

УДК 681.518.5:004.052.32

Д. В. Ефанов, канд. техн. наук

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

ОСОБЕННОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ОШИБОК В ИНФОРМАЦИОННЫХ ВЕКТОРАХ МОДИФИЦИРОВАННЫХ КОДОВ БЕРГЕРА

Коды с суммированием, или коды Бергера, часто используются в задачах технической диагностики. Однако ими не обнаруживается большое количество ошибок в информационных векторах, а также вносится сравнительно высокая избыточность в контролируемое устройство или контрольное оборудование. Для улучшения свойств обнаружения ошибок в информационных векторах кодов с суммированием используется модификация правил определения значений разрядов контрольных векторов. Модифицированные коды Бергера, правила построения которых описаны в данной работе, обнаруживают почти вдвое большее количество ошибок в информационных векторах, чем классические коды Бергера. В статье впервые дается вывод формулы расчета количества необнаруживаемых ошибок в информационных векторах модифицированных кодов Бергера, наличие которой позволяет обосновать некоторые свойства модифицированных кодов Бергера по обнаружению ошибок в информационных векторах.

техническая диагностика; код Бергера; модифицированный код Бергера; необнаруживаемая ошибка; информационный вектор; формула расчета количества необнаруживаемых ошибок

Введение

При построении контролепригодных дискретных устройств, передаче и обработке данных при реализации ответственных технологических процессов на железнодорожном транспорте применяются принципы помехоустойчивого кодирования [1–5]. Используются разнообразные способы кодирования, позволяющие решать как задачи обнаружения ошибок, так и задачи их исправления. Часто кодирование применяют при организации надежных дискретных систем, при этом широко распространены коды с обнаружением ошибок – они позволяют организовывать системы с обнаружением дефектов при небольшой структурной избыточности [6, 7]. Наиболее распространенными кодами, применяемыми для этих целей, являются равновесные коды и коды Бергера [8–10]. Эти же коды часто используют при организации систем функционального контроля комбинационных логических схем [11–15].

Равновесные коды и коды Бергера имеют важную особенность – ими идентифицируются любые однонаправленные (монотонные) ошибки [16, 17]. Подобное свойство определяет возможности их применения при построении

контролепригодных дискретных устройств. Однако кодами Бергера не обнаруживается большое количество необнаруживаемых ошибок малых кратностей, а использование их при технической реализации приводит к существенному увеличению сложности схем [18–20].

В работе [21] показано, что кодами Бергера не обнаруживается следующее количество ошибок в информационных векторах:

$$N_m = \sum_{d=2}^l \left(\sum_{r=\frac{d}{2}}^{\frac{m-d}{2}} C_m^r C_m^{\frac{d}{2}} C_{m-r}^{\frac{d}{2}} \right), \quad (1)$$

где m – длина информационного вектора; d – кратность необнаруживаемой ошибки (d – четное число); r – вес информационного вектора; l – верхний предел суммирования: $l = m$, если m – четное число, и $l = m - 1$, если m – нечетное число.

Применяя формулу (1) для кода Бергера с $m = 6$ определяем, что им не обнаруживается 860 ошибок в информационных векторах.

Коды Бергера обладают интересной особенностью – ими не обнаруживается постоянная доля ошибок четной кратностью d от общего количества ошибок данной кратностью вне зависимости от длины информационного вектора [21, 22]:

$$\sigma_d = 100 \cdot 2^{-d} C_m^d, \quad \% \quad (2)$$

В табл. 1 приводятся значения величин σ_d для некоторых значений d .

Таблица 1. Значение величины σ_d

d	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	...	100
σ_d	50	37,5	31,25	27,344	24,609	22,559	20,947	19,638	18,547	17,62	...	7,959

Из табл. 1 следует, что коды Бергера имеют сравнительно большое количество необнаруживаемых ошибок, в особенности малых кратностей – ими не обнаруживается половина двукратных искажений в информационных векторах и более трети четырехкратных искажений в информационных векторах.

Поскольку в коде Бергера одному контрольному вектору соответствуют все информационные векторы с весом r , частный случай формулы (1) может быть использован для подсчета необнаруживаемых ошибок и в равновесных кодах « r из m »:

$$N_m = \sum_{d=2}^l C_m^r C_m^{\frac{d}{2}} C_{m-r}^{\frac{d}{2}}. \quad (3)$$

Здесь $r = \text{const}$.

Использование равновесных кодов [23–25] и кодов Бергера [26], например, при организации систем функционального контроля, требует анализа выходов контролируемых устройств. Использование данных кодов для контроля логических устройств подразумевает, что выходы будут монотонно независимыми (т. е. допускать либо только ошибки типа $0 \rightarrow 1$, либо только ошибки типа $1 \rightarrow 0$ при возникновении во внутренней структуре любых одиночных ошибок выходов логических элементов) или же будут образованы группы монотонно независимых выходов. Если же данное условие не соблюдается, требуется реконфигурация элементов и связей в структуре контролируемого логического устройства [27–32].

Улучшить свойства обнаружения ошибок кодами Бергера можно за счет модификации правил их построения [33–40]. Данная работа посвящена анализу характеристик необнаруживаемых ошибок модифицированными кодами Бергера, которые описаны в [41].

1 Модифицированный код Бергера

Как отмечалось выше, при организации систем функционального контроля устройств автоматики и вычислительной техники полезными могут оказаться модифицированные коды Бергера. Данные коды получают по следующему алгоритму [41].

Алгоритм 1. *Получение значений разрядов контрольных векторов модифицированных кодов Бергера:*

1. Фиксируется модуль $M = 2^{\lceil \log_2(m+1) \rceil - 1}$.
2. Подсчитывается вес информационного вектора r .
3. Число r представляется по модулю M (другими словами, определяется наименьший неотрицательный вычет числа r по заданному модулю): $V = r(\text{mod } M)$.
4. Определяется поправочный коэффициент α , равный сумме по модулю два t произвольных установленных заранее информационных разрядов.
5. Формируется число $W = V + \alpha M$.
6. Полученное число W представляется в двоичном виде и записывается в контрольный вектор.

Обозначим коды с суммированием, получаемые по алгоритму 1, как $RS(m,k)$ -коды, где m – длина информационного, а k – длина контрольного векторов. Действие алгоритма иллюстрируется таблицей 2, где получены контрольные векторы для всех информационных векторов $RS(4,3)$ -кода, для которого поправочный коэффициент вычисляется по формуле: $\alpha = f_1 \oplus f_2$.

Таблица 2. Разряды векторов $RS(4,3)$ -кода при $\alpha = f_1 \oplus f_2$

№	f_1	f_2	f_3	f_4	r	V	α	W	g_1	g_2	g_3
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	1
2	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1
3	0	0	1	1	2	2	0	2	0	1	0
4	0	1	0	0	1	1	1	5	1	0	1
5	0	1	0	1	2	2	1	6	1	1	0
6	0	1	1	0	2	2	1	6	1	1	0
7	0	1	1	1	3	3	1	7	1	1	1
8	1	0	0	0	1	1	1	5	1	0	1
9	1	0	0	1	2	2	1	6	1	1	0
10	1	0	1	0	2	2	1	6	1	1	0
11	1	0	1	1	3	3	1	7	1	1	1
12	1	1	0	0	2	2	0	2	0	1	0
13	1	1	0	1	3	3	0	3	0	1	1
14	1	1	1	0	3	3	0	3	0	1	1
15	1	1	1	1	4	0	0	0	0	0	0

2 Подсчет количества необнаруживаемых ошибок в информационных векторах модифицированных кодов Бергера

2.1. Анализ контрольных групп

Определим, какое количество ошибок в информационных векторах $RS(m,k)$ -кодов не будет обнаружено. Рассмотрим $RS(4,3)$ -код при $\alpha = f_1 \oplus f_2$. Все его информационные векторы классифицируем по контрольным группам веса W информационного вектора (табл. 3). Ошибка не будет обнаружена только в том случае, если она переведет информационный вектор одной контрольной группы в информационный вектор той же контрольной группы. Общее количество необнаруживаемых ошибок равно сумме парных переходов всех информационных векторов внутри каждой контрольной группы. Таким образом, количество необнаруживаемых ошибок зависит от количества информационных векторов в контрольных группах таблицы распределения. Для рассматриваемого $RS(4,3)$ -кода при $\alpha = f_1 \oplus f_2$ в группах с $W = 0, 1, 2, 3, 5$ и 7 расположено по 2 информационных вектора, в группе с $W = 6 - 4$

Таблица 3. Распределение информационных векторов $RS(4,3)$ -кода при $\alpha = f_1 \oplus f_2$ на контрольные группы

Контрольные группы веса вектора W							
0	1	2	3	4	5	6	7
0000	0001	0011	1101		0100	0101	0111
1111	0010	1100	1110		1000	0110	1011
						1001	
						1010	
Количество информационных векторов в группе W							
2	2	2	2	0	2	4	2

информационного вектора, а группа с $W = 4$ пуста. Количество необнаруживаемых ошибок соответственно равно $1 \cdot 2 + 1 \cdot 2 + 1 \cdot 2 + 1 \cdot 2 + 0 + 1 \cdot 2 + 3 \cdot 4 + 1 \cdot 2 = 24$.

Формализуем процесс подсчета количества необнаруживаемых ошибок в информационных векторах модифицированных кодов Бергера. Для этого рассмотрим еще один частный случай $RS(m,k)$ -кодов с большей длиной информационного вектора, чем в предыдущем примере – $RS(6,3)$ -код при $\alpha = f_1 \oplus f_2 \oplus f_3$.

Представим информационный вектор рассматриваемого кода как два вектора с длинами t и $m - t$ соответственно. Вектор с длиной t поставим в соответствие той части информационного вектора модифицированного кода Бергера, по которой рассчитывается поправочный коэффициент, а вектор с длиной $m - t$ – оставшимся разрядам информационного вектора (рис. 1).

$$\langle \underbrace{f_1 \ f_2 \ f_3}_t \ \underbrace{f_4 \ f_5 \ f_6}_{m-t} \rangle$$

Рис. 1. Разбиение информационного вектора

Обозначим вес части информационного вектора с t разрядами как r_1 ($r_1 \in [0, 1, \dots, t]$), а информационного вектора с $m - t$ информационными разрядами – как r_2 ($r_2 \in [0, 1, \dots, m - t]$). Общий вес информационного вектора, таким образом, будет $r = r_1 + r_2$.

Для примера рассмотрим все информационные векторы $RS(6,3)$ -кода, в состав которых входит вектор $\langle m-t \rangle = \langle 011 \rangle$. Поскольку в данном случае $t = 3$, существует ровно $2^t = 2^3 = 8$ различных информационных векторов, которые показаны на рис. 2. Информационные векторы $\langle t \rangle$ имеют различный вес. Количество информационных векторов с весом $r_1 \in [0, 1, \dots, t]$ определяется выражением $\sum_{r_1=0}^t C_t^{r_1}$.

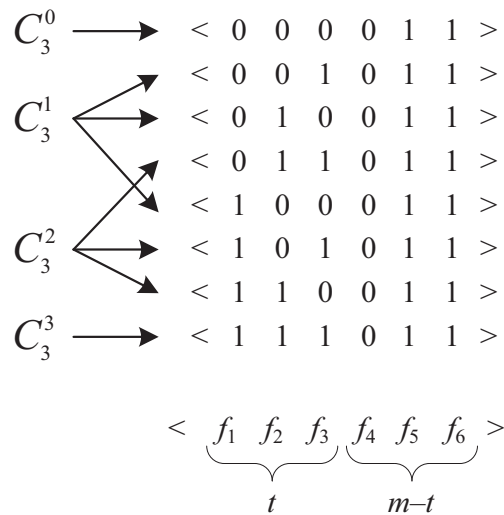


Рис. 2. Информационные векторы $\langle \sim \sim \sim 0 1 1 \rangle$

Для подсчета количества необнаруживаемых $RS(m,k)$ -кодом ошибок важным является число вариантов получения кодовых векторов с зафиксированным вектором $\langle m - t \rangle$ и различными векторами $\langle t \rangle$ с весом r_1 . Коэффициент α принимает либо значение 0, либо значение 1 в зависимости от значения веса вектора $\langle t \rangle$: если вес r_1 является четным числом, то $\alpha = 0$, иначе $\alpha = 1$. При $\alpha = 0$ модифицированный вес $W = V$, при $\alpha = 1$ модифицированный вес $W = V + M$. К примеру, для всех информационных векторов, изображенных на рис. 2, $V = (r_1 + r_2)(\text{mod}4) = (r_1 + 2)(\text{mod}4)$. Для информационных векторов с четными значениями веса r_1 имеем: для веса $r_1 = 0 - W = V = 0 + 2 = 2$; для веса $r_1 = 2 - W = V = 2 + 2 = 4(\text{mod}4) = 0$. Для информационных векторов с нечетными значениями веса r_1 соответственно: для $r_1 = 1 - W = V + 4 = 1 + 2 + 4 = 7(\text{mod}4) = 3$; для $r_1 = 3$ имеем $W = V + 4 = 3 + 2 + 4 = 9(\text{mod}4) = 1$. Отсюда следует, что рассмотренные 8 информационных векторов пополняют контрольные группы W в следующих соотношениях (см. рис. 2): в группе $W = 2$ есть $C_3^0 = 1$ информационный вектор, в группе $W = 0 - C_3^2 = 3$ информационных вектора, в группе $W = 3 - C_3^1 = 3$ информационных вектора, в группе $W = 1 - C_3^3 = 1$ информационный вектор.

Если продолжить рассуждения для вектора $\langle m - t \rangle$, нетрудно получить количество различных вариантов построения информационных векторов $RS(m,k)$ -кодов и их расположения в контрольных группах W для всех значений веса r_2 .

2.2 Последовательность подсчета количества необнаруживаемых ошибок в модифицированных кодах Бергера

Получив для каждой контрольной группы количество размещенных в ней информационных векторов, нетрудно определить и число необнару-

живаемых ошибок (табл. 4). Для каждой контрольной группы с весом W оно определяется по формуле:

$$N_W^N = N_W (N_W - 1). \quad (4)$$

Таблица 4. Подсчет суммарного веса информационных векторов групп W

RS(6,3)-код						
r_2	Число кодовых векторов $\langle m-t \rangle$	r_1	Число кодовых векторов $\langle t \rangle$	Число векторов $\langle m \rangle$	$V = (r_1 + r_2) \bmod 4$	W
0	$C_3^0 = 1$	0	$C_3^0 = 1$	$C_3^0 C_3^0 = 1$	0	0
		1	$C_3^1 = 3$	$C_3^0 C_3^1 = 3$	1	5
		2	$C_3^2 = 3$	$C_3^0 C_3^2 = 3$	2	2
		3	$C_3^3 = 1$	$C_3^0 C_3^3 = 1$	3	7
1	$C_3^1 = 3$	0	$C_3^0 = 1$	$C_3^1 C_3^0 = 3$	1	1
		1	$C_3^1 = 3$	$C_3^1 C_3^1 = 9$	2	6
		2	$C_3^2 = 3$	$C_3^1 C_3^2 = 9$	3	3
		3	$C_3^3 = 1$	$C_3^1 C_3^3 = 3$	(4) 0	4
2	$C_3^2 = 3$	0	$C_3^0 = 1$	$C_3^2 C_3^0 = 3$	2	2
		1	$C_3^1 = 3$	$C_3^2 C_3^1 = 9$	3	7
		2	$C_3^2 = 3$	$C_3^2 C_3^2 = 9$	(4) 0	0
		3	$C_3^3 = 1$	$C_3^2 C_3^3 = 3$	(5) 1	5
3	$C_3^3 = 1$	0	$C_3^0 = 1$	$C_3^3 C_3^0 = 1$	3	3
		1	$C_3^1 = 3$	$C_3^3 C_3^1 = 3$	(4) 0	4
		2	$C_3^2 = 3$	$C_3^3 C_3^2 = 3$	(5) 1	1
		3	$C_3^3 = 1$	$C_3^3 C_3^3 = 1$	(6) 2	6

Суммируя числа по всем одноименным группам W из таблицы 4 получаем таблицу 5. Отметим, что этот же результат приведен в [39, табл. 5].

Общее количество необнаруживаемых ошибок в $RS(m,k)$ -коде является суммой количества необнаруживаемых ошибок в каждой контрольной группе:

$$N_m = \sum_{W=0}^{2^k-1} N_W^N. \quad (5)$$

Например, для рассмотренного в предыдущем пункте $RS(6,3)$ -кода имеем: $N = 10 \cdot 9 + 6 \cdot 5 + 6 \cdot 5 + 10 \cdot 9 + 6 \cdot 5 + 6 \cdot 5 + 10 \cdot 9 + 10 \cdot 9 = 480$.

Полученная величина почти вдвое меньше, чем для аналогичного по параметрам кода Бергера.

Для определения числа N необходимо подсчитать только количество информационных векторов в каждой контрольной группе. Обобщая приведенные ранее рассуждения, можно предложить следующий алгоритм подсчета количества информационных векторов в контрольных группах $RS(m, k)$ -кода.

Таблица 5. Число информационных векторов в каждой группе W

W	Число информационных векторов
0	10
1	6
2	6
3	10
4	6
5	6
6	10
7	10

Алгоритм 2. Определение количества информационных векторов в контрольных группах:

1. Устанавливается число информационных разрядов, входящих в линейную сумму поправочного коэффициента α – число t .

2. Для каждого вектора $\langle m-t \rangle$ определяются все возможные векторы $\langle t \rangle$ с весом r_1 , другими словами, для всех $C_{m-t}^{r_2}$ векторов $\langle m-t \rangle$ устанавливается соответствие $C_t^{r_1}$ векторам $\langle t \rangle$.

3. Определяется мощность множества информационных векторов, входящих в группу r_1, r_2 :

$$N_{r_1, r_2} = C_t^{r_1} C_{m-t}^{r_2}. \quad (6)$$

4. Определяется наименьший неотрицательный вычет веса информационного вектора $r = r_1 + r_2$ – число V .

5. Определяется значение поправочного коэффициента α для каждого информационного вектора: если r_1 является четным числом, то $\alpha = 0$, иначе $\alpha = 1$.

6. Определяется результирующее значение модифицированного веса W , для чего для каждого вектора $\langle t \rangle$ с нечетным значением веса r_1 к величине V прибавляется значение модуля M , а для каждого четного r_1 $V = W$.

7. Подсчитывается сумма чисел N_{r_1, r_2} при одинаковых W .

Таким образом, можно предложить следующую формулу подсчета количества необнаруживаемых ошибок в модифицированных кодах Бергера [42]:

$$N_m = \sum_{W=0}^{2^k-1} N_W = \sum_{W=0}^{2^k-1} \left(\sum_{r_1, r_2 \in \langle W \rangle} C_t^{r_1} C_{m-t}^{r_2} \left(\sum_{r_1, r_2 \in \langle W \rangle} C_t^{r_1} C_{m-t}^{r_2} - 1 \right) \right), \quad (7)$$

где m – общая длина информационного вектора; t – длина вектора, по которому определяется поправочный коэффициент α ; r_1 и r_2 – значения веса векторов $\langle t \rangle$ и $\langle m-t \rangle$: $r_1 \in [0, 1, \dots, t]$, а $r_2 \in [0, 1, \dots, m-t]$; W – модифицированный вес информационного вектора (номер контрольной группы информационных векторов); $\langle W \rangle$ – множество значений модифицированного веса информационного вектора; N_W – количество необнаруживаемых ошибок в информационных векторах контрольной группы с весом W .

Формула (7) объясняет некоторые свойства $RS(m, k)$ -кодов, изложенные в [40, 41], например, то, что общее количество необнаруживаемых ошибок в информационных векторах $RS(m, k)$ -кодов не зависит от того, какие разряды информационного вектора суммируются в поправочном коэффициенте α , а зависят только от количества суммируемых разрядов. Из формулы (7) также следует, что при различном значении длины вектора $\langle t \rangle$ (различном количестве информационных разрядов в линейной сумме коэффициента α) может быть различное количество необнаруживаемых ошибок в самом коде.

3 Характеристики обнаружения ошибок модифицированными кодами Бергера

С использованием формул (1) и (7) было рассчитано общее количество необнаруживаемых ошибок в информационных векторах $S(m, k)$ и $RS(m, k)$ кодов (табл. 6), а также проведено сравнение данных кодов (взяв $RS(m, k)$ -код с минимальным общим количеством необнаруживаемых ошибок, для которого поправочный коэффициент содержит сумму по модулю два $\left\lfloor \frac{m}{2} \right\rfloor$ информационных разрядов [41]). В среднем модифицированные коды Бергера обнаруживают вдвое большее количество ошибок в информационных векторах, чем классические коды Бергера, о чем говорит значение величины

$$\kappa = \frac{N_m^{RS(m, k)}}{N_m^{S(m, k)}} \cdot 100 \%, \quad (8)$$

где $N_m^{S(m,k)}$ и $N_m^{RS(m,k)}$ – общее количество необнаруживаемых ошибок в классических и модифицированных кодах Бергера.

Таблица 6. Общее количество необнаруживаемых ошибок в кодах Бергера

m	Общее количество необнаруживаемых ошибок в кодах с суммированием		$k, \%$
	$S(m,k)$	$RS(m,k)$	
2	2	0	0
3	12	8	66,667
4	54	24	44,444
5	220	112	50,909
6	860	480	55,814
7	3304	1984	60,048
8	12 614	6216	49,279
9	48 108	23 888	49,655
10	183 732	91 680	49,899
11	703 384	352 480	50,112
12	2700 060	1359 136	50,337
13	10 392 408	5258 944	50,604
14	40 100 216	20 420 736	50,924
15	155 084 752	79 565 952	51,305
16	601 014 854	300 481 096	49,996
17	2333 475 148	1166 684 944	49,998
18	9074 873 156	4537 330 464	49,999
19	35 344 739 512	17 672 164 704	49,999
20	137 845 480 244	68 922 399 792	50

Рисунок 3 иллюстрирует зависимость величины k от m и наглядно демонстрирует долю необнаруживаемых модифицированными кодами Бергера ошибок от аналогичного показателя для классического кода Бергера.

С увеличением длины информационного вектора значение величины k приближается к 50%, что объясняется характером модификации кода Бергера: сначала, согласно алгоритму 1, все информационные векторы, вес которых превосходит число M , перемещаются в контрольные группы, соответствующие меньшему весу, а затем осуществляется сдвиг половины векторов в группы с большими номерами. Этой процедурой фактически осуществляется более сбалансированное, по сравнению с кодами Бергера, перераспределение информационных векторов между контрольными группами.

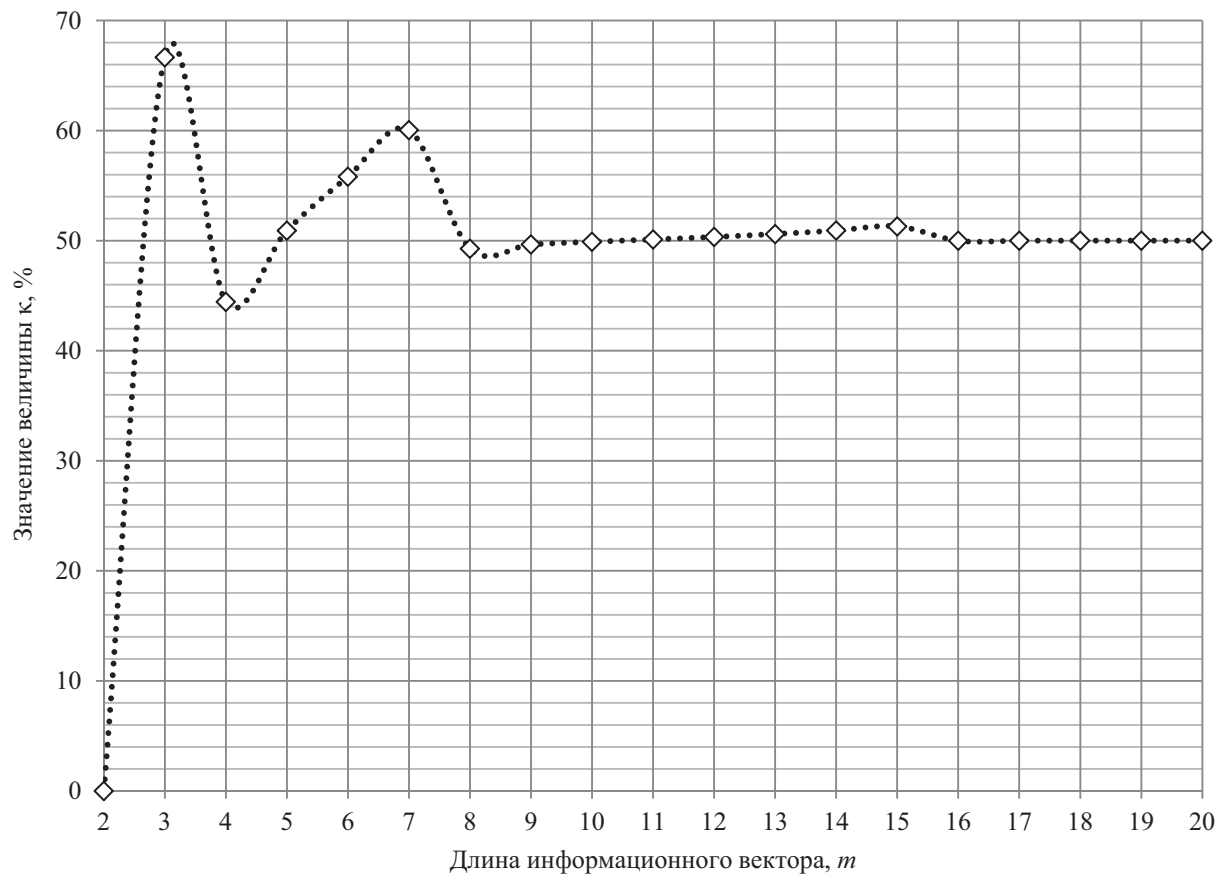


Рис. 3. Зависимость величины k от m

К сожалению, формула (7) не дает возможности анализа необнаруживаемых ошибок в информационных векторах по их видам и не позволяет классифицировать их на монотонные, симметричные и асимметричные ошибки [43].

С целью более детального анализа характеристик $RS(m,k)$ -кодов в ходе исследований был разработан специализированный программный модуль подсчета необнаруживаемых ошибок по видам и кратностям для модифицированных кодов Бергера, что позволило подтвердить установленные ранее результаты и сформулировать новые свойства, учет которых полезен при решении задач технической диагностики.

В [41], где представлен анализ характеристик обнаружения ошибок $RS(m,k)$ -кодами только с позиции их кратности, утверждается, что при использовании всех 2^m информационных векторов свойства кода не зависят от того, какие именно информационные разряды были использованы при вычислении поправочного коэффициента α , а определяются только их количеством, причем (m,k) -коды с q и $m - q$ информационными разрядами в α характеризуются одинаковыми свойствами обнаружения ошибок. В ходе исследований для $RS(m,k)$ -кодов с различной длиной информационных векторов был проведен подробный анализ характеристик обнаружения ошибок в информационных векторах и были получены специальные характеристические

таблицы. Примеры таких таблиц для модифицированных кодов Бергера с длиной информационного вектора $m = 10$ приведены ниже (табл. 7–11).

В этих таблицах представлены абсолютные и относительные характеристики модифицированных кодов Бергера (для кодов в обозначение в виде третьей цифры в скобках введено количество информационных разрядов в поправочном коэффициенте α). Следует отметить, что все характеристические таблицы при различных длинах информационных векторов позволяют выявить следующие общие свойства модифицированных кодов Бергера:

1. $RS(m,k)$ -коды обнаруживают любые ошибки с нечетными кратностями.

2. $RS(m,k)$ -коды не обнаруживают примерно половину возможных симметричных ошибок в информационных векторах, имея в классе необнаруживаемых симметричные ошибки с любыми четными кратностями.

3. $RS(m,k)$ -коды обнаруживают монотонные ошибки любых кратностей за исключением некоторых монотонных ошибок с кратностями $d = M$.

4. Наибольший вклад во множество необнаруживаемых $RS(m,k)$ -кодами ошибок вносят ошибки с кратностями $d < M$, каждая из которых относится к виду симметричных ошибок.

5. $RS(m,k)$ -коды обнаруживают асимметричные ошибки любых кратностей $d \leq M$ и не обнаруживают часть асимметричных ошибок с кратностями

$$d = M + 2j, \quad j = 1, 2, \dots, q, \quad q \leq \left\lfloor \frac{m - M}{2} \right\rfloor.$$

Детально анализируя свойства $RS(m,k)$ -кодов, можно сделать вывод о том, что данные коды имеют приемлемые характеристики для использования их в задачах технической диагностики: ими обнаруживаются любые монотонные ошибки кратностью $d < M$ и асимметричные ошибки кратностью $d < M + 2$. Другими словами, данные коды относятся к типам M -UEDC(m,k)-кодов* и $(M+2)$ -AEDC(m,k)-кодов**.

Заключение

Классические коды с суммированием обнаруживают 100% монотонных ошибок в информационных векторах, однако при этом они имеют сравнительно большое количество необнаруживаемых ошибок. Для уменьшения их числа требуется модификация кода, например, по алгоритму 1. В работе приводится вывод формулы расчета количества необнаруживаемых ошибок в информационных векторах модифицированных кодов Бергера. Данная формула

* UEDC – unidirectional error-detecting code.

** AEDC – asymmetric error-detecting code.

Таблица 7. Характеристики ошибок, не обнаруживаемых $RS(10,4,1)$ -кодами

Необнаруживаемые ошибки кратностью d			Всего необнаруживаемых ошибок	Доля необнаруживаемых ошибок кратностью d от количества ошибок данной кратностью данного вида			Доля от общего количества ошибок данного вида
2	4	6		8	10		
Монотонные							
0	0	0	72	0	0	0	0,06
Симметричные							
18432	48384	26880	2520	0	60	40	20
Асимметричные							
–	0	0	0	0	0	0	0
Всех видов							
18432	48384	26880	2592	0	22,5	12,5	5,63
				40			0
				Всех видов, %			9,19

Таблица 8. Характеристики ошибок, не обнаруживаемых $RS(10,4,2)$ -кодами

Необнаруживаемые ошибки кратностью d			Всего необнаруживаемых ошибок	Доля необнаруживаемых ошибок кратностью d от количества ошибок данной кратностью данного вида			Доля от общего количества ошибок данного вида
2	4	6		8	10		
Монотонные							
0	0	0	232	0	0	0	0,2
Симметричные							
14848	37632	31360	8120	252	64,44	64,44	50,19
Асимметричные							
–	0	0	0	20	0	0	0,01
Всех видов							
14848	37632	31360	8352	272	17,5	14,58	18,13
				32,22			26,56
				Всех видов, %			8,83

Таблица 9. Характеристики ошибок, не обнаруживаемых $RS(10,4,3)$ -кодами

Необнаруживаемые ошибки кратностью d			Всего необнаруживаемых ошибок	Доля необнаруживаемых ошибок кратностью d от количества ошибок данного вида			Доля от общего количества ошибок данного вида				
2	4	6		8	10						
Монотонные											
0	0	0	168	0	0	0	46,67	0	0,15		
Симметричные											
12288	37632	35840	5880	0	91640	53,33	46,67	46,67	0	49,88	
Асимметричные											
-	0	0	0	0	0	-	0	0	0	0	
Всех видов											
12288	37632	35840	6048	0	91808	26,67	17,5	16,67	13,13	0	8,76

Таблица 10. Характеристики ошибок, не обнаруживаемых $RS(10,4,4)$ -кодами

Необнаруживаемые ошибки кратностью d			Всего необнаруживаемых ошибок	Доля необнаруживаемых ошибок кратностью d от количества ошибок данного вида			Доля от общего количества ошибок данного вида				
2	4	6		8	10						
Монотонные											
0	0	0	168	0	168	0	0	46,67	0	0,15	
Симметричные											
10752	40704	33920	5880	252	91508	46,67	50,48	46,67	100	49,81	
Асимметричные											
-	0	0	0	20	20	-	0	0	2,60	0,01	
Всех видов											
10752	40704	33920	6048	272	91696	23,33	18,93	15,77	13,13	26,56	8,75

Таблица 11. Характеристики ошибки, не обнаруживаемых RS(10,4,5)-кодами

Необнаруживаемые ошибки кратностью d		Всего обнаруживаемых ошибок			Доля необнаруживаемых ошибок кратностью d от количества ошибок данного вида				Доля от общего количества ошибок данного вида	
					2	4	6	8		10
		Моногонные			Моногонные, %					
0	0	0	200	0	0	0	55,56	0	0,17	
		Симметричные			Симметричные, %					
10 240	42 240	32 000	7000	0	44,44	52,38	47,62	55,56	0	49,79
		Асимметричные			Асимметричные, %					
-	0	0	0	0	-	0	0	0	0	0
		Всех видов			Всех видов, %					
10 240	42 240	32 000	7200	0	22,22	19,64	14,88	15,63	0	8,75

позволяет рассчитать количество необнаруживаемых ошибок в любых вариантах построения модифицированных кодов Бергера, определенных алгоритмом 1. Это, в свою очередь, дает возможность определения свойств данных кодов по обнаружению ошибок в информационных векторах и соответственно выработать рекомендации по их применению в задачах технической диагностики.

Полученная в работе формула расчета количества необнаруживаемых модифицированными кодами Бергера ошибок в информационных векторах может быть использована и для подсчета количества необнаруживаемых ошибок в классических кодах Бергера. Тогда следует положить $W = r$, $t = m$, $r_1 = r_2 = r$:

$$N = \sum_{r=0}^{2^k-1} N_r = \sum_{r=0}^{2^k-1} C_m^r (C_m^r - 1). \quad (9)$$

Формула (9), например, приведена в работе [44].

Следует также отметить, что формула (7), выведенная в данной работе, может быть применена и для подсчета общего количества необнаруживаемых ошибок в модульно модифицированных кодах с суммированием единичных разрядов при $M \in \{2; 4; \dots; 2^{\lceil \log_2(m+1) \rceil - 2}\}$ [44, 45].

Более детальный анализ на основе разделения ошибок на различные виды позволяет установить для модифицированных кодов с суммированием критерии применимости при решении задач технической диагностики – например, возможности применения $RS(m, k)$ -кодов для контроля логических схем с монотонно независимыми выходами [27–32].

Результаты работы расширяют теорию функционального контроля логических схем автоматики и вычислительной техники по кодам с суммированием единичных информационных разрядов.

Библиографический список

1. Сапожников Вал. В. Основы технической диагностики / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников. – М. : ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2004. – 316 с.
2. Системы управления движением поездов на перегонах. Ч. 1 : Функциональные схемы систем / В. М. Лисенков, П. Ф. Бестемьянов, В. Б. Леушин, В. А. Лисенков, А. Е. Ваньшин ; под ред. В. М. Лисенкова. – М. : ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2009. – 160 с.
3. Шаманов В. И. Электромагнитная совместимость систем железнодорожной автоматики и телемеханики / В. И. Шаманов. – М. : ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2013. – 244 с.

4. Кравцов Ю. А. Перспективные способы кодирования рельсовых цепей тональной частоты / Ю. А. Кравцов, Е. В. Архипов, М. Е. Бакин // Автоматика на транспорте. – 2015. – Т. 1. – № 2. – С. 119–126.
5. Сапожников Вал. В. Способ построения кода с суммированием с улучшенными показателями обнаружения ошибок в информационных векторах / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов, В. В. Дмитриев, М. Р. Черепанова // Автоматика на транспорте. – 2016. – Т. 2. – № 1. – С. 95–123.
6. Pradhan D. K. Fault-tolerant computer system design / D. K. Pradhan. – N.Y : Prentice Hall, 1996. – 560 p.
7. Abramovici M. Digital system testing and testable design / M. Abramovici, M. A. Breuer, A. D. Friedman. – Computer science press, 1998. – 652 p.
8. Пархоменко П. П. Основы технической диагностики (оптимизация алгоритмов диагностирования, аппаратурные средства) / П. П. Пархоменко, Е. С. Согомоян. – М. : Энергоатомиздат, 1981. – 320 с.
9. Сапожников Вал. В. Самопроверяемые дискретные устройства / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников. – СПб. : Энергоатомиздат, 1992. – 224 с.
10. Piestrak S. J. Design of self-testing checkers for unidirectional error detecting codes / S. J. Piestrak. – Wrocław : Oficyna wydawnicza politechniki wrocławskiej, 1995. – 111 p.
11. Touba N. A. Logic synthesis of multilevel circuits with concurrent error detection / N. A. Touba, E. J. McCluskey // IEEE transactions on computer-aided design of integrated circuits and systems. – 1997. – Vol. 16, Jul. 1997. – Pp. 783–789.
12. Nicolaidis M. On-line testing for VLSI – a compendium of approaches / M. Nicolaidis, Y. Zorian // Journal of electronic testing : Theory and applications. – 1998. – Issue 12. – Pp. 7–20.
13. Mitra S. Which concurrent error detection scheme to choose? / S. Mitra, E. J. McCluskey // Proceedings of International test conference, 2000, USA, Atlantic City, NJ, 03–05 October 2000. – Pp. 985–994.
14. Matrosova A. Survivable self-checking sequential circuits / A. Matrosova, I. Levin, S. Ostanin // Proceedings of 2001 IEEE International symposium on defect and fault tolerance in VLSI systems (DFT 2001), Oct. 24–26, San Francisco, CA, 2001. – Pp. 395–402.
15. Fujiwara E. Code design for dependable systems : Theory and practical applications / E. Fujiwara. – John Wiley & Sons, 2006. – 720 p.
16. Согомоян Е. С. Самопроверяемые устройства и отказоустойчивые системы / Е. С. Согомоян, Е. В. Слабаков. – М. : Радио и связь, 1989. – 208 с.
17. Сапожников Вал. В. Обнаружение опасных ошибок на рабочих выходах комбинационных логических схем / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов // Автоматика на транспорте. – 2015. – Т. 1. – № 2. – С. 195–211.
18. Blyudov A. Properties of code with summation for logical circuit test organization / A. Blyudov, D. Efanov, Val. Sapozhnikov, Vl. Sapozhnikov // Proceedings of 10th IEEE east-west design & test symposium (EWDTS'2012), Kharkov, Ukraine, September 14–17, 2012. – Pp. 114–117.
19. Sapozhnikov Val. Modular sum code in building testable discrete systems / Val. Sapozhnikov, Vl. Sapozhnikov, D. Efanov // Proceedings of 13th IEEE east-west de-

- sign & test symposium (EWDTS'2015), Batumi, Georgia, September 26–29, 2015. – Pp. 181–187.
20. Ефанов Д. В. Применение модульных кодов с суммированием для построения систем функционального контроля комбинационных логических схем / Д. В. Ефанов, Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. – 2015. – № 10. – С. 152–169.
 21. Ефанов Д. В. О свойствах кода с суммированием в схемах функционального контроля / Д. В. Ефанов, Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. – 2010. – № 6. – С. 155–162.
 22. Сапожников Вал. В. Предельные свойства кода с суммированием / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2010. – № 3. – С. 290–299.
 23. Smith D. H. A new table of constant weight codes of length greater than 28 / D. H. Smith, L. A. Hughes, S. Perkins // The Electronic journal of combinatorics [electronic only]. – 2006. – Vol. 13. – Issue 1. – Page research paper A2, 18 p. – URL : <https://eudml.org/doc/130372>.
 24. Tarnik S. Design of embedded constant weight code checkers based on averaging operations / S. Tarnik // The 16th IEEE International on-line testing symposium (IOLTS), 5–7 July 2010, Corfu, Greece. – Pp. 255–260.
 25. Lala P. K. Principles of modern digital design / P. K. Lala. – New Jersey : John Wiley & Sons, 2007. – 419 p.
 26. Berger J. M. A Note on error detecting codes for asymmetric channels / J. M. Berger // Information and control. – 1961. – Vol. 4. – № 1. – Pp. 68–73.
 27. Слабаков Е. В. Самопроверяемые вычислительные устройства и системы (обзор) / Е. В. Слабаков, Е. С. Согомоян // Автоматика и телемеханика. – 1981. – № 11. – С. 147–167.
 28. Busaba F. Y. Self-checking combinational circuit design for single and unidirectional multibit errors / F. Y. Busaba, P. K. Lala // Journal of electronic testing : Theory and applications. – 1994. – Issue 5. – Pp. 19–28.
 29. Гессель М. Исследование комбинационных самопроверяемых устройств с независимыми и монотонно независимыми выходами / М. Гессель, А. А. Морозов, Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. – 1997. – № 2. – С. 180–193.
 30. Saposhnikov Val. V. A new design method for self-checking unidirectional combinational circuits / Val. V. Saposhnikov, A. Morosov, Vl. V. Saposhnikov, M. Göessel // Journal of electronic testing: Theory and applications. – 1998. – Vol. 12. – Issue 1–2. – Pp. 41–53.
 31. Morosow A. Self-checking combinational circuits with unidirectionally independent outputs / A. Morosow, Val. V. Saposhnikov, Vl. V. Saposhnikov, M. Goessel // VLSI Design. – 1998. – Vol. 5. – Issue 4. – Pp. 333–345.
 32. Сапожников Вал. В. Метод построения комбинационных самопроверяемых устройств с обнаружением всех одиночных неисправностей / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, М. Гёссель, А. А. Морозов // Электронное моделирование. – 1998. – Т. 20. – № 6. – С. 70–80.

33. Dong H. Modified berger codes for detection of unidirectional errors / H. Dong // IEEE trans. comput., vol. C-33, June 1984. – Pp. 572–575.
34. Jha N. K. A Systematic code for detecting t-unidirectional errors / N. K. Jha, M. B. Vora // Proceedings of International symposium fault-tolerant comput., Pittsburg, PA, Jun. 1987. – Pp. 96–101.
35. Das D. Weight-based codes and their application to concurrent error detection of multilevel circuits / D. Das, N. A. Touba // Proceedings of 17th IEEE test symposium, USA, California, 1999. – Pp. 370–376.
36. Das D. Low cost concurrent error detection based on modulo weight-based codes / D. Das, N. A. Touba, M. Seuring, M. Gossel // Proceedings of IEEE 6th International on-line testing workshop (IOLTW), Spain, Palma de Mallorca, July 3–5, 2000. – Pp. 171–176.
37. Мехов В. Б. Контроль комбинационных схем на основе модифицированных кодов с суммированием / В. Б. Мехов, Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. – 2008. – № 8. – С. 153–165.
38. Сапожников Вал. В. Экспериментальные исследования двоичных кодов с суммированием / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, А. А. Блюдов // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2011. – № 2. – С. 145–152.
39. Блюдов А. А. Модифицированный код с суммированием для организации контроля комбинационных схем / А. А. Блюдов, Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. – 2012. – № 1. – С. 169–177.
40. Блюдов А. А. Коды с суммированием для организации контроля комбинационных схем / А. А. Блюдов, Д. В. Ефанов, Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. – 2013. – № 6. – С. 153–164.
41. Блюдов А. А. Построение модифицированного кода Бергера с минимальным числом необнаруживаемых ошибок информационных разрядов / А. А. Блюдов, Д. В. Ефанов, Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Электронное моделирование. – 2012. – Т. 34. – № 6. – С. 17–29.
42. Сапожников Вал. В. Применение кодов с суммированием при синтезе систем железнодорожной автоматики и телемеханики на программируемых логических интегральных схемах / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов // Автоматика на транспорте. – 2015. – Т. 1. – № 1. – С. 84–107.
43. Сапожников Вал. В. Классификация ошибок в информационных векторах систематических кодов / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов // Известия вузов. Приборостроение. – 2015. – Т. 58. – № 5. – С. 333–343.
44. Блюдов А. А. О кодах с суммированием единичных разрядов в системах функционального контроля / А. А. Блюдов, Д. В. Ефанов, Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. – 2014. – № 8. – С. 131–145.
45. Efanov D. On the problem of selection of code with summation for combinational circuit test organization / D. Efanov, Val. Sapozhnikov, Vl. Sapozhnikov, A. Blyudov // Proceedings of 11th IEEE east-west design & test symposium (EWDTS'2013), Rostov-on-Don, Russia, September 27–30, 2013. – Pp. 261–266.

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

The peculiarities of error detection in data vectors of modified Berger codes

Summation codes or Berger codes are often applied in the tasks of technical diagnostics. However, the codes in question detect quite a few errors in data vectors, and a relatively high redundancy is injected in a unit under test or check-out equipment. In order to improve the properties of error detection in data vectors of summation codes, the modification of rules for determination of values of check vectors' bits was applied. Modified Berger codes, the building rules of which were described in the given study, detect twice as more errors in data vectors, compared to classical Berger codes. The development of a formula for calculating the number of undetected errors in data vectors of modified Berger codes was originally given in the article, which makes it possible to validate some properties of modified Berger codes of error detection in data vectors.

technical diagnostics; Berger code; modified Berger code; undetected error; data vector; formula for calculating the amount of undetected errors.

References

1. Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V. (2004). Basics of technical diagnostics [Osnovy tekhnicheskoy diagnostiki]. Moscow, FSBEI «Study and methodical railway transport education center» [UMC ZHDT]. – 316 p.
2. Vanshyn A. E., Lisenkov V. M., Bestem'yanov P. F., Leushin V. B. (2009). Control systems of traffic trains on block lines. – Part 1: Functional schemas of systems [Sistemy upravleniya dvizheniem poezdov na peregonah. – CHast' 1: Funkcional'nye skhemy sistem], ed. V. M. Lisenkov, Moscow, FSBEI «Study and methodical railway transport education center» [GOU «Uchebno-metodicheskij centr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte»]. – 160 p.
3. Shamanov V. I. (2013). Electromagnetic compatibility of railway automation and remote control systems [Ehlektromagnitnaya sovmestimost' sistem zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki]. Moscow, FSBEI «Study and methodical railway transport education center» [UMC ZHDT]. – 244 p.
4. Kravcov Yu. A., Arhipov E. V., Bakin M. E. (2015). Advanced methods of voice-frequency track circuits coding [Perspektivnye sposoby kodirovaniya rel'sovyh cepej tonal'noj chastoty], Automation on Transport [Avtomatika na transporte], vol. 1, issue 2. – Pp. 119–126.
5. Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V., Efanov D. V., Dmitriev V. V., Cherepanova M. R. (2016). Method of formation of sum code with improved efficiency of error detection in data vectors [Sposob postroeniya koda s summirovaniem s uluchshen-

- nymi pokazatelyami obnaruzheniya oshibok v informacionnyh vektorah], *Automation on transport [Avtomatika na transporte]*, vol. 2, issue 1. – Pp. 95–123.
6. Pradhan D. K. (1996). *Fault-tolerant computer system design*. New York, Prentice hall. – 560 p.
 7. Abramovici M., Breuer M. A., Friedman A. D. (1998). *Digital system testing and testable design*. – Computer science press. – 652 p.
 8. Parhomenko P. P., Sogomonyan E. S. (1981). *Basics of technical diagnostics (optimization of diagnostic algorithms and equipment) [Osnovy tekhnicheskoy diagnostiki (optimizaciya algoritmov diagnostirovaniya, apparaturnye sredstva)]*. Moscow, Energoatomizdat [Ehnergoatomizdat]. – 320 p.
 9. Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V. (1992). *Self-checking discrete devices [Samoproveryaemye diskretnye ustrojstva]*. St. Petersburg, Energoatomizdat [Ehnergoatomizdat]. – 224 p.
 10. Piestrak S. J. (1995). *Design of self-testing checkers for unidirectional error detecting codes*. Wrocław, Oficyna wydawnicza politechniki wrocławskiej. – 111 p.
 11. Toubia N. A., 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, Jul. 1997. – Pp. 783–789.
 12. Nicolaidis M., Zorian Y. (1998). *On-line testing for VLSI – a compendium of approaches*, *journal of electronic testing, theory and applications*, issue 12. – Pp. 7–20.
 13. Mitra S., McCluskey E. J. (2000). *Which concurrent error detection scheme to choose?* *Proceedings of International test conference, 2000, USA, Atlantic City, NJ, 03–05 October 2000*. – Pp. 985–994.
 14. Matrosova A., Levin I., Ostanin S. (2001). *Survivable self-checking sequential circuits*, *Proceedings of 2001 IEEE International symposium on defect and fault tolerance in VLSI systems (DFT 2001)*, Oct. 24–26, San Francisco, CA, 2001. – Pp. 395–402.
 15. Fujiwara E. (2006). *Code design for dependable systems, theory and practical applications*. John Wiley & Sons. – 720 p.
 16. Sogomonyan E. S., Slabakov E. V. (1989). *Self-checking devices and fault-tolerant systems [Samoproveryaemye ustrojstva i otkazoustojchivye sistemy]*. Moscow, Radio & Communication [Radio i svyaz'], 208 p.
 17. Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V., Efanov D. V. (2015). *Detection of hazardous errors at the operative outputs of combinational logic circuits [Obnaruzhenie opasnyh oshibok na rabochih vyhodah kombinacionnyh logicheskikh skhem]*, *Automation on Transport [Avtomatika na transporte]*, vol. 1, issue 2. – Pp. 195–211.
 18. Blyudov A., Efanov D., Sapozhnikov Val., Sapozhnikov Vl. (2012). *Properties of code with summation for logical circuit test organization*, *Proceedings of 10th IEEE east-west design & test symposium (EWDTS'2012)*, Kharkov, Ukraine, September 14–17. – Pp. 114–117.
 19. Sapozhnikov Val., Sapozhnikov Vl., 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. – Pp. 181–187.
 20. Efanov D. V., Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V. (2015). *Applications of modular summation codes to concurrent error detection systems for combinational boolean*

- circuits [Primenenie modul'nyh kodov s summirovaniem dlya postroeniya sistem funktsional'nogo kontrolya kombinatsionnyh logicheskikh skhem], Automation and Remote Control [Avtomatika i telemekhanika], issue 10. – Pp. 152–169.
21. Efanov D. V., Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V. (2010). On summation code properties in functional control circuits [O svoystvakh koda s summirovaniem v skhemah funktsional'nogo kontrolya], Automation and remote control [Avtomatika i telemekhanika], issue 6. – Pp. 155–162.
 22. Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V., Efanov D. V. (2010). Berger code limit properties [Predel'nye svoystva koda s summirovaniem], Proceedings of Petersburg transport university [Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya], issue 3. – Pp. 290–299.
 23. Smith D. H., Hughes L. A., Perkins S. (2006). A new table of constant weight codes of length greater than 28, the electronic journal of combinatorics [electronic only], vol. 13, issue 1. – Page Research paper A2, 18 p. URL: <https://eudml.org/doc/130372>.
 24. Tarnik S. (2010). Design of embedded constant weight code checkers based on averaging operations, The 16th IEEE International on-line testing symposium (IOLTS), 5–7 July 2010, Corfu, Greece. – Pp. 255–260.
 25. Lala P. K. (2007). Principles of modern digital design. – New Jersey, John Wiley & Sons. – 419 p.
 26. Berger J. M. (1961). A note on error detecting codes for asymmetric channels, information and control, vol. 4, issue 1. – Pp. 68–73.
 27. Slabakov E. V., Sogomonyan E. S. (1981). Self-checking digital devices and systems (review) [Samoproveryaemye vychislitel'nye ustrojstva i sistemy (obzor)], Automation and Remote Control [Avtomatika i telemekhanika], issue 11. – Pp. 147–167.
 28. Busaba F. Y., Lala P. K. (1994). Self-checking combinational circuit design for single and unidirectional multibit errors, journal of electronic testing: theory and applications, issue 5. – Pp. 19–28.
 29. Gessel' M., Morozov A. A., Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V. (1997). Investigation of combination self-testing devices having independent and unidirectional independent outputs [Issledovanie kombinatsionnyh samoproveryaemykh ustrojstv s nezavisimymi i monotonno nezavisimymi vyhodami], Automation and remote control [Avtomatika i telemekhanika], issue 2. – Pp. 180–193.
 30. Saposhnikov Val. V., Morosov A., Saposhnikov Vl. V., Göessel M. (1998). A new design method for self-checking unidirectional combinational circuits, Journal of electronic testing: theory and applications, vol. 12, issue 1–2. – Pp. 41–53.
 31. Morosow A, Saposhnikov Val. V., Saposhnikov Vl. V., Goessel M. (1998). Self-checking combinational circuits with unidirectionally independent outputs, VLSI Design, vol. 5, issue 4. – Pp. 333–345.
 32. Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V., Gyossel' M., Morozov A. A. (1998). A method for synthesis of combinational self-checking devices with detection all stuck-at faults [Metod postroeniya kombinatsionnyh samoproveryaemykh ustrojstv s obnaruzheniem vsekh odinochnykh neispravnostej], Electronic Modeling [Ehlektronnoe modelirovanie], vol. 20, issue 6. – Pp. 70–80.
 33. Dong H. (1984). Modified berger codes for detection of unidirectional errors, IEEE trans. comput., vol. C-33, June 1984. – Pp. 572–575.

34. Jha N. K., Vora M. B. (1987). A systematic code for detecting t-unidirectional errors, Proceedings of international symposium fault-tolerant comput., Pittsburg, PA, Jun. 1987. – Pp. 96–101.
35. Das D., Touba N. A. (1999). Weight-based codes and their application to concurrent error detection of multilevel circuits, Proc. 17th IEEE test symposium, USA, California. – Pp. 370–376.
36. Das D., Touba N. A., Seuring M., Gossel M. (2000). Low cost concurrent error detection based on modulo weight-based codes, Proceedings of IEEE 6th International on-line testing workshop (IOLTW), Spain, Palma de Mallorca, July 3–5, 2000. – Pp. 171–176.
37. Mekhov V. B., Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V. (2008). Checking of combinational circuits basing on modification sum codes [Kontrol' kombinacionnyh skhem na osnove modifitsirovannyh kodov s summirovaniem], Automation and Remote Control [Avtomatika i telemekhanika], issue 8. – Pp. 153–165.
38. Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V., Blyudov A. A. (2011). Experimental research of summation binary codes [Eksperimental'nye issledovaniya dvoichnyh kodov s summirovaniem], Proceedings of Petersburg transport university [Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya], issue 2. – Pp. 145–152.
39. Blyudov A. A., Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V. (2012). A modified summation code for organizing control of combinatorial circuits [Modifitsirovannyj kod s summirovaniem dlya organizacii kontrolya kombinacionnyh skhem], Automation and remote control [Avtomatika i telemekhanika], issue 1. – Pp. 169–177.
40. Blyudov A. A., Efanov D. V., Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V. (2013). Summation codes for organization of control of combinational circuits [Kody s summirovaniem dlya organizacii kontrolya kombinacionnyh skhem], Automation and remote control [Avtomatika i telemekhanika], issue 6. – Pp. 153–164.
41. Blyudov A. A., Efanov D. V., Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V. (2012). Formation Berger modified code with minimum total number of undetectable errors in data bits [Postroenie modifitsirovannogo koda Bergera s minimal'nym chislom neobnaruzhivaemyh oshibok informacionnyh razryadov], Electronic modeling [Elektronnoe modelirovanie], vol. 34, issue 6. – Pp. 17–29.
42. Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V., Efanov D. V. (2015). Application of sum codes for synthesis of railway automation and remote control at programmable logic integrated circuits [Primenenie kodov s summirovaniem pri sinteze sistem zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki na programmiruemyh logicheskikh integral'nyh skhemah], Automation on transport [Avtomatika na transporte], vol. 1, issue 1. – Pp. 84–107.
43. Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V., Efanov D. V. (2015). Errors classification in information vectors of systematic codes [Klassifikaciya oshibok v informacionnyh vektorah sistemicheskikh kodov], Journal of instrument engineering [Izvestiya vuzov. Priborostroenie], vol. 58, issue 5. – Pp. 333–343.
44. Blyudov A. A., Efanov D. V., Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V. (2014). On codes with summation of data bits in concurrent error detection systems [O kodah s summirovaniem edinichnyh razryadov v sistemah funkcional'nogo kon-

- trolya], Automation and remote control [Avtomatika i telemekhanika], issue 8. – Pp. 131–145.
45. Efanov D., Sapozhnikov Val., Sapozhnikov Vl., Blyudov A. (2013). On the problem of selection of code with summation for combinational circuit test organization, Proceedings of 11th IEEE east-west design & test symposium (EWDTS`2013), Rostov-on-Don, Russia, September 27–30, 2013. – Pp. 261–266.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии Р. Убаром
Поступила в редакцию 09.09.2016, принята к публикации 22.02.2017*

ЕФАНОВ Дмитрий Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I.
e-mail: TrES-4b@yandex.ru

© Ефанов Д. В., 2017