
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 госуниверситет путей сообщения Императора Александра I
(Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9,
тел. (+7) 9117092164, (+7) (812) 4578579, e-mail: port.at.pgups@gmail.com)

Модульно-взвешенные коды с суммированием с наименьшим общим числом необнаруживаемых ошибок в информационных векторах

Рассмотрены два способа построения кодов с суммированием с наименьшим общим числом необнаруживаемых ошибок в информационных векторах, имеющих такое же число контрольных разрядов, как классические коды Бергера. Способы основаны на взвешивании разрядов и переходов между разрядами, занимающими соседние позиции в информационных векторах, с помощью последовательности весовых коэффициентов, образующей натуральный ряд чисел. Проанализированы некоторые ключевые особенности обнаружения ошибок в информационных векторах предложенных кодов, отличающие данные коды от кодов Бергера и их известных модификаций. На основании экспериментов с контрольными комбинационными схемами показана эффективность разработанных кодов при организации контроля ошибок, возникающих на выходах схем.

К л ю ч е в ы е с л о в а: дискретные устройства, техническая диагностика, код Бергера, модифицированный код Бергера, обнаружение ошибок.

Розглянуто два способи побудови кодів з підсумовуванням із найменшою чисельністю невиявних помилок в інформаційних векторах, які мають таке ж число контрольних розрядів, як класичні коди Бергера. Способи ґрунтуються на зважуванні розрядів і переходів між розрядами, що займають сусідні позиції в інформаційних векторах, за допомогою послідовності вагових коефіцієнтів, яка утворює ряд чисел. Проаналізовано деякі ключові особливості виявлення помилок в інформаційних векторах запропонованих кодів, які відрізняють ці коди від кодів Бергера та їх відомих модифікацій. На базі експериментів з контрольними комбінаційними схемами показана ефективність розроблених кодів при організації контролю помилок на виходах схем.

К л ю ч о в і с л о в а: дискретне обладнання, технічна діагностика, код Бергера, модифікований код Бергера, виявлення помилок.

В задачах построения надежных дискретных устройств и задачах технической диагностики, например при организации систем функционального контроля (СФК) или при кодировании состояний объектов, часто исполь-

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

зуют помехоустойчивые равномерные коды с небольшой избыточностью, ориентированные на обнаружение ошибок [1—8]. К таким кодам относят блочные коды с достаточно простыми правилами построения, так как они определяют показатели структурной избыточности дискретных устройств. Равномерные блочные коды классифицируются на разделимые, или (m, k) -коды (m и k — длины информационных и контрольных векторов кода), и неразделимые. Известно большое число кодов, обладающих различными характеристиками обнаружения ошибок и позволяющих синтезировать различные по сложности технической реализации логические устройства [9—19].

Наиболее широко применяются в устройствах автоматики классические коды с суммированием, или коды Бергера [20], обладающие свойством 100%-ного обнаружения монотонных ошибок. Существуют различные подходы к построению логических схем с обнаружением отказов на основе кодов Бергера [2, 21—25].

Для построения кодов Бергера подсчитывают число единичных разрядов в информационном векторе (определяют вес r информационного вектора). Полученное число представляют в двоичном виде и записывают в разряды контрольного вектора. Обозначим коды Бергера как $S(m, k)$ -коды, где $k = \lceil \log_2(m+1) \rceil$ ($\lceil \dots \rceil$ — целое сверху от вычисляемого значения). Каждому контрольному вектору $S(m, k)$ -кода с весом r соответствует C_m^r информационных векторов. Распределение информационных векторов между контрольными векторами весьма неравномерно, чем объясняется значительное число необнаруживаемых $S(m, k)$ -кодом ошибок. Любая ошибка в информационном векторе, при которой одновременно искажается одинаковое число нулевых и единичных разрядов (симметричная ошибка), этим кодом не обнаруживается. Поэтому в классе необнаруживаемых оказывается 50% двукратных ошибок, 37,5% четырехкратных ошибок и так далее [26].

Для улучшения характеристик обнаружения ошибок в информационных векторах разработаны модифицированные коды Бергера, или $RS(m, k)$ -коды [27, 28]. В разряды контрольного вектора модифицированного кода Бергера записывается двоичное число, равное модифицированному весу информационного вектора $W = r \pmod{M} + \alpha M$, где $r \pmod{M}$ — наименьший неотрицательный вычет веса по модулю $M = 2^{\lceil \log_2(m+1) \rceil - 1}$, а α — поправочный коэффициент, вычисляемый как сумма по модулю два заранее установленных разрядов информационного вектора.

Для данного значения m в зависимости от способа вычисления α может быть построено $\sum_{j=1}^{m-1} C_m^j = 2^m - 2$ $RS(m, k)$ -кодов. В этом случае минимальное общее число необнаруживаемых ошибок, а также двукратных

необнаруживаемых ошибок, обеспечивает такой $RS(m, k)$ -код, для которого коэффициент α есть сумма по модулю два произвольных $m/2$ информационных разрядов при четном значении m и $(m \pm 1)/2$ информационных разрядов при нечетном значении m . $RS(m, k)$ -коды обнаруживают практически в два раза больше ошибок в информационных векторах, чем коды Бергера, но в отличие от них, не обнаруживают некоторое число монотонных ошибок кратностью $d = M = 2^{\lceil \log_2(m+1) \rceil - 1}$.

Еще одним способом модификации кода является взвешивание одного из разрядов каким-либо натуральным числом и построение кода по следующим правилам [29—31]. Всем разрядам информационного вектора, за исключением одного, приписываем единичные весовые коэффициенты, а одному — весовой коэффициент $w_i \geq 2$, где i — позиция разряда в информационном векторе. Определяем сумму весовых коэффициентов единичных информационных разрядов, представляем ее в двоичном виде и записываем в разряды контрольного вектора. Такой код обозначим $WS(m, k, w_i)$.

В зависимости от значений m и w_i могут быть построены коды с улучшенными по сравнению с кодами Бергера характеристиками обнаружения ошибок. При этом любой $WS(m, k, w_i)$ -код будет обнаруживать 100% монотонных ошибок. Изменяя число w_i от 2 до m , можно уменьшить общее число необнаруживаемых ошибок. Все $WS(m, k, w_i)$ -коды при $w_i \geq m$ будут в точности повторять основные свойства классических кодов Бергера, т.е. ими не будут обнаруживаться только симметричные ошибки, общее число которых приблизительно вдвое меньше, чем у кодов Бергера.

$S(m, k)$ -, $RS(m, k)$ - и $WS(m, k, w_i)$ -коды при $w_i \leq 2^{\lceil \log_2(m+1) \rceil} - m$ имеют одинаковое число контрольных разрядов $k = \lceil \log_2(m+1) \rceil$, но при этом обладают различными характеристиками обнаружения ошибок. Результаты исследований свидетельствуют о том, что общее число необнаруживаемых этими кодами ошибок может быть значительно уменьшено. Рассмотрим два способа построения (m, k) -кодов с минимальным общим числом необнаруживаемых ошибок в информационных векторах при $k = \lceil \log_2(m+1) \rceil$.

Модульно-взвешенные коды Бергера. Модифицированные коды Бергера, обнаруживают практически вдвое больше ошибок в информационных векторах, чем классические коды Бергера. Однако можно построить такие коды с суммированием, которые не обнаруживают минимальное общее число ошибок в информационных векторах при заданных значениях длин информационных и контрольных векторов. Такие коды построены на основе взвешивания разрядов или переходов между разрядами в информационных векторах [32—37]. Рассмотрим два таких кода, относящихся к классу модульно-взвешенных кодов с суммированием.

К о д 1. Устанавливаем последовательность весовых коэффициентов, образующую натуральный ряд чисел. Каждое число из этой последовательности приписывается разряду информационного вектора, начиная с младшего (табл. 1). Определяем значение модуля $M = 2^{\lceil \log_2(m+1) \rceil}$. Подсчитываем число V_S , которое равно сумме весовых коэффициентов единичных информационных разрядов, и определяем наименьший неотрицательный вычет данного числа по модулю $M - V_S \pmod{M}$. Полученное в итоге число представляем в двоичном виде и записываем в разряды контрольного вектора. Данный код назовем модульным кодом с суммированием взвешенных разрядов и обозначим $WSM(m, k)$ -код [38].

К о д 2. Приписываем установленную выше последовательность весовых коэффициентов не разрядам, а переходам между соседними разрядами в информационных векторах (см. табл. 1), и устанавливаем значение модуля $M = 2^{\lceil \log_2(m+1) \rceil}$. Подсчитываем число V_T как сумму весовых коэффициентов активных переходов, для которых $f_i \oplus f_{i+1} = 1$. Определяем наименьший неотрицательный вычет числа V_T по модулю $M - V_T \pmod{M}$. Полученное число представляется в двоичном виде и записывается в разряды контрольного вектора. Данный код назовем модульным кодом с суммированием взвешенных переходов и обозначим $WTM(m, k)$ -код [39].

Коды 1 и 2 имеют такое же число разрядов в контрольных векторах, как и коды Бергера, однако обладают совершенно иными свойствами обнаружения ошибок в информационных векторах.

Характеристики обнаружения ошибок модульно-взвешенными кодами Бергера. В ходе исследований был разработан специальный программный модуль расчета характеристик обнаружения ошибок в информационных векторах (m, k) -кодов, позволяющий рассчитывать число необнаруживаемых ими ошибок по видам (монотонные, симметричные и асимметричные [40]) и кратностям d .

В табл. 2 приведены характеристики необнаруживаемых ошибок $WSM(m, k)$ - и $WTM(m, k)$ -кодами при $m = 3 \div 20$, где N_2 — рассчитанные значения двукратных необнаруживаемых ошибок, $\xi_{m, k}$ — отношение числа

Таблица 1. Весовые коэффициенты кодов с суммированием

Разряд информационного вектора	f_5	f_4	f_3	f_2	f_1
Весовой коэффициент	w_5	w_4	w_3	w_2	w_1
разряда	5	4	3	2	1
	$w_{4,5}$	$w_{3,4}$	$w_{2,3}$	$w_{1,2}$	
перехода между разрядами	4	3	2	1	

необнаруживаемых оптимальным (m, k) -кодом ошибок к аналогичной величине рассматриваемого кода, γ_m — доля необнаруживаемых кодом ошибок от общего числа ошибок в информационных векторах. Величина $\xi_{m, k}$ показывает, насколько близок код при данной длине информационного вектора к коду с минимальным общим числом необнаруживаемых ошибок (оптимальному (m, k) -коду [27, 28]). Коэффициенты υ_m , σ_m и α_m характеризуют доли необнаруживаемых данным кодом монотонных, симметричных и асимметричных ошибок от общего числа возможных в информационных векторах ошибок соответствующего вида, $\beta_{m, 2}$ — доля двукратных необнаруживаемых ошибок от общего числа двукратных ошибок.

Анализируя значения $\xi_{m, k}$ в табл. 2, можно сделать вывод о том, что все $WSM(m, k)$ - и $WTM(m, k)$ -коды при $m \neq 2^t$, $t = 2, 3, \dots$, являются оптимальными (m, k) -кодами, т.е. кодами с минимальным общим числом необнаруживаемых ошибок. Как свидетельствуют значения γ_m , при малых длинах информационных векторов обоими кодами не обнаруживается приблизительно 10—15 % ошибок в информационных векторах: в диапазоне $m = 8 \div 15$ — $\gamma_m \approx 6\%$, а при $m \geq 16$ — $\gamma_m \approx 3\%$, что значительно меньше аналогичных величин для $S(m, k)$ - и $RS(m, k)$ -кодов (рис. 1).

Коды $WSM(m, k)$ и $WTM(m, k)$, в отличие от кодов Бергера, в классе необнаруживаемых имеют ошибки всех видов: монотонные, симметричные и асимметричные. Однако их доли существенны лишь при небольших длинах информационных векторов ($m < 8$). На рис. 2 представлены графики зависимостей коэффициентов υ_m , σ_m и α_m для кодов $WSM(m, k)$, $WTM(m, k)$ и наилучших $RS(m, k)$ -кодов.

Коды $RS(m, k)$ идентифицируют большее число монотонных ошибок по сравнению с модульно-взвешенными кодами, имеющими при одинаковых значениях m приблизительно равное число монотонных необнаруживаемых ошибок (у $WSM(m, k)$ -кодов немного меньше, чем у $WTM(m, k)$ -кодов). Значительно лучшими характеристиками по сравнению с $RS(m, k)$ -кодами обладают $WSM(m, k)$ - и $WTM(m, k)$ -коды в области симметричных ошибок. Если $RS(m, k)$ -кодами не обнаруживается приблизительно 50 % симметричных ошибок в информационных векторах, то $WSM(m, k)$ - и $WTM(m, k)$ -кодами — менее 10—15 %, а при увеличении длины информационного вектора наблюдается существенное уменьшение значения σ_m .

Асимметричных необнаруживаемых ошибок гораздо больше у взвешенных кодов с суммированием по сравнению с $RS(m, k)$ -кодами. При этом $WTM(m, k)$ -коды по показателю обнаружения асимметричных ошибок имеют преимущество перед $WSM(m, k)$ -кодами.

Таблица 2. Показатели обнаружения ошибок $WSM(m, k)$ - и $WTM(m, k)$ -кодами

m	k	Число необнаруживаемых ошибок				N_2	$\xi_{m,k}, \%$	$\gamma_m, \%$	Доля необнаруживаемых ошибок от общего числа ошибок данного вида				$\beta_2, \%$
		Общее	Моно-тонные	Симметричные	Асимметричные				$\nu_m, \%$	$\sigma_m, \%$	$\alpha_m, \%$		
$WSM(m, k)$ -коды													
3	2	8	4	0	4	100	14,286	28,571	0	66,667	16,667		
4	3	16	4	2	0	100	6,667	6,061	3,704	17,857	0		
5	3	96	32	12	16	100	9,677	12,214	5,455	14,857	5		
6	3	448	116	64	64	100	11,111	12,262	7,442	14,549	6,667		
7	3	1920	420	312	192	100	11,811	13,035	9,443	13,448	7,143		
8	4	3840	572	810	2458	100	5,882	5,416	6,421	6,136	0		
9	4	15872	2056	2956	10860	100	6,067	6,095	6,145	6,199	1,389		
10	4	64512	6572	11080	46860	100	6,158	6,211	6,031	6,267	2,222		
11	4	260096	20420	42592	197084	100	6,204	6,232	6,055	6,279	2,727		
12	4	1044480	62648	165318	816514	100	6,227	6,23	6,123	6,272	3,03		
13	4	4186112	192220	642112	3351780	100	6,239	6,27	6,179	6,261	3,205		
14	4	16760832	583044	2491168	13686620	100	6,244	6,267	6,212	6,256	3,297		
15	4	67076096	1765252	9662528	55648316	100	6,247	6,273	6,23	6,253	3,333		
16	5	134152192	2641036	19715754	111795402	100	3,124	3,11	3,28	3,099	0		
17	5	536739840	7991576	74602620	454145644	100	3,124	3,124	3,197	3,113	0,368		

18	5	2147221504	24050524	286276696	1836894284	262144	100	3,125	3,125	3,125	3,155	3,12	0,654
19	5	8589410304	72316400	1108254688	7408839216	786432	100	3,125	3,125	3,126	3,136	3,123	0,877
20	5	34358689792	217157524	4312002076	29829530192	2097152	100	3,125	3,125	3,124	3,128	3,125	1,053
<i>ИТМ (m, k)-коды</i>													
3	2	8	2	0	6	0	100	14,286	14,286	14,286	0	100	0
4	3	24	6	10	8	8	66,66667	10	9,091	9,091	18,519	14,286	8,333
5	3	96	30	8	58	32	100	9,677	11,45	11,45	3,636	16,571	10
6	3	448	174	176	138	192	100	11,111	14,165	14,165	20,465	7,492	20
7	3	1920	470	352	1098	448	100	11,811	14,587	14,587	10,654	12,429	16,667
8	4	3856	830	1378	1648	832	99,58506	5,907	7,858	7,858	10,924	4,114	11,607
9	4	15872	2714	2728	10430	2 304	100	6,067	8,045	8,045	5,671	5,954	12,5
10	4	64512	8714	22120	33678	7 680	100	6,158	8,236	8,236	12,039	4,504	16,667
11	4	260096	25338	44224	190534	17 408	100	6,204	7,733	7,733	6,287	6,071	15,455
12	4	1044480	73650	334064	636766	44 032	100	6,227	7,324	7,324	12,372	4,891	16,288
13	4	4186112	222546	668120	3295446	99 328	100	6,239	7,259	7,259	6,429	6,156	15,545
14	4	16760832	662154	4998704	11099974	243 712	100	6,244	7,117	7,117	12,466	5,073	16,346
15	4	67076096	1993546	9997312	55085238	536 576	100	6,247	7,084	7,084	6,446	6,189	15,595
16	5	134152224	3139258	37502834	93510132	933 888	99,99998	3,124	3,697	3,697	6,24	2,592	11,875
17	5	536739840	9489846	75005608	452244386	2 293 760	100	3,124	3,71	3,71	3,214	3,1	12,868
18	5	2147221504	28476558	566937272	1551807674	5 898 240	100	3,125	3,7	3,7	6,247	2,636	14,706
19	5	8589410304	83611278	1133873792	7371925234	12 845 056	100	3,125	3,614	3,614	3,208	3,108	14,327
20	5	34358689792	243489886	8614371176	25500828730	29 097 984	100	3,125	3,503	3,503	6,249	2,671	14,605

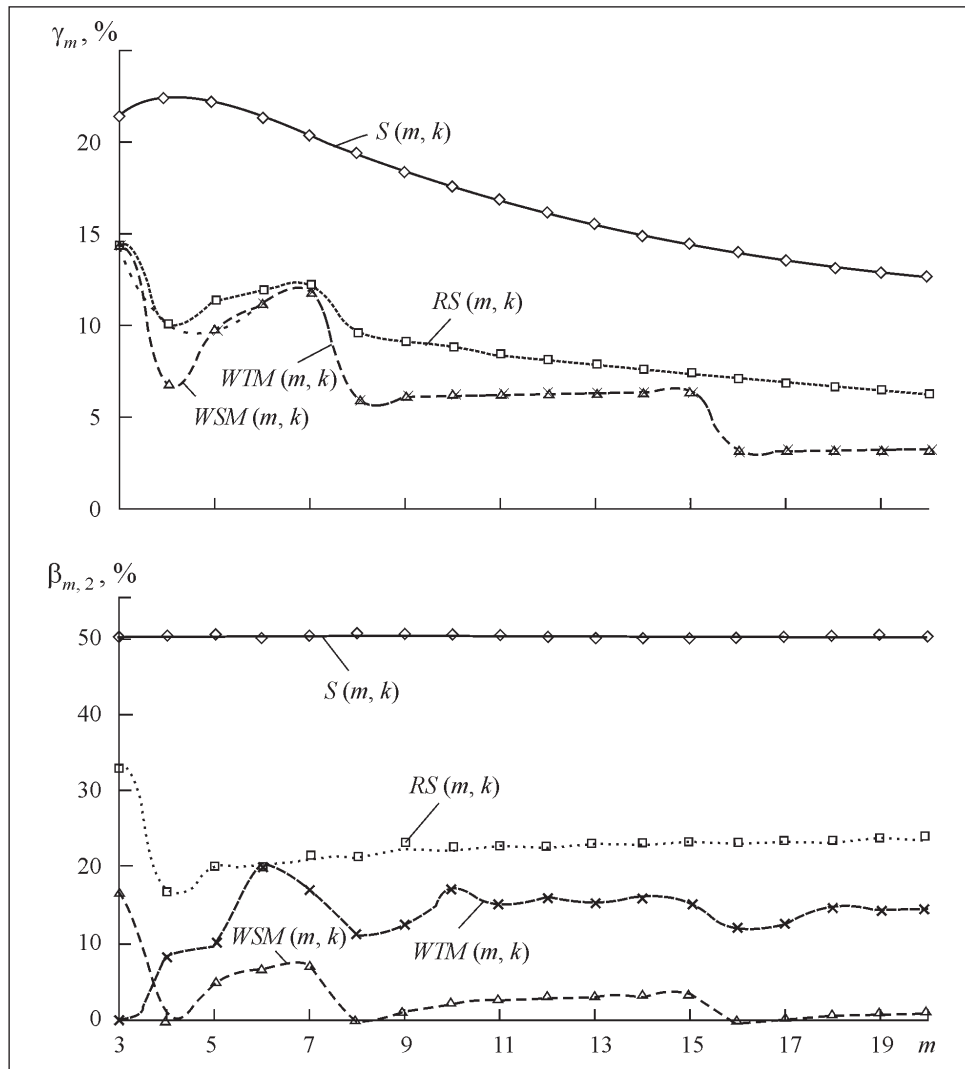


Рис. 1. Графики зависимостей коэффициентов γ_m и $\beta_{m,2}$ от длины информационного вектора

Укажем некоторые особенности модульно-взвешенных кодов с суммированием, учет которых может оказаться важным при построении надежных дискретных устройств.

Свойства $WSM(m, k)$ -кодов:

- 1) в классе необнаруживаемых есть ошибки с четными и нечетными кратностями;
- 2) минимальная кратность монотонных необнаруживаемых ошибок составляет $d = 2$ для любых значений m , кроме $m = 2^t, t = 2, 3, \dots$. Для $m = 2^t$

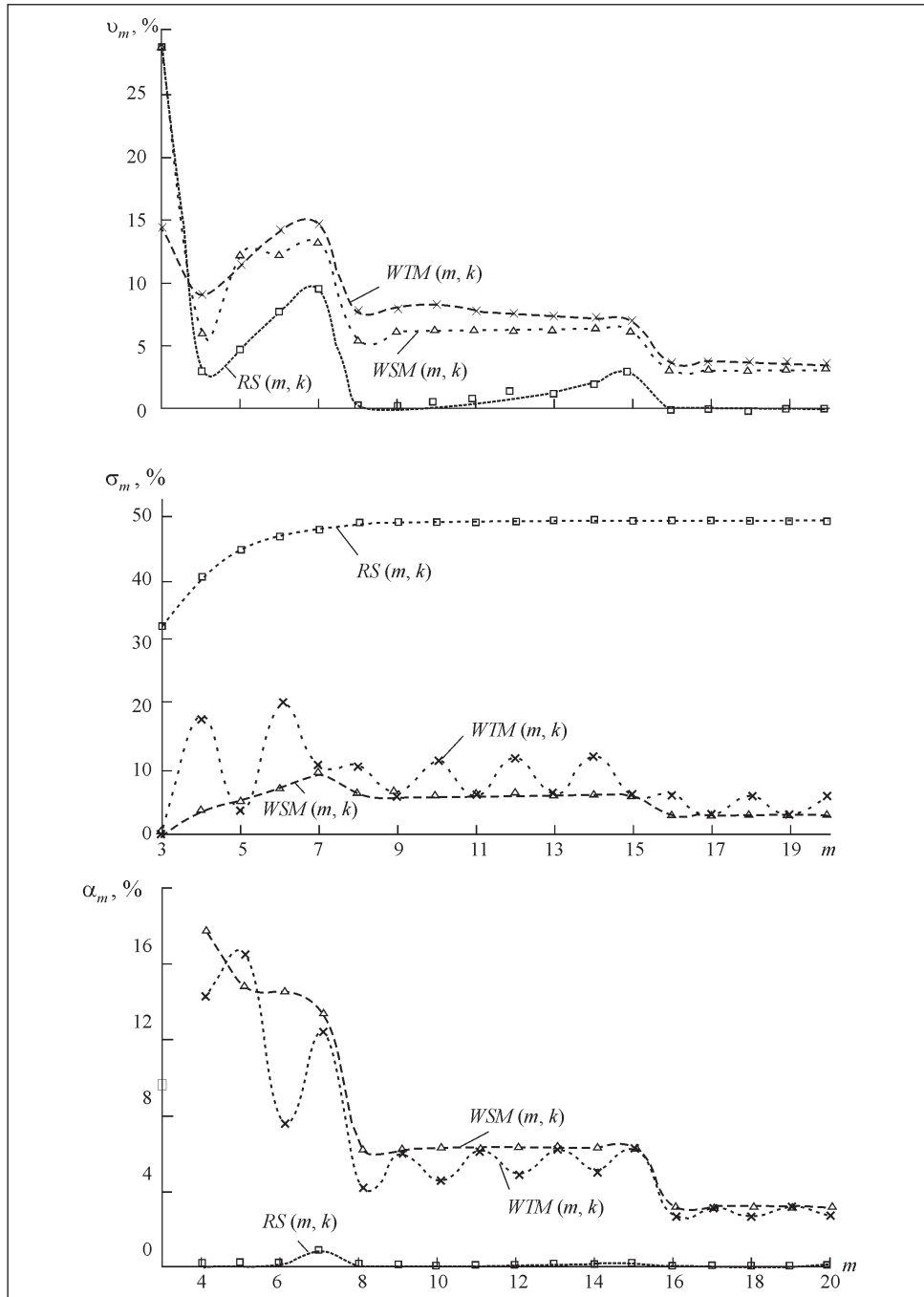


Рис. 2. Графики зависимостей коэффициентов v_m , σ_m и α_m от длины информационного вектора

эта величина составляет $d = 3$; минимальная кратность симметричных ошибок — $d = 4$, а асимметричных — $d = 3$;

3) при длинах информационных векторов $m = 2^t$, $t = 2, 3, \dots$ обнаруживаются любые двукратные ошибки в информационных векторах.

Свойства $WTM(m, k)$ -кодов:

1) при четных значениях m обнаруживаются любые ошибки с четными кратностями;

2) при нечетных значениях m в классе необнаруживаемых есть ошибки с четными и нечетными кратностями;

3) минимальная кратность монотонных и симметричных необнаруживаемых ошибок составляет $d = 2$, асимметричных — $d = 4$ при четных значениях m и $d = 3$ — при нечетных значениях m ;

4) при $m = 3$ обнаруживаются любые двукратные ошибки в информационных векторах.

Как видно из рис. 1, эффективность обнаружения двукратных ошибок модульно-взвешенными кодами с суммированием достаточно высока. Классические и модифицированные коды Бергера уступают по данному показателю $WSM(m, k)$ - и $WTM(m, k)$ -кодам. По показателю обнаружения двукратных ошибок в информационных векторах $WSM(m, k)$ -коды имеют доминантное положение перед всеми рассматриваемыми кодами: при $4 \geq m \geq 7$ значение β_2 не превышает 10%, а при $8 \geq m \geq 15$ — 5%; с увеличением длины информационного вектора m значение β_2 уменьшается. Как видим, при длинах информационных векторов $m = 2^t$, $t = 2, 3, \dots$ $WSM(m, k)$ -кодами обнаруживается 100% двукратных ошибок в информационных векторах. Несколько худшими характеристиками обнаружения двукратных ошибок обладают $WTM(m, k)$ -коды.

В табл. 3 указаны критерии обнаружения ошибок в порядке ухудшения свойств различных (m, k) -кодов.

Результаты экспериментов. В ходе исследований были проведены эксперименты по фиксации ошибок на выходах контрольных комбина-

Таблица 3. Основные критерии обнаружения ошибок (m, k) -кодами

Ухудшение свойств кодов	Обнаружение ошибок				
	общее	монотонных	симметричных	асимметричных	двукратных
↓	$WSM(m, k)$	$S(m, k)$	$WSM(m, k)$	$S(m, k)$	$WSM(m, k)$
	$WTM(m, k)$	$RS(m, k)$	$WTM(m, k)$	$WTM(m, k)$	$WTM(m, k)$
	$RS(m, k)$	$WSM(m, k)$	$RS(m, k)$	$WSM(m, k)$	$RS(m, k)$
	$S(m, k)$	$WTM(m, k)$	$S(m, k)$	$RS(m, k)$	$S(m, k)$

Таблица 4. Обнаружение ошибок на выходах контрольных схем различными кодами с суммированием

Номер схемы	Контрольная схема	Число обнаруживаемых ошибок кодами							
		$S(m, k)$		$RS(m, k)$		$WSM(m, k)$		$WTM(m, k)$	
		Общее	Доля от общего, %	Общее	Доля от общего, %	Общее	Доля от общего, %	Общее	Доля от общего, %
1	<i>ст82а</i>	68	0/100/0	64	0/100/0	4	0/100/0	4	0/100/0
2	<i>ст85а</i>	176	0/100/0	64	0/100/0	0	—	0	—
3	<i>b1</i>	2	0/100/0	0	—	0	—	0	—
4	<i>стb</i>	6	0/100/0	0	—	0	—	0	—
5	<i>z4m1</i>	128	0/100/0	64	0/100/0	0	—	8	0/100/0
6	<i>ст162а</i>	1920	0/100/0	7581	79,74/20,26/0	6277	100/0/0	5983	100/0/0
7	<i>ст163а</i>	10368	0/100/0	27808	29/71/0	20288	100/0/0	19092	99,83/0/0,17
8	<i>alu2</i>	7722	0/100/0	2685	4,58/95,42/0	805	84,6/3,48/11,92	2001	56,52/42,18/1,3
9	<i>x2</i>	104	0/100/0	88	45,46/54,54/0	518	100/0/0	102	37,26/54,9/7,84
10	<i>alu4</i>	187276	0/100/0	116607	0/100/0	30732	3,33/0,74/95,93	17966	65,28/15,93/18,79
11	<i>ст138а</i>	0	—	0	—	0	—	0	—
12	<i>f51m</i>	123	0/100/0	39	0/100/0	16	0/100/0	122	96,72/3,28/0
13	<i>ст42а</i>	8	0/100/0	2	0/100/0	0	—	0	—
14	<i>cu</i>	34048	0/100/0	34048	0/100/0	1536	0/0/100	96	100/0/0
15	<i>pt1</i>	27392	0/100/0	14080	0/100/0	2032	0/82,68/17,32	6293	0/91,72/8,28

Примечание: перед первой косой чертой указана доля обнаруживаемых кодом монотонных ошибок, после нее — доля симметричных ошибок, после второй косой черты — доля асимметричных ошибок.

ционных схем различными кодами с суммированием. Для экспериментов выбрана база LGSynth'89, контрольные схемы в которой представлены в формате *.netblif [41, 42]. Для каждой контрольной комбинационной схемы выполнялись следующие действия:

1. Последовательно вносили все одиночные константные неисправности на выходах внутренних логических элементов.

2. При внесении каждой неисправности на входы схемы подавали все возможные двоичные векторы, на каждом из которых фиксировались выходные значения $\langle f_m f_{m-1} \dots f_2 f_1 \rangle$.

3. На каждом входном наборе формируемый вектор $\langle f_m f_{m-1} \dots f_2 f_1 \rangle$ сравнивали с эталонным вектором на данном наборе (формируемом на выходах исправной схемы).

4. Для каждого из четырех кодов, $S(m, k)$, $RS(m, k)$, $WSM(m, k)$ и $WTM(m, k)$, фиксировали тип ошибки (обнаруживаемая или необнаруживаемая), кратность ошибки и ее вид.

Данный алгоритм позволил получить статистические данные о возможностях обнаружения ошибок на выходах каждой контрольной комбинационной схемы различными кодами с суммированием (табл. 4). Для

Таблица 5. Доли необнаруживаемых ошибок $WSM(m, k)$ - и $WTM(m, k)$ -кодами от числа необнаруживаемых ошибок кодами $S(m, k)$ и $RS(m, k)$

Номер схемы	Контрольная схема	Доля необнаруживаемых ошибок			
		$\Psi_S, \%$		$\Psi_{RS}, \%$	
		$WSM(m, k)$	$WTM(m, k)$	$WSM(m, k)$	$WTM(m, k)$
1	<i>cm82a</i>	5,88	5,88	6,25	6,25
2	<i>cm85a</i>	0	0	0	0
3	<i>b1</i>	0	0	—	—
4	<i>cmb</i>	0	0	—	—
5	<i>z4ml</i>	0	6,25	0	12,5
6	<i>cm162a</i>	326,93	311,62	82,8	78,92
7	<i>cm163a</i>	195,68	184,14	72,96	68,66
8	<i>alu2</i>	10,43	25,913	29,981	74,53
9	<i>x2</i>	498,08	98,08	588,64	115,91
10	<i>alu4</i>	16,41	9,59	26,36	15,41
11	<i>cm138a</i>	—	—	—	—
12	<i>f51m</i>	13,01	99,19	41,03	312,82
13	<i>cm42a</i>	0	0	0	0
14	<i>cu</i>	4,51	0,28	4,51	0,28
15	<i>pm1</i>	7,42	22,97	14,43	44,7

каждой из 15 схем в табл. 4 представлены общее число необнаруживаемых ошибок, а также доли необнаруживаемых ошибок различных видов от их общего числа. Как видно из табл. 4, $S(m, k)$ -кодами не обнаруживаются все симметричные ошибки, возникающие на выходах схем, а ошибки других видов обнаруживаются полностью. Для $RS(m, k)$ -кода в классе необнаруживаемых оказываются только монотонные и симметричные ошибки. При этом на выходах некоторых схем данный код, в отличие от кода Бергера, обнаруживает некоторую долю симметричных ошибок. Асимметричные ошибки обнаруживаются $RS(m, k)$ -кодом на основе его свойства, а именно: в классе необнаруживаемых для данного кода могут быть асимметричные ошибки только с четной кратностью $d \geq M + 2$ [43]. При контроле трех схем из 15 $RS(m, k)$ -код обеспечивает 100%-ное обнаружение любых одиночных неисправностей.

При контроле схем кодами $WSM(m, k)$ и $WTM(m, k)$ удастся еще больше улучшить показатели обнаружения ошибок. В случае контроля $WSM(m, k)$ -кодами практически для всех схем, за исключением $f51m$ и $pm1$, эффект достигается за счет обнаружения большого числа симметричных ошибок. Для шести схем из 15 обнаруживаются любые неисправности во внутренней структуре схемы.

Несколько хуже результаты применения $WTM(m, k)$ -кодов — ими не обнаруживается большое число ошибок на выходах контрольных схем, за исключением некоторых случаев, например схем cu и $x2$. Для пяти схем из 15 при контроле $WTM(m, k)$ -кодами удастся обнаружить любые неисправности на выходах логических элементов внутренней структуры.

В табл. 5 приведены доли ψ_S и ψ_{RS} необнаруживаемых ошибок $WSM(m, k)$ - и $WTM(m, k)$ -кодами от числа необнаруживаемых ошибок соответственно кодами $S(m, k)$ и $RS(m, k)$.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что применение взвешенных кодов с суммированием при организации контроля комбинационных схем более эффективно по сравнению с использованием классических и модифицированных кодов Бергера.

Выводы

Предлагаемые способы построения кодов с суммированием позволяют построить коды с минимальным общим числом необнаруживаемых ошибок. Коды $WSM(m, k)$ и $WTM(m, k)$ обладают улучшенными характеристиками обнаружения двукратных ошибок в информационных векторах по сравнению с кодами Бергера и модифицированными кодами с суммированием единичных разрядов. Кроме того, коды $WSM(m, k)$ и $WTM(m, k)$ обнаруживают большее число симметричных ошибок в информационных

векторах, чем известные коды. По сравнению с $RS(m, k)$ -кодом $WSM(m, k)$ - и $WTM(m, k)$ -коды обнаруживают большее число асимметричных ошибок. Недостатком их следует считать наличие большего числа необнаруживаемых монотонных ошибок, чем у $RS(m, k)$ -кода.

При построении надежных дискретных устройств применение кодов с суммированием на основе взвешивания разрядов или переходов между разрядами, обладающих минимальным общим числом необнаруживаемых ошибок в информационных векторах, в значительном числе случаев дает лучшие результаты, чем использование классических и модифицированных кодов с суммированием единичных разрядов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *McCluskey E.J.* Logic Design Principles: With Emphasis on Testable Semicustom Circuits. N.J.: Prentice Hall PTR, 1986, 549 p.
2. *Согомонян Е.С., Слабаков Е.В.* Самопроверяемые устройства и отказоустойчивые системы. М.: Радио и связь, 1989, 208 с.
3. *Сапожников В.В., Сапожников Вл.В.* Самопроверяемые дискретные устройства. СПб: Энергоатомиздат, 1992, 224 с.
4. *Hurst S.L.* VLSI Testing: Digital and Mixed Analogue/Digital Techniques (Circuits, Devices and Systems Series) 1st Edition. London: The Institution of Engineering and Technology, 1998, 552 p.
5. *Nicolaidis M., Zorian Y.* On-Line Testing for VLSI — A Compendium of Approaches // Journal of Electronic Testing: Theory and Applications, 1998, №12, pp. 7-20.
6. *Mitra S., McCluskey E.J.* Which Concurrent Error Detection Scheme to Choose? // Proc. of International Test Conf., 2000. USA, Atlantic City, NJ, 03-05 October 2000, pp. 985-994.
7. *Matrosova A., Levin I., Ostanin S.A.* Self-Checking Synchronous FSM Network Design with Low Overhead // VLSI Design, 2000, Vol. 11, Issue 1, pp. 47-58.
8. *Lala P.K.* Self-Checking and Fault-Tolerant Digital Design. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 2001, 216 p.
9. *Dong H.* Modified Berger Codes for Detection of Unidirectional Errors // IEEE Transaction on Computers, 1984, June, Vol. C-33, pp. 572-575.
10. *Nikolos D.* Invited Paper t-Symmetric and d-Unidirectional ($d > t$) Error-Detecting Cyclic AN Arithmetic Codes // Intern. Journal of Electronics, 1990, Vol. 68, Issue 1, pp. 1-22. DOI: 10.1080/00207219008921143.
11. *Jha N.K.* Totally Self-Checking Checker Designs for Bose-Lin, Bose and Blaum Codes // IEEE Transaction on Computer-Aided Design, 1991, Vol. 10, Issue 1, pp. 136-143. DOI 10.1109/43.62799.
12. *Piestrak S.J.* Design of Self-Testing Checkers for Unidirectional Error Detecting Codes. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 1995, 111 p.
13. *Jha N.K., Gupta S.* Testing of Digital Systems. Cambridge University Press, 2003, 1000 p.
14. *Fujiwara E.* Code Design for Dependable Systems: Theory and Practical Applications. John Wiley & Sons, 2006, 720 p.
15. *Мехов В.Б., Сапожников В.В., Сапожников Вл.В.* Контроль комбинационных схем на основе модифицированных кодов с суммированием // Автоматика и телемеханика, 2008, №8, с. 153-165.

16. *Piestrak S.J., Pillement S, Sentieys O.* Designing Efficient Codecs for Bus-Invert Berger Code for Fully Asymmetric Communication // IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2010, Vol. 57, Issue 10, pp. 777-781. DOI: 10.1109/TCSII.2010.2067773.
17. *Efanov D., Sapozhnikov V., Sapozhnikov Vl., Blyudov A.* On the Problem of Selection of Code with Summation for Combinational Circuit Test Organization // Proc. of 11th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2013). Rostov-on-Don, Russia, September 27-30, 2013, pp. 261-266. DOI 10/1109/EWDTS.2013.6673133.
18. *Dinesh Babu N., Ramani G.* Checkbit Prediction for Logic Functions By Using Dong's Code Method // Intern. Journal of Science and Research (IJSR), 2014, Vol. 3, Issue 11, pp. 946-949.
19. *Chaithra V., Nataraj Urs H.D.* Enhanced Stuck at Zero and Stuck at One Fault Identification in NOC Routers // Intern. Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering, 2016, Vol. 5, Issue 4, pp. 2946-2955. DOI:10.15662/IJAREEIE.2016.0504147.
20. *Berger J.M.* A Note on Error Detection Codes for Asymmetric Channels // Information and Control, 1961, Vol. 4, Issue 1, pp. 68-73. DOI: 10.1016/S0019-9958(61)80037-5.
21. *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, Vol. 5, Issue 5, pp. 19-28.
22. *Matrosova A.Yu., Ostanin S.A.* Self-Checking Synchronous Sequential Circuit Design for Unidirectional Error // Proc. of the IEEE European Test Workshop (ITW'98). 1998, 27-29 May, Sitges, Barcelona, Spain.
23. *Morosow A, Saposhnikov V.V., Saposhnikov Vl.V., Goessel M.* Self-Checking Combinational Circuits with Unidirectionally Independent Outputs // VLSI Design, 1998, Vol. 5, Issue 4, pp. 333-345.
24. *Saposhnikov V.V., Morosov A., Saposhnikov Vl.V., Göessel M.* A New Design Method for Self-Checking Unidirectional Combinational Circuits // Journal of Electronic Testing: Theory and Applications, 1998, Vol. 12, Issue 1-2, pp. 41-53.
25. *Göessel M., Ocheretny V., Sogomonyan E., Marienfeld D.* New Methods of Concurrent Checking: Edition 1. Dordrecht: Springer Science+Business Media B.V., 2008, 184 p.
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. *Блюдов А.А., Ефанов Д.В., Сапожников В.В., Сапожников Вл.В.* Построение модифицированного кода Бергера с минимальным числом необнаруживаемых ошибок информационных разрядов // Электрон. моделирование, 2012, **34**, №6, с. 17-29.
28. *Блюдов А.А., Ефанов Д.В., Сапожников В.В., Сапожников Вл.В.* О кодах с суммированием единичных разрядов в системах функционального контроля // Автоматика и телемеханика, 2014, №8, с. 131-145.
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). Kyev, Ukraine, 2014, September 26-29, pp. 116-125. DOI 10.1109/EWDTS.2014.7027056.
30. *Сапожников В.В., Сапожников Вл.В., Ефанов Д.В.* Построение кодов с суммированием с наименьшим количеством необнаруживаемых симметричных ошибок в информационных векторах // Радиоэлектроника и информатика, 2014, №4, с. 46-55.
31. *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.
32. *Berger J.M.* A Note on Burst Detection Sum Codes // Information and Control, 1961, Vol. 4, Issue 2-3, pp. 297-299. DOI: 1016/S0019-9958(61)80021-7.

33. Das D., Touba N.A. Weight-Based Codes and Their Application to Concurrent Error Detection of Multilevel Circuits // Proc. of the 17th IEEE VLSI Test Symposium. USA, CA, Dana Point, 1999, April 25-29, pp. 370-376.
34. Sapozhnikov V., Sapozhnikov Vl. New Code for Fault Detection in Logic Circuits // Proc. of 4th Intern. Conf. on Unconventional Electromechanical and Electrical Systems. St. Petersburg, Russia, 1999, June 21-24, pp. 693-696.
35. Das D., Touba N.A., Seuring M., Gössel M. Low Cost Concurrent Error Detection Based on Modulo Weight-Based Codes // Proc. of IEEE 6th International On-Line Testing Workshop (IOLTW). Spain, Palma de Mallorca, 2000, July 3-5, pp. 171-176.
36. Mehov V., Sapozhnikov V., Sapozhnikov Vl., Urganskov D. Concurrent Error Detection Based on New Code with Modulo Weighted Transitions between Information Bits // Proc. of 7th IEEE East-West Design & Test Workshop (EWDTW'2007). Erevan, Armenia, 2007, September 25-30, pp. 21-26.
37. 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.
38. Сапожников В.В., Сапожников Вл.В., Ефанов Д.В., Никитин Д.А. Модульно взвешенный код с суммированием для систем технического диагностирования // Информатика и системы управления, 2015, №3, с. 53-62.
39. Sapozhnikov V., Sapozhnikov Vl., Efanov D. et al. Optimum Sum Codes, that Effectively Detect the Errors of Low Multiplicities // RadioElectronics & Informatics, 2015, №1, pp. 17-22.
40. 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.
41. Collection of Digital Design Benchmarks. Режим доступа: <http://ddd.fit.cvut.cz/prj/Benchmarks>.
42. Yang S. Logic Synthesis and Optimization Benchmarks: User Guide: Version 3.0. Microelectronics Center of North Carolina (MCNC), 1991, 88 p.
43. 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.

Поступила 03.04.17

REFERENCES

1. McCluskey, E.J. (1986), Logic design principles: with emphasis on testable semicustom circuits, Prentice Hall PTR, New Jersey, USA.
2. Sogomonyan, E.S. and Slabakov, E.V. (1989), *Samoproveryaemye ustroystva i otkazoustoychivyye sistemy* [Self-checking devices and fault-tolerant systems], Radio i svyaz, Moscow, USSR.
3. Sapozhnikov, V.V. and Sapozhnikov, Vl.V. (1992), *Samoproveryaemye diskretnyye ustroystva* [Self-checking discrete devices], Energoatomizdat, St. Petersburg, Russia.
4. Hurst, S.L. (1998), VLSI testing: digital and mixed analogue/digital techniques (circuits, devices and systems series), 1st edition, The Institution of Engineering and Technology, London, UK.
5. 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.
6. Mitra, S. and McCluskey, E.J. (2000), Which concurrent error detection scheme to choose?, *Proceedings of International Test Conference*, 2000, USA, Atlantic City, NJ, October, 03-05, 2000, pp. 985-994.

7. Matrosova, A., Levin, I. and Ostanin, S.A. (2000), Self-checking synchronous FSM network design with low overhead, *VLSI Design*, Vol. 11, Iss. 1, pp. 47-58.
8. Lala, P.K. (2001), Self-checking and fault-tolerant digital design, Morgan Kaufmann Publishers, San Francisco, USA.
9. Dong, H. (1984), Modified Berger codes for detection of unidirectional errors, *IEEE Transaction on Computers*, Vol. C-33, pp. 572-575.
10. Nikolos, D. (1990), Invited paper t-symmetric and d-unidirectional ($d > t$) error-detecting cyclic AN arithmetic codes, Intern. Journal of Electronics, Vol. 68, Iss. 1, pp. 1-22. DOI: 10.1080/00207219008921143.
11. Jha, N.K. (1991), Totally self-checking checker designs for Bose-Lin, Bose and Blaum codes, *IEEE Transaction on Computer-Aided Design*, Vol. 10, Iss. 1, pp. 136-143. DOI 10.1109/43.62799.
12. Piestrak, S.J. (1995), Design of self-testing checkers for unidirectional error detecting codes. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, Poland.
13. Jha, N.K. and Gupta, S. (2003), Testing of digital systems, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
14. Fujiwara, E. (2006), Code design for dependable systems: Theory and practical applications, John Wiley & Sons, New Jersey, USA.
15. Mekhov, V.B., Sapozhnikov, V.V. and Sapozhnikov, V.I. (2008), "Control of combinational circuits basing on modified sum codes", *Avtomatika i telemekhanika*, no. 8, pp. 153-165.
16. Piestrak, S.J., Pillement, S. and Sentieys, O. (2010), Designing efficient codes for bus-invert Berger code for fully asymmetric communication, *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, Vol. 57, Iss. 10, pp. 777-781. DOI: 10.1109/TCSII.2010.2067773.
17. Efanov, D., Sapozhnikov, V., Sapozhnikov, V.I. and Blyudov, A. (2013), On the problem of selection of code with summation for combinational circuit test organization, *Proceedings of the 11th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2013)*, Rostov-on-Don, Russia, September 27-30, 2013, pp. 261-266. DOI 10.1109/EWDTS.2013.6673133.
18. Dinesh Babu, N. and Ramani, G. (2014), Checkbit prediction for logic functions by using Dong's code method, *International Journal of Science and Research (IJSR)*, Vol. 3, Iss. 11, pp. 946-949.
19. Chaithra, V. and Nataraj Urs, H.D. (2016), Enhanced stuck at zero and stuck at one fault identification in NOC routers, *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, Vol. 5, Iss. 4, pp. 2946-2955. DOI:10.15662/IJAREEIE.2016.0504147.
20. Berger, J.M. (1961), A note on error detecting codes for asymmetric channels, *Information and Control*, Vol. 4, Iss. 1, pp. 68-73. DOI: 10.1016/S0019-9958(61)80037-5.
21. 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.
22. Matrosova, A.Yu. and Ostanin, S.A. (1998), Self-checking synchronous sequential circuit design for unidirectional error, *Proceedings of the IEEE European Test Workshop (ITW'98)*, May 27-29, 1998, Sitges, Barcelona, Spain.
23. Morosow, A., Sapozhnikov, V.V., Sapozhnikov, V.I. and Göessel, M. (1998), Self-Checking Combinational Circuits with Unidirectionally Independent Outputs, *VLSI Design*, Vol. 5, Iss. 4, pp. 333-345.
24. Sapozhnikov, V.V., Morosov, A., Sapozhnikov, V.I. and Göessel, M. (1998), A new design method for self-checking unidirectional combinational circuits, *Journal of Electronic Testing: Theory and Applications*, Vol. 12, Iss. 1-2, pp. 41-53.
25. Göessel, M., Ocheretny, V., Sogomonyan, E. and Marienfeld, D. (2008), New methods of concurrent checking: Edition 1, Springer Science+Business Media B.V., Dodrecht, Germany.
26. Efanov, D.V., Sapozhnikov, V.V. and Sapozhnikov, V.I. (2010), "On sum code properties in concurrent error detection systems, *Avtomatika i telemekhanika*, no. 6, pp. 155-162.

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. Blyudov, A.A., Efanov, D.V., Sapozhnikov, V.V. and Sapozhnikov, VI.V. (2014), "On codes with summation of data bits in concurrent error detection systems, *Avtomatika i telemekhanika*, no. 8, pp. 131-145.
29. Sapozhnikov, V., Sapozhnikov, VI., 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. DOI 10.1109/EWDTS.2014.7027056.
30. Sapozhnikov, V.V., Sapozhnikov, VI.V. and Efanov, D.V. (2014), "Formation of codes with summation with the smallest number of undetectable errors of data bits", *Radioelektronika i informatika*, no. 4, pp. 46-55.
31. Sapozhnikov, V.V., Sapozhnikov, VI.V. and Efanov, D.V. (2016), "Checking of combinational circuits based on sum codes with one weighed data bit", *Avtomatika na transporte*, Vol. 2, no. 4, pp. 564-597.
32. Berger, J.M. (1961), A note on burst detection sum codes, *Information and Control*, Vol. 4, Iss. 2-3, pp. 297-299. DOI: 10.1016/S0019-9958(61)80024-7.
33. Das, D. and Touba, N.A. (1999), Weight-based codes and their application to concurrent error detection of multilevel circuits, *Proceedings of 17th IEEE Test Symposium*, USA, California, April 25-29, 1999, pp. 370-376.
34. Sapozhnikov, V. and Sapozhnikov, VI. (1999), New code for fault detection in logic circuits, *Proceedings of the 4th Intern. Conf. on Unconventional Electromechanical and Electrical Systems*, St. Petersburg, Russia, June 21-24, 1999, pp. 693-696.
35. Das, D., Touba, N.A., Seuring, M. and Göessel, 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.
36. Mehov, V., Sapozhnikov, V., Sapozhnikov, VI. and Urganskov, D. (2007), Concurrent error detection based on new code with modulo weighted transitions between information bits, *Proceedings of the 7th IEEE East-West Design & Test Workshop (EWDTW'2007)*, Erevan, Armenia, September 25-30, 2007, pp. 21-26.
37. 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.
38. Sapozhnikov, V.V., Sapozhnikov, VI.V., Efanov, D.V. and Nikitin, D.A. (2015) "Modulo weighted code with summation for the systems of technical diagnosis", *Informatika i sistemy upravleniya*, no. 3, pp. 53-62.
39. Sapozhnikov, V., Sapozhnikov, VI., Efanov, D. et al. (2015), Optimum sum codes, that effectively detect the errors of low multiplicities, *Radioelectronics and Informatics*, no. 1, pp. 17-22.
40. Sapozhnikov, V.V., Sapozhnikov, VI.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.
41. Collection of digital design benchmarks, available at: <http://ddd.fit.cvut.cz/prj/Benchmarks/>.
42. Yang, S. (1991), Logic synthesis and optimization benchmarks: User Guide: Version 3.0, Microelectronics Center of North Carolina (MCNC), USA.
43. Sapozhnikov, V.V., Sapozhnikov, VI.V. and Efanov, D.V. (2015), "Application of sum codes for synthesis of railway automation and remote control at programmable logic integrated circuits", *Avtomatika na transporte*, Vol. 1, no. 1, pp. 84-107.

Received 03.04.17

V.V. Sapozhnikov, V.I. Sapozhnikov, D.V. Efanov

MODULO WEIGHTED CODES WITH SUMMATION WITH THE MINIMUM NUMBER OF UNDETECTABLE ERRORS IN DATA VECTORS

The paper deals with two ways of code formation with summation; these codes have the minimum number of undetectable errors in data vectors and the same number of check bits as Berger's classic codes. These ways are based on the weighing the bits and transitions between bits taking adjacent positions in the data vectors using natural sequence of weight factors forming a natural number series. Some key error detection features in data vectors of these codes are analyzed; they show the difference of these codes from the Berger codes and their known modifications. Efficiency of the developed codes under the control of errors which appear at the circuit output is shown on the basis of experiments with the monitoring combination circuits.

Keywords: discrete devices, technical diagnostics, Berger code, modified Berger code, error detection.

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.

