

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КОДОВ ХЭММИНГА ПРИ ОРГАНИЗАЦИИ САМОПРОВЕРЯЕМЫХ СХЕМ ВСТРОЕННОГО КОНТРОЛЯ

В. В. САПОЖНИКОВ, Вл. В. САПОЖНИКОВ, Д. В. ЕФАНОВ

*Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I,
190031, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: TrES-4b@yandex.ru*

Анализируются свойства кодов Хэмминга при возникновении ошибок только в информационных разрядах, что актуально при решении задач синтеза дискретных систем с обнаружением неисправностей. Установлены особенности обнаружения ошибок различного вида (монотонных, симметричных и асимметричных) в информационных разрядах кодов Хэмминга. Показано, что доля необнаруживаемых ошибок различного вида при конкретной кратности от общего числа необнаруживаемых ошибок данной кратностью не зависит от количества информационных разрядов и является постоянной величиной. Представлен результат экспериментов с использованием контрольных комбинационных схем, показано, что организация самопроверяемых схем встроенного контроля на основе кодов Хэмминга эффективнее применения стандартной системы дублирования как по сложности технической реализации, так и по обнаружению одиночных константных неисправностей элементов внутренней структуры комбинационных схем.

Ключевые слова: *техническая диагностика, самопроверяемая схема встроенного контроля, обнаружение неисправностей, информационный вектор, ошибка, коды Хэмминга, контрольная комбинационная схема, структурная избыточность*

Введение. Коды Хэмминга, впервые описанные в классической работе [1], широко используются при передаче и обработке информации и при построении компонентов микроэлектронных и микропроцессорных систем автоматики [2—7]. Известны также приложения кодов Хэмминга и при организации надежной передачи информации между устройствами стационарных и бортовых систем управления движением поездов [8, 9]. Коды Хэмминга получили распространение благодаря своему основному свойству — возможности исправлять однократные ошибки и идентифицировать двукратные ошибки.

Коды Хэмминга можно применять и на более „глубоком“ уровне архитектуры управляющих систем. Например, при создании самотестируемых схем и микроэлектронных компонентов с самопроверяемыми схемами встроенного контроля [10—13]. В таких дискретных системах, как правило, необходимо контролировать возникновение сбоя на аппаратном уровне и не допускать передачи неверных результатов вычислений к взаимосвязанным блокам [14, 15]. Эта задача решается за счет использования при организации схемы контроля равномерных двоичных кодов, ориентированных на обнаружение ошибок в информационных разрядах кодовых слов (наиболее часто, равновесных кодов и кодов с суммированием) [16].

Различные равномерные коды обладают разными характеристиками обнаружения ошибок в информационных разрядах и соответственно условия их применения при синтезе самопроверяемых схем встроенного контроля различны. Например, классическими кодами Бергера [17] обнаруживаются любые ошибки в информационных векторах, при которых изменяется неравное количество нулевых и единичных разрядов, что используется при выборе способа выделения контролепригодных групп выходов объекта диагностирования или при модификации его структуры [18—21]. В настоящей статье подробно анализируются характеристики обнаружения кодами Хэмминга ошибок в информационных разрядах. При этом рассматриваются ошибки не только конкретной кратностью, но и различного вида (монотонные, симметричные и асимметричные [22]).

Изложению результатов исследований кодов Хэмминга по обнаружению ошибок в информационных разрядах при организации самопроверяемых схем встроенного контроля посвящено несколько работ [23—26], в каждой из которых анализируются лишь характеристики обнаружения ошибок по кратностям. Настоящая работа восполняет пробел в изучении особенностей кодов Хэмминга в задачах организации схем встроенного контроля, дополняя и расширяя известные свойства.

Особенности организации самопроверяемых схем встроенного контроля. При организации самопроверяемых схем встроенного контроля на основе равномерных кодов, например кодов Бергера или Хэмминга, выходы $F(x)$ объекта диагностирования отождествляются с информационным вектором длиной m , а схема контроля реализуется как устройство вычисления значений разрядов контрольных векторов (рис. 1).

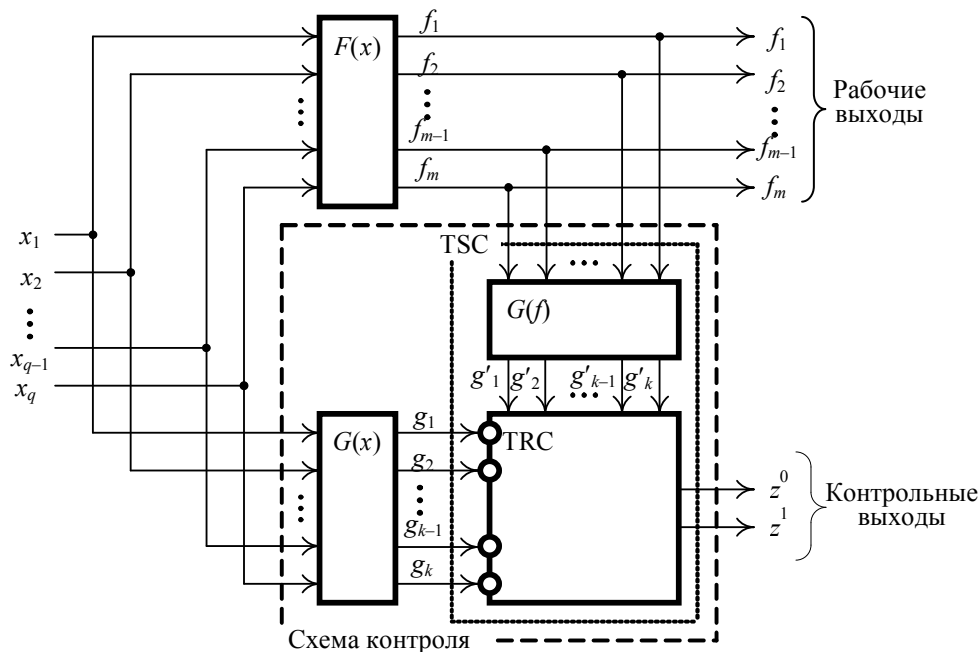


Рис. 1

Блок контрольной логики $G(x)$ вычисляет значения контрольных функций таким образом, что на выходах блоков $F(x)$ и $G(x)$ формируется кодовое слово заранее выбранного кода. Для проверки соответствия значений разрядов информационных и контрольных векторов в схеме контроля устанавливается самопроверяемый тестер TSC [11], наиболее удобно синтезируемый посредством каскадного подключения генератора $G(f)$ контрольных разрядов выбранного кода и самопроверяемого компаратора TRC, реализованного на основе модулей сжатия парафазных сигналов [27]. Генератор $G(f)$ по информационному вектору, поступающему от блока $F(x)$, формирует значения разрядов контрольного вектора $\langle g'_k g'_{k-1} \dots g'_2 g'_1 \rangle$, а компаратор TRC поразрядно сравнивает этот вектор с контрольным вектором

$\langle g_k g_{k-1} \dots g_2 g_1 \rangle$, сформированным блоком $G(x)$. Значения контрольных функций, формируемые блоком $G(x)$, предварительно инвертируются. Таким образом, на входы компаратора поступают парафазные сигналы вида $\langle \overline{g'_i g_i} \rangle$, $i = \overline{1, k}$, что позволяет на его выходе получать единственный контрольный парафазный сигнал $\langle z^0 z^1 \rangle$. Если неисправность в каком-либо из блоков системы диагностирования ($F(x)$, $G(x)$ или $G(f)$) нарушает парафазность как минимум одной пары входов компаратора $\langle \overline{g'_i g_i} \rangle$ хотя бы на одном входном наборе, то это приводит к установлению на выходах $\langle z^0 z^1 \rangle$ непарафазного сигнала $\langle 00 \rangle$ или $\langle 11 \rangle$. То же самое происходит при появлении неисправности в элементах внутренней структуры самого компаратора.

Как правило, при организации самопроверяемых схем встроенного контроля используются модели одиночных константных неисправностей на выходах внутренних элементов блоков системы диагностирования. Такие модели покрывают до 80—95 % реальных физических дефектов в зависимости от технологии изготовления устройства [28]. Так как блоки $F(x)$ и $G(x)$ реализуются отдельно, одиночная константная неисправность не может вызвать искажений одновременно в информационном и контрольном векторах. Структуры функциональных блоков могут быть таковы, что неисправности будут вызывать на их выходах ошибки различного вида и разных кратностей. Характеристики обнаружения ошибок кодом, выбранным на этапе проектирования схемы встроенного контроля, определяют и особенности обнаружения ошибок в объекте диагностирования.

Характеристики обнаружения ошибок кодами Хэмминга. Коды Хэмминга (обозначим их как $H(m,k)$ -коды, где m и k — количество информационных и контрольных разрядов) строятся следующим образом. В кодовом слове выделяются позиции с номерами 2^j , $j=0,1,2,\dots (2^j \leq m)$, для контрольных разрядов. Каждый контрольный разряд вычисляется как свертка по модулю два тех информационных разрядов, в двоичном эквиваленте десятичных номеров которых на j -м месте стоит единица. К примеру, в табл. 1 представлено расположение информационных и контрольных разрядов для $H(4,3)$ -кода. Другим способом задания кода Хэмминга является матричная форма, эквивалентная описанной [3].

Таблица 1

Десятичный номер разряда	1	2	3	4	5	6	7
Двоичный номер разряда	00	01	01	10	10	11	11
	1	0	1	0	1	0	1
Контрольные разряды	g_1	g_2		g_3			
Информационные разряды			f_1		f_2	f_3	f_4

Согласно правилам построения, значения контрольных разрядов $H(4,3)$ -кода вычисляются по формулам

$$\begin{aligned}
 g_1 &= f_1 \oplus f_2 \oplus f_4; \\
 g_2 &= f_1 \oplus f_3 \oplus f_4, \\
 g_3 &= f_2 \oplus f_3 \oplus f_4.
 \end{aligned}$$

Поскольку далее речь идет об анализе характеристик обнаружения ошибок кодами Хэмминга при их возникновении только в информационных разрядах, будем условно объединять разряды в информационный вектор длиной m .

Для анализа характеристик обнаружения ошибок в информационных векторах отдельных кодов целесообразно задавать код в виде таблицы распределения всех информационных векторов на контрольные группы, соответствующие контрольным векторам. Тогда необнаруживаемым ошибкам в информационных векторах кодов будут соответствовать все парные

переходы между этими векторами одной контрольной группы. Анализируя каждую контрольную группу, можно выявить особенности — количество, кратность и вид — необнаруживаемых кодом ошибок. В табл. 2 задан $H(5,4)$ -код. В каждой контрольной группе таблицы выявлены по 2 необнаруживаемые ошибки кратностью $d=3$, всего 8 монотонных и 24 асимметричные необнаруживаемые ошибки.

Таблица 2

Контрольные группы							
0000	0001	0010	0011	0100	0101	0110	0111
Информационные векторы							
00000	00111	01110	01001	01010	01101	00100	00011
11100	11011	10010	10101	10110	10001	11000	11111
Количество и вид необнаруживаемых ошибок							
2 Моно- тонные	2 Асим- метричные	2 Асим- метричные	2 Асим- метричные	2 Асим- метричные	2 Асим- метричные	2 Асим- метричные	2 Моно- тонные
Контрольные группы							
1000	1001	1010	1011	1100	1101	1110	1111
Информационные векторы							
00110	00001	01000	01111	01100	01011	00010	00101
11010	11101	10100	10011	10000	10111	11110	11001
Количество и вид необнаруживаемых ошибок							
2 Асим- метричные	2 Моно- тонные	2 Асим- метричные	2 Асим- метричные	2 Асим- метричные	2 Асим- метричные	2 Моно- тонные	2 Асим- метрич- ные

Количество необнаруживаемых кодами Хэмминга ошибок различного вида приведено в табл. 3. Известно [3], что в классе необнаруживаемых могут быть только ошибки кратностью $d \geq 3$. В табл. 4 приведены характеристики необнаруживаемых ошибок, а именно: γ_m — доля необнаруживаемых ошибок от их общего количества; ν_m , σ_m и α_m — доли необнаруживаемых соответственно монотонных, симметричных и асимметричных ошибок от их общего количества.

Таблица 3

m	k	Общее количество ошибок	Общее количество необнаруживаемых ошибок	Общее количество необнаруживаемых ошибок по видам		
				монотонные	симметричные	асимметричные
3	3	56	8	2	0	6
4	3	240	16	4	0	12
5	4	992	32	8	0	24
6	4	4032	192	40	24	128
7	4	16256	896	128	144	624
8	4	65280	3840	532	640	2668
9	4	261632	15872	1784	2688	11400
10	4	1047552	64512	5890	10812	47810
11	4	4192256	260096	18908	42584	198604
12	5	16773120	520192	37816	85168	397208
13	5	67100672	2088960	97988	320696	1670276
14	5	268419072	8372224	282808	1242832	6846584
15	5	1073709056	33521664	854300	4824336	27843028
16	5	4294901760	134152192	2589880	18736800	112825512
17	5	17179738112	536739840	7853408	72831872	456054560
18	5	68719214592	2147221504	23757568	283417744	1840046192
19	5	274877382656	8589410304	71718260	1104146264	7413545780
20	5	1099510579200	34358689792	216839044	4306933152	29834917596

Таблица 4

m	k	$\gamma_m, \%$	$\upsilon_m, \%$	$\sigma_m, \%$	$\alpha_m, \%$
3	3	14,286	3,571	0	10,714
4	3	6,667	1,667	0	5
5	4	3,226	0,806	0	2,419
6	4	4,762	0,992	0,595	3,175
7	4	5,512	0,787	0,886	3,839
8	4	5,882	0,815	0,98	4,087
9	4	6,067	0,682	1,027	4,357
10	4	6,158	0,562	1,032	4,564
11	4	6,204	0,451	1,016	4,737
12	5	3,101	0,225	0,508	2,368
13	5	3,113	0,146	0,478	2,489
14	5	3,119	0,105	0,463	2,551
15	5	3,122	0,08	0,449	2,593
16	5	3,124	0,06	0,436	2,627
17	5	3,124	0,046	0,424	2,655
18	5	3,125	0,035	0,412	2,678
19	5	3,125	0,026	0,402	2,697
20	5	3,125	0,02	0,392	2,713

Следует отметить важное свойство кодов Хэмминга: их информационные векторы равномерно распределены между всеми контрольными векторами, что характеризует данные коды как коды с наименьшим общим количеством необнаруживаемых ошибок при конкретных значениях m и k . Величина γ_m для $H(m,k)$ -кодов — это минимальная нижняя граница количества необнаруживаемых ошибок для любых разделимых кодов с аналогичным соотношением m и k . Абсолютное большинство необнаруживаемых $H(m,k)$ -кодами ошибок — это асимметричные ошибки: $\alpha_m > 60 \%$ для любого значения m (рис. 2). Необнаруживаемые ошибки других видов встречаются реже. Особенностью $H(m,k)$ -кодов является 100 %-ное обнаружение симметричных ошибок при $m \leq 5$. При $m > 5$ некоторое количество симметричных ошибок кратностью $d \geq 4$ не обнаруживается.

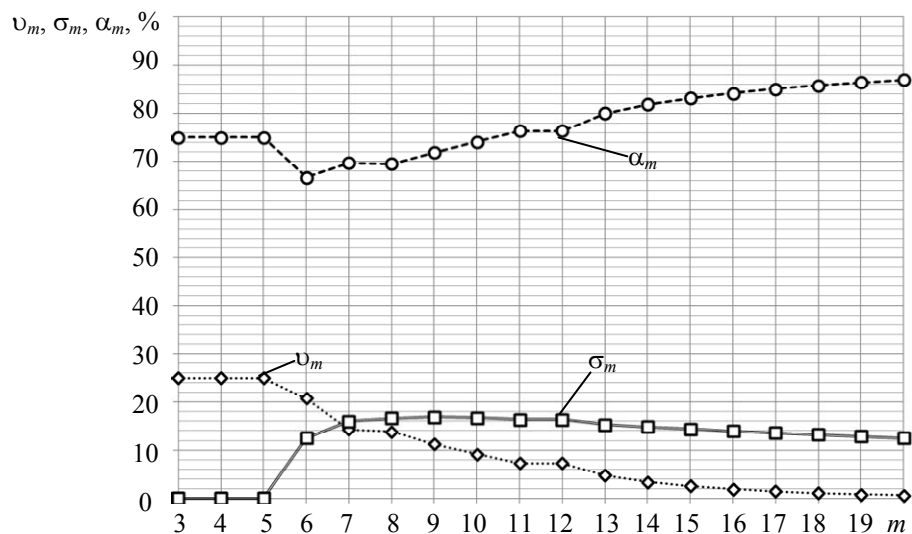


Рис. 2

В табл. 5 и 6 приводятся характеристики необнаруживаемых ошибок в информационных векторах $H(m,k)$ -кодов по кратностям. Наибольший интерес для синтеза дискретных систем представляют ошибки малой кратностью, поэтому в таблицах приведены данные только

для ошибок кратностью $d \leq 8$. При малых значениях длины информационного вектора ($m \leq 6$) основными среди необнаруживаемых являются трехкратные ошибки, с увеличением значения m доминируют ошибки большей кратностью. При $m \leq 15$ свыше 70 % необнаруживаемых ошибок составляют ошибки кратностью $d=3 \dots 8$.

Таблица 5

m	k	Общее количество необнаруживаемых ошибок	Количество необнаруживаемых ошибок кратностью d					
			3	4	5	6	7	8
3	3	8	8	–	–	–	–	–
4	3	16	16	0	–	–	–	–
5	4	32	32	0	0	–	–	–
6	4	192	128	64	0	0	–	–
7	4	896	256	384	256	0	0	–
8	4	3840	1280	1280	512	512	256	0
9	4	15872	3584	4608	3072	3072	1536	0
10	4	64512	10240	15360	12288	15360	10240	0
11	4	260096	26624	51200	51200	55296	47104	20480
12	5	520192	53248	102400	102400	110592	94208	40960
13	5	2088960	114688	237568	278528	376832	442368	335872
14	5	8372224	229376	606208	983040	1376256	1703936	1687552
15	5	33521664	557056	1572864	2850816	4882432	6881280	6848512
16	5	134152192	1245184	4194304	8716288	15794176	23986176	26804224
17	5	536739840	2883584	11141120	24903680	48758784	81788928	100007936
18	5	2147221504	6553600	29622272	69730304	143130624	266076160	365166592
19	5	8589410304	16777216	71827456	187695104	429391872	836763648	1251475456
20	5	34358689792	47185920	184549376	473956352	1203765248	2592079872	4221566976

Таблица 6

m	k	Доли необнаруживаемых ошибок кратностью d от общего количества необнаруживаемых ошибок, %						
		3	4	5	6	7	8	3 ÷ 8
3	3	100	–	–	–	–	–	100
4	3	100	0	–	–	–	–	100
5	4	100	0	0	–	–	–	100
6	4	66,667	33,333	0	0	–	–	100
7	4	28,571	42,857	28,571	0	0	–	100
8	4	33,333	33,333	13,333	13,333	6,667	0	100
9	4	22,581	29,032	19,355	19,355	9,677	0	100
10	4	15,873	23,81	19,048	23,81	15,873	0	98,414
11	4	10,236	19,685	19,685	21,26	18,11	7,874	96,85
12	5	10,236	19,685	19,685	21,26	18,11	7,874	96,85
13	5	5,49	11,373	13,333	18,039	21,176	16,078	85,489
14	5	2,74	7,241	11,742	16,438	20,352	20,157	78,67
15	5	1,662	4,692	8,504	14,565	20,528	20,43	70,381
16	5	0,928	3,127	6,497	11,773	17,88	19,98	60,185
17	5	0,537	2,076	4,64	9,084	15,238	18,632	50,207
18	5	0,305	1,38	3,247	6,666	12,392	17,006	40,996
19	5	0,195	0,836	2,185	4,999	9,742	14,57	32,527
20	5	0,137	0,537	1,379	3,504	7,544	12,287	25,388

Отметим важное свойство, присущее кодам Хэмминга, учет которого может оказаться полезным при решении задач построения самопроверяемых схем встроенного контроля. Доля

необнаруживаемых ошибок различного вида при конкретной кратности от общего количества необнаруживаемых ошибок данной кратностью не зависит от длины информационного вектора и является постоянной величиной.

В табл. 7 и на рис. 3 представлены численные соотношения между ошибками различного вида при конкретной кратности, здесь введены обозначения: $\upsilon_{m,d}$, $\sigma_{m,d}$, $\alpha_{m,d}$ — доля необнаруживаемых монотонных, симметричных и асимметричных ошибок конкретной кратностью d соответственно от общего количества ошибок данной кратностью. Из приведенных данных следует, что $\upsilon_{m,d} < 1\%$ при $m \geq 8$ и любом значении d . При нечетном d максимальное количество среди необнаруживаемых ошибок составляют асимметричные ошибки; при четном d наблюдается некоторая, существенная, доля симметричных ошибок в классе необнаруживаемых. В целом тенденция такова: с увеличением значения d доля асимметричных ошибок в классе необнаруживаемых кодами Хэмминга увеличивается, а симметричных и монотонных — уменьшается.

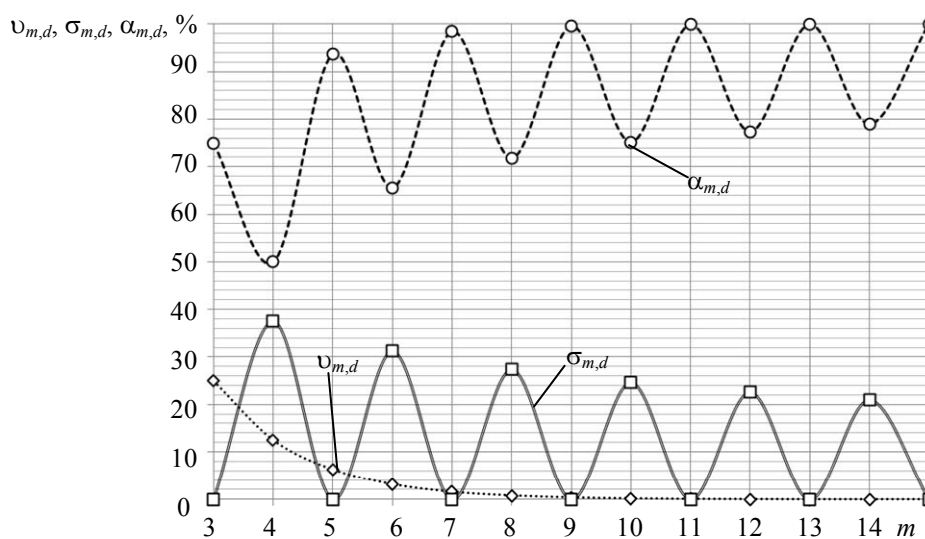


Рис. 3

Таблица 7

d	Длина информационного вектора*	$\upsilon_{m,d}$, %	$\sigma_{m,d}$, %	$\alpha_{m,d}$, %
3	$m \geq 3$	25	0	75
4	$m \geq 6$	12,5	37,5	50
5	$m \geq 7$	6,25	0	93,75
6	$m \geq 8$	3,125	31,25	65,625
7	$m \geq 8$	1,563	0	98,438
8	$m \geq 11$	0,781	27,344	71,875
9	$m \geq 11$	0,391	0	99,609
10	$m \geq 10$	0,195	24,609	75,195
11	$m \geq 13$	0,098	0	99,902
12	$m \geq 13$	0,049	22,559	77,393
13	$m \geq 15$	0,024	0	99,976
14	$m \geq 15$	0,012	20,947	79,041
15	$m \geq 17$	0,006	0	99,994

* Примечание. В данной графе указаны значения m , при которых возможно возникновение необнаруживаемых ошибок конкретной кратностью.

Представленные данные существенно расширяют результаты исследований [23—26] и позволяют при разработке самопроверяемых схем встроенного контроля обоснованно выбирать код исходя из особенностей топологии объекта диагностирования.

Экспериментальные исследования. В ходе исследований особенностей кодов Хэмминга при организации самопроверяемых схем встроенного контроля был проведен ряд экспериментов с использованием систем контрольных логических схем из наборов LGSynth`89 и MCNC Benchmarks, предназначенных для оценки эффективности разрабатываемых методов технической диагностики дискретных систем [29]. Эксперименты проводились в два этапа.

На первом этапе требовалось оценить эффективность применения $H(m,k)$ -кодов по показателю обнаружения ошибок на выходах контрольных комбинационных схем из набора LGSynth`89. В этом наборе схемы представлены, в том числе, в формате *.netblif, имеющем вид списочной формы задания контрольной схемы, и реализованы с использованием инверторов и элементов ИЛИ-НЕ с 2, 3 или 4 входами. В ходе эксперимента был разработан специальный программный модуль, позволяющий для каждой контрольной схемы моделировать последовательно одиночные константные неисправности выходов всех логических элементов и определять реакцию выходного вектора $\langle f_m f_{m-1} \dots f_2 f_1 \rangle$ на каждую неисправность при подаче на входы схемы всех возможных векторов $\langle x_q x_{q-1} \dots x_2 x_1 \rangle$. Это позволило для каждой логической схемы определить характеристики обнаружения возникающих на ее выходах ошибок. Полученные результаты сведены в табл. 8, где I и O — количество входов и выходов для каждой контрольной схемы.

Таблица 8

Но- мер схе- мы	Назва- ние схемы	I	O	Количество ошибок	Доля ошибок по видам, %				Доля ошибок по кратностям, %		
					одно- кратные	моно- тонные	симмет- ричные	асим- метрич- ные	$d=2$	$d=3$	$d \geq 4$
1	cm82a	5	3	648	88,889	0	10,494	0,617	10,494	0,617	—
2	cm85a	11	3	30912	99,431	0	0,569	0	0,569	0	—
3	b1	3	4	46	95,652	0	4,348	0	4,348	0	0
4	cmb	16	4	288218	86,308	13,69	0,002	0	13,692	0	0
5	z4ml	7	4	4168	96,161	0	3,071	0,768	3,071	0,768	0
6	cm162a	14	5	317331	78,261	20,71	0,605	0,424	11,939	7,562	2,238
7	cm163a	16	5	1221312	80,868	17,686	0,849	0,597	10,816	6,524	1,792
8	alu2	10	6	62838	73,879	9,606	12,289	4,227	19,649	5,899	0,573
9	x2	10	7	19708	84,352	14,512	0,528	0,609	12,32	2,76	0,568
10	alu4	14	8	1980377	72,468	10,956	9,457	7,119	15,326	7,706	4,5
11	cm138a	6	8	680	100	0	0	0	0	0	0
12	f51m	8	8	13264	92,619	5,805	0,927	0,648	6,461	0,694	0,226
13	pcl	19	9	17472087	89,839	8,289	1,078	0,794	2,827	2,565	4,769
14	cm42a	4	10	278	97,122	0	2,878	0	2,878	0	0
15	cu	14	11	137984	53,455	19,828	24,675	2,041	44,063	1,693	0,789
16	pm1	16	13	757760	92,128	1,588	3,615	2,669	4,966	2,095	0,811
17	sct	19	15	16586128	93,987	1,417	1,448	3,149	1,485	1,268	3,26
18	decod	5	16	224	100	0	0	0	0	0	0
19	tcon	17	16	4849664	100	0	0	0	0	0	0
20	pcler8	27	17	4331229952	74,39	23,873	0,909	0,828	15,615	2,754	7,241
21	ldd	9	19	30182	74,475	25,525	0	0	9,347	4,798	11,38
22	cc	21	20	35167192	83,534	9,045	5,32	2,101	6,386	2,989	7,091
23	ttt2	24	21	755063504	94,417	2,546	1,852	1,185	3,976	0,985	0,622

В табл. 9 представлены характеристики обнаружения ошибок на выходах контрольных логических схем при использовании для контроля $H(m,k)$ -кодов. Для 10 контрольных схем из 23 обнаружены любые ошибки в информационном векторе $\langle f_m f_{m-1} \dots f_2 f_1 \rangle$; для оставшихся схем доля необнаруживаемых ошибок от общего их количества составляет менее 1 %. Срав-

нительный анализ табл. 8 и 9 показывает: использование кода Хэмминга максимально эффективно для схем с большим количеством симметричных ошибок, а также ошибок малой кратностью.

Таблица 9

Но- мер схе- мы	Назва- ние схемы	I	O	Количес- тво необ- наружи- ваемых ошибок	Доля необна- руживаемых ошибок от их общего числа, %	Доля необнаруживаемых ошибок от общего количе- ства ошибок данного вида, %			Доля необнару- живаемых оши- бок кратностью d от общего коли- чества необна- руживаемых ошибок, %	
						моно- тонные	симмет- ричные	асим- мет- ричные	$d=3$	$d \geq 4$
1	cm82a	5	3	4	0,617	0	0	100	100	0
2	cm85a	11	3	0	0	0	0	–	–	–
3	b1	3	4	0	0	0	0	–	–	–
4	cmb	16	4	0	0	0	0	–	–	–
5	z4ml	7	4	0	0	0	0	0	–	–
6	cm162a	14	5	224	0,071	0,071	0	0	100	0
7	cm163a	16	5	0	0	0	0	0	–	–
8	alu2	10	6	37	0,059	0,008	0	1,242	100	0
9	x2	10	7	88	0,447	0,452	0	0	72,727	27,273
10	alu4	14	8	4069	0,205	0,058	0	2,202	100	0
11	cm138a	6	8	0	0	0	–	–	–	–
12	f51m	8	8	2	0,015	0,008	0	1,163	100	0
13	pclе	19	9	94871	0,543	0,47	0	10,332	49,574	50,426
14	cm42a	4	10	0	0	0	0	–	–	–
15	cu	14	11	0	0	0	0	0	–	–
16	pm1	16	13	1792	0,236	0	0	8,861	100	0
17	sct	19	15	24212	0,146	0,006	2,372	3,354	32,959	67,041
18	decod	5	16	0	0	0	–	–	–	–
19	tcon	17	16	0	0	0	–	–	–	–
20	pcler8	27	17	25391968	0,586	0,52	0	9,134	45,67	54,33
21	ldd	9	19	96	0,318	0,318	–	–	0	100
22	cc	21	20	99640	0,283	0,265	0,239	1,204	17,864	82,136
23	ttt2	24	21	99120	0,013	0	0	1,108	100	0

На втором этапе эксперимента оценивалась сложность технической реализации самопроверяемых схем встроенного контроля с применением стандартной библиотеки функциональных элементов stdcell2_2.genlib и интерпретатора SIS [30]. С помощью разработанного программного модуля были получены все файлы-описания элементов системы диагностирования (см. рис. 1), а с использованием SIS произведена обработка этих файлов и вычислен условный показатель площади, занимаемой устройством на кристалле (в относительных единицах библиотеки stdcell2_2.genlib). Был произведен сравнительный анализ применения кодов Хэмминга и метода дублирования. Для каждой контрольной схемы был рассчитан показатель μ , характеризующий долю площади, занимаемой на кристалле системой диагностирования на основе кодов Хэмминга, от площади, занимаемой на кристалле системой дублирования. Практически для всех схем этот показатель менее 100 % (за исключением схем dc2 и dk17), что говорит о преимуществе системы диагностирования на основе кодов Хэмминга. Данные, полученные в ходе экспериментов, представлены в табл. 10 и на рис. 4.

Таблица 10

Номер схемы	Контрольная схема	I	O	Площадь устройства, о.е.			μ , %
				$F(x)$	Система дублирования	Система на основе кодов Хэмминга	
1	newcond	11	2	1136	2496	1704	68,269
2	sqn	7	3	2008	4448	4152	93,345
3	newtpla2	10	4	840	2320	2152	92,759
4	dist	8	5	6968	14784	14400	97,403
5	root	8	5	3496	7840	6728	85,816
6	max512	9	6	9632	20320	17384	85,551
7	max1024	10	6	17816	36688	33168	90,406
8	dc1	4	7	976	3216	2696	83,831
9	dc2	8	7	2424	6112	7192	117,67
10	dekoder	4	7	736	2736	2528	92,398
11	wim	4	7	712	2688	2528	94,048
12	br1	12	8	3608	8688	6576	75,691
13	br2	12	8	2952	7376	5712	77,44
14	newbyte	5	8	592	2656	2504	94,277
15	t3	12	8	1768	5008	4840	96,645
16	inc	7	9	2376	6432	5456	84,826
17	ex1010	10	10	43296	88480	83000	93,807
18	newcpla2	7	10	1096	4080	3776	92,549
19	b10	15	11	9168	20432	17944	87,823
20	dk17	10	11	1768	5632	6304	111,932
21	gary	15	11	10688	23472	20504	87,355
22	in0	15	11	10704	23504	20520	87,304
23	m1	6	12	3064	8432	6144	72,865
24	sqr6	6	12	2648	7600	7368	96,947
25	p82	5	14	2368	7456	5904	79,185
26	m2	8	16	10096	23328	14880	63,786
27	m3	8	16	13464	30064	19216	63,917
28	m4	8	16	18704	40544	26616	65,647
29	tms	8	16	6784	16704	11232	67,241
30	b2	16	17	40952	85248	53848	63,166
Среднее значение							85,463

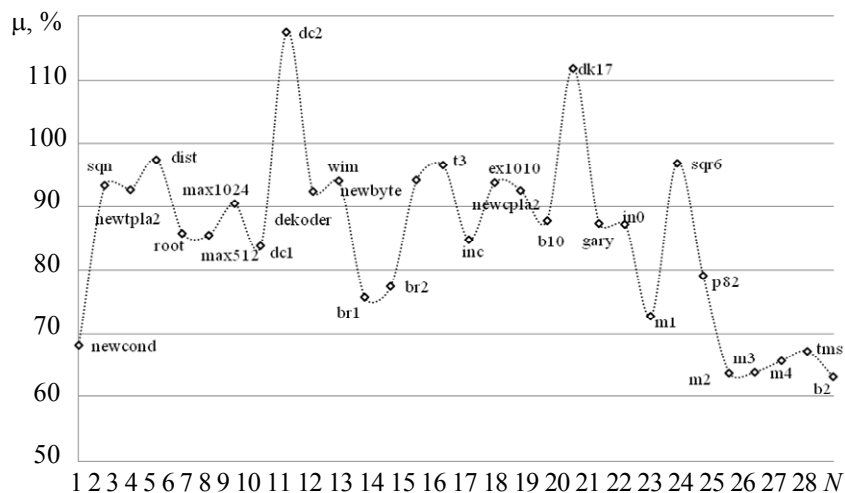


Рис. 4

Выводом из представленных результатов экспериментов по оценке показателей обнаружения ошибок кодами Хэмминга и сложности технической реализации схем контроля на их основе является высокая эффективность использования данного класса кодов для решения поставленных задач.

Заключение. Коды Хэмминга, нашедшие широкое применение в сфере коммуникаций, могут эффективно использоваться и в задачах построения систем с обнаружением отказов — самопроверяемых схем встроенного контроля. В статье впервые установлены характеристики обнаружения кодами Хэмминга ошибок по различным их видам в информационных разрядах, представлены основные особенности и закономерности, учет которых позволяет выбрать наиболее эффективный способ организации схем контроля. Как следует из результатов экспериментов, применение кодов Хэмминга в задачах организации самопроверяемых схем встроенного контроля во многих случаях позволяет строить системы с обнаружением 100% одиночных константных неисправностей выходов внутренних логических элементов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hamming R. W. Error detecting and correcting codes // Bell System Technical Journal. 1950. N 29 (2). P. 147—160.
2. MacWilliams F. J., Sloane N. J. A. The Theory of Error-Correcting Codes. Amsterdam: North-Holland, 1977. 785 p.
3. Hamming R. W. Coding and Information Theory. N. Y.: Prentice-Hall, 1986. 272 p.
4. Сагалович Ю. Л. Об одном свойстве кода Хэмминга // Проблемы передачи информации. 1988. Т. 24, № 1. С. 79—81.
5. McCluskey E. J. Logic Design Principles: With Emphasis on Testable Semicustom Circuits. New Jersey: Prentice Hall PTR, 1986. 549 p.
6. Fujiwara E. Code Design for Dependable Systems: Theory and Practical Applications. New Jersey: John Wiley & Sons, 2006. 720 p.
7. Сагалович Ю. Л. Введение в алгебраические коды: Учеб. пособие для вузов. М.: ИППИ РАН, 2010. 302 с.
8. Системы управления движением поездов на перегонах: Учебник для вузов / В. М. Лисенков, П. Ф. Бестемьянов, В. Б. Леушин, А. В. Лисенков, А. Е. Ваньшин; Под ред. В. М. Лисенкова. М.: ГОУ „Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте“, 2009. Ч. 2. 324 с.
9. Ефанов Д. В., Блюдов А. А. Повышение надежности датчиков контроля положения железнодорожных стрелок // Изв. Петербург. ун-та путей сообщения. 2014. № 3. С. 69—77.
10. Согомонян Е. С., Слабаков Е. В. Самопроверяемые устройства и отказоустойчивые системы. М.: Радио и связь, 1989. 208 с.
11. Сапожников В. В., Сапожников Вл. В. Самопроверяемые дискретные устройства. СПб: Энергоатомиздат, 1992. 224 с.
12. Matrosova A., Ostanin S., Kirienko I., Nikolaeva E. Fault-tolerant high performance scheme design // Proc. of the 13th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2015), Batumi, Georgia, 26—29 Sept., 2015. P. 286—289. DOI: 10.1109/EWDTS.2015.7493129.
13. Аксенова Г. П. Сжатие тестовой реакции при самотестировании в программируемых логических матрицах // Автоматика и телемеханика. 2013. № 2. С. 124—138.
14. Дрозд А. В., Харченко В. С., Антощук С. Г., Дрозд Ю. В., Дрозд М. А., Сулима Ю. Ю. Рабочее диагностирование безопасных информационно-управляющих систем / Под ред. А. В. Дрозда и В. С. Харченко. Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского „ХАИ“, 2012. 614 с.
15. Kharchenko V., Kondratenko Yu., Kasprzyk J. Green IT engineering: concepts, models, complex systems architectures // Springer Book Ser. „Studies in Systems, Decision and Control“. 2017. Vol. 74. 305 p. DOI: 10.1007/978-3-319-44162-7.
16. Nicolaidis M., Zorian Y. On-Line Testing for VLSI – a compendium of approaches // J. of Electronic Testing: Theory and Application. 1998. Vol. 12, is. 1—2. P. 7—20. DOI: 10.1023/A:1008244815697.

17. *Berger J. M.* A note on error detecting codes for asymmetric channels // *Information and Control*. 1961. Vol. 4, is. 1. P. 68—73. DOI:10.1016/S0019-9958(61)80037-5.
18. *Busaba F. Y., Lala P. K.* Self-checking combinational circuit design for single and unidirectional multibit errors // *J. of Electronic Testing: Theory and Applications*. 1994. Vol. 5, is. 1. P. 19—28. DOI: 10.1007/BF00971960.
19. *Morosow A., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V., Goessel M.* Self-checking combinational circuits with unidirectionally independent outputs // *VLSI Design*. 1998. Vol. 5, is. 4. P. 333—345. DOI: 10.1155/1998/20389.
20. *Matrosova A. Yu., Levin I., Ostanin S. A.* Self-checking synchronous FSM network design with low overhead // *VLSI Design*. 2000. Vol. 11, is. 1. P. 47—58. DOI:10.1155/2000/46578.
21. *Ефанов Д. В., Сапожников В. В., Сапожников Вл. В.* Условия обнаружения неисправности логического элемента в комбинационном устройстве при функциональном контроле на основе кода Бергера // *Автоматика и телемеханика*. 2017. № 5. С. 152—165.
22. *Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В.* Классификация ошибок в информационных векторах систематических кодов // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2015. Т. 58, № 5. С. 333—343. DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-5-333-343.
23. *Ефанов Д. В.* Предельные свойства кода Хэмминга в схемах функционального диагностирования // *Информатика и системы управления*. 2011. № 3. С. 70—79.
24. *Ефанов Д. В., Блюдов А. А.* Коды Хэмминга и их обнаруживающие способности в схемах функционального контроля // *Информатика и системы управления*. 2012. № 2. С. 100—111.
25. *Sapozhnikov V., Sapozhnikov Vl., Efanov D., Blyudov A.* Analysis of error-detection possibilities of CED circuits based on Hamming and Berger codes // *Proc. of the 11th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDT'S'2013), Rostov-on-Don, Russia, 27—30 Sept., 2013*. P. 200—207. DOI: 10.1109/EWDT'S.2013.6673097.
26. *Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В.* Исследование свойств кодов Хэмминга и их модификаций в системах функционального контроля // *Автоматика на транспорте*. 2015. Т. 1, № 3. С. 311—337.
27. *Huches J. L. A., McCluskey E. J., Lu D. J.* Design of totally self-checking comparators with an arbitrary number of inputs // *IEEE Transact. on Computers*. 1984. Vol. C-33, N 6. P. 546—550.
28. *Пархоменко П. П., Согомонян Е. С.* Основы технической диагностики (оптимизация алгоритмов диагностирования, аппаратурные средства). М.: Энергоатомиздат, 1981. 320 с.
29. Collection of Digital Design Benchmarks [Электронный ресурс]: <<http://ddd.fit.cvut.cz/prj/Benchmarks/>>.
30. SIS: A System for Sequential Circuit Synthesis / *E. M. Sentovich, K. J. Singh, L. Lavagno, C. Moon, R. Murgai, A. Saldanha, H. Savoj, P. R. Stephan, R. K. Brayton, A. Sangiovanni-Vincentelli* // *Rep.*, 4 May, 1992; Univ. of California, Berkeley, 45 p.

Сведения об авторах

- Валерий Владимирович Сапожников** — д-р техн. наук, профессор; Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, кафедра автоматки и телемеханики на железных дорогах;
E-mail: port.at.pgups@gmail.com
- Владимир Владимирович Сапожников** — д-р техн. наук, профессор; Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, кафедра автоматки и телемеханики на железных дорогах;
E-mail: at.pgups@gmail.com
- Дмитрий Викторович Ефанов** — канд. техн. наук, доцент; Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, кафедра автоматки и телемеханики на железных дорогах;
E-mail: TrES-4b@yandex.ru

Поступила в редакцию
17.05.17 г.

Ссылка для цитирования: Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В. Особенности применения кодов Хэмминга при организации самопроверяемых схем встроенного контроля // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2018. Т. 61, № 1. С. 47—59.

**FEATURES OF HAMMING CODES APPLICATION
IN SELF-CHECKING TEST CIRCUIT ORGANIZATION****V. V. Sapozhnikov, VI. V. Sapozhnikov, D. V. Efanov***Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,
190031, St. Petersburg, Russia
E-mail: TrES-4b@yandex.ru*

Hamming code properties are analyzed for the case of error occurrence in data bits only; it is actual for the solutions of error detecting systems synthesis. Features of detection of different type (monotonous, symmetric, asymmetric) errors in Hamming code data bits are described. It is shown that ratio of different type of undetectable errors of given multiplicity to the total number of undetectable errors of given multiplicity does not depend on data vector length and is a constant. Results of benchmark experiments demonstrate that application of Hamming code for the organization of self-checking test circuits may be more effective than the use of standard duplication circuit both for technical implementation complexity and for detection of single faults of circuit's inner structure.

Keywords: technical diagnostic, concurrent error detection circuits, error detection, data vector, error, Hamming code, combination test circuit, structural redundancy

Data on authors

- Valery V. Sapozhnikov** — Dr. Sci., Professor; Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Department of Automation and Remote Control on Railways; E-mail: port.at.pgups@gmail.com
- Vladimir V. Sapozhnikov** — Dr. Sci., Professor; Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Department of Automation and Remote Control on Railways; E-mail: at.pgups@gmail.com
- Dmitry V. Efanov** — PhD, Associate Professor; Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Department of Automation and Remote Control on Railways; E-mail: TrES-4b@yandex.ru

For citation: Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov VI. V., Efanov D. V. Features of Hamming codes application in self-checking test circuit organization. *Journal of Instrument Engineering*. 2018. Vol. 61, N 1. P. 47—59 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-1-47-59