

УДК 681.518.5:004.052.32

Д. В. Ефанов**ПРИМЕНЕНИЕ РАВНОВЕСНОГО КОДА «2 ИЗ 4»
ПРИ ОРГАНИЗАЦИИ СИСТЕМ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ**

Дата поступления: 11.04.2016

Решение о публикации: 05.06.2016

Цель: Исследовать особенности применения равновесных кодов «1 из 4» и «2 из 4» при организации систем функционального контроля методом логического дополнения. **Методы:** Используются методы теории информации и кодирования, теории дискретных устройств и технической диагностики дискретных систем. **Результаты:** Формализованы правила вычисления функций логического дополнения разрядов векторов рабочих функций систем функционального контроля до разрядов равновесного кода «2 из 4». Данные правила обеспечивают свойство полной самопроверяемости блока логического дополнения и тестера в схеме контроля. В эксперименте с контрольными комбинационными схемами LGSynth`89 показано, что могут быть получены системы функционального контроля, организованные по коду «2 из 4» с меньшей структурной избыточностью, чем системы, организованные по коду «1 из 4». На характеристики системы функционального контроля можно влиять на этапе их разработки, варьируя дополняемые разряды вектора рабочих функций. Кроме того, оба кода обладают высокой обнаруживающей способностью в системах функционального контроля и идентифицируют большее количество искажений, чем часто применяемые коды с суммированием. **Практическая значимость:** Использование равновесного кода «2 из 4» позволяет организовывать системы функционального контроля с небольшой структурной избыточностью, при этом обеспечивается важнейшее их свойство – полная самопроверяемость.

Система функционального контроля, логическое дополнение, код с суммированием, равновесный код, код «1 из 4», код «2 из 4», структурная избыточность, необнаруживаемая ошибка.

Dmitry V. Efanov, Cand. Eng., associate professor, TrES-4b@yandex.ru (Petersburg State Transport University) APPLICATION OF THE 2-OUT-OF-4 CONSTANT-WEIGHT CODE IN ORGANISING CONCURRENT ERROR DETECTION SYSTEMS

Objective: To study specific features of application of 1-out-of-4 and 2-out-of-4 constant-weight codes in organising concurrent error detection systems by Boolean complement method. **Methods:** Information and coding theory, discrete devices theory, and discrete devices' technical diagnostics methods were applied. **Results:** Rules for calculation of Boolean complement functions of vector classes of operating functions of concurrent error detection systems up to 2-out-of-4 constant-weight code positions were formalised. These rules ensure quality of totally self-checkability of Boolean complement block and checker in checking circuit. An experiment with LGSynth`89 Benchmarks indicated that concurrent error detection systems can be produced organised on the 2-out-of-4 code with lesser structure redundancy than those organised on the 1-out-of-4 code. Concurrent error detection system characteristics can be influenced at the development stage by varying complemented positions of operating functions vector. Besides, both codes possess high detection ability in concurrent error detection systems and identify more distortions than the often-used sum codes. **Practical importance:** Application of the 2-out-of-4 constant-weight code allows to organise concurrent error detection systems with low structure redundancy and at the same time their most important quality, totally self-checkability, is ensured.

Concurrent error detection system, Boolean complement, sum code, constant-weight code, 1-out-of-4 code, 2-out-of-4 code, structure redundancy, undetectable error.

При синтезе надежных дискретных устройств часто применяют системы обнаружения ошибок в логических блоках и узлах. Данные системы основываются на использовании парафазного кодирования или же на методах функционального контроля [7, 10]. При реализации логического устройства в парафазной логике каждый сигнал представляется в виде пары значений $\langle 01 \rangle$ или $\langle 10 \rangle$ – так называемого парафазного сигнала. При возникновении неисправности на выходе какого-либо логического элемента нарушается парафазность сигнала на выходе схемы, что и служит признаком ошибки. Такой подход требует существенной избыточности схемы. Альтернативой применения парафазного кодирования является использование систем функционального контроля логических устройств. В такой системе контролируемое логическое устройство $F(x)$ снабжается специальной схемой контроля, позволяющей в процессе его эксплуатации выполнять также техническое диагностирование [5]. В основе системы функционального контроля, как правило, лежит заранее установленный помехоустойчивый код с высокой кодовой скоростью. Часто в качестве таких кодов используют коды Бергера и их модификации [1, 8, 11, 15].

На рис. 1 изображена традиционная структурная схема системы функционального контроля, в основу которой положен систематический (m,k) -код, где m и k – длина информационных и контрольных векторов, соответственно [18, 19]. В ней контролируемое логическое устройство $F(x)$, вычисляющее систему булевых функций f_1, f_2, \dots, f_m , дополняется блоком контрольной логики $G(x)$, формирующим значения системы контрольных функций g_1, g_2, \dots, g_k , и тестером TSC . Выходы блока $F(x)$ отождествляют с информационным вектором (m,k) -кода, а выходы блока $G(x)$ – с контрольным вектором данного кода. Тестер в системе функционального контроля выполняет функцию проверки в процессе эксплуатации соответствия значений разрядов информационного и контрольного векторов.

Важнейшим свойством системы функционального контроля является обеспечение полной самопроверяемости тестера как устройства, выполняющего роль «последнего сторожа». Это подразумевает наличие возможности формирования защитного сигнала хотя бы на одном входном наборе при несоответствии значений разрядов информационного и контрольного векторов, а также в случае возникновения собственных неисправностей тестера.

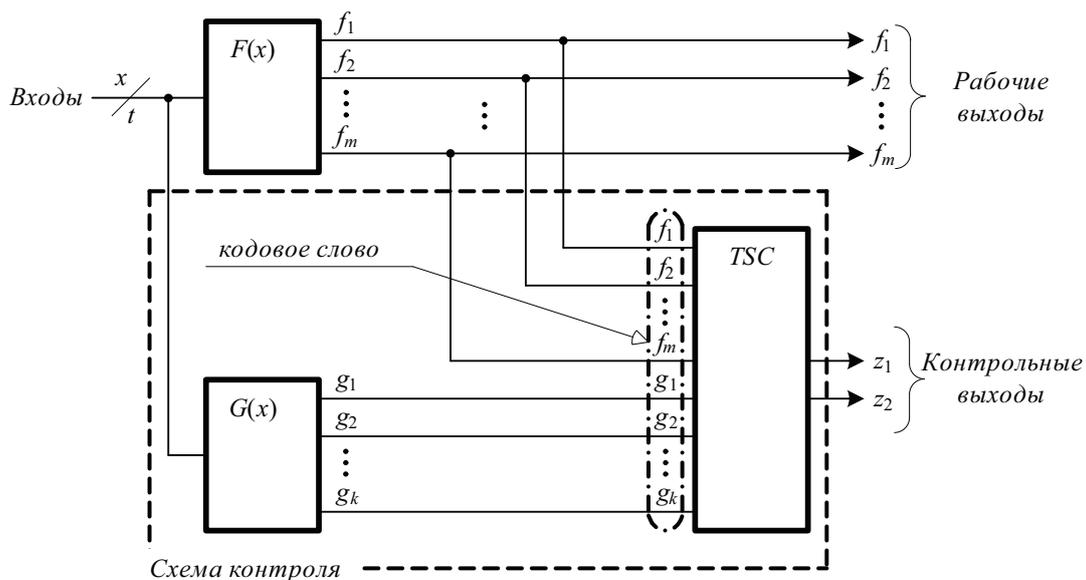


Рис. 1. Традиционная структура системы функционального контроля

Недостатком традиционной структуры системы функционального контроля является то, что для выбранного (m,k) -кода ее техническая реализация будет единственной. Это не дает разработчику системы функционального контроля возможности влиять на ее характеристики, такие как структурная избыточность, обнаруживающая способность, контролепригодность и т. д. В [4, 6, 17] описана структура логического дополнения, лишенная этого недостатка.

В системе функционального контроля на основе логического дополнения (рис. 2), в отличие от традиционной структуры, применен блок логического дополнения. Данный блок образован каскадом сумматоров по модулю «два», предназначенных для преобразования рабочих функций f_i в контрольные функции g_i по правилу

$$h_i = f_i \oplus g_i.$$

Использование блока логического дополнения позволяет в качестве основы системы функционального контроля выбирать любой блочный код, в том числе неразделимый. При этом возможен выбор преобразуемых функций f_i в кодовое слово выбранного кода.

В [3, 14, 16, 20] описано приложение равновесных кодов «1 из 3» (1/3-кодов) и «1 из 4» (1/4-кодов) при организации системы функционального контроля. Выходы контролируемого устройства $F(x)$ разбиваются на группы

по 3 или 4 выхода в каждой, для контроля каждой группы используется 1/3-TSC или 1/4-TSC (в зависимости от выбранного кода), выходы же тестеров объединяются на входах специальных схем сжатия парафазных сигналов с целью организации контроля только одного парафазного выхода [7].

Применение равновесных кодов с небольшой длиной кодового слова обусловлено простотой обеспечения свойства полной самопроверяемости тестера. Например, для полной проверки 1/4-TSC требуется подача на его входы четырех векторов {0001; 0010; 0100; 1000}. Для организации контроля логических устройств можно применить и равновесный код «2 из 4» (2/4-код), тестер с максимальной простотой реализации которого обладает такой же длиной проверяющего теста, как и 1/4-TSC: {0011; 1100; 1001; 0110} [9].

Данная работа представляет результаты анализа применения 1/4- и 2/4-кодов при организации систем функционального контроля на примере контрольных комбинационных схем LGSynth`89 [13].

Системы контроля на основе 1/4- и 2/4-кодов

На рис. 3 и 4 изображены структуры системы функционального контроля на основе

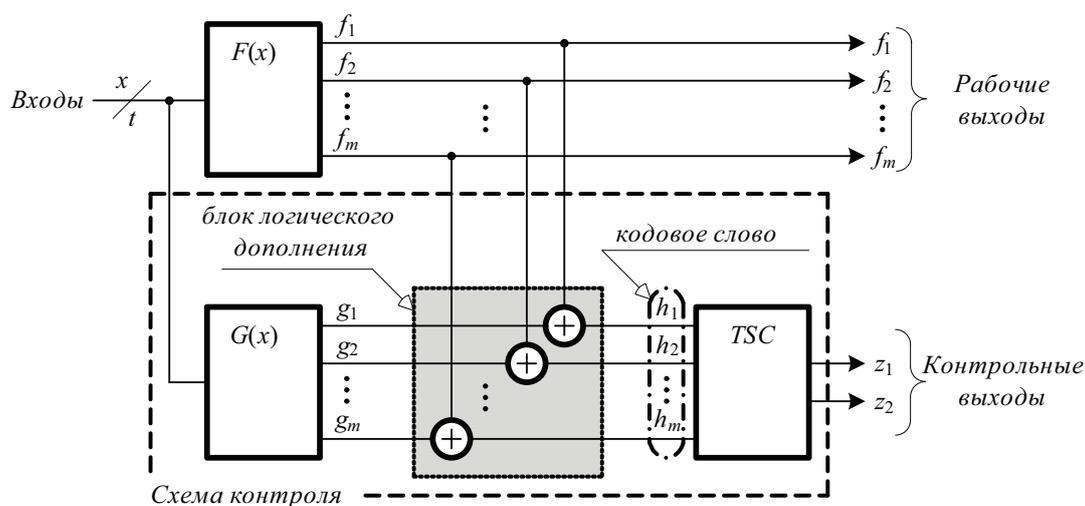


Рис. 2. Структура системы функционального контроля на основе логического дополнения

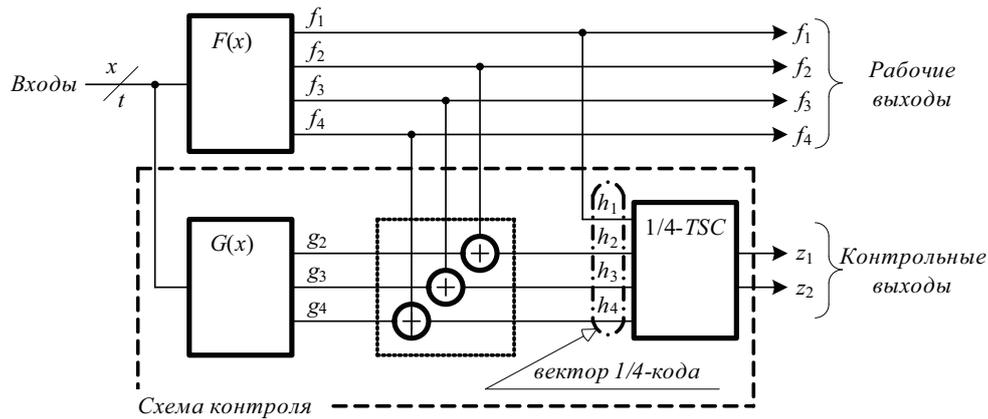


Рис. 3. Структура системы функционального контроля на основе 1/4-кода

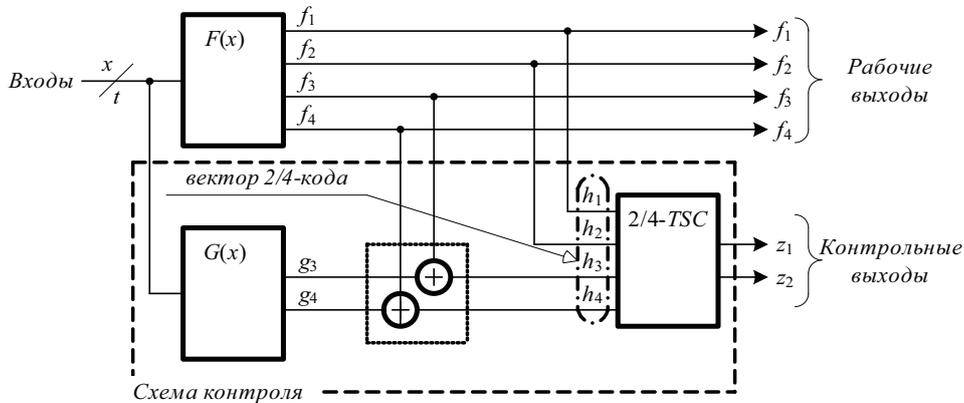


Рис. 4. Структура системы функционального контроля на основе 2/4-кода

1/4- и 2/4-кодов. При построении системы функционального контроля на основе 1/4-кода требуется дополнить любые три рабочие функции, что всегда обеспечивает формирование векторов 1/4-кода. При этом сами функции логического дополнения могут быть определены по следующим правилам [6, 16]:

$$\begin{cases} g_1 = 0; \\ g_2 = f_1 f_2; \\ g_3 = (f_1 \vee f_2) f_3; \\ g_4 = (f_1 \vee f_2 \vee f_3) f_4 \vee \overline{f_1 f_2 f_3 f_4}. \end{cases} \quad (1)$$

При организации системы контроля на основе 2/4-кода удастся минимизировать количество сумматоров по модулю «два» в блоке логического дополнения (рис. 4). Это уменьшает количество функций дополнения

и, соответственно, структурную избыточность схемы контроля. Сами функции логического дополнения вычисляются по правилам:

$$\begin{cases} g_1 = 0; \\ g_2 = f_1 f_2 \vee \overline{f_1 f_2} = \overline{f_1 \oplus f_2}; \\ g_3 = 0; \\ g_4 = f_3 f_4 \vee \overline{f_3 f_4} = \overline{f_3 \oplus f_4}. \end{cases} \quad (2)$$

Эксперимент с контрольными комбинационными схемами

Для определения эффективности приложения 2/4-кода при организации систем функционального контроля были поставлены эксперименты с контрольными комбинационными схемами LGSynth'89. В эксперименте оценивались показатели структурной избыточности

систем функционального контроля, а также показатели обнаруживающей способности.

Для получения результатов использовали специально разработанный программный комплекс, позволяющий синтезировать файлы – описания систем функционального контроля различными методами и симулировать одиночные неисправности в контрольных комбинационных схемах. Для ряда комбинационных схем с четырьмя выходами определены характеристики систем функционального контроля, организованных по методу логического дополнения на основе 1/4- и 2/4-кодов. При этом были проанализированы все возможные варианты логического дополнения, а именно все $4! = 24$ варианта дополнения функций. В таблице приведены результаты эксперимента для одной контрольной комбинационной схемы z4ml.

Для каждого варианта организации системы функционального контроля, полученного с использованием формул (1) и (2) путем всех возможных перестановок разрядов в векторе рабочих функций, вычислены значения площади систем функционального контроля L (в усл. ед.) и количество необнаруживаемых в контролируемой схеме ошибок D (в шт.). Для расчета площади систем функционального контроля был использован интерпретатор SIS [21], позволяющий анализировать свойства логических схем. Площадь блоков системы функционального контроля ($L_{1/4}^S$ и $L_{2/4}^S$) оценивалась по библиотеке функциональных элементов stdcell2_2.genlib. Анализатор одиночных неисправностей интегрирован в разработанный программный комплекс, а данные анализа занесены в столбцы $D_{1/4}^S$ и $D_{2/4}^S$ таблицы.

На основе полученных экспериментальных данных рассчитан ряд показателей систем функционального контроля:

1) структурная избыточность по отношению к площади схемы

$$\delta_{1/4} = \frac{L_{1/4}^S}{L_{F(x)}} \cdot 100 \% \quad \text{и} \quad \delta_{2/4} = \frac{L_{2/4}^S}{L_{F(x)}} \cdot 100 \%;$$

2) коэффициент эффективности по структурной избыточности 2/4-кода по отношению к 1/4-коду

$$\chi = \frac{L_{2/4}^S}{L_{1/4}^S} \cdot 100 \%;$$

3) обнаруживающая способность кода по отношению к максимальному количеству ошибок в схеме (D_{\max})

$$\gamma_{1/4} = \frac{D_{1/4}^S}{D_{\max}} \cdot 100 \% \quad \text{и} \quad \gamma_{2/4} = \frac{D_{2/4}^S}{D_{\max}} \cdot 100 \%;$$

4) коэффициент эффективности по обнаруживающей способности 2/4-кода по отношению к 1/4-коду

$$\mu = \frac{D_{2/4}^S}{D_{1/4}^S} \cdot 100 \%.$$

В 22 случаях из 24 система функционального контроля для схемы z4ml, организованная по 2/4-коду, имеет меньшую площадь, чем система контроля на основе 1/4-кода. В некоторых случаях при использовании 2/4-кода удается уменьшить площадь системы функционального контроля практически на 25 % по сравнению с площадью системы контроля на основе 1/4-кода. В среднем коэффициент эффективности по структурной избыточности 2/4-кода по отношению к 1/4-коду в системе функционального контроля для схемы z4ml составил $\chi = 88,182 \%$.

По характеристикам обнаруживающей способности код 2/4 также выигрывает у кода 1/4. Минимальное количество необнаруживаемых ошибок в системе функционального контроля на основе 1/4-кода равно 56, а на основе 2/4-кода – 16. Среднее значение коэффициента эффективности по обнаруживающей способности 2/4-кода по отношению к 1/4-коду составило $\mu = 60,958 \%$.

Отметим также, что все необнаруживаемые 1/4- и 2/4-кодами ошибки имеют кратность $d=2$. Общее же количество двукратных оши-

Экспериментальные результаты

#	Замена выходов контрольной троллейной схемы	Показатели структурной избыточности						Показатели обнаруживающей способности					
		$L_{F(x)}$, усл. ед.	$L_{1/4}^S$, усл. ед.	$\delta_{1/4}$, %	$L_{2/4}^S$, усл. ед.	$\delta_{2/4}$, %	χ , %	$D_{1/4}^S$, ош.	$\gamma_{1/4}$, %	$D_{2/4}^S$, ош.	$\gamma_{2/4}$, %	μ , %	
1	$\langle f_1, f_2, f_3, f_4 \rangle \rightarrow$ $\langle f_1, f_2, f_3, f_4 \rangle$	1184	3360	283,784	2528	213,514	75,238	66	1,583	16	0,384	24,242	
2	$\langle f_1, f_2, f_3, f_4 \rangle \rightarrow$ $\langle f_1, f_2, f_4, f_3 \rangle$	1184	3632	306,757	2528	213,514	69,604	56	1,344	48	1,152	85,714	
3	$\langle f_1, f_2, f_3, f_4 \rangle \rightarrow$ $\langle f_1, f_3, f_2, f_4 \rangle$	1184	3352	283,108	3200	270,27	95,465	66	1,583	64	1,536	96,97	
4	$\langle f_1, f_2, f_3, f_4 \rangle \rightarrow$ $\langle f_1, f_3, f_4, f_2 \rangle$	1184	4200	354,73	3464	292,568	82,476	56	1,344	64	1,536	114,286	
5	$\langle f_1, f_2, f_3, f_4 \rangle \rightarrow$ $\langle f_1, f_4, f_2, f_3 \rangle$	1184	3384	285,811	3200	270,27	94,563	62	1,488	48	1,152	77,419	
6	$\langle f_1, f_2, f_3, f_4 \rangle \rightarrow$ $\langle f_1, f_4, f_3, f_2 \rangle$	1184	3856	325,676	3464	292,568	89,834	62	1,488	16	0,384	25,806	
7	$\langle f_1, f_2, f_3, f_4 \rangle \rightarrow$ $\langle f_2, f_1, f_3, f_4 \rangle$	1184	3360	283,784	2528	213,514	75,238	66	1,583	48	1,152	72,727	
8	$\langle f_1, f_2, f_3, f_4 \rangle \rightarrow$ $\langle f_2, f_1, f_4, f_3 \rangle$	1184	3632	306,757	2528	213,514	69,604	56	1,344	16	0,384	28,571	
9	$\langle f_1, f_2, f_3, f_4 \rangle \rightarrow$ $\langle f_2, f_3, f_1, f_4 \rangle$	1184	3352	283,108	3200	270,27	95,465	66	1,583	48	1,152	72,727	
10	$\langle f_1, f_2, f_3, f_4 \rangle \rightarrow$ $\langle f_2, f_3, f_4, f_1 \rangle$	1184	4200	354,73	3200	270,27	76,19	56	1,344	16	0,384	28,571	
11	$\langle f_1, f_2, f_3, f_4 \rangle \rightarrow$ $\langle f_2, f_4, f_1, f_3 \rangle$	1184	3384	285,811	3200	270,27	94,563	62	1,488	64	1,536	103,226	
12	$\langle f_1, f_2, f_3, f_4 \rangle \rightarrow$ $\langle f_2, f_4, f_3, f_1 \rangle$	1184	3856	325,676	3464	292,568	89,834	62	1,488	64	1,536	103,226	
13	$\langle f_1, f_2, f_3, f_4 \rangle \rightarrow$ $\langle f_3, f_1, f_2, f_4 \rangle$	1184	3584	302,703	3464	292,568	96,652	82	1,967	64	1,536	78,049	

Окончание таблицы

#	Замена выходов контрольной схемы	Показатели структурной избыточности						Показатели обнаруживающей способности				
		$L_{F(x)}$, усл. ед.	$L_{1/4}^S$, усл. ед.	$\delta_{1/4}$, %	$L_{2/4}^S$, усл. ед.	$\delta_{2/4}$, %	κ , %	$D_{1/4}^S$, ош.	$\gamma_{1/4}$, %	$\gamma_{2/4}$, %	μ , %	
14	$\langle f_{1,2}, f_{3,4} \rangle \rightarrow$ $\langle f_{3,1}, f_{4,2} \rangle$	1184	3896	329,054	3200	270,27	82,136	60	1,44	1,536	106,667	
15	$\langle f_{1,2}, f_{3,4} \rangle \rightarrow$ $\langle f_{3,2}, f_{1,4} \rangle$	1184	3584	302,703	3464	292,568	96,652	82	1,967	0,384	19,512	
16	$\langle f_{1,2}, f_{3,4} \rangle \rightarrow$ $\langle f_{3,2}, f_{4,1} \rangle$	1184	3896	329,054	3200	270,27	82,136	60	1,44	1,152	80	
17	$\langle f_{1,2}, f_{3,4} \rangle \rightarrow$ $\langle f_{3,4}, f_{1,2} \rangle$	1184	3024	255,405	2528	213,514	83,598	86	2,063	0,384	18,605	
18	$\langle f_{1,2}, f_{3,4} \rangle \rightarrow$ $\langle f_{3,4}, f_{2,1} \rangle$	1184	3024	255,405	2528	213,514	83,598	86	2,063	1,152	55,814	
19	$\langle f_{1,2}, f_{3,4} \rangle \rightarrow$ $\langle f_{4,1}, f_{2,3} \rangle$	1184	2936	247,973	3464	292,568	117,984	104	2,495	0,384	15,385	
20	$\langle f_{1,2}, f_{3,4} \rangle \rightarrow$ $\langle f_{4,1}, f_{3,2} \rangle$	1184	3584	302,703	3200	270,27	89,286	88	2,111	1,152	54,545	
21	$\langle f_{1,2}, f_{3,4} \rangle \rightarrow$ $\langle f_{4,2}, f_{1,3} \rangle$	1184	2936	247,973	3464	292,568	117,984	104	2,495	1,536	61,538	
22	$\langle f_{1,2}, f_{3,4} \rangle \rightarrow$ $\langle f_{4,2}, f_{3,1} \rangle$	1184	3584	302,703	3200	270,27	89,286	88	2,111	1,536	72,727	
23	$\langle f_{1,2}, f_{3,4} \rangle \rightarrow$ $\langle f_{4,3}, f_{1,2} \rangle$	1184	2992	252,703	2528	213,514	84,492	96	2,303	1,152	50	
24	$\langle f_{1,2}, f_{3,4} \rangle \rightarrow$ $\langle f_{4,3}, f_{2,1} \rangle$	1184	2992	252,703	2528	213,514	84,492	96	2,303	0,384	16,667	
Средние значения		1184	3483,333	294,201	3053	257,855	88,182	73,667	1,767	1,024	60,958	

бок для схемы $z4m1$ равно 128. Равновесными кодами идентифицируются все 4008 одиночных ошибок и 32 трехкратные ошибки. К слову, классическим кодом Бергера [12] в системе функционального контроля для схемы $z4m1$ не обнаруживаются все 128 двукратных ошибки, а модифицированным кодом Бергера, предложенным в [2], – 64.

Анализируя показатели как структурной избыточности, так и обнаруживающей способности систем функционального контроля, отметим доминирующее положение 2/4-кода по отношению к 1/4-коду.

Заключение

В статье предложен способ вычисления значений функций логического дополнения в системах функционального контроля на основе равновесного 2/4-кода. Эксперимент с контрольными комбинационными схемами показал, что удается улучшить показатели структурной избыточности и обнаруживающей способности системы по сравнению с использованием для их организации 1/4-кода. Следует отметить, что применение обоих равновесных кодов для рассмотренных в эксперименте контрольных схем оказывается эффективнее, чем применение кодов с суммированием. Полученные результаты позволяют судить о хороших перспективах использования 2/4-кода при организации систем функционального контроля на основе метода логического дополнения. Что немаловажно, при использовании описанных правил вычисления функций логического дополнения обеспечивается свойство полной самопроверяемости тестера в схеме контроля.

Библиографический список

1. Блюдов А. А. О кодах с суммированием единичных разрядов в системах функционального контроля / А. А. Блюдов, Д. В. Ефанов, В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. – 2014. – № 8. – С. 131–145.

2. Блюдов А. А. Построение модифицированного кода Бергера с минимальным числом обнаруживаемых ошибок информационных разрядов / А. А. Блюдов, Д. В. Ефанов, В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Электронное моделирование. – 2012. – Т. 34, № 6. – С. 17–29.

3. Гессель М. Контроль комбинационных схем методом логического дополнения / М. Гессель, А. В. Морозов, В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. – 2005. – № 8. – С. 161–172.

4. Гессель М. Логическое дополнение – новый метод контроля комбинационных схем / М. Гессель, А. В. Морозов, В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. – 2003. – № 1. – С. 167–176.

5. Пархоменко П. П. Основы технической диагностики (оптимизация алгоритмов диагностирования, аппаратные средства) / П. П. Пархоменко, Е. С. Согомоян. – М. : Энергоатомиздат, 1981. – 320 с.

6. Сапожников В. В. Организация функционального контроля комбинационных схем методом логического дополнения / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, А. В. Дмитриев, А. В. Морозов, М. Гессель // Электронное моделирование. – 2002. – Т. 24, № 6. – С. 51–66.

7. Сапожников В. В. Основы технической диагностики / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников. – М. : Маршрут, 2004, 318 с.

8. Сапожников В. В. Применение кодов с суммированием при синтезе систем железнодорожной автоматики и телемеханики на программируемых логических интегральных схемах / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов // Автоматика на транспорте. – 2015. – Т. 1, № 1. – С. 84–107.

9. Сапожников В. В. Самопроверяемые дискретные устройства / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников. – СПб. : Энергоатомиздат, 1992. – 224 с.

10. Сапожников В. В. Теория дискретных устройств железнодорожной автоматики, телемеханики и связи / В. В. Сапожников, Ю. А. Кравцов, Вл. В. Сапожников. – М. : УМК МПС России, 2001. – 312 с.

11. Согомоян Е. С. Самопроверяемые устройства и отказоустойчивые системы / Е. С. Согомо-

нян, Е. В. Слабаков. – М. : Радио и связь, 1989. – 208 с.

12. Berger J.M. A Note on Error Detecting Codes for Asymmetric Channels / J.M. Berger // *Inf. and Control*. – 1961. – Vol. 4, N 1. – P. 68–73.

13. Collection of Digital Design Benchmarks. – URL : <http://ddd.fit.cvut.cz/prj/Benchmarks>.

14. Das D.K. Constraint Don't Cares for Optimizing Designs for Concurrent Checking by 1-out-of-3 Codes / D.K. Das, S.S. Roy, A. Dmitriev, A. Morozov, M. Gössel // *Proc. 10th Int. Workshops on Boolean Problems*, Freiberg, Germany, Sept., 2012. – Freiberg, 2012. – P. 33–40.

15. Das D. Weight-Based Codes and Their Application to Concurrent Error Detection of Multi-level Circuits / D. Das, N.A. Touba // *Proc. of the 17th IEEE VLSI Test Symp., USA, California, Dana Point, Apr. 25–29, 1999. – Dana Point, California, 1999. – P. 370–376*.

16. Goessel M. A New Method for Concurrent Checking by Use of a 1-out-of-4 Code / M. Goessel, V. Saposhnikov, V. Saposhnikov, A. Dmitriev // *Proc. 6th IEEE Int. On-line Testing Workshop, Palma de Mallorca, Spain, 3–5 July 2000. – Palma de Mallorca, 2000. – P. 147–152*.

17. Gössel M. New Methods of Concurrent Checking / M. Gössel, V. Ocheretny, E. Sogomonyan, D. Marienfeld. – Dordrecht : Springer Sci. + Bus. Media B.V., 2008. – 184 p.

18. Mitra S. Which Concurrent Error Detection Scheme to Choose? / S. Mitra, E.J. McClaskey // *Proc. Int. Test Conf., USA, Atlantic City, NJ, Oct. 03–05 2000. – Atlantic City, NJ, 2000. – P. 985–994*.

19. Nicolaidis M. On-Line Testing for VLSI – A Compendium of Approaches / M. Nicolaidis, Y. Zorian // *J. Electron. Test. : Theory Appl.* – 1998. – N 12. – P. 7–20.

20. Saposhnikov V.V. Design of Totally Self-Checking Combinational Circuits by Use of Complementary Circuits / V.V. Saposhnikov, V.V. Saposhnikov, A. Morozov, G. Osadtchi, M. Gossel // *Proc. East-West Design & Test Workshop, Yalta, Ukraine, 2004. – Yalta, 2004. – P. 83–87*.

21. Yang S. Logic Synthesis and Optimization Benchmarks: User Guide: Version 3.0. – Microelectronics Center of North Carolina (MCNC), 1991. – 88 p.

References

1. Blyudov A.A., Yefanov D.V., Sapozhnikov V.V. & Sapozhnikov V.V. *Avtomatika i telemekhanika – Autom. Remote Control*, 2014, no. 8, pp. 131-145.

2. Blyudov A.A., Yefanov D.V., Sapozhnikov V.V. & Sapozhnikov V.V. *Elektronnoye modelirovaniye – Electronic Modeling*, 2012, Vol. 34, no. 6, pp. 17-29.

3. Gössel M., Morozov A.V., Sapozhnikov V.V. & Sapozhnikov V.V. *Avtomatika i telemekhanika – Autom. Remote Control*, 2005, no. 8, pp. 161-172.

4. Gössel M., Morozov A.V., Sapozhnikov V.V. & Sapozhnikov V.V. *Avtomatika i telemekhanika – Autom. Remote Control*, 2003, no. 1, pp. 167-176.

5. Parkhomenko P.P. & Sogomonyan Ye.S. *Osnovy tekhnicheskoy diagnostiki (optimizatsiya algoritmov diagnostirovaniya, apparaturnyye sredstva)* [Technical Diagnostics Basics (Optimisation of Diagnostics Algorithms, Hardware-Based Tools)]. Moscow, Energoatomizdat, 1981. 320 p.

6. Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov V.V., Dmitriev A.V., Morozov A.V. & Gössel M. *Elektronnoye modelirovaniye – Electronic Modeling*, 2002, P. 24, no. 6, pp. 51-66.

7. Sapozhnikov V.V. & Sapozhnikov V.V. *Osnovy tekhnicheskoy diagnostiki* [Technical Diagnostics Basics]. Moscow, Marshrut, 2004. 318 p.

8. Sapozhnikov V.V. & Sapozhnikov V.V. & Yefanov D.V. *Avtomatika na transporte – Automatics at Transport*, 2015, Vol. 1, no. 1, pp. 84-107.

9. Sapozhnikov V.V. & Sapozhnikov V.V. *Samoveryayemyye diskretnyye ustroystva* [Self-checking Discrete Devices]. St. Petersburg, Energoatomizdat, 1992. 224 p.

10. Sapozhnikov V.V., Kravtsov Yu.A. & Sapozhnikov V.V. *Teoriya diskretnykh ustroystv zheleznodorozhnoy avtomatiki, telemekhaniki i svyazi* [Theory of Discrete Devices of Railway Automatics, Telemechanics and Communication]. Moscow, UMK MPS Rossii, 2001. 312 p.

11. Sogomonyan Ye.S. & Slabakov Ye.V. *Samoveryayemyye ustroystva i otkazoustoychivyye sistemy* [Self-Checking Machines and Fail-Safe Systems]. Moscow, Radio i svyaz, 1989. 208 p.

12. Berger J.M. *Inf. and Control*, 1961, Vol. 4, no. 1, pp. 68-73.

13. Collection of Digital Design Benchmarks, available at: <http://ddd.fit.cvut.cz/prj/Benchmarks>.
14. Das D. K., Roy S. S., Dmitriev A., Morozov A. & Gössel M. Constraint Don't Cares for Optimizing Designs for Concurrent Checking by 1-out-of-3 Codes. *Proc. 10th Int. Workshops on Boolean Problems*, Freiberg, Germany, Sept., 2012. Freiberg, 2012. Pp. 33-40.
15. 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 Symp.*, USA, California, Dana Point, Apr. 25-29, 1999. Dana Point, California, 1999. Pp. 370-376.
16. Goessel M., Saposhnikov V. I., Saposhnikov V. & Dmitriev A. A New Method for Concurrent Checking by Use of a 1-out-of-4 Code. *Proc. 6th IEEE Int. On-line Testing Workshop*, Palma de Mallorca, Spain, 3-5 July 2000. Palma de Mallorca, 2000. Pp. 147-152.
17. Gössel M., Ocheretny V., Sogomonyan E. & Marienfeld D. *New Methods of Concurrent Checking*. Dordrecht, Springer Sci. + Bus. Media B. V., 2008. 184 p.
18. Mitra S. & McClaskey E. J. Which Concurrent Error Detection Scheme to Choose? *Proc. Int. Test Conf.*, USA, Atlantic City, NJ, 2000, 03-05 Oct. Atlantic City, NJ, 2000. Pp. 985-994.
19. Nicolaidis M. & Zorian Y. On-Line Testing for VLSI – A Compendium of Approaches. *J. Electron. Test.: Theory Appl.*, 1998, no. 12, pp. 7-20.
20. Saposhnikov V. V., Saposhnikov V. I., Morozov A., Osadtchi G. & Gossel M. Design of Totally Self-Checking Combinational Circuits by Use of Complementary Circuits. *Proc. East-West Design & Test Workshop*, Yalta, Ukraine, 2004. Yalta, 2004. P. 83-87.
21. Yang S. *Logic Synthesis and Optimization Benchmarks: User Guide: Version 3.0*. Microelectronics Center of North Carolina (MCNC), 1991. 88 p.

ЕФАНОВ Дмитрий Викторович – канд. техн. наук, доцент, TrES-4b@yandex.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).