимых для реализации операции распределения равновесных векторов по различным контрольным группам:

$$k_{\min} = \lceil \log_2 C_m^{\lfloor m/2 \rfloor} \rceil.$$

Отсюда вытекает следующее утверждение.

**Утверждение.** Невозможно построить  $SED(m, k)$ -код, используя параметры  $m$  и  $k$  такие, что  $k < \lceil \log_2 C_m^{\lfloor m/2 \rfloor} \rceil$ .

Рассчитаем значения  $k_{\min}$  для потенциальных  $SED(m, k)$ -кодов (табл. 1). Из табл. 1 следует, что код с возможностью 100%-ного обнаружения симметричных ошибок в информационных векторах может быть построен

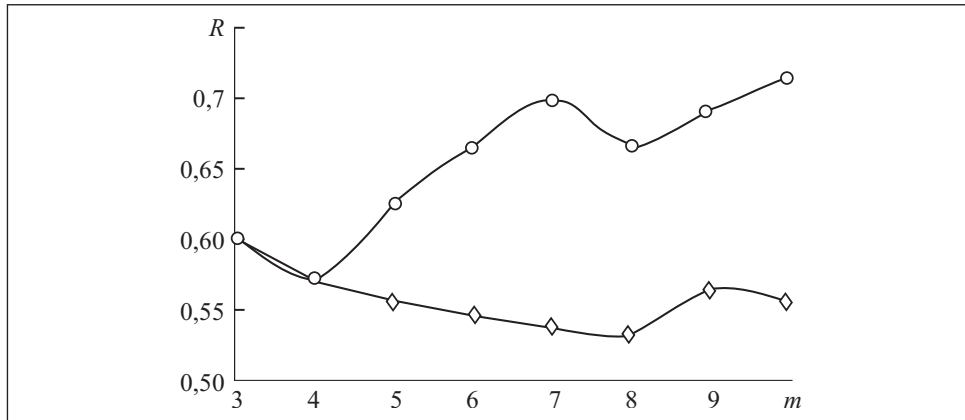


Рис. 5. Кодовая скорость  $(m, k)$ -кодов:  $\diamond$  — SED ( $m, k$ );  $\circ$  — код Бергера

только при достаточно большой избыточности (близкой к двойной, как у кода с повторением). Это обстоятельство сужает перспективы применения SED ( $m, k$ )-кодов, в том числе при решении задач технической диагностики дискретных систем, в которых существует зависимость между числом разрядов в контрольных векторах и структурной избыточностью дискретных систем. Например, в технической диагностике часто используют коды Бергера, число разрядов в их контрольных векторах  $k = \lceil \log_2(m+1) \rceil$  и их модификации (число разрядов в контрольных векторах таких кодов, как правило,  $k \leq \lceil \log_2(m+1) \rceil$ ).

На рис. 5 представлены графики зависимости кодовой скорости  $R = m/(m+k)$  от длины информационного вектора  $m$  для классических кодов Бергера и абстрактных SED ( $m, k$ )-кодов. Только в двух случаях, при  $m = 3$  и  $m = 4$ , значения  $R$  для различных кодов совпадают. При  $m > 4$  величина кодовой скорости для кода Бергера увеличивается и при  $m \rightarrow \infty$  стремится к единице, а для SED ( $m, k$ )-кода — к 0,5. Таким образом, SED ( $m, k$ )-код для реального использования на практике, может быть построен только при небольшой длине информационного вектора.

#### Примеры кодов, обнаруживающих любые симметричные ошибки.

Из табл. 1 следует, что любой SED ( $m, k$ )-код имеет избыточность, близкую к избыточности кода с повторением (на его основе строится система дублирования). В [26] предложен WT ( $m, k$ )-код с суммированием взвешенных переходов между разрядами, занимающими соседние позиции в информационных векторах, последовательность весовых коэффициентов которого образует ряд возрастающих степеней числа 2:  $2^0, 2^1, 2^2, \dots, 2^{m-1}$ , начиная с младшего разряда. Данный код имеет  $k = m - 1$  разрядов в контрольном векторе (на его основе строится система «почти дублирование») и по

своим параметрам (зависимости числа контрольных разрядов от числа информационных) близок к соответствующему SED ( $m, k$ )-коду. WT ( $m, k$ )-кодом не обнаруживается 100 % ошибок максимальной кратностью  $d = m$  в информационных векторах, т.е.  $2^m$  ошибок. При нечетных значениях  $m$  WT ( $m, k$ )-кодом идентифицируются все симметричные ошибки. При четных значениях  $m$  WT ( $m, k$ )-код имеет некоторую долю симметричных ошибок с максимальной кратностью (табл. 2). Однако эта доля незначительна, а симметричные ошибки с максимальной кратностью на выходах реальных схем возникают не часто: необходимо, чтобы в их структурах существовали логические элементы, выходы которых связаны путями со всеми выходами схемы, и  $m/2$  из них имели бы четное число инверсий, а  $m/2$  — нечетное.

Таким образом, WT ( $m, k$ )-код при нечетных значениях  $m$  является SED ( $m, k$ )-кодом, а при четных значениях  $m$  — кодом, близким по своим характеристикам к SED ( $m, k$ )-коду.

Из утверждения и рис. 5 следует, что SED ( $m, k$ )-коды с небольшой длиной контрольного вектора, например при  $k \leq \lceil \log_2(m+1) \rceil$ , могут быть построены только при малой длине информационного вектора. Построим один из SED ( $m, k$ )-кодов при  $m = 4$ . Для построения используем табличную форму задания разделимого кода (табл. 3), где все информационные векторы распределены в контрольные группы, соответствующие контрольным векторам. Распределим в различные контрольные группы ин-

Таблица 1. Параметры SED ( $m, k$ )-кодов

$m$	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$N_{\min}^g$	3	6	10	20	35	70	126	252	462	924	1716	3432	6435	12870	24310	48620	92378	184756
$k_{\min}$	2	3	4	5	6	7	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18

Таблица 2. Характеристики обнаружения ошибок WT( $m, k$ )-кодами

$m$	$k$	Число ошибок			Доля ошибок от общего их числа	
		Общее	Необнаруживаемых	Необнаруживаемых симметричных	Необнаруживаемых, %	Необнаруживаемых симметричных, %
4	3	240	16	6	6,66667	2,5
6	5	4 032	64	20	1,5873	0,49603
8	7	65 280	256	70	0,39216	0,10723
10	9	1 047 552	1 024	252	0,09775	0,02406
12	11	16 773 120	4 096	924	0,02442	0,00551
14	13	268 419 072	16 384	3 432	0,0061	0,00128

Таблица 3. Распределение информационных векторов между контрольными векторами SED (4, 3)-кода

Контрольная группа	0	1	2	3	4	5	6	7
Контрольный вектор	000	001	010	011	100	101	110	111
Информационный вектор	0000 1111	0011 0100	0101 1011	0110 1000	1001 0111	1010 1101	1100 0010	0001 1110

Таблица 4. Кодовые слова полученного SED (4, 3)-кода

Контрольная группа	Информационный вектор				Контрольный вектор		
	$f_4$	$f_3$	$f_2$	$f_1$	$g_3$	$g_2$	$g_1$
0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	1	1	1	1
2	0	0	1	0	1	1	0
3	0	0	1	1	0	0	1
4	0	1	0	0	0	0	1
5	0	1	0	1	0	1	0
6	0	1	1	0	0	1	1
7	0	1	1	1	1	0	0
8	1	0	0	0	0	1	1
9	1	0	0	1	1	0	0
10	1	0	1	0	1	0	1
11	1	0	1	1	0	1	0
12	1	1	0	0	1	1	0
13	1	1	0	1	1	0	1
14	1	1	1	0	1	1	1
15	1	1	1	1	0	0	0

формационные векторы с весом  $r = \lfloor m/2 \rfloor = \lfloor 4/2 \rfloor = 2$ . Векторов с таким весом имеется  $C_m^r = C_4^2 = 6$ . Все они размещены в группы с номерами 1—6. Далее информационные векторы размещались в контрольные группы так, чтобы монотонные и асимметричные необнаруживаемые ошибки имели максимальную возможную кратность, а их распределение в контрольные группы в итоге было равномерным.

Каждая контрольная группа дает по две необнаруживаемые ошибки: группа 0 — две монотонные четырехкратные ошибки, группы 1 — 6 — по



две асимметричные трехкратные ошибки и группа 7 — две асимметричные четырехкратные ошибки. Всего 16 ошибок.

Построенный SED(4,3)-код относится к кодам с наименьшим общим числом необнаруживаемых ошибок в информационных векторах при заданных значениях  $m$  и  $k$  [27], а его векторы имеют минимальное расстояние Хэмминга ( $d_{\min} = 3$ ), т.е. код обнаруживает любые однократные и двукратные ошибки в информационных векторах. В табл. 4 представлены все кодовые слова построенного SED(4,3)-кода.

Нетрудно определить правила вычисления значений разрядов контрольных функций  $g_i$ . После двухуровневой минимизации и записи логических выражений в дизъюнктивной нормальной форме получаем

$$\begin{aligned} g_1 &= f_4 f_3 \bar{f}_2 \bar{f}_1 \vee f_3 f_2 \bar{f}_1 \vee f_4 \bar{f}_3 \bar{f}_1 \vee \bar{f}_4 f_3 \bar{f}_1 \vee \bar{f}_4 \bar{f}_3 f_1, \\ g_2 &= f_4 \bar{f}_3 \bar{f}_2 f_1 \vee f_4 \bar{f}_2 \bar{f}_1 \vee f_3 f_2 \bar{f}_1 \vee \bar{f}_4 \bar{f}_2 \bar{f}_1 \vee \bar{f}_4 \bar{f}_2 f_1, \\ g_3 &= \bar{f}_4 \bar{f}_3 f_2 f_1 \vee \bar{f}_3 f_2 \bar{f}_1 \vee f_4 \bar{f}_3 \bar{f}_1 \vee \bar{f}_3 \bar{f}_2 \bar{f}_1 \vee f_4 \bar{f}_2 \bar{f}_1. \end{aligned} \quad (2)$$

Следует заметить, что при использовании системы функций (2) блок  $G(x)$  СФК (см. рис. 1) будет самопроверяемым.

Другим известным SED (4,3)-кодом, удовлетворяющим требованию  $k \leq \lceil \log_2(m+1) \rceil$ , является классический код Хэмминга с длиной информационного вектора  $m = 4$  [28]. Им не обнаруживается также 16 ошибок в информационных векторах, четыре из которых — монотонные трехкратные ошибки и 12 — асимметричные трехкратные ошибки.

## Выводы

Класс SED ( $m, k$ )-кодов является небольшим, а их свойства в настоящее время практически не используются при выборе способа построения надежных дискретных систем. Рассмотренные SED (4, 3)-коды можно применять, например, при организации СФК четырехвыходных логических схем, на выходах которых доминируют симметричные ошибки. Учитывая высокую кратность необнаруживаемых кодом монотонных и асимметричных ошибок, можно построить структуры со 100%-ным обнаружением любых одиночных неисправностей в блоке  $F(x)$  при условии отсутствия путей, ведущих от внутренних логических элементов контролируемых устройств к  $d \geq 3$  выходам. Для многовыходных схем СФК на основе SED ( $m, k$ )-кодов может быть построена посредством выделения групп симметрично независимых выходов (по аналогии с методом, описанным в [29]).

Достоинством рассматриваемых кодов является также наличие менее жестких ограничений на тестируемость контрольного оборудования. Посредством равномерного распределения информационных векторов между всеми контрольными векторами для SED (4, 3)-кодов гораздо проще обеспечить свойство полной самопроверяемости, чем для классических кодов Бергера. Коды, ориентированные на обнаружение 100 % симметричных ошибок, несмотря на жесткие ограничения их класса, можно применять при организации надежных дискретных систем.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Mitra S., McCluskey E.J. Which Concurrent Error Detection Scheme to Choose? // Proc. of International Test Conference, 2000. USA, Atlantic City, NJ, 03-05 October 2000. — P. 985—994.
3. Дрозд А.В. Нетрадиционный взгляд на рабочее диагностирование вычислительных устройств // Проблемы управления. — 2008. — № 2. — С. 48—56.
4. McCluskey, E.J. Logic Design Principles: With Emphasis on Testable Semicustom Circuits. — New Jersey : Prentice Hall PTR, 1986. — 549 p.
5. Согомонян Е.С., Слабаков Е.В. Самопроверяемые устройства и отказоустойчивые системы. — М. : Радио и связь, 1989. — 208 с.
6. Pradhan D.K. Fault-Tolerant Computer System Design. — NY : Prentice Hall, 1996. — 560 p.
7. Fujiwara E. Code Design for Dependable Systems: Theory and Practical Applications. — New Jersey: John Wiley & Sons, 2006. — 720 p.
8. Lala P.K. Principles of Modern Digital Design. — New Jersey: John Wiley & Sons, 2007. — 419 p.
9. Сапожников В.В., Сапожников Вл.В. Самопроверяемые дискретные устройства. — СПб: Энергоатомиздат, 1992. — 224 с.
10. Сапожников В.В., Сапожников Вл.В., Ефанов Д.В., Черепанова М.Р. Модульные коды с суммированием в системах функционального контроля. I. Свойства обнаружения ошибок кодами в информационных векторах // Электрон. моделирование. — 2016. — **38**, №2. — С. 27—48.
11. Сапожников В.В., Сапожников Вл.В., Ефанов Д.В., Черепанова М.Р. Модульные коды с суммированием в системах функционального контроля. II. Уменьшение структурной избыточности систем функционального контроля // Там же. — 2016. — **38**, № 3. — С. 47—61.
12. Morosow A., Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov V.V., Goessel M. Self-Checking Combinational Circuits with Unidirectionally Independent Outputs // VLSI Design. — 1998. — Vol. 5, Issue 4. — P. 333—345.
13. Busaba F.Y., Lala P.K. Self-Checking Combinational Circuit Design for Single and Unidirectional Multibit Errors // Journal of Electronic Testing: Theory and Applications. — 1994. — Issue 1. — P. 19—28.
14. 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. DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-5-333-343.
15. Berger J.M. A Note on Error Detecting Codes for Asymmetric Channels // Information and Control. — 1961. — Vol. 4, № 1. — P. 68—73.

16. 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.
17. Bose B., Lin D.J. Systematic Unidirectional Error-Detection Codes // IEEE Trans. Comput. — 1985. — Vol. C-34, Nov. — P. 1026—1032.
18. Piestrak S.J. Design of Self-Testing Checkers for Unidirectional Error Detecting Codes. — Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 1995. — 111 p.
19. Sapozhnikov V., Sapozhnikov V., 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. DOI: 10.1109/EWDTS2015.7493133.
20. Dong H. Modified Berger Codes for Detection of Unidirectional Errors // IEEE Transaction on Computers. — Vol. C-33, June 1984. — P. 572—575.
21. Jha N.K., Vora M.B. A t-Unidirectional Errors-Detecting Systematic Code // Computers & Mathematics with Applications. — 1988. — Vol. 16, No. 9. — P. 705—714.
22. Parhami B. New Class of Unidirectional Error-Detection Codes // Proc. of IEEE International Conference on Computer Design: VLSI in Computers and Processors 14-16 Oct. 1991 (ICCD'91) — Cambridge, MA. — P. 574—577.
23. Das D., Toubia N.A. Weight-Based Codes and Their Application to Concurrent Error Detection of Multilevel Circuits // Proc. of 17th IEEE Test Symposium. — USA, California, 1999. — P. 370—376.
24. Сапожников В.В., Сапожников Вл.В., Ефанов Д.В., Никитин Д.А. Исследование свойств кодов с суммированием с одним взвешенным информационным разрядом в системах функционального контроля // Электрон. моделирование. — 2015. — 37, № 1. — С. 25—48.
25. Сапожников В.В., Сапожников Вл.В., Ефанов Д.В. Контроль комбинационных схем на основе кодов с суммированием с одним взвешенным информационным разрядом // Автоматика на транспорте. — 2016. — 2, № 4. — С. 564—597.
26. Сапожников В.В., Сапожников Вл.В., Ефанов Д.В., Дмитриев В.В. Новые структуры систем функционального контроля логических схем // Автоматика и телемеханика. — 2017. — № 2. — С. 127—143.
27. Блюдов А.А., Ефанов Д.В., Сапожников В.В., Сапожников Вл.В. Построение модифицированного кода Бергера с минимальным числом обнаруживаемых ошибок информационных разрядов // Электрон. моделирование. — 2012. — 34, № 6. — С. 17—29.
28. Hamming R.W. Error Detecting and Correcting Codes // Bell System Technical Journal. — 1950. — 29 (2). — P. 147—160.
29. Гессель М., Морозов А.А., Сапожников В.В., Сапожников Вл.В. Исследование комбинационных самопроверяемых устройств с независимыми и монотонно независимыми выходами // Автоматика и телемеханика. — 1997. — № 2. — С. 180—193.

Поступила 23.01.17

## REFERENCES

1. 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.
2. Mitra, S. and McCluskey, E.J. (2000), “Which concurrent error detection scheme to choose?”, *Proceedings of International Test Conference*, USA, Atlantic City, NJ, October 03-05, 2000, pp. 985-994.
3. Drozd, A.V. (2008), “Untraditional view of operational diagnostics of computing devices”, *Problemy upravleniya*, no. 2, pp. 48-56.

4. McCluskey, E.J. (1986), *Logic Design Principles: With Emphasis on Testable Semicustom Circuits*, Prentice Hall PTR, New Jersey, USA.
5. Sogomonyan, E.S. and Slabakov, E.V. (1989), *Samoproveryaemye ustroystva i otkazoustoichivyye sistemy* [Self-checking devices and fault-tolerant systems], Radio i svyaz, Moscow, Russia.
6. Pradhan, D.K. (1996), *Fault-tolerant computer system design*, Prentice Hall, New York, USA.
7. Fujiwara, E. (2006), *Code design for dependable systems: Theory and practical applications*, John Wiley & Sons, New Jersey, USA.
8. Lala, P.K. (2007), *Principles of Modern Digital Design*, John Wiley & Sons, New Jersey, USA.
9. Sapozhnikov, V.V. and Sapozhnikov, Vl.V. (1992), *Samoproveryaemye diskretnyye ustroystva* [Self-checking discrete devices], St. Petersburg, Energoatomizdat, Russia.
10. Sapozhnikov, V.V., Sapozhnikov, Vl.V., Efanov, D.V. and Cherepanova, M.R. (2016), "Modulo codes with summation in concurrent error detection systems. I. Ability of modulo codes to detect error in data vectors", *Elektronnoe modelirovanie*, Vol. 38, no. 2, pp. 27-48.
11. Sapozhnikov, V.V., Sapozhnikov, Vl.V., Efanov, D.V. and Cherepanova, M.R. (2016), "Modulo codes with summation in concurrent error detection systems. II. Decrease of hardware redundancy of concurrent error detection systems", *Elektronnoe modelirovanie*, Vol. 38, no. 3, pp. 47-61.
12. Morosow, A, Sapozhnikov, V.V., Sapozhnikov, Vl.V. and Goessel, M. (1998), "Self-checking combinational circuits with unidirectionally independent outputs", *VLSI Design*, Vol. 5, Iss. 4, pp. 333-345.
13. Busaba, F.Y. and Lala, P.K. (1994), "Self-checking combinational circuit design for single and unidirectional multibit errors", *Journal of Electronic Testing: Theory and Applications*, Vol. 5, Iss. 5, pp. 19-28.
14. 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. DOI 10.17586/0021-3454-2015-58-5-333-343.
15. Berger, J.M. (1961), "A note on error detecting codes for asymmetric channels", *Information and Control*, Vol. 4, no. 1, pp. 68-73. DOI: 10.1016/S0019-9958(61)80037-5.
16. Efanov, D.V., Sapozhnikov, V.V. and Sapozhnikov, Vl.V. (2010), "On sum code properties in functional control systems", *Avtomatika i telemekhanika*, no. 6, pp. 155-162.
17. Bose, B. and Lin, D.J. (1985), "Systematic unidirectional error-detection codes", *IEEE Transactions on Computers*, Vol. C-34, pp. 1026-1032.
18. Piestrak, S.J. (1995), *Design of self-testing checkers for unidirectional error detecting codes*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, Poland.
19. 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. DOI 10.1109/EWDTS.2015.7493133.
20. Dong, H. (1984), "Modified Berger codes for detection of unidirectional errors", *IEEE Transaction on Computers*, Vol. C-33, June 1984, pp. 572-575.
21. Jha, N.K. and Vora, M.B. (1988), "A t-unidirectional errors-detecting systematic code", *Computers & Mathematics with Applications*, Vol. 16, no. 9, pp. 705-714.
22. Parhami, B. (1991), "New class of unidirectional error-detection codes", *Proc. of IEEE International Conference on Computer Design: VLSI in Computers and Processors*. Oct. 14-16, 1991 (ICCD '91), Cambridge, MA, pp. 574-577.
23. Das, D. and Touba, N.A. (1999), "Weight-based codes and their application to concurrent error detection of multilevel circuits", *Proceedings of the 17th IEEE Test Symposium*, USA, California, pp. 370-376.

24. Sapozhnikov, V.V., Sapozhnikov, VI.V., Efanov, D.V. and Nikitin, D.A. (2015), "Research of sum codes with one weighted data bit properties in concurrent error detection systems", *Elektronnoe modelirovanie*, Vol. 37, no. 1, pp. 25-48.
25. Sapozhnikov, V.V., Sapozhnikov, VI.V. and Efanov, D.V. (2016), "Checking of combinational circuits, based on sum codes with one weighted data bit", *Avtomatika na transporte*, Vol. 2, no. 4, pp. 564-597.
26. Sapozhnikov, V.V., Sapozhnikov, VI.V., Efanov, D.V. and Dmitriev, V.V. (2017), "New structures of the concurrent error detection systems for logic circuits", *Avtomatika i telemekhanika*, no. 2, pp. 127-143.
27. Blyudov, A.A., Efanov, D.V., Sapozhnikov, V.V. and Sapozhnikov, VI.V. (2012), "Formation of the Berger modified code with minimum number of undetectable errors of data bits", *Elektronnoe modelirovanie*, Vol. 34, no. 6, pp. 17-29.
28. Hamming, R.W. (1950) "Error Detecting and Correcting Codes", *Bell System Technical Journal*, Vol. 29, no. 2, pp. 147-160.
29. Goessel, M., Morozov, A.A., Sapozhnikov, V.V. and Sapozhnikov, VI.V. (1997), "Investigation of Combination Self-testing Devices Having Independent and Monotone Independent Outputs", *Automation and Remote Control*, Vol. 58, no. 2, pp. 180-193.

Received 23.01.17

*V.V. Sapozhnikov, VI.V. Sapozhnikov, D.V. Efanov*

#### CODES WITH SUMMATION DETECTING ANY SYMMETRIC ERRORS

Features of errors arising in separable codes data vectors have been considered. The classification of codes oriented to the 100% detection of specific type errors has been formed. Separable codes detecting any symmetric fault in data vector have been analyzed in detail. Conditions of formation of codes detecting all symmetric errors have been stated; some examples are given.

*Key words: technical diagnostics of discrete systems, separable codes, Berger code, data vectors errors classification.*

*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 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 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. В 2007 г. окончил Петербургский государственный университет путей сообщения. Область научных исследований — дискретная математика, надежность и техническая диагностика дискретных систем.*

