

УДК 681.518.5:004.052.32

В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов, М. Р. Черепанова**СРАВНЕНИЕ СТРУКТУР СИСТЕМ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ,
ОРГАНИЗОВАННЫХ ПО КЛАССИЧЕСКИМ И МОДИФИЦИРОВАННЫМ
КОДАМ БЕРГЕРА**

Дата поступления: 08.06.2015

Решение о публикации: 08.06.2015

Цель: Уменьшить сложность технической реализации систем функционального контроля комбинационных логических схем, организованных по кодам с суммированием единичных информационных разрядов, за счет модификации правил построения. **Методы:** Используются методы теории информации и кодирования, теории дискретных устройств и технической диагностики дискретных систем. **Результаты:** Экспериментально показано, что за счет применения модификации правил построения кодов с суммированием можно уменьшить сложность технической реализации системы функционального контроля (уменьшится сложность блока контрольной логики и генератора тестера в составе контрольного оборудования). В статье впервые анализируются свойства модифицированных кодов с суммированием единичных информационных разрядов при отдельной и совместной реализации блоков основной и контрольной логики в системах функционального контроля. В обоих случаях модифицированные коды с суммированием единичных информационных разрядов имеют преимущества перед кодами Бергера. Кроме того, модифицированные коды почти вдвое эффективнее классических кодов Бергера обнаруживают ошибки на выходах контролируемых устройств. Таким образом, в работе установлены преимущества модифицированных кодов с суммированием единичных информационных разрядов перед кодами Бергера в системах функционального контроля. **Практическая значимость:** Результаты работы позволяют на практике более эффективно выбирать код, на основе которого организуется система функционального контроля логической схемы, с учетом особенностей контролируемой схемы и свойств самих кодов. Уменьшение сложности технической реализации ведет к уменьшению экономических затрат на реализацию контролепригодной системы и на ее энергопотребление в процессе функционирования.

Система функционального контроля, отдельная реализация, совместная реализация, комбинационная схема, код Бергера, модифицированный код Бергера, необнаруживаемая ошибка, площадь на кристалле.

Valeriy V. Sapozhnikov, D. Eng., professor, kat@pgups.edu; **Vladimir V. Sapozhnikov**, D. Eng., professor, kat@pgups.edu; **Dmitriy V. Yefanov**, Cand. Sci. (Eng.), associate professor, TrES-4b@yandex.ru; **Mariya R. Cherepanova**, student, bugsbunny.k38@gmail.com (Petersburg State Transport University)
COMPARISON OF STRUCTURES OF FUNCTIONAL CONTROL SYSTEMS ORGANISED BY CLASSIC AND MODIFIED BERGER CODES

Objective: To decrease complexity of technical realisation of functional control systems in combination logic circuits organised by codes with addition of singular information bits by modifying formation rules. **Methods:** Information and encoding theory, discrete device theory and technical diagnostics of discrete systems methods were used. **Results:** The study showed by experiment that it is possible to reduce complexity of technical realisation of functional control system by applying modification of formation rules for codes with addition (control logic block and tester generator in control equipment will be reduced). The article analyses qualities of modified codes with addition of singular information bits in cases of separate and joint realisation of blocks of main and control logic in functional control systems for the first time. In both instances, modified codes with addition of singular information bits

have an advantage over Berger codes. Besides, the modified codes discern control devices' output errors nearly twice as efficiently as classic Berger codes do. Thus the study establishes advantages that modified codes with addition of singular information bits have over Berger codes in functional control systems.

Practical importance: Study results permit to have a more efficient choice of code that the system of logical scheme's functional control is organised on, taking into account the scheme being controlled and the codes' own qualities. Decreasing complexity of technical realisation leads to cutting economic expenses on realisation of a testable system and its power consumption during functioning.

Functional control system, separate realisation, joint realisation, combination scheme, Berger code, modified Berger code, undetectable error, chip surface.

Принципы помехоустойчивого кодирования часто используются при передаче и обработке информации, а также при организации надежных систем автоматики и телемеханики [7–9, 11, 13, 21]. Например, использование помехоустойчивого кодирования положено в основу построения систем функционального контроля комбинационных логических схем [1, 7, 22]. При организации таких систем можно использовать два основных подхода. Первый подразумевает дополнение контролируемой логической схемы $f(x)$, имеющей m выходов, специальным контрольным оборудованием в составе блока контрольной логики $g(x)$ и тестера (рис. 1а). В процессе функционирования блок контрольной логики $g(x)$

вычисляет значения k контрольных функций, а тестер проверяет их соответствие значениям функций, вычисленных контролируемым устройством. Второй подход основан на внесении избыточности в само контролируемое устройство (рис. 1б). На этапе проектирования надежной дискретной системы совместно реализуются блоки основной и контрольной логики $f(x)$ и $g(x)$ с последующей оптимизацией полученной структуры. Полученная схема дополняется тестером.

Система функционального контроля, построенная с отдельной реализацией блоков $f(x)$ и $g(x)$, как правило, обнаруживает большее количество ошибок на выходах контролируемой схемы, чем система функционального

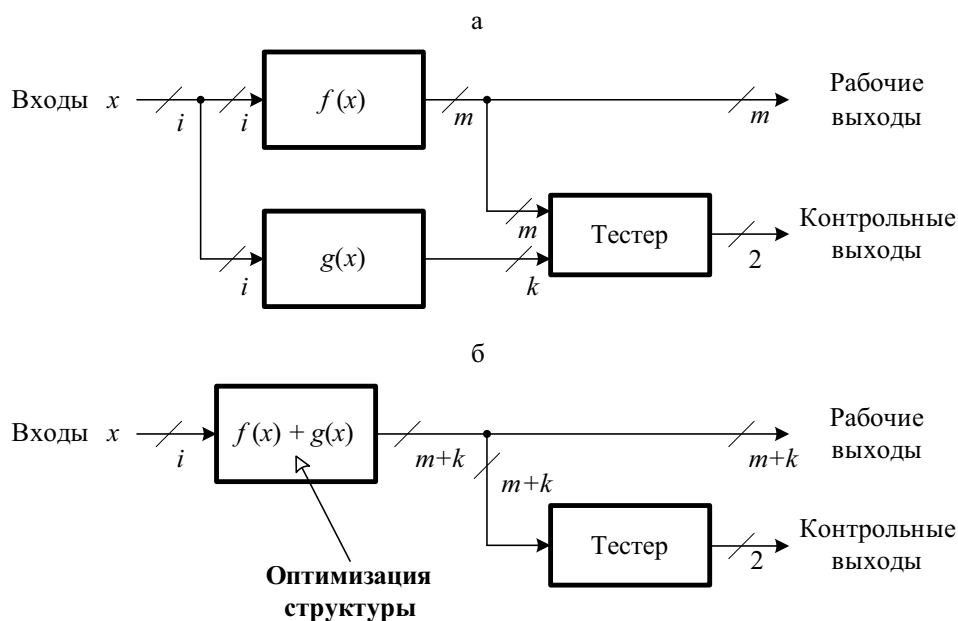


Рис. 1. Структуры систем функционального контроля:
 а) с отдельной реализацией блоков $f(x)$ и $g(x)$; б) с совместной реализацией блоков $f(x)$ и $g(x)$

контроля с совместной реализацией блоков $f(x)$ и $g(x)$. Однако система с совместной реализацией блоков $f(x)$ и $g(x)$ имеет меньшую сложность технической реализации по сравнению с системой с раздельной реализацией блоков $f(x)$ и $g(x)$.

Так или иначе, при организации систем функционального контроля на показатели обнаружения ошибок на выходах контролируемых схем и на сложность технической реализации самих систем контроля влияет положенный в основу помехоустойчивый код. Например, для построения систем функционального контроля со 100%-ным обнаружением одиночных неисправностей на выходах логических элементов в структуре блока $f(x)$ используются методы реконфигурации связей между входами устройства, логическими элементами и выходами устройства, а также резервирования внутренних логических элементов (рис. 2). В структуру основного устройства $f(x)$, таким образом, вносится избыточность – дополнительные логические элементы $f_{\text{доп}}(x)$, позволяющая реализовать функции основного блока с обеспечением контроля неисправностей [7, 18].

В данной работе приведены результаты экспериментальных исследований влияния правил модификации часто используемых в задачах технической диагностики классических кодов с суммированием (кодов Бергера [10]) на сложность технической реализации систем функционального контроля с раздельными и с совместными блоками основной и контрольной логики.

Коды с суммированием

Классические коды с суммированием (обозначим их как $S(m, k)$ -коды, где m – длина информационного вектора, а k – длина контрольного вектора), часто используемые при построении систем функционального контроля [14, 16, 19], являются систематическими кодами. При определении значений разрядов контрольного вектора $S(m, k)$ -кода подсчитывается вес информационного вектора (число единичных разрядов), полученное число представляется в двоичном коде и записывается в разряды контрольного вектора. Количество разрядов в контрольном векторе $S(m, k)$ -кода $k = \lceil \log_2(m+1) \rceil$ (запись $\lceil \dots \rceil$ обозначает целое сверху от вычисляемого значения).

Коды Бергера из-за неравномерного распределения информационных векторов между контрольными имеют низкую эффективность использования контрольных разрядов: $S(m, k)$ -коды с длиной информационных векторов $m = 2-20$ не обнаруживают в среднем 17,03% ошибок в информационных векторах [4].

Для повышения эффективности обнаружения ошибок в информационных векторах классическими кодами с суммированием в [3] предложен алгоритм модификации, который основан на следующих правилах. Определяется вес информационного вектора и представляется по заранее установленному модулю M (устанавливается наименьший неотрицательный вычет значения веса по модулю M). При этом модуль выбирается равным $M = 2^{k-1}$, где $k = \lceil \log_2(m+1) \rceil$ – число кон-

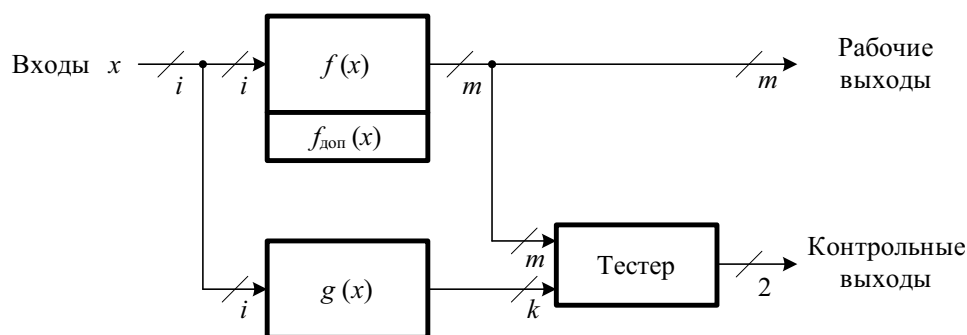


Рис. 2. Структура контролепригодного устройства

трольных разрядов в классическом $S(m, k)$ -коде. К полученной величине приписывается в качестве старшего контрольного разряда коэффициент α , полученный как сумма по модулю «два» заранее установленных информационных разрядов.

Описанный метод построения модифицированного кода Бергера ($RS(m, k)$ -код) позволяет повысить количество обнаруживаемых ошибок в информационных векторах кодов почти вдвое [3]. При этом минимальное общее количество необнаруживаемых ошибок получается в том случае, если в качестве поправочного коэффициента по модулю «два» суммируются $\left\lfloor \frac{m}{2} \right\rfloor$ информационных разрядов (запись $\lfloor \dots \rfloor$ обозначает целое снизу от вычисляемого значения). Например, при длине информационных векторов $m = 2-20$ $RS(m, k)$ -коды в среднем не обнаруживают 8,4% ошибок в информационных векторах. Модифициро-

ванные коды с поправочным коэффициентом, в котором суммируются по модулю «два» $\left\lfloor \frac{m}{2} \right\rfloor$ информационных разрядов, также имеют и минимум двукратных необнаруживаемых ошибок в разрядах информационных векторов (в среднем для $m = 2-20$ не обнаруживается 21,58%). На рис. 3 приводится зависимость доли необнаруживаемых двукратных ошибок от общего количества двукратных ошибок в информационных векторах – величины $\beta_2(m)$. Как известно, для $S(m, k)$ -кодов $\beta_2(m) = \text{const} = 50\%$. Для $RS(m, k)$ -кодов $\beta_2(m)$ является переменной величиной в зависимости от длины информационного вектора и при $m \geq 4$ не превышает 25%. Учет свойств обнаружения ошибок в информационных векторах $RS(m, k)$ -кодами позволяет на практике организовывать системы функционального контроля логических схем с улучшенными характеристиками [17]. Более подробно свойства обнаружения

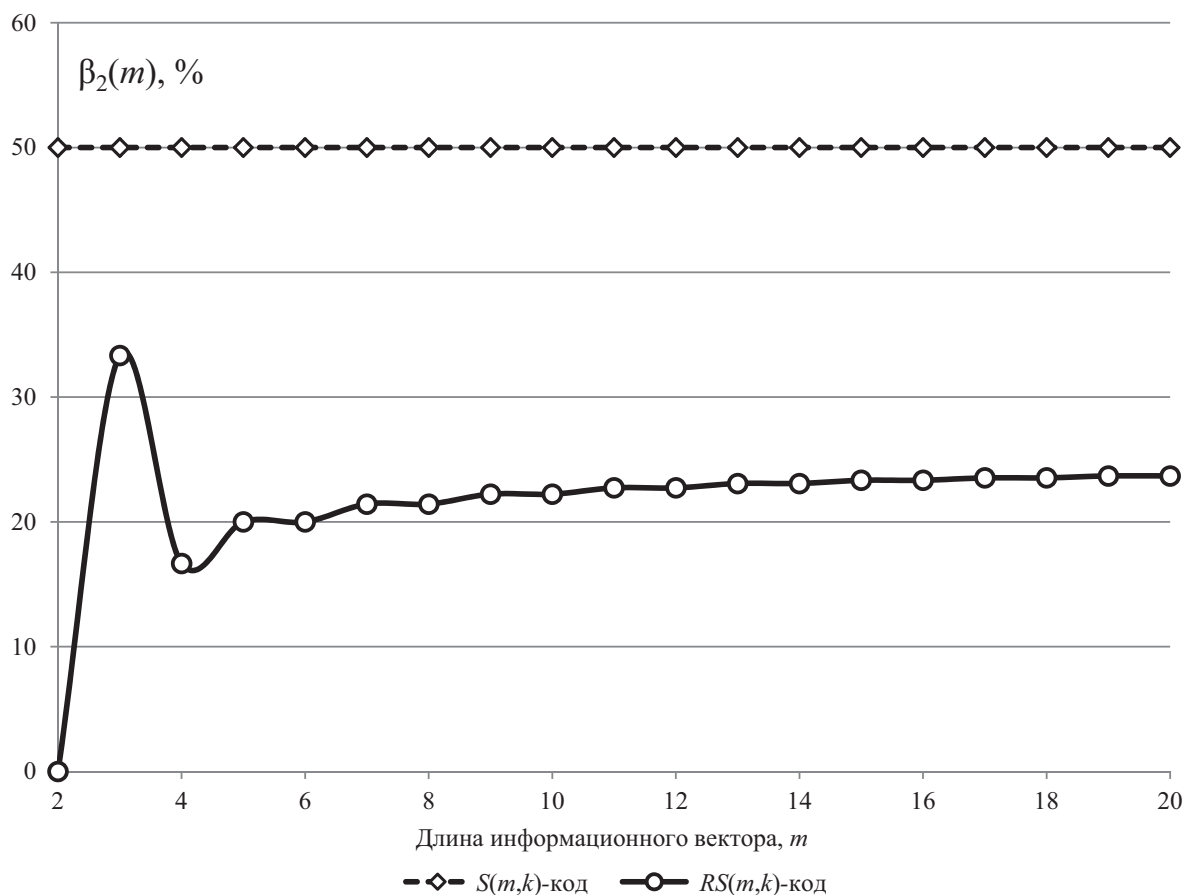


Рис. 3. Зависимость величины $\beta_2(m)$ от длины информационного вектора

ошибок в информационных векторах модифицированными кодами Бергера описаны в [1, 2].

Свойства обнаружения ошибок в информационных векторах кодом с суммированием определяют и свойства обнаружения неисправностей в контролируемом устройстве $f(x)$ самой системой функционального контроля. В [6] приводятся результаты экспериментов с набором специальных комбинационных схем, используемых для оценки эффективности вновь разрабатываемых методов технической диагностики. Эксперименты связаны с моделированием работы комбинационных схем при внесении в их структуру последовательно всех одиночных неисправностей на выходах внутренних логических элементов. Результаты подтверждают теоретические исследования: $RS(m,k)$ -коды обнаруживают большее количество ошибок в информационных векторах, чем классические $S(m,k)$ -коды.

Другим немаловажным показателем систем функционального контроля является аппаратная избыточность. Она определяет площадь, занимаемую всем устройством на кристалле. От площади, в свою очередь, зависят и другие важные характеристики дискретных устройств: быстродействие, энергопотребление, контролепригодность и прочие.

В [5], например, показано, что можно получить структуры тестеров $RS(m,k)$ -кодов, не превышающие по сложности структуры тестеров $S(m,k)$ -кодов. Однако на общий показатель аппаратной избыточности системы функционального контроля также влияет площадь блока контрольной логики $g(x)$. В следующем разделе статьи приведены результаты экспериментов с системой контрольных комбинационных схем по сравнению площадей систем функционального контроля, организованных по $S(m,k)$ - и $RS(m,k)$ -кодам.

Результаты экспериментов с системой контрольных комбинационных схем

Для сравнения сложности технической реализации структуры функционального

контроля по $RS(m,k)$ -коду со структурой функционального контроля по классическому коду Бергера были поставлены эксперименты с набором контрольных комбинационных схем LGSynth'91 [12, 15, 20]. Для эксперимента выбраны 30 схем с различным числом входов и выходов. Цель эксперимента – определить эффективность применения $RS(m,k)$ -кода взамен $S(m,k)$ -кода при организации контроля заданной комбинационной схемы $f(x)$.

Показателем сложности технической реализации, как упоминалось выше, является площадь (L). Площадь рассчитывается с применением известного интерпретатора SIS (Sequential Interactive Synthesis), разработанного в Университете Калифорнии (Berkeley) специально для решения задач технической диагностики [20]. В SIS можно определить параметры логической схемы при ее синтезе в определенном функционально полном наборе логических элементов. Эти наборы составляют так называемые библиотеки логических элементов. Для постановки экспериментов мы выбрали стандартную библиотеку функциональных элементов *stdcell2_2.genlib*.

В эксперименте между собой сравнивались сложности систем функционального контроля с положенными в основу классическими $S(m,k)$ -кодами и модифицированными $RS(m,k)$ -кодами. Отдельно сравнивались площади систем функционального контроля с отдельной реализацией блоков основной и контрольной логики и с их совместной реализацией (рис. 4).

Эффективность использования модифицированного кода взамен классического при организации системы функционального контроля можно оценить отношением площадей новой и старой структур. Назовем данную величину коэффициентом эффективности по площади θ :

$$\theta^S = 100 \cdot \frac{L_{RS(m,k)}^S}{L_{S(m,k)}^S}, \% \quad (1)$$

$$\theta^J = 100 \cdot \frac{L_{RS(m,k)}^J}{L_{S(m,k)}^J}, \% \quad (2)$$

В формулах (1) и (2) у величин θ и L приписан верхний индекс, обозначающий вид реализации структуры системы функционального контроля: S (от англ. separate) – раздельная реализация, J (от англ. joint) – совместная реализация.

В таблице приведены результаты экспериментов для 30 контрольных комбинационных схем. Для 13 из 30 схем использование $RS(m,k)$ -кода при организации системы функционального контроля как с раздельной, так и с совместной реализацией блоков основной и контрольной логики оказалось более эффективным, чем использование $S(m,k)$ -кода. Площадь систем функционального контроля для некоторых комбинационных схем была уменьшена на четверть (для схем $clp1$ $\theta^S = 76,32\%$ и $p82$ $\theta^S = 73,888\%$). Для 17 комбинационных схем применение $RS(m,k)$ -кода приводит к увеличению площади системы функционального контроля по сравнению с системой контроля по коду Бергера. Однако увеличение площади не превышает 10% (для всех комбинационных схем $\theta^S < 110\%$). На рис. 5 представлено распределение значений коэффициента θ^S для выбранных контрольных схем. Анализируя рис. 5, можно выделить диапазон

изменения значений площадей систем функционального контроля при использовании модифицированного кода Бергера по сравнению с классическим кодом – $70\% < \theta^S < 110\%$. Похожие результаты актуальны и для системы функционального контроля с совместной реализацией блоков основной и контрольной логики. Для одной схемы, $br1$, было зафиксировано значительное увеличение значения площади при использовании $RS(m,k)$ -кода по сравнению с системами с раздельной реализацией логических блоков. Для схемы $p82$, наоборот, показатель площади увеличился более чем на 25% . Отметим, что среднее значение коэффициента эффективности для всех рассмотренных в ходе эксперимента контрольных комбинационных схем $\theta^S = 97,625\%$ и $\theta^J = 99,265\%$.

Таким образом, при увеличенных почти вдвое показателях обнаружения ошибок в контролируемых схемах модифицированный код Бергера также имеет преимущество перед классическим кодом Бергера по показателю площади.

В ходе экспериментов оценено уменьшение площади при совместной реализации блоков основной и контрольной логики по сравнению с их раздельной реализацией для выбранного кода с суммированием.

Введем специальный коэффициент сжатия δ , характеризующий уменьшение площади

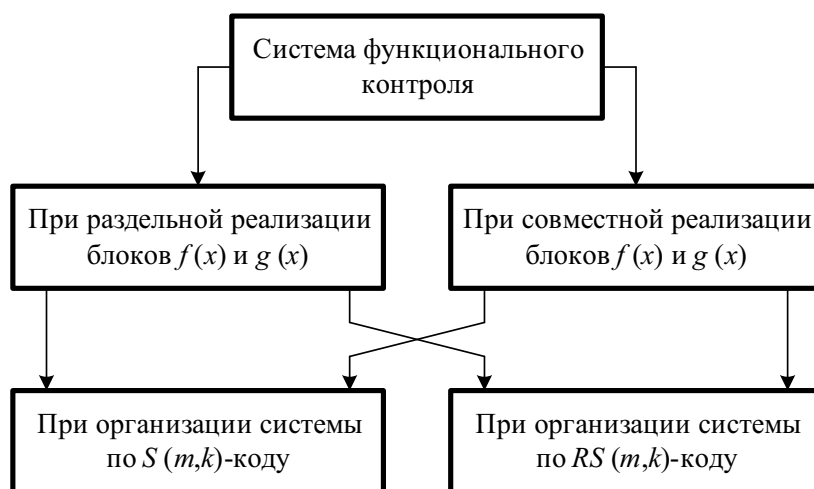


Рис. 4. Классификация систем функционального контроля

Показатели систем функционального контроля

№	Название контрольной схемы	Число входов/ выходов	Площадь контрольной схемы	$L^S_{S(m,k)}$	$L^S_{RS(m,k)}$	$L^I_{S(m,k)}$	$L^I_{RS(m,k)}$	θ^S	θ^I	$\delta_{S(m,k)}$	$\delta_{RS(m,k)}$
1	b2	16/17	40952	75 224	74 968	57 560	57 816	99,66	100,445	76,518	129,667
2	b10	15/11	9168	33 032	30 168	31 336	27 816	91,33	88,767	94,866	108,456
3	br1	12/8	3608	9304	9408	6744	9040	101,118	134,045	72,485	104,071
4	br2	12/8	2952	8280	8376	7888	8304	101,159	105,274	95,266	100,867
5	clpl	11/5	640	4696	3584	3504	3264	76,32	93,151	74,617	109,804
6	dc1	4/7	976	3576	3624	3024	3112	101,342	102,91	84,564	116,452
7	dc2	8/7	2424	8368	8592	8056	7712	102,677	95,73	96,272	111,411
8	decoder	4/7	736	3328	3432	3016	3120	103,125	103,448	90,625	110
9	dist	8/5	6968	13 264	12 584	11 856	10 880	94,873	91,768	89,385	115,662
10	ex1010	10/10	43 296	80 464	87 048	80 848	88 248	108,183	109,153	100,477	98,64
11	f51m	8/8	2272	13 144	12 368	11 488	13 120	94,096	114,206	87,401	94,268
12	gary	15/11	10 688	35 816	31 744	32 968	29 080	88,631	88,207	92,048	109,161
13	in0	15/11	10 704	35 832	31 760	32 968	29 080	88,636	88,207	92,007	109,216
14	in1	16/17	40 952	75 224	74 968	57 560	57 816	99,66	100,445	76,518	129,667
15	inc	7/9	2376	9352	9536	8568	8736	101,967	101,961	91,617	109,158
16	intb	15/7	22 248	114 224	104 160	72 808	66 520	91,189	91,364	63,741	156,584
17	m2	8/16	10 096	30 232	30 792	24 856	25 448	101,852	102,382	82,218	121
18	m3	8/16	13 464	34 232	34 920	25 208	25 704	102,01	101,968	73,639	135,854
19	m4	8/16	18 704	40 400	41 656	28 936	30 200	103,109	104,368	71,624	137,934
20	max512	9/6	9632	15 680	15 960	15 128	14 176	101,786	93,707	96,48	112,585
21	mp2d	14/14	2568	20 032	17 600	23 480	19 176	87,859	81,67	117,212	91,781
22	newcpla2	7/10	1896	11 032	10 768	9720	9560	97,607	98,354	88,107	112,636
23	newcwp	4/5	440	2136	2048	2048	1904	95,88	92,969	95,88	107,563
24	newtpla2	10/4	840	2224	2392	1936	2080	107,554	107,438	87,05	115
25	p82	5/14	2368	16 728	12 360	15 808	11 224	73,888	71,002	94,5	110,121
26	root	8/5	3496	6384	6424	5368	5408	100,627	100,745	84,085	118,787
27	t3	12/8	1768	5760	6008	5784	5992	104,306	103,596	100,417	100,267
28	t4	12/8	1080	8648	9008	7808	8048	104,163	103,074	90,287	111,928
29	tms	8/16	6784	26 600	26 984	24 376	24 944	101,444	102,33	91,639	108,178
30	wim	4/7	712	3248	3336	2888	3040	102,709	105,263	88,916	109,737
Средние значения											
								97,625	99,265	88,015	113,549

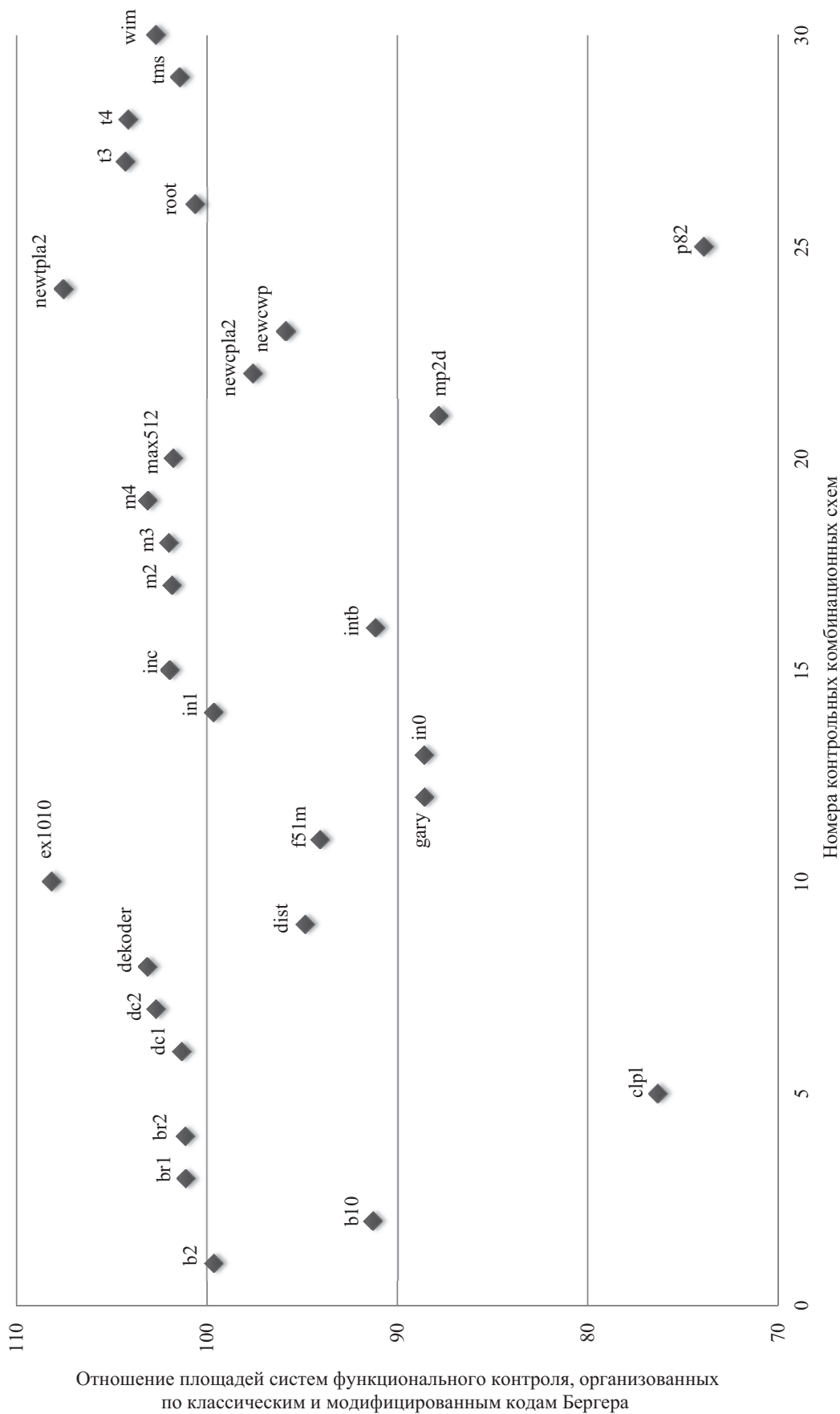


Рис. 5. Сравнение площадей систем функционального контроля, построенных на основе $S(m,k)$ - и $RS(m,k)$ -кодов, при раздельной реализации блоков $f(x)$ и $g(x)$

структуры системы функционального контроля при совместной реализации блоков $f(x)$ и $g(x)$ по сравнению со структурой системы функционального контроля при отдельной реализации блоков $f(x)$ и $g(x)$ для выбранного кода с суммированием:

$$\delta_{S(m,k)} = 100 \cdot \frac{L_{S(m,k)}^J}{L_{S(m,k)}^S}, \%;$$

$$\delta_{RS(m,k)} = 100 \cdot \frac{L_{RS(m,k)}^J}{L_{RS(m,k)}^S}, \%.$$

При совместной реализации блоков основной и контрольной логики в системе функционального контроля, организованной по классическому коду Бергера, удастся уменьшить площадь в среднем на 11,985%. Для модифицированного кода Бергера, наоборот, площадь увеличивается в среднем на 13,549%. Для некоторых комбинационных схем совместная реализация блоков основной и контрольной логики дает уменьшение площади более чем на четверть (см. таблицу).

Заключение

Использование модифицированных кодов Бергера при организации систем функционального контроля как с отдельной, так и с совместной реализацией контролируемой комбинационной схемы и блока контрольной логики более эффективно не только с позиции количества обнаруживаемых одиночных неисправностей, но и по показателю аппаратных затрат. При отдельной реализации схем основной и контрольной логики в системе функционального контроля достигается уменьшение показателя площади в среднем на 2,375% по сравнению с системой контроля, организованной по классическому коду Бергера. Совместная реализация схем основной и контрольной логики при использовании модифицированного кода Бергера выгоднее на 0,735%, чем при использовании классического кода Бергера.

Коэффициент сжатия для системы функционального контроля по модифицированному коду Бергера равен $\delta_{RS(m,k)} = 113,549\%$, что говорит об увеличении площади системы функционального контроля при совместной реализации блоков основной и контрольной логики, чем при их отдельной реализации.

В целом можно заключить, что модифицированные коды Бергера могут быть эффективно использованы при построении надежных систем автоматики и телемеханики.

Библиографический список

1. Блюдов А. А. Коды с суммированием для организации контроля комбинационных схем / А. А. Блюдов, Д. В. Ефанов, В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. – 2013. – № 6. – С. 153–164.
2. Блюдов А. А. О кодах с суммированием единичных разрядов в схемах функционального контроля / А. А. Блюдов, Д. В. Ефанов, В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. – 2014. – № 8. – С. 131–145.
3. 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.
4. Ефанов Д. В. О свойствах кода с суммированием в схемах функционального контроля / Д. В. Ефанов, В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. – 2010. – № 6. – С. 155–162.
5. Ефанов Д. В. Синтез генераторов тестеров модифицированных кодов Бергера на основе свойств линейных и простых симметричных функций / Д. В. Ефанов // Изв. Петербург. гос. ун-та путей сообщения. – 2014. – № 4. – С. 99–109.
6. 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.

7. Согомонян Е. С. Самопроверяемые устройства и отказоустойчивые системы / Е. С. Согомонян, Е. В. Слабаков. – М. : Радио и связь, 1989. – 208 с.
8. Ходаковский В. А. Мера сходства узкополосных сигналов / В. А. Ходаковский, Т. В. Ходаковский // Автоматика на транспорте. – 2015. – Т. 1, № 2. С. 180–194.
9. Шамапов В. И. Электромагнитная совместимость систем железнодорожной автоматики и телемеханики / В. И. Шамапов. – М. : ФГБОУ «Учеб.-методич. центр по образованию на ж.-д. транспорте», 2013. – 244 с.
10. 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.
11. Chandra V. Reliability and Safety Analysis of Fault Tolerant and Fail-Safe Node for Use in Railway Signaling System / V. Chandra, K.V. Kumar // Elsevier J. Reliab. Eng. Syst. – 1997. – Vol. 57, is. 2. – P. 177–183.
12. Collection of Digital Design Benchmarks. – URL : <http://ddd.fit.cvut.cz/prj/Benchmarks>.
13. Fujiwara E. Code Design for Dependable Systems : Theory and Practical Applications / E. Fujiwara. – John Wiley & Sons, 2006. – 720 p.
14. Gorshe S. S. A Self-Checking ALU Design with Efficient Codes / S. S. Gorshe, B. Bose // Proc. 14th VLSI Test Symposium, Princeton, NJ, USA, 1996. – NJ : Princeton, 1996. – P. 157–161.
15. Kunz W. Multi-Level Logic Optimization by Implication Analysis / W. Kunz, P. R. Menon // Proc. IEEE/ACM Int. Conf. on Computer Aided Design (ICCAD'94), San Jose, CA, Nov. – San Jose, 1994. – P. 6–13.
16. Matrosova A. Survivable Self-Checking Sequential Circuits / A. Matrosova, I. Levin, S. Ostanin // Proc. of 2001 IEEE Int. Symp. on Defect and Fault Tolerance in VLSI Systems (DFT 2001), San Francisco, CA, 2001, 24–26 Oct. – San Francisco, 2001. – P. 395–402.
17. Mitra S. Which Concurrent Error Detection Scheme to Choose? / S. Mitra, E. J. McClaskey // Proc. Int. Test Conf., Atlantic City, NJ, USA, 2000, 3–5 Oct. – Atlantic City ; NJ, 2000. – P. 985–994.
18. Morosov A. Self-Checking Combinational Circuits with Unidirectionally Independent Outputs / A. Morosov, V. V. Sapozhnikov, V. V. Sapozhnikov, M. Goessel // VLSI Design. – 1998. – Vol. 5, is. 4. – P. 333–345.
19. Potin O. A New Scheme for Off-Line and On-Line Testing With ABC And Berger Encoding / O. Potin, Ch. Dufaza, Ch. Landrault // Proc. 4th IEEE Int. Online Testing Workshop, Italia, Capri, 1998. – Capri, 1998. – P. 71–75.
20. Sentovich E. M. SIS : A System for Sequential Circuit Synthesis / E. M. Sentovich, K. J. Singh, L. Lavagno et al. // Electronics Res. Laboratory, Dep. of Electrical Eng. and Computer Sci., Univ. of California, Berkeley, 1992, 4 May. – Berkeley : Univ. of California, 1992. – 45 p.
21. Ubar R. Design and Test Technology for Dependable Systems-on-Chip (Premier Reference Source) / R. Ubar, J. Raik, H.-T. Vierhaus. – Inf. Sci. Ref., Hershey, NY, IGI Global, 2011. – 578 p.
22. Wang L.-T. System-on-Chip Test Architectures: Nanometer Design for Testability / L.-T. Wang, C. E. Stroud, N. A. Touba. – Morgan Kaufmann Publ., 2008. – 856 p.

References

1. Blyudov A.A., Yefanov D.V., Sapozhnikov V.V. & Sapozhnikov V.V. *Avtomatika i telemekhanika – Automatics and Telemechanics*, 2013, no. 6, pp. 153-164.
2. Blyudov A. A., Yefanov D. V., Sapozhnikov V.V. & Sapozhnikov V.V. *Avtomatika i telemekhanika – Automatics and Telemechanics*, 2014, no. 8, pp. 131-145.
3. Blyudov A.A., Yefanov D.V., Sapozhnikov V.V. & Sapozhnikov V.V. *Elektronnoye modelirovaniye – Electronic Simulation*, 2012, Vol. 34, no. 6, pp. 17-29.
4. Yefanov D.V., Sapozhnikov V.V. & Sapozhnikov V.V. *Avtomatika i telemekhanika – Automatics and Telemechanics*, 2010, no. 6, pp. 155-162.
5. Yefanov D.V. *Izvestiya PGUPS – Proc. of Petersburg Transp. Univ.*, 2014, Is. 4, pp. 99-109.
6. Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov V.V. & Yefanov D.V. *Avtomatika na transporte – Automatics in Transport*, 2015, Vol. 1, no. 1, pp. 84-107.
7. Sogomonyan Ye. S. & Slabakov Ye. V. *Samoproveryayemye ustroystva i otkazoustoychivyye*

sistemy [Self-Checking Machines and Fail-Safe Systems]. Moscow, Radio i svyaz, 1989. 208 с.

8. Khodakovskiy V.A. & Khodakovskiy T. V. *Avtomatika na transporte – Automatics in Transport*, 2015, Vol. 1, no. 2, pp. 180-194.

9. Shamanov V.I. Elektromagnitnaya sovmestimost sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki [Electromagnetic Compatibility of Systems of Railway Automatics and Telemechanics]. Moscow, FGBOU “Training Centre for Railway Transport Education”, 2013. 244 p.

10. Berger J.M. A Note on Error Detecting Codes for Asymmetric Channels. *Inf. and Control*, 1961, Vol. 4, no. 1, pp. 68-73.

11. Chandra V. & Kumar K. V. Reliability and Safety Analysis of Fault Tolerant and Fail-Safe Node for Use in Railway Signaling System. *Elsevier J. Reliab. Eng. Syst.*, 1997, Vol. 57, is. 2, pp. 177-183.

12. Collection of Digital Design Benchmarks, available at: <http://ddd.fit.cvut.cz/prj/Benchmarks>.

13. Fujiwara E. Code Design for Dependable Systems: Theory and Pract. Applications. John Wiley & Sons, 2006. 720 p.

14. Gorshe S. S. & Bose B. A Self-Checking ALU Design with Efficient Codes. *Proc. 14th VLSI Test Symp.*, Princeton, NJ, USA, 1996. NJ, Princeton, 1996, pp. 157-161.

15. Kunz W. & Menon P.R. Multi-Level Logic Optimization by Implication Analysis. *Proc. IEEE/ACM Int. Conf. on Computer Aided Design (ICCAD '94)*, San Jose, CA, Nov. San Jose, 1994, pp. 6-13.

16. Matrosova A., Levin I. & Ostanin S. Survivable Self-Checking Sequential Circuits. *Proc. of 2001 IEEE Int. Symp. on Defect and Fault Tolerance in VLSI Systems (DFT 2001)*, San Francisco, CA, 2001, 24–26 Oct. San Francisco, 2001, pp. 395-402.

17. Mitra S. & McClaskey E. J. Which Concurrent Error Detection Scheme to Choose? *Proc. Int. Test Conf.*, Atlantic City, NJ, USA, 2000, 3–5 Oct. Atlantic City, NJ, 2000, pp. 985-994.

18. Morosov A., Saposhnikov V. V., Saposhnikov V. V. & Goessel M. Self-Checking Combinational Circuits with Unidirectionally Independent Outputs. *VLSI Design*, 1998, Vol. 5, is. 4, pp. 333-345.

19. Potin O., Dufaza Ch. & Landrault Ch. A New Scheme for Off-Line and On-Line Testing With ABC And Berger Encoding. *Proc. 4th IEEE Int. Online Testing Workshop*, Italia, Capri, 1998. Capri, 1998, pp. 71-75.

20. Sentovich E.M., Singh K.J., Lavagno L., Monon C., Murgai R., Saldanha A., Savoj H., Stephan P.R., Brayton R.K. & Sangiovanni-Vincentelli A. SIS: A System for Sequential Circuit Synthesis. *Electronics Res. Laboratory, Dep. of Electrical Eng. and Computer Sci.*, Univ. of California, Berkeley, 1992, 4 May. Berkeley, Univ. of California, 1992. 45 p.

21. Ubar R., Raik J. & Vierhaus H.-T. Design and Test Technology for Dependable Systems-on-Chip (Premier Reference Source). *Inf. Sci. Ref.*, Hershey, NY, IGI Global, 2011. 578 p.

22. Wang L.-T., Stroud C. E. & Touba N. A. System-on-Chip Test Architectures: Nanometer Design for Testability. Morgan Kaufmann Publ., 2008. 856 p.

САПОЖНИКОВ Валерий Владимирович – д-р техн. наук, профессор, kat@pgups.edu; САПОЖНИКОВ Владимир Владимирович – д-р техн. наук, профессор, kat@pgups.edu; *ЕФАНОВ Дмитрий Викторович – канд. техн. наук, доцент, TrES-4b@yandex.ru; ЧЕРЕПАНОВА Мария Родионовна – студент, bugsbunny.k38@gmail.com (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).