

# Организация полностью самопроверяемой схемы встроенного контроля на основе метода логического дополнения до равновесного кода «2 из 4»

<sup>1</sup> Д.В. Ефанов <TrES-4b@yandex.ru>

<sup>2</sup> В.В. Сапожников <port.at.pgups@gmail.com>

<sup>2</sup> Вл.В. Сапожников <at.pgups@gmail.com>

<sup>2</sup> Д. В. Пивоваров <pivovarov.d.v.spb@gmail.com>

<sup>1</sup> ООО «ЛокоТех-Сигнал»,

107113, Россия, г. Москва, 3-я Рыбинская ул., д. 18, стр. 22

<sup>2</sup> Петербургский государственный университет путей сообщения  
Императора Александра I,

190031, Россия, г. Санкт-Петербург, Московский пр., д. 9

**Аннотация.** Рассматривается задача синтеза самопроверяемой схемы встроенного контроля с оптимизацией структурной избыточности на основе использования метода логического дополнения до равновесного кода «2 из 4». Разработан способ доопределения значений контрольных функций, позволяющий пошагово устанавливать их вид и при этом обеспечивать решение задачи тестирования соответствующих элементов сложения по модулю два и схемы тестера. При этом в значения функций вводятся неопределенности, что позволяет минимизировать сами функции, и соответственно, упрощать схему блока контрольной логики.

**Ключевые слова:** схема встроенного контроля; логическое дополнение; равновесный код; код «2 из 4».

**DOI:** 10.15514/ISPRAS-2018-30(2)-6

**Для цитирования:** Ефанов Д.В., Сапожников В.В., Сапожников Вл.В., Пивоваров Д.В. Организация полностью самопроверяемой схемы встроенного контроля на основе метода логического дополнения до равновесного кода «2 из 4». Труды ИСП РАН, том 30, вып. 2, 2018 г., стр. 99-112. DOI: 10.15514/ISPRAS-2018-30(2)-6

## 1. Введение

При построении отказоустойчивых компонентов систем автоматического управления широко применяют самопроверяемые схемы встроенного контроля, организуя для объекта диагностирования систему функционального

контроля [1–3]. В такой системе реализуется стратегия рабочего диагностирования, когда входные рабочие воздействия на объект диагностирования одновременно являются и тестовыми, а отключение его от работы не является необходимым [4].

Системы функционального контроля в реальных приложениях должны обеспечивать 100%-ное обнаружения ошибок из заданного класса. Причем схема встроенного контроля в составе системы функционального контроля должна быть полностью самопроверяемой: любая неисправность из заданного класса должна обнаруживаться в момент первого ее проявления на контрольных выходах в виде формирования защитной комбинации [5, 6].

При синтезе систем функционального контроля используются равномерные блочные коды с избыточностью, не превышающей количества рабочих выходов объекта диагностирования. К таким кодам относятся различные коды с суммированием (коды Бергера [7] и их модификации) и равновесные коды [8]. В процессе синтеза системы функционального контроля используют особенности обнаружения ошибок выбранным равномерным кодом. Например, классические коды Бергера и равновесные коды обладают свойством обнаружения любых монотонных и асимметричных ошибок.

Это свойство позволяет использовать данные коды в процессе построения системы функционального контроля следующим образом [9]:

- 1) осуществлять поиск групп монотонно (или и монотонно, и асимметрично) независимых выходов объекта диагностирования с последующим их контролем на основе соответствующего кода и объединением контрольных выходов получаемых подсхем контроля на входах самопроверяемой схемы сжатия парафазных сигналов;
- 2) преобразовывать структурную схему объекта диагностирования в схему с единой группой монотонно (или и монотонно, и асимметрично) независимых выходов с последующим контролем их на основе соответствующего кода.

Такой способ, как показано в современной мировой литературе по синтезу контролепригодных компонентов систем управления [10–13], применяется довольно часто.

В системе функционального контроля объект диагностирования  $F(x)$  снабжается самопроверяемой схемой встроенного контроля в составе блока контрольной логики  $G(x)$  и полностью самопроверяемого тестера TSC [14]. Схема блока контрольной логики строится таким образом, чтобы на выходах обоих блоков  $F(x)$  и  $G(x)$  в процессе нормальной эксплуатации формировались только кодовые слова заранее выбранного блочного кода. Тестер контролирует принадлежность поступающего на его входы кодового слова выбранному коду, и при его нарушении формирует сигнал ошибки [15].

В [16, 17] описана структурная схема системы функционального контроля, включающая еще один блок, помимо обозначенных выше, – блок логического

дополнения, образованный каскадом сумматоров по модулю два ( $XOR$ s). Структура системы функционального контроля, полученная на основе метода логического дополнения, является более «гибкой», чем классическая структура [14], с точки зрения обеспечения самопроверяемости схемы контроля и структурной избыточности получаемого дискретного устройства.

## 2. Контроль логических устройств на основе 2/4-кода

В [23] отмечены существенные преимущества использования 2/4-кода при организации контроля логических устройств автоматики и вычислительной техники по сравнению с другими равновесными кодами. Прежде всего, они заключаются в следующем:

- 1) тестер 2/4-кода (2/4-TSC) имеет простую структуру (рис. 1) и требует для полной проверки всего четырех комбинаций: {0011; 1100; 1001; 0110} [24];
- 2) Для преобразования любого четырехбитного вектора, формируемого на выходах блока  $F(x)$ , в кодовое слово 2/4-кода потребуется изменение максимум двух функций, а значит, блок логического дополнения будет иметь наименьшую сложность, а блок контрольной логики – всего два выхода [25];
- 3) эксперименты [26, 27] показывают, что использование 2/4-кода для контроля многовыходных логических устройств дает меньшую по сложности схему контроля, чем любых других равновесных кодов.

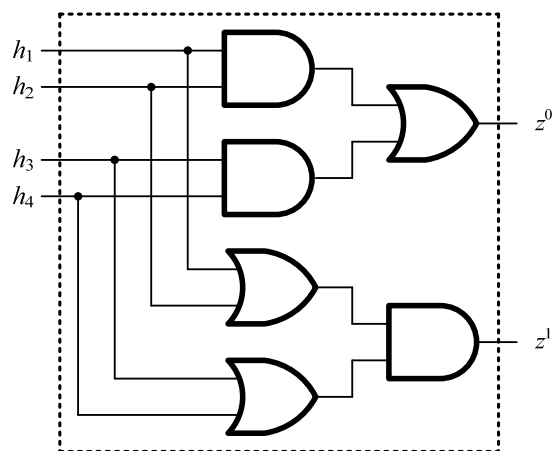


Рис. 1. Наиболее простая структурная схема 2/4-TSC  
Fig. 1. The simplest structural circuit of 2/4-TSC

Структурная схема системы функционального контроля на основе метода логического дополнения до равновесного 2/4-кода изображена на рис. 2. Эта

структура является базовой и используется при контроле группы из четырех выходов. Информационный вектор  $\langle f_4, f_3, f_2, f_1 \rangle$  преобразуется в кодовое слово 2/4-кода  $\langle h_4, h_3, h_2, h_1 \rangle$  следующим образом:  $h_1 = f_1, h_2 = f_2, h_3 = f_3 \oplus g_3, h_4 = f_4 \oplus g_4$ . Таким образом, в блоке логического дополнения преобразуются только две рабочие функции на элементах  $XOR_3$  и  $XOR_4$ .

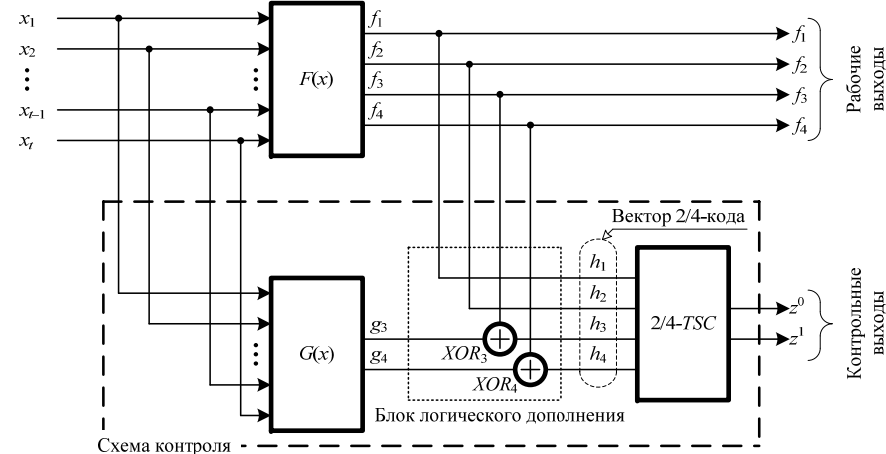


Рис. 2. Структурная схема системы контроля комбинационного логического устройства на основе 2/4-кода

Fig. 2. The structural scheme of the control system of the combination logic device based on 2/4-code

Для обеспечения полной самопроверяемости системы функционального контроля необходимо обеспечивать формирование хотя бы по разу всех кодовых слов 2/4-кода, а также формирование хотя бы по разу всех тестовых комбинаций каждого элемента  $XOR$  – комбинаций {00; 01; 10; 11} [28]. Кроме того, блоки  $F(x)$  и  $G(x)$  должны быть проверяемыми, то есть любая неисправность из заданного класса должна проявляться на выходах в виде искажений значений. Далее приводится способ построения системы функционального контроля, учитывающий обозначенные выше особенности тестирования ее компонентов.

## 3. Способ построения ССВК на основе 2/4-кода

Рассмотрим следующий подход к построению самопроверяемой схемы контроля на основе 2/4-кода, ориентированный на доопределении значений двух контрольных функций пошагово, исходя из обеспечения условий тестируемости элементов  $XOR$  блока логического дополнения и 2/4-TSC.

Будем рассматривать способ на примере организации схемы контроля для комбинационного логического устройства, заданного в виде таблицы

истинности (табл. 1). Устройство имеет четыре входа  $x_1, x_2, x_3$  и  $x_4$  и четыре выхода  $f_1, f_2, f_3$  и  $f_4$ .

**Шаг 1.** На начальном этапе выбираются две рабочие функции, которые не будут дополняться и будут напрямую соединены с входами тестера. Эти функции выбираются из соображений обеспечения формирования тестового множества для 2/4-TSC {0011; 1100; 1001; 0110}, а именно: хотя бы на одном входном наборе должны быть сформированы хотя бы по разу информационные векторы  $\langle f_1 f_2 f_3 f_4 \rangle = \langle 0 0 \sim \sim \rangle, \langle 0 1 \sim \sim \rangle, \langle 1 0 \sim \sim \rangle, \langle 1 1 \sim \sim \rangle$ . В противном случае окажется невозможным формирование всех тестовых комбинаций для 2/4-TSC. В рассматриваемом примере в качестве не дополняемых функций могут быть выбраны функции  $f_1$  и  $f_2$ . Таким образом,  $h_1 = f_1$  и  $h_2 = f_2$ .

**Шаг 2.** Определяются условия дополнения функции  $f_3$ , которые должны учитывать и предыдущий шаг алгоритма. Значение функции  $h_3$  должно выбираться исходя из выражения

$$h_3 = \begin{cases} 0, & \text{если } h_1 h_2 = 1; \\ 1, & \text{если } h_1 \vee h_2 = 0; \\ \sim, & \text{если } h_1 \oplus h_2 = 1. \end{cases}$$

**Шаг 3.** Из предыдущего шага следует, что:

$$g_3 = \begin{cases} f_3, & \text{если } h_3 = 0; \\ \overline{f_3}, & \text{если } h_3 = 1; \\ \sim, & \text{если } h_3 = \sim. \end{cases}$$

Выполнение третьего шага для рассматриваемого примера представлено в табл. 1.

Табл. 1. Первый этап получения значений контрольных функций

Table 1. The first stage of obtaining the values of check functions

No.	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$h_1$	$h_2$	$h_3$	$h_4$	$g_3$	$g_4$
0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	~		~	
1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1		1	
2	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	~		~	
3	0	0	1	1	1	0	1	1	1	0	~		~	
4	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1		0	
5	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1		1	
6	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	~		~	
7	0	1	1	1	0	0	1	0	0	0	1		0	
8	1	0	0	0	1	0	1	1	1	0	~		~	
9	1	0	0	1	1	1	0	1	1	1	0		0	

10	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1		1	
11	1	0	1	1	1	0	0	1	1	0	~		~	
12	1	1	0	0	0	1	1	1	0	1	~		~	
13	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1		1	
14	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	1		0	
15	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	1		0	

**Шаг 4.** Частично определенная функция  $g_3$  минимизируется, например, по методу Карно (рис. 3). Минимизированная функция  $g_3$  имеет вид:

$$g_3 = \overline{x_1 x_2} \vee \overline{x_2 x_3} \vee \overline{x_2 x_3 x_4}.$$

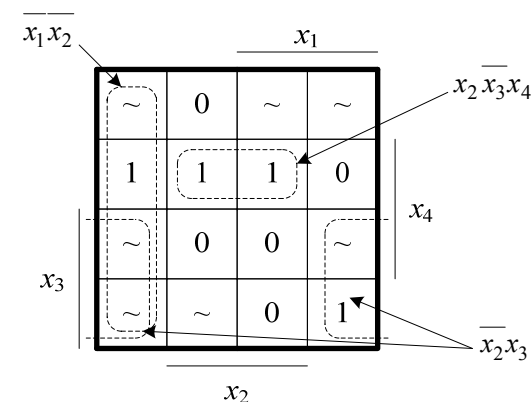


Рис. 3. Минимизация частично определенной функции  $g_3$

Fig. 3. The minimization of a partially defined function  $g_3$

**Шаг 5.** Вычисляется функция  $h_3 = f_3 \oplus g_3$ . Результат занесен в таблицу 2.

Табл. 2. Второй этап получения значений контрольных функций

Table 2. The second stage of obtaining the values of check functions

No.	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$h_1$	$h_2$	$h_3$	$h_4$	$g_3$	$g_4$
0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	1	1	1
1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	1	0
2	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	1	0	1	1
3	0	0	1	1	1	0	1	1	1	0	0	1	1	0
4	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	1
5	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
6	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0
7	0	1	1	1	0	0	1	0	0	0	1	1	0	1
8	1	0	0	0	1	0	1	1	1	0	1	0	0	1

9	1	0	0	1	1	1	0	1	1	1	0	0	0	1
10	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
11	1	0	1	1	1	0	0	1	1	0	1	0	1	1
12	1	1	0	0	0	1	1	1	0	1	1	0	0	1
13	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
14	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0
15	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	1	1	0	1

*Шаг 6.* Необходимо проверить, все ли тестовые комбинации для  $XOR_3$  сформированы после выполнения процедуры однозначного определения функции  $g_3$ . Для этого следует вычислить четыре проверяющие функции, устанавливающие наличие или отсутствие входных наборов, на которых формируются тестовые комбинации элемента сложения по модулю два:

$$\begin{aligned}
 p_1^3 &= f_3 g_3 = \overline{x_1 x_2 x_3 x_4} \vee \overline{x_1 x_2 x_3 x_4} \vee \overline{x_1 x_2 x_3 x_4} \vee \\
 &\vee \overline{x_1 x_2 x_3 x_4} \vee \overline{x_1 x_2 x_3 x_4} \vee \overline{x_1 x_2 x_3 x_4} \neq 0; \\
 p_2^3 &= f_3 g_3 = \overline{x_1 x_2 x_3 x_4} \vee \overline{x_1 x_2 x_3 x_4} \neq 0; \\
 p_3^3 &= f_3 g_3 = \overline{x_1 x_2 x_3 x_4} \vee \overline{x_1 x_2 x_3 x_4} \vee \overline{x_1 x_2 x_3 x_4} \vee \overline{x_1 x_2 x_3 x_4} \vee \\
 &\vee \overline{x_1 x_2 x_3 x_4} \vee \overline{x_1 x_2 x_3 x_4} \vee \overline{x_1 x_2 x_3 x_4} \neq 0. \\
 p_4^3 &= f_3 g_3 = \overline{x_1 x_2 x_3 x_4} \neq 0.
 \end{aligned}$$

Так как все четыре функции не равны 0, то элемент  $XOR_3$  тестируется.

Если же проверка показала отсутствие какой-либо тестовой комбинации для элемента  $XOR_3$ , то выполняется коррекция функции  $g_3$ .

*Шаг 7.* Коррекция функции  $g_3$  требует доопределения данной функции на неопределенных значениях в соответствии с требуемой тестовой комбинацией.

Для этого по формуле  $g_3^* = h_1 \oplus h_2$  находятся те входные наборы, на которых функция  $g_3 = \sim$ . Далее осуществляется доопределение функции  $g_3$  на установленных входных наборах для обеспечения формирования соответствующей тестовой комбинации элемента  $XOR_3$ .

В случае если процедура коррекции значения функции  $g_3$  не дает возможности формирования всех проверяющих комбинаций, осуществляется замена функции  $g_3$  на  $g_4$ . Действия шагов 2 – 7 повторяются. В случае, если результат также не достигнут, в качестве не дополняемых функций выбирают другие функции и процедура повторяется.

*Шаг 8.* Определяются значения функции  $g_4$ :

$$g_4 = \begin{cases} f_4, & \text{если } h_1 h_2 \vee h_1 h_3 \vee h_2 h_3 = 1; \\ \overline{f_4}, & \text{если } h_1 h_2 \vee h_1 h_3 \vee h_2 h_3 \neq 1. \end{cases}$$

Условия выбора значений функции  $g_4$  определяются исходя из проверки наличия в уже определенных значениях разрядов кодового слова  $\langle h_1 h_2 h_3 \sim \rangle$  наличия двух единичных значений. Так как функция  $g_3$  однозначно определена, функция  $g_4$  также определяется однозначно (см. табл. 2).

*Шаг 9.* Выполняется процедура проверки формирования полного множества тестовых комбинаций для элемента  $XOR_4$ :

$$\begin{aligned}
 p_1^4 &= f_4 g_4 = \overline{x_1 x_2 x_3 x_4} \neq 0; \\
 p_2^4 &= f_4 g_4 = \overline{x_1 x_2 x_3 x_4} \vee \overline{x_1 x_2 x_3 x_4} \vee \\
 &\vee \overline{x_1 x_2 x_3 x_4} \vee \overline{x_1 x_2 x_3 x_4} \vee \overline{x_1 x_2 x_3 x_4} \neq 0; \\
 p_3^4 &= f_4 g_4 = \overline{x_1 x_2 x_3 x_4} \vee \overline{x_1 x_2 x_3 x_4} \vee \overline{x_1 x_2 x_3 x_4} \neq 0. \\
 p_4^4 &= f_4 g_4 = \overline{x_1 x_2 x_3 x_4} \vee \overline{x_1 x_2 x_3 x_4} \vee \overline{x_1 x_2 x_3 x_4} \vee \overline{x_1 x_2 x_3 x_4} \vee \\
 &\vee \overline{x_1 x_2 x_3 x_4} \vee \overline{x_1 x_2 x_3 x_4} \vee \overline{x_1 x_2 x_3 x_4} \neq 0.
 \end{aligned}$$

Поскольку все проверяющие функции не равны нулю, элемент  $XOR_4$  полностью тестируется.

*Шаг 10.* Проверяется наличие среди кодовых слов  $\langle h_1 h_2 h_3 h_4 \rangle$  всех тестовых комбинаций 2/4-TSC. В рассматриваемом случае они формируются.

Таким образом, представленная последовательность действий по доопределению значений контрольных функций, позволяет однозначно установить значения контрольных функций на всех входных наборах, а значит, полностью позволяет синтезировать схему контроля.

## 6. Заключение

Представленный способ построения схемы встроенного контроля для комбинационных логических устройств позволяет достичь свойства ее самопроверяемости за счет последовательного доопределения значений контрольных функций.

Недостатком способа следует признать большое количество операций по доопределению и ограниченность реальным числом входных переменных (не более 30 – 35 – это пределы мощности современных вычислительных систем). При большом количестве входных переменных (более 35) следует применять декомпозицию устройства и выделение отдельных подсхем в его составе. Еще одним недостатком является то, что способ ограничен для его использования при построении схем контроля для логических устройств с малым числом

входов (например, при 3 входах), так как имеется малое число вариантов дополнений.

Способ построения схемы контроля по методу логического дополнения для 2/4-кода универсален, и с учетом того факта, что 2/4-*TSC* имеет простую структуру, позволяет синтезировать схемы встроенного контроля со структурной избыточностью, не превышающей избыточность схемы контроля при использовании метода дублирования. Такое заключение может быть сделано на основании большого количества экспериментов по применению равновесных кодов при организации самопроверяемых схем контроля, в том числе, опубликованных в известных источниках [26].

## Список литературы

- [1]. Kubalik P., Kubátová H. Parity Codes Used for On-Line Testing in FPGA. *Acta Polytechnica*, 2005, Vol. 45, No. 6, pp. 53-59.
- [2]. Ubar R., Raik J., Vierhaus H.-T. Design and Test Technology for Dependable Systems-on-Chip (Premier Reference Source). *Information Science Reference*, Hershey – New York, IGI Global, 2011, 578 p.
- [3]. Borecký J., Kohlík M., Kubátová H. Parity Driven Reconfigurable Duplex System. *Microprocessors and Microsystems*, 2017, Vol. 52, pp. 251-260, doi: 10.1016/j.micpro.2017.06.015.
- [4]. А.В. Дрозд, В.С. Харченко, С.Г. Антошук, Ю.В. Дрозд, М.А. Дрозд, Ю.Ю. Сулима. Рабочее диагностирование безопасных информационно-управляющих систем. Под ред. А.В. Дрозда и В.С. Харченко. Харьков: Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», 2012, 614 с.
- [5]. Пархоменко П.П., Согомонян Е.С. Основы технической диагностики (оптимизация алгоритмов диагностирования, аппаратные средства). М.: Энергоатомиздат, 1981, 320 с.
- [6]. Согомонян Е.С., Слабаков Е.В. Самопроверяемые устройства и отказоустойчивые системы. М.: Радио и связь, 1989, 208 с.
- [7]. Berger J.M. A Note on Error Detecting Codes for Asymmetric Channels. *Information and Control*, 1961, vol. 4, issue 1, pp. 68-73, doi:10.1016/S0019-9958(61)80037-5.
- [8]. Freiman C.V. Optimal Error Detection Codes for Completely Asymmetric Binary Channels. *Information and Control*, 1962, Vol. 5, Issue 1, pp. 64-71, doi: 10.1016/S0019-9958(62)90223-1.
- [9]. 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.
- [10]. Sogomonyan E.S., Gössel M. Design of Self-Testing and On-Line Fault Detection Combinational Circuits with Weakly Independent Outputs. *Journal of Electronic Testing: Theory and Applications*, 1993, Vol. 4, Issue 4, Pp. 267-281, doi:10.1007/BF00971975.
- [11]. Busaba F.Y., Lala P.K. Self-Checking Combinational Circuit Design for Single and Unidirectional Multibit Errors. *Journal of Electronic Testing: Theory and Applications*, 1994, Vol. 5, Issue 1, Pp. 19-28, DOI: 10.1007/BF00971960.

- [12]. Matrosova A.Yu., Levin I., Ostanin S.A. Self-Checking Synchronous FSM Network Design with Low Overhead. *VLSI Design*, 2000, Vol. 11, Issue 1, Pp. 47-58, DOI: 10.1155/2000/46578.
- [13]. Ostanin S. Self-Checking Synchronous FSM Network Design for Path Delay Faults. *Proceedings of 15th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2017)*, Novi Sad, Serbia, September 29 – October 2, 2017, pp. 696-699, doi: 10.1109/EWDTS.2017.8110129.
- [14]. Nicolaidis M., Zorian Y. On-Line Testing for VLSI – A Compendium of Approaches. *Journal of Electronic Testing: Theory and Applications*, 1998, №12, Pp. 7-20, DOI: 10.1023/A:1008244815697.
- [15]. Piestrak S.J. Design of Self-Testing Checkers for Unidirectional Error Detecting Codes, Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 1995, 111 p.
- [16]. Сапожников В.В., Сапожников Вл.В., Дмитриев А.В., Морозов А.В., Гессель М. Организация функционального контроля комбинационных схем методом логического дополнения. *Электронное моделирование*, 2002, Том 24, №6, С. 52-66.
- [17]. Гессель М., Морозов А.В., Сапожников В.В., Сапожников Вл.В. Логическое дополнение – новый метод контроля комбинационных схем. *Автоматика и телемеханика*, 2003, №1, С. 167-176.
- [18]. Sapozhnikov V.I., Dmitriev A., Goessel M., Saposhnikov V.V. Self-Dual Parity Checking – a New Method for on Line Testing. *Proceedings of 14th IEEE VLSI Test Symposium*, 28 April – 1 May 1996, Princeton, NJ, USA, pp. 162-168, doi: 10.1109/VTEST.1996.510852.
- [19]. Dmitriev A., Saposhnikov V., Saposhnikov V.I., Goessel M., Moshanin V., Morosov A. New Self-Dual Circuits for Error Detection and Testing. *VLSI Design*, 2000, Vol. 11, Issue 1, Pp. 1-21, DOI: 10.1155/2000/84720.
- [20]. Gössel M., Ocheretny V., Sogomonyan E., Marienfeld D. New Methods of Concurrent Checking: Edition 1, Dordrecht: Springer Science+Business Media B.V., 2008, 184 p.
- [21]. Sen S.K. A Self-Checking Circuit for Concurrent Checking by 1-out-of-4 code with Design Optimization using Constraint Don't Cares. *National Conference on Emerging trends and advances in Electrical Engineering and Renewable Energy (NCEEERE 2010)*, Sikkim Manipal Institute of Technology, Sikkim, held during 22-24 December, 2010.
- [22]. 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. *Proceedings of the 10th International Workshops on Boolean Problems*, Freiberg, Germany, September, 2012, pp. 33-40.
- [23]. Сапожников В.В., Сапожников Вл.В., Ефанов Д.В. Построение самопроверяемых структур систем функционального контроля на основе равновесного кода «2 из 4». *Проблемы управления*, 2017, №1, с. 57-64.
- [24]. Сапожников В.В., Сапожников Вл.В. Самопроверяемые дискретные устройства, СПб: Энергоатомиздат, 1992, 224 с.
- [25]. Sapozhnikov V., Sapozhnikov V.I., Efanov D. Concurrent Error Detection of Combinational Circuits by the Method of Boolean Complement on the Base of «2-out-of-4» Code. *Proceedings of 14th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2016)*, Yerevan, Armenia, October 14-17, 2016, pp. 126-133, doi: 10.1109/EWDTS.2016.7807677.
- [26]. Пивоваров Д.В. Построение систем функционального контроля многовыходных комбинационных схем методом логического дополнения по равновесным кодам. *Автоматика на транспорте*, 2018, Том 4, №1, С. 130-148.

- [27]. Сапожников В.В., Сапожников В.В., Ефанов Д.В., Пивоваров Д.В. Синтез систем функционального контроля многовыходных комбинационных схем на основе метода логического дополнения. Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика, 2017, №4, С. 69-80, doi: 10.17223/19988605/41/9.
- [28]. Аксёнова Г.П. Необходимые и достаточные условия построения полностью проверяемых схем свертки по модулю 2. Автоматика и телемеханика, 1979, №9, С. 126-135.

## The organization of the totally self-checking integrated control circuit based on the Boolean complement method up to «2-out-of-4» constant-weight code

<sup>1</sup> D.V. Efanov <TrES-4b@yandex.ru>

<sup>2</sup> V.V. Sapozhnikov <port.at.pgups@gmail.com>

<sup>2</sup> V.I. Sapozhnikov <at.pgups@gmail.com>

<sup>2</sup> D.V. Pivovarov <pivovarov.d.v.spb@gmail.com>

<sup>1</sup> ООО «LocoTech-Signal»,

18, box 22, 3ed Rybinskaya st., Moscow, Russia, 107113

<sup>2</sup> Emperor Alexander I St. Petersburg state transport university,

9, Moscovsky ave., St. Petersburg, Russia 190031

**Abstract.** The article considers the problem of the synthesis of a self-checking integrated control circuit with optimization of structural redundancy using the Boolean complement method up to 2-out-of-4 constant-weight code. A method for determining the values of control functions is developed, which makes it possible to set their appearance step by step, this ensures the solution of the problem of testing the corresponding elements of addition by modulo two and the tester circuit. In this case, uncertainties are introduced into the values of functions, which makes it possible to minimize the functions themselves, and, accordingly, simplify the circuit of check logic block. The method of constructing the control scheme by the method of logical addition for the 2/4-code is universal, and taking into account the fact that 2/4-TSC has a simple structure, it allows synthesizing embedded control schemes with structural redundancy not exceeding the redundancy of the control scheme when using the duplication method. Such a conclusion can be made on the basis of a large number of experiments on the use of equilibrium codes in the organization of self-verified control schemes

**Keywords:** integrated control circuit; Boolean complement; constant-weight code; «2-out-of-4» code.

**DOI:** 10.15514/ISPRAS-2018-30(2)-6

**For citation:** Efanov D.V., Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov V.I., Pivovarov D.V. The organization of the totally self-checking integrated control circuit based on the Boolean complement method up to «2-out-of-4» constant-weight code. *Trudy ISP RAN/Proc. ISP RAS*, vol. 30, issue. 2, 2018, pp. 99-112 (in Russian). DOI: 10.15514/ISPRAS-2018-30(2)-6

## References

- [1]. Kubalik P., Kubátová H. Parity Codes Used for On-Line Testing in FPGA. *Acta Polytechnica*, 2005, Vol. 45, No. 6, pp. 53-59.
- [2]. Ubar R., Raik J., Vierhaus H.-T. Design and Test Technology for Dependable Systems-on-Chip (Premier Reference Source). – Information Science Reference, Hershey – New York, IGI Global, 2011, 578 p.
- [3]. Borecký J., Kohlík M., Kubátová H. Parity Driven Reconfigurable Duplex System. *Microprocessors and Microsystems*, 2017, Vol. 52, pp. 251-260, doi: 10.1016/j.micpro.2017.06.015.
- [4]. Objects and Methods of On-Line Testing for Safe Instrumentation and Control Systems / A.V. Drozd, V.S. Kharchenko, S.G. Antoshchuk, Ju.V. Drozd, M.A. Drozd, Yu.Yu. Sulima. Kharkov, National Aerospace University "KhAI", 2012, 614 p. (in Russian).
- [5]. Parkhomenko P.P., Sogomonyan E.S. Technical Diagnosis Fundamentals (Diagnostic Algorithm Optimization, Apparatus Means). Moscow: Energoatomizdat, 1981, 320 p. (in Russian).
- [6]. Sogomonyan, E.S., Slabakov E.V. Self-Checking Devices and Fault-Tolerant Systems. Moscow: Radio & Communication, 1989, 208 p. (in Russian).
- [7]. Berger J.M. A Note on Error Detecting Codes for Asymmetric Channels. *Information and Control*, 1961, vol. 4, issue 1, pp. 68-73, doi:10.1016/S0019-9958(61)80037-5.
- [8]. Freiman C.V. Optimal Error Detection Codes for Completely Asymmetric Binary Channels. *Information and Control*, 1962, Vol. 5, Issue 1, pp. 64-71, doi: 10.1016/S0019-9958(62)90223-1.
- [9]. Efanov D.V., Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov V.I. Conditions for Detecting a Logical Element Fault in a Combination Device under Concurrent Checking Based on Berger's Code. *Automation and Remote Control*, 2017, Vol. 78, Issue 5, pp. 891-901, doi: 10.1134/S0005117917050113.
- [10]. Sogomonyan E.S., Gössel M. Design of Self-Testing and On-Line Fault Detection Combinational Circuits with Weakly Independent Outputs. *Journal of Electronic Testing: Theory and Applications*, 1993, Vol. 4, Issue 4, pp. 267-281, doi: 10.1007/BF00971975.
- [11]. Busaba F.Y., Lala P.K. Self-Checking Combinational Circuit Design for Single and Unidirectional Multibit Errors. *Journal of Electronic Testing: Theory and Applications*, 1994, Vol. 5, Issue 1, pp. 19-28, doi: 10.1007/BF00971960.
- [12]. Matrosova A.Yu., Levin I., Ostanin S.A. Self-Checking Synchronous FSM Network Design with Low Overhead. *VLSI Design*, 2000, Vol. 11, Issue 1, pp. 47-58, doi: 10.1155/2000/46578.
- [13]. Ostanin S. Self-Checking Synchronous FSM Network Design for Path Delay Faults. *Proceedings of 15th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2017)*, Novi Sad, Serbia, September 29 – October 2, 2017, pp. 696-699, doi: 10.1109/EWDTS.2017.8110129.
- [14]. Nicolaidis M., Zorian Y. On-Line Testing for VLSI – A Compendium of Approaches. *Journal of Electronic Testing: Theory and Applications*, 1998, Issue 12, pp. 7-20, doi: 10.1023/A:1008244815697.
- [15]. Piestrak S.J. Design of Self-Testing Checkers for Unidirectional Error Detecting Codes. – Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 1995, 111 p.
- [16]. Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov V.I., Dmitriev A.V., Morozov A.V., Gössel M. Organization of Functional Checking of Combinational Circuits by the Logic

- Complement Method, *Yelektronnoje modelirovanije* [Electronic Modeling], 2002, Vol. 24, Issue 6, pp. 51-66. (in Russian).
- [17]. Goessel M., Morozov A.V., Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov V.I.V. Logic Complement, a New Method of Checking the Combinational Circuits. *Automation and Remote Control*, 2003, Vol. 64, Issue 1, pp. 153-161, doi: 10.1023/A:1021884727370.
- [18]. Saposhnikov V.I.V., Dmitriev A., Goessel M., Saposhnikov V.V. Self-Dual Parity Checking – a New Method for on Line Testing. *Proceedings of 14th IEEE VLSI Test Symposium*, 28 April – 1 May 1996, Princeton, NJ, USA, pp. 162-168, doi: 10.1109/VTEST.1996.510852.
- [19]. Dmitriev A., Saposhnikov V., Saposhnikov V.I., Goessel M., Moshanin V., Morosov A. New Self-Dual Circuits for Error Detection and Testing. *VLSI Design*, 2000, Vol. 11, Issue 1, pp. 1-21, doi: 10.1155/2000/84720.
- [20]. Göessel M., Ocheretny V., Sogomonyan E., Marienfeld D. *New Methods of Concurrent Checking: Edition 1.* – Dordrecht: Springer Science+Business Media B.V., 2008, 184 p.
- [21]. Sen S.K. A Self-Checking Circuit for Concurrent Checking by 1-out-of-4 code with Design Optimization using Constraint Don't Cares. *National Conference on Emerging trends and advances in Electrical Engineering and Renewable Energy (NCEEERE 2010)*, Sikkim Manipal Institute of Technology, Sikkim, held during 22-24 December, 2010.
- [22]. 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. *Proceedings of the 10th International Workshops on Boolean Problems*, Freiberg, Germany, September, 2012, pp. 33-40.
- [23]. Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov V.I.V., Efanov D.V. Design of Self-Checking Concurrent Error Detection Systems Based on “2-out-of-4” Constant-Weight Code. *Problemy upravleniya* [Control Sciences], 2017, Issue 1, Pp. 57-64. (in Russian).
- [24]. Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov V.I.V. Self-Checking Discrete Devices. St. Petersburg: Energoatomizdat, 1992, 224 p. (in Russian).
- [25]. Sapozhnikov V., Sapozhnikov V.I., Efanov D. Concurrent Error Detection of Combinational Circuits by the Method of Boolean Complement on the Base of «2-out-of-4» Code. *Proceedings of 14th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2016)*, Yerevan, Armenia, October 14-17, 2016, pp. 126-133, doi: 10.1109/EWDTS.2016.7807677.
- [26]. Pivovarov D.V. Formation of concurrent error detection systems in multiple-output combinational circuits using the Boolean complement method based on constant-weight codes. *Avtomatika na transporte* [Automation on transport], 2018, Vol. 4, Issue 1, pp. 130-148. (in Russian).
- [27]. Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov V.I.V., Efanov D.V., Pivovarov D.V. Synthesis of concurrent error detection systems of multioutput combinational circuits based on Boolean complement method. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta: Upravleniye, vychislitel'naya tekhnika i informatika* [Tomsk State University Journal of Control and Computer Science], 2017, Issue 4, pp. 69-80, doi: 10.17223/19988605/41/9. (in Russian).
- [28]. Aksjonova G.P. Necessary and Sufficient Conditions for Design of Completely Checkable Modulo 2 Convolution Circuits. *Automation and Remote Control*, 1979, Vol. 40, Issue 9, pp. 1362-1369.