

# **СИНТЕЗ САМОПРОВЕРЯЕМЫХ ДИСКРЕТНЫХ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ ЛОГИЧЕСКОЙ КОРРЕКЦИИ СИГНАЛОВ И КОМПОЗИЦИИ РАВНОВЕСНЫХ КОДОВ «1 ИЗ 4» И «3 ИЗ 4».**

## **Ч. 2. Метод синтеза с преобразованием подмножества сигналов от объекта диагностирования**

Д. В. Ефанов\*, Е. И. Елина\*\*

\*\*\*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург;

\*Институт проблем транспорта им. Н. С. Соломенко РАН, г. Санкт-Петербург

\*✉ TrES-4b@yandex.ru, \*\*✉ eseniya-elina@mail.ru

**Аннотация.** В целях снижения значений показателей сложности технической реализации самопроверяемых дискретных устройств по сравнению с методом, описанным в первой части настоящей статьи, предложено учитывать свойства композиции равновесных кодов «1 из 4» и «3 из 4». Благодаря им удастся снизить число преобразуемых сигналов  $p$  в блоке коррекции сигналов и фиксировать его равным 4, 3, 2 или 1. В данной части статьи приведены модифицированные структуры организации схем встроенного контроля для объектов диагностирования и алгоритм их синтеза, учитывающий выбор значения  $p$ . Показано, что с уменьшением числа  $p$  снижается вариативность в выборе кодовых слов, принадлежащих композиции равновесных кодов «1 из 4» и «3 из 4», что может сказаться на возможности обеспечения полной проверки тестера. При этом путем возможных перестановок выходов в контролируемых подмножествах выходов и среди полного множества выходов объекта диагностирования создаются возможности устранения данного недостатка. Выходом из этой ситуации также является возможность увеличения числа  $p$  до 2, 3 или 4. Экспериментально показаны преимущества разработанного метода и демонстрируется их эффективность по сравнению с дублированием и другими методами, основанными на логической коррекции сигналов. При преобразовании  $p = 2$  или  $p = 1$  сигналов в выделяемом подмножестве выходов практически для всех тестовых схем достигнут эффект по сравнению с рассмотренными методами. Полученные авторами результаты говорят о потенциальной эффективности их применения в практических приложениях синтеза самопроверяемых дискретных устройств.

**Ключевые слова:** самопроверяемое дискретное устройство, схема встроенного контроля, логическая коррекция сигналов, композиция равновесных кодов «1 из 4» и «3 из 4», структурная избыточность, контролепригодная структура.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Особенностью описанного в первой части настоящей статьи [1] метода синтеза самопроверяемых дискретных устройств является использование преобразования всех сигналов от выделенной четверки выходов объекта диагностирования.

С одной стороны, это дает высокую вариативность проектировщику устройства, так как позволяет установить значения на выходах блока коррекции сигналов (БКС) в схеме встроенного контроля (СВК) восемью способами на каждом наборе значений аргументов. С другой стороны, преобразование всех сигналов приводит к необходимости

вычисления значений аналогичного количества функций коррекции блоком  $G(X)$ . Количество выходов в существенной мере влияет и на общие показатели сложности технической реализации СВК и структурной избыточности самопроверяемого дискретного устройства. Остальная же часть СВК является типовой. Несмотря на это, как показали результаты экспериментов, метод, описанный в первой части настоящей статьи, весьма эффективен в сравнении с классическим методом дублирования [2] и в ряде случаев эффективен и в сравнении с известными методами, основанными на логической коррекции сигналов (ЛКС) и применении равновесных кодов [3].

Из приведенных выше рассуждений следует, что возможны два пути, позволяющие снизить значения показателей сложности технической реализации самопроверяемого дискретного устройства при использовании ЛКС и композиции равновесных кодов «1 из 4» и «3 из 4». Первый состоит в поиске таких способов формирования функций коррекции блоком  $G(X)$ , при которых две функции и более будут совпадать либо будут совпадать части подфункций (кофакторы). Это можно сделать, например, при использовании бинарных диаграмм решений (англ. *binary decision diagram*, BDD) и разложении булевых функций, вычисляемых блоком  $G(X)$ , на кофакторы с последующей оптимизацией системы булевых функций [4]. Другим же способом является поиск метода, устанавливающего зависимость между значениями, вычисляемыми объектом диагностирования  $F(X)$  и блоком  $G(X)$  на каждом наборе значений аргументов, при котором часть функций коррекции окажутся эквивалентными. Среди большого количества булевых функций, формируемых при использовании ЛКС, это возможно. Однако решение этой задачи остается открытым. Второй путь в решении задачи снижения показателей сложности технической реализации блока  $G(X)$  связан с сокращением числа его выходов при сокращении числа элементов преобразования в БКС. Например, в работе [5] показано, что для построения СВК на основе ЛКС и равновесного кода «1 из 3» достаточно преобразовать всего два сигнала из трех. В статье [6] определено, что при решении аналогичной задачи с применением равновесного кода «1 из 4» можно использовать всего три элемента преобразования вместо четырех. При применении равновесного кода «2 из 4» и вовсе можно сократить число элементов преобразования с четырех до двух [7]. Исследования авторов настоящей статьи показывают, что при использовании композиции равновесных кодов «1 из 4» и «3 из 4» можно добиваться сокращения числа элементов вплоть до одного! Соответственно, возможны эффективные модифика-

ции структуры организации СВК на основе ЛКС и композиции равновесных кодов «1 из 4» и «3 из 4», представленной на рис. 1 в первой части настоящей статьи [1]. Описанию особенностей синтеза самопроверяемых дискретных устройств и посвящена данная часть статьи.

## 1. МОДИФИКАЦИЯ СТРУКТУРЫ СХЕМЫ ВСТРОЕННОГО КОНТРОЛЯ НА ОСНОВЕ КОМПОЗИЦИИ РАВНОВЕСНЫХ КОДОВ «1 ИЗ 4» И «3 ИЗ 4» С УЧЕТОМ УМЕНЬШЕНИЯ ЧИСЛА ПРЕОБРАЗУЕМЫХ СИГНАЛОВ

Учитывая особенности множества кодовых слов композиции равновесных кодов «1 из 4» и «3 из 4», можно оптимизировать структуру СВК, сократив количество элементов преобразования в БКС.

**Теорема 1.** *Минимальное количество элементов XOR, требующихся для получения кодового слова  $\langle h_4(X) h_3(X) h_2(X) h_1(X) \rangle$ , принадлежащего композиции двух равновесных кодов «1 из 4» и «3 из 4», из кодового слова  $\langle f_4(X) f_3(X) f_2(X) f_1(X) \rangle$ , не зависит от вида реализуемых объектом диагностирования функций и равно одному.*

**Доказательство.** Вне зависимости от вида реализуемых объектом диагностирования булевых функций при подаче на его входы каждого из наборов значений аргументов формируется кодовое слово  $\langle f_4(X) f_3(X) f_2(X) f_1(X) \rangle$ , которое может иметь вес  $r \in \{0, 1, 2, 3, 4\}$ . Если  $r = 0$ , то кодовое слово  $\langle f_4(X) f_3(X) f_2(X) f_1(X) \rangle$  можно преобразовать в кодовое слово с весом  $r = 1$ , принадлежащее композиции двух равновесных кодов «1 из 4» и «3 из 4», с использованием коррекции только одного сигнала. Если  $r = 1$  или  $r = 3$ , то кодовое слово  $\langle f_4(X) f_3(X) f_2(X) f_1(X) \rangle$  корректировать не нужно, так как оно принадлежит композиции двух равновесных кодов «1 из 4» и «3 из 4». Если  $r = 2$ , то кодовое слово  $\langle f_4(X) f_3(X) f_2(X) f_1(X) \rangle$  можно преобразовать в кодовое слово с весом  $r = 1$  или  $r = 3$ , принадлежащее композиции двух равновесных кодов «1 из 4» и «3 из 4», с использованием коррекции только одного сигнала. Наконец, при  $r = 4$  кодовое слово  $\langle f_4(X) f_3(X) f_2(X) f_1(X) \rangle$  можно преобразовать в кодовое слово с весом  $r = 3$ , принадлежащее композиции двух равновесных кодов «1 из 4» и «3 из 4», с использованием коррекции тоже только одного сигнала. Коррекция осуществляется единственным образом на каждом наборе значений аргументов. Тем самым были рассмотрены все варианты преобразований кодовых слов  $\langle f_4(X) f_3(X) f_2(X) f_1(X) \rangle$  в кодовые слова, принадлежащие композиции двух равновесных кодов «1 из 4» и «3 из 4», и положение теоремы 1 доказано. ♦

В структуре организации СВК, представленной на рис. 1 в первой части статьи [1], можно некоторые выходы объекта диагностирования не преобразовывать и использовать такую структуру, в ко-



торой корректируются  $p \in \{1, 2, 3\}$  выходов из четверки выбранных на множестве выходов объекта диагностирования, а  $4 - p$  выходов контролировать при прямом подключении к входам тестера композиции двух равновесных кодов «1 из 4» и «3 из 4».

На рис. 1 изображены модифицированные структуры организации СВК для случаев различных значений  $p \in \{1, 2, 3\}$ . Число  $p$  оказывает существенное влияние на показатель сложности технической реализации блока  $G(X)$  и, как следствие, в значительной мере влияет на общий показатель

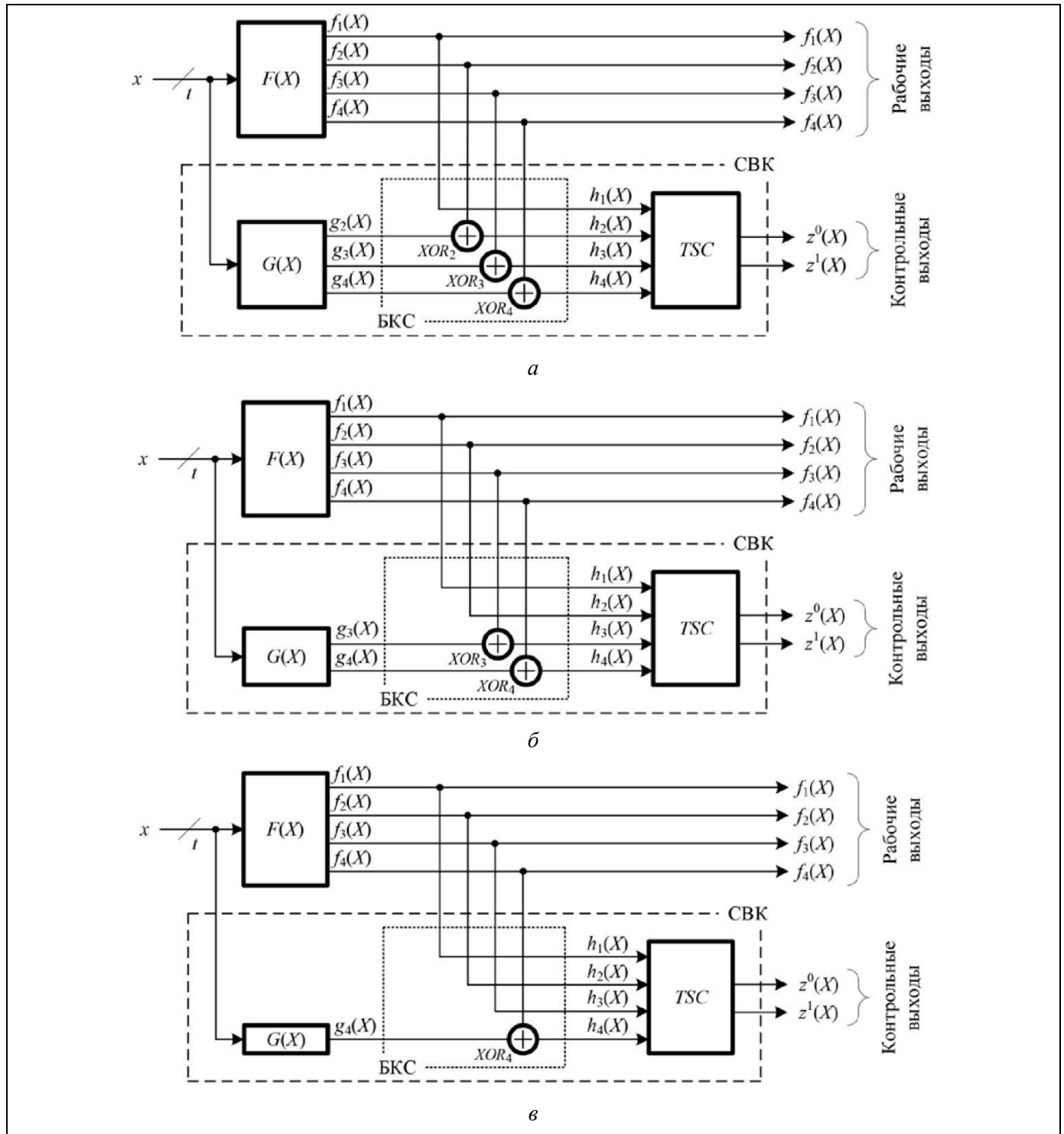


Рис. 1. Варианты структур организации СВК на основе ЛКС и композиции равновесных кодов «1 из 4» и «3 из 4»: а – при  $p = 3$ ; б – при  $p = 2$ ; в – при  $p = 1$

структурной избыточности конечного самопроверяемого дискретного устройства.

Уменьшение значения  $p$  влияет на то, какое количество выходов из четверки выходов объекта диагностирования будет напрямую подключаться к тестеру  $TSC$ . А это, в свою очередь, приводит к уменьшению подмножества кодовых слов заданной композиции равновесных кодов при выборе способа преобразования вектора  $\langle f_4(X) f_3(X) f_2(X) f_1(X) \rangle$  в вектор  $\langle h_4(X) h_3(X) h_2(X) h_1(X) \rangle$ .

**Теорема 2.** Значения функций  $g_i(X)$  на каждом наборе значений аргументов при использовании коррекции  $p \in \{1, 2, 3, 4\}$  выходов объекта диагностирования можно установить следующим количеством способов:

$$M_p = (2^{p-1})^{2^p}. \quad (1)$$

Справедливость формулы (1) подтверждается тем, что основание степени в формуле (1)  $2^{p-1}$  определяет число кодовых слов, принадлежащих композиции двух равновесных кодов «1 из 4» и «3 из 4», в которые можно преобразовать кодовые слова  $\langle f_4(X) f_3(X) f_2(X) f_1(X) \rangle$  при коррекции  $p$  символов в них, а показатель степени  $2^p$  определяет количество наборов значений аргументов, на которых осуществляется получение значений.

Из теоремы 2 следует, что чем меньше число  $p$ , тем меньшая имеется степень свободы в выборе способа логической коррекции сигналов в БКС. Но тем и проще обеспечивать полную самопроверяемость структуры самого БКС.

1. Выбрать число  $p \in \{1, 2, 3, 4\}$  преобразуемых выходов и выделить  $p$  конкретных преобразуемых выходов и  $4 - p$  напрямую подключаемых к входам тестера.

2. Упорядочить выходы в четверке: первыми перечислить  $4 - p$  напрямую подключаемых к входам тестера, а последующими –  $p$  преобразуемых в БКС.

3. Рассмотреть все наборы значений аргументов от набора с десятичным эквивалентом нуля до набора с десятичным эквивалентом  $2^p - 1$  последовательно в лексикографическом порядке. Проанализировать значения  $4 - p$  функций, реализуемых на напрямую подключаемых к входам тестера выходах объекта диагностирования. Для  $p$  преобразуемых выходов на каждом наборе значений аргументов определить подмножество кодовых слов, принадлежащих композиции равновесных кодов, среди которых можно выбрать то кодовое слово  $\langle h_4(X) h_3(X) h_2(X) h_1(X) \rangle$ , в которое будет преобразован вектор  $\langle f_4(X) f_3(X) f_2(X) f_1(X) \rangle$ . В соответствии с формулой (1) при  $p = 4$  это восемь кодовых слов, при  $p = 3$  – четыре, при  $p = 2$  – два, при  $p = 1$  – одно. В табл. 1 кодовые слова композиции равновесных кодов «1 из 4» и «3 из 4» упорядочены по мере изменения значений старших разрядов, среди которых можно выделять  $4 - p$  неизменяемых и с учетом их значений осуществлять выбор устанавливаемого кодового слова. При получении значений разрядов вектора  $\langle h_4(X) h_3(X) h_2(X) h_1(X) \rangle$  хотя бы единожды должны быть задействованы все кодовые слова рассматриваемой композиции.

Таблица 1

## 2. АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ СХЕМЫ ВСТРОЕННОГО КОНТРОЛЯ НА ОСНОВЕ КОМПОЗИЦИИ РАВНОВЕСНЫХ КОДОВ «1 ИЗ 4» И «3 ИЗ 4»

В первой части статьи [1] показано, что при синтезе СВК на основе ЛКС основной задачей оказывается синтез блока  $G(X)$ . Покажем, каким образом следует синтезировать его для каждой выделенной четверки выходов объекта диагностирования при использовании различного числа преобразуемых сигналов от объекта диагностирования.

**Алгоритм 3<sup>1</sup>.** Синтез СВК для четверки выходов объекта диагностирования с фиксированным числом  $p$  элементов преобразования в БКС:

### Упорядоченные по мере изменения значений старших разрядов кодовые слова композиции равновесных кодов «1 из 4» и «3 из 4»

Номер кодового слова	$\langle h_4(X) h_3(X) h_2(X) h_1(X) \rangle$
1	0001
2	0010
3	0100
4	0111
5	1000
6	1011
7	1101
8	1110

4. Проанализировать множество кодовых слов  $\langle h_4(X) h_3(X) h_2(X) h_1(X) \rangle$  на полном множестве наборов значений аргументов. Если хотя бы одно из кодовых слов из табл. 1 не формируется, то осуществить перестановки выходов внутри четверки; если это не дает результата – осуществить

<sup>1</sup> Нумерация алгоритмов и примеров сквозная в рамках обеих частей статьи.



перестановки выходов внутри полного их множества; если и это не дает результата – увеличить число  $p$ , что с каждым увеличением будет повышать вдвое степень свободы – число выбираемых кодовых слов.

5. Повторить шаги 3–6 алгоритма 1 из первой части настоящей статьи [1].

Обратим внимание читателя на п. 3 алгоритма, в котором подразумевается использование всех восьми кодовых слов, принадлежащих заданной композиции. Однако, учитывая выражение (2) из первой части настоящей статьи [1], можно изменить этот пункт и устанавливать значения разрядов вектора  $\langle h_4(X) h_3(X) h_2(X) h_1(X) \rangle$  только для получения четырех кодовых слов заданной композиции, которые обеспечат полную проверку тестера. Но такое отступление от алгоритма возможно только для случаев  $p = 2, 3$  или  $4$ ; для  $p = 1$  кодовое слово  $\langle h_4(X) h_3(X) h_2(X) h_1(X) \rangle$  определено однозначно.

При синтезе СВК для устройства с  $n > 4$  выходами используется алгоритм 2 из первой части настоящей статьи [1].

Отметим, что в отличие от алгоритма 1 из первой части настоящей статьи, данный алгоритм может подразумевать большое количество циклов при невозможности обеспечения формирования полного множества кодовых слов композиции равновесных кодов «1 из 4» и «3 из 4». При этом чис-

ло операций и время выполнения алгоритма 3 будут возрастать. В ряде случаев при отсутствии требуемого результата при получении значений кодовых слов  $\langle h_4(X) h_3(X) h_2(X) h_1(X) \rangle$  следует ограничиваться числом  $\beta$  допустимых перестановок для данного  $p$ . Например, это число при большом количестве выходов у объекта диагностирования может быть ограничено  $\beta = 1\ 000 \dots 10\ 000$ .

**Пример 3.** Синтезировать СВК для дискретного устройства из примера 1 (см. первую часть статьи [1]) по алгоритму 3 при условии  $p = 2$ .

В соответствии с п. 1 алгоритма 3 задано число  $p = 2$ . Положим, что выходы  $f_4(X)$  и  $f_3(X)$  напрямую подключаются к входам тестера:  $h_4(X) = f_4(X)$ ,  $h_3(X) = f_3(X)$ . Сигналы с выходов  $f_2(X)$  и  $f_1(X)$  преобразуются в БКС:  $h_2(X) = f_2(X) \oplus g_2(X)$ ,  $h_1(X) = f_1(X) \oplus g_1(X)$ . Следуя п. 2 алгоритма 3, упорядочиваем выходы так:  $f_4(X), f_3(X), f_2(X)$  и  $f_1(X)$ . Пользуясь п. 3 алгоритма 3 и табл. 1, устанавливаем значения разрядов вектора  $\langle h_4(X) h_3(X) h_2(X) h_1(X) \rangle$  на каждом наборе значений аргументов (табл. 2). При заполнении строк проверяем формирование всех кодовых слов из табл. 1. Они формируются. Повторяя шаги 3–6 алгоритма 1 из первой части настоящей статьи [1], находим значения функций  $g_2(X) = f_2(X) \oplus h_2(X)$ ,  $g_1(X) = f_1(X) \oplus h_1(X)$ . Анализируем формирование проверяющих тестов для элементов  $XOR_2$  и  $XOR_1$ . Тесты формируются. Далее по данным табл. 2 оптимизируются функции  $g_2(X), g_1(X)$ , в выбранном элементном базисе синтезируются блок  $G(X)$  и само самопроверяемое дискретное устройство.

Таблица 2

Описание работы устройства с четырьмя выходами и СВК для него

№	Наборы значений аргументов				Значения на выходах $F(X)$				Значения на выходах БКС				Значения на выходах $G(X)$		Тестовые комбинации БКС	
	$x_4$	$x_3$	$x_2$	$x_1$	$f_4(X)$	$f_3(X)$	$f_2(X)$	$f_1(X)$	$h_4(X)$	$h_3(X)$	$h_2(X)$	$h_1(X)$	$g_2(X)$	$g_1(X)$	$XOR_2$	$XOR_1$
0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	1	0	1	0	01	00
1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	11	01
2	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	0	11	00
3	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	01	00
4	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1	01	01
5	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	10	00
6	0	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	01	01
7	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	00	10
8	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	1	10	01
9	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	01	00
10	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	11	00
11	1	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	00	10
12	1	1	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	1	1	11	11
13	1	1	0	1	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1	10	01
14	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	11	10
15	1	1	1	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	0	01	10

Число способов выделения четверок выходов на полном множестве выходов объекта диагностирования определяется следующим образом. Пусть  $n$  – мощность множества выходов объекта диагностирования, а количество подмножеств –  $q = \left\lfloor \frac{n}{4} \right\rfloor$ , среди которых  $\left\lfloor \frac{n}{4} \right\rfloor$  (записи  $\lceil \dots \rceil$  и  $\lfloor \dots \rfloor$  обозначают соответственно целое сверху и целое снизу от вычисляемого значения) с неповторяющимися выходами и, возможно, одно с частью уже использованных в предпоследнем подмножестве при  $n(\bmod 4) \neq 0$ . Тогда число способов выбора первого подмножества выходов определяется величиной  $C_n^4$ , число способов выбора второго подмножества равно  $C_{n-4}^4$ , и т. д. до последнего подмножества с непересекающимися подмножествами выходов  $C_{n-4\left(\left\lfloor \frac{n}{4} \right\rfloor - 1\right)}^4$ . Оставшиеся  $n(\bmod 4)$  выходов выбираются единственным способом. Всего число способов выделения подмножеств выходов определяется выражением

$$N = C_n^4 C_{n-4}^4 \cdot \dots \cdot C_{n-4\left(\left\lfloor \frac{n}{4} \right\rfloor - 1\right)}^4 = \prod_{i=1}^{\left\lfloor \frac{n}{4} \right\rfloor} C_{n-4(i-1)}^4. \quad (2)$$

Внутри четверки выходов преобразуемые в БКС выбираются  $C_4^p$  способами. Если все четверки контролируются на основе одной и той же структуры (см. рис. 1), имеем сомножитель

$$\gamma = \left( C_4^p \right)^{\left\lfloor \frac{n}{4} \right\rfloor}. \quad (3)$$

Учитывая, что на входы объекта диагностирования подаются  $2^t$  наборов значений аргументов (см. выражение (1)), а также формулы (2) и (3), получаем формулу, позволяющую определить количество способов синтеза СВК на основе ЛКС и композиции равновесных кодов «1 из 4» и «3 из 4» с выбираемыми  $p$  выходами, значения которых преобразуются в БКС:

$$N^* = \left( 2^{p-1} \right)^{2^t} \left( C_4^p \right)^{\left\lfloor \frac{n}{4} \right\rfloor} \prod_{i=1}^{\left\lfloor \frac{n}{4} \right\rfloor} C_{n-4(i-1)}^4. \quad (4)$$

Для примера при  $n = 17$ ,  $t = 4$  и  $p = 2$  имеем  $N^* = 546\,335\,889\,555\,456\,000$ . Это число способов синтеза СВК в реальности перебрать практически невозможно. Поэтому следует ограничить количество итераций работы алгоритма 3 фиксируемым числом, например, как отмечено выше, числом  $\beta = 1\,000 \dots 10\,000$ . Затем требуется зафиксировать критерий выбора наилучших среди них, например, критерий минимума значения показателя струк-

турной избыточности, и выбрать соответствующий ему способ реализации самопроверяемого дискретного устройства.

Увеличивая значение  $p$ , можно всегда добиться желаемого результата, если это в принципе возможно для заданного объекта диагностирования. В статье [8] авторами отмечены условия, при которых возможно обеспечение тестируемости элементов БКС и тестера – они связаны с требованиями по наличию единичных и нулевых значений для каждой из функций, реализуемых на выходах объекта диагностирования. Кроме того, здесь необходимо подчеркнуть, что представленный алгоритм позволяет именно организовать контроль вычислений в подмножестве из четырех выходов и никак не ориентирован на поиск контролепригодных выходов среди полного их множества. Решение этой задачи в статье не рассматривается, но заинтересованный читатель может обратиться к некоторым работам по поиску контролепригодных подмножеств выходов с учетом особенностей обнаружения ошибок равномерными разделимыми кодами, по модификации структур объектов диагностирования и контролепригодному синтезу самих устройств [9–14]. Аналогичные алгоритмы могут быть сформированы и для композиции равновесных кодов «1 из 4» и «3 из 4» с учетом особенностей обнаружения ею ошибок в кодовых словах.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Основная цель уменьшения числа преобразуемых в СВК сигналов от объекта диагностирования состоит в снижении показателей сложности технической реализации самопроверяемых дискретных устройств и в упрощении процедуры обеспечения полной самопроверяемости СВК. Поэтому авторами были проведены эксперименты с теми же тестовыми схемами из набора MCNC Benchmarks [15, 16], что и в первой части статьи [1]. Методика постановки экспериментов осталась той же – были синтезированы СВК с помощью разработанного метода. Кроме того, для сравнения результатов также использовались ранее полученные данные по показателям сложности технической реализации самопроверяемых дискретных устройств с СВК, построенными с помощью метода дублирования, а также двух хорошо известных методов, основанных на ЛКС и применении равновесных кодов «1 из 4» и «2 из 4».

Метод, основанный на ЛКС и применении равновесного кода «1 из 4», описан в работе [17] и подразумевает преобразование трех сигналов от объекта диагностирования из четырех по формулам



$$\left\{ \begin{array}{l} g_4(X) = 0; \\ g_3(X) = \overline{f_4(X)} \overline{f_3(X)} \overline{f_2(X)} \vee \\ \vee f_3(X) (f_4(X) \vee f_1(X)); \\ g_2(X) = \overline{f_4(X)} \overline{f_3(X)} \overline{f_2(X)} \overline{f_1(X)} \vee \\ \vee f_2(X) (f_4(X) \vee \overline{f_3(X)} \vee \overline{f_1(X)}); \\ g_1(X) = \overline{f_4(X)} \overline{f_3(X)} \overline{f_2(X)} \overline{f_1(X)} \vee \\ \vee f_1(X) (f_4(X) \vee \overline{f_3(X)} \vee \overline{f_2(X)}). \end{array} \right. \quad (5)$$

Следует обратить внимание на то, что нумерация выходов в настоящей работе отличается от нумерации выходов, принятой в статье [17], и идет слева направо – так, как это и принято при нумерации разрядов в кодовых векторах. Поэтому в системе функций (5) нумерация функций изменена по сравнению с источником. Для полного соответствия изложенной работе [17] нужно выполнить замену индексов функций:  $4 \rightarrow 1$ ,  $3 \rightarrow 2$ ,  $2 \rightarrow 3$ ,  $1 \rightarrow 4$ . Более ранние методы, например, метод из статьи [6], не рассматривались, так как установленные в них зависимости между значениями выходов объекта диагностирования и блока  $G(X)$  не дают возможности полной проверки одного из элементов преобразования в БКС. Требуется анализ значений функций, вычисляемых объектом диагностирования, на каждом наборе значений аргументов с выбором того кодового слова  $\langle h_4(X) h_3(X) h_2(X) h_1(X) \rangle$ , в которое осуществляется преобразование.

Метод, основанный на ЛКС и применении равновесного кода «2 из 4», описан в работе [7] и подразумевает преобразование двух сигналов от объекта диагностирования из четырех по формулам

$$\left\{ \begin{array}{l} g_4(X) = 0; \\ g_3(X) = 0; \\ g_2(X) = f_1(X) \sim f_3(X); \\ g_1(X) = f_2(X) \sim f_4(X). \end{array} \right. \quad (6)$$

В табл. 3–5 даны результаты экспериментов с использованным авторами набором тестовых комбинационных схем. Как и в первой части статьи [1], величины  $L_{F(X)}$  и  $L_{G(X)}$  характеризуют условные площади, занимаемые устройством на кристалле при их синтезе в библиотеке стандартных элементов `stdcell2_2.genlib`;  $L_D$ ,  $L_{1/4+3/4}$ ,  $L_{1/4*}$ ,  $L_{2/4}$  характеризуют условные площади, занимаемые на кристалле самопроверяемыми дискретными устройствами с СВК на основе дублирования, разрабо-

танного авторами метода, описанного в настоящей статье, методов из работ [17] и [7] соответственно. Для удобства сравнения методов между собой использованы коэффициенты

$$\mu = \frac{L_{1/4+3/4}}{L_D} \cdot 100\%, \quad (7)$$

$$\theta = \frac{L_{1/4+3/4}}{L_{1/4*}} \cdot 100\%, \quad (8)$$

$$\zeta = \frac{L_{1/4+3/4}}{L_{2/4}} \cdot 100\%. \quad (9)$$

Также рассчитаны производные показатели, характеризующие выигрыш разработанных методов по сравнению с рассматриваемыми:

$$\Delta\mu = \left( 1 - \frac{L_{1/4+3/4}}{L_D} \right) \cdot 100\%, \quad (10)$$

$$\Delta\theta = \left( 1 - \frac{L_{1/4+3/4}}{L_{1/4*}} \right) \cdot 100\%, \quad (11)$$

$$\Delta\zeta = \left( 1 - \frac{L_{1/4+3/4}}{L_{2/4}} \right) \cdot 100\%. \quad (12)$$

На рис. 2–5 для удобства анализа в виде столбчатых диаграмм приведены результаты расчета значений показателей  $\Delta\mu$ ,  $\Delta\theta$ ,  $\Delta\zeta$ , полученные по формулам (10)–(12) для разработанного авторами метода с различными значениями  $p$ .

Как и ожидалось, для всех тестовых схем уменьшение числа  $p$  приводит к увеличению выигрыша в показателе сложности технической реализации устройства, что можно видеть на диаграммах, приведенных на рис. 2. Для подавляющего большинства тестовых схем при  $p = 4$  и  $p = 3$  достигается выигрыш по сравнению с дублированием, тогда как при  $p = 2$  и  $p = 1$  – получен выигрыш абсолютно для всех схем. Наилучшие результаты по показателю  $\Delta\mu$  достигаются для случая  $p = 1$ . Однако и при  $p = 2$  также имеется значительный выигрыш по сравнению с дублированием.

Так как логичным видится уменьшение значений показателей сложности технической реализации с уменьшением числа корректируемых сигналов от объекта диагностирования, целесообразно сравнение не только с дублированием, но и с методами, подразумевающими использование также числа устройств преобразования, меньшего, чем общее количество выходов в четверке. Методы из работ [17] и [7] подразумевают коррекцию  $p = 3$  и  $p = 2$  сигналов соответственно.

На рис. 3–6 приведены столбчатые диаграммы по каждому из показателей  $\Delta\mu$ ,  $\Delta\theta$  и  $\Delta\zeta$  для различных тестовых схем при различных значениях  $p$ . По ним можно отследить, при каких значениях  $p$  достигается улучшение по сравнению не только с дублированием, но и с другими сравниваемыми методами.

<sup>2</sup> Знак «\*» использован для того, чтобы указать читателю на отличие методов синтеза СВК на основе ЛКС с применением равновесного кода «1 из 4», с которыми проведено сравнение в первой и второй частях настоящей статьи.


**Результаты экспериментов. Значения показателей условной площади, занимаемой устройствами на кристалле**

Тестовая схема	n	q	$L_{F(X)}$	$L_D$	p = 4		p = 3		p = 2		p = 1		Метод из работы [17]		Метод из работы [7]	
					$L_{G(X)}$	$L_{1/4+3/4}$	$L_{G(X)}$	$L_{1/4+3/4}$	$L_{G(X)}$	$L_{1/4+3/4}$	$L_{G(X)}$	$L_{1/4+3/4}$	$L_{G(X)}$	$L_{1/4^*}$	$L_{G(X)}$	$L_{2/4}$
rd84	4	1	4 912	10 464	4 056	9 240	2 528	7 672	1 592	6 696	1 576	6 640	4 072	9 320	4 416	9 600
sqrt8	4	1	1 160	2 960	1 280	2 712	1 056	2 448	1 112	2 464	752	2 064	1 176	2 672	1 088	2 520
sao2	4	1	2 992	6 624	3 752	7 016	2 024	5 248	1 520	4 704	968	4 112	2 056	5 424	1720	4 984
dist	5	2	6 968	14 784	8 080	15 784	7 584	15 208	5 344	12 888	3 880	11 344	5 080	12 616	4 336	11 768
newcwp	5	2	440	1 728	784	1 960	672	1 768	408	1 424	376	1 312	504	1 512	232	1 136
root	5	2	3 496	7 840	3 432	7 664	3 120	7 272	2 736	6 808	1 496	5 488	2 136	6 200	2 240	6 200
max512	6	2	9 632	20 320	7 944	18 312	7 168	17 456	5 776	15 984	3 560	13 688	6 648	17 040	6 136	16 424
dc1	7	2	976	3 216	680	2 392	600	2 232	464	2 016	280	1 752	592	2 520	552	2 376
dekoder	7	2	736	2 736	688	2 160	496	1 888	432	1 744	280	1 512	472	2 160	528	2 112
wim	7	2	712	2 688	1 000	2 448	640	2 008	552	1 840	336	1 544	408	2 072	544	2 104
newapla2	7	2	600	2 464	1 072	2 408	656	1 912	456	1 632	152	1 248	448	2 000	448	1 896
dc2	7	2	2 424	6 112	3 184	6 344	2 864	5 944	2 664	5 664	2 128	5 048	2 024	5 400	1 512	4 784
newbyte	8	2	592	2 656	808	2 136	504	1 752	376	1 544	96	1 184	264	2 040	216	1 544
mlp4	8	2	7 224	15 920	7 232	15 192	6 352	14 232	5 120	12 920	2 744	10 464	5 752	14 160	4 608	12 568
f51m	8	2	2 272	6 016	5 144	8 152	4 504	7 432	2 680	5 528	2 040	4 808	4 208	7 664	2 176	5 184
inc	9	3	2 376	6 432	2 480	6 056	1 992	5 448	1 928	5 264	1 112	4 328	1 584	5 336	1 440	4 744
dk27	9	3	528	2 736	2 256	3 984	1 240	2 848	920	2 408	960	2 328	720	2 624	544	2 000
newcpla2	10	3	1 896	5 680	3 800	6 896	1 616	4 592	1 424	4 280	568	3 304	1 408	4 872	1 192	4 208
sqr6	12	3	2 648	7 600	2 896	6 744	2 056	5 784	1 472	5 080	1 208	4 696	2 016	6 816	1 784	5 632
m1	12	3	3 064	8 432	1 912	6 176	1 104	5 248	736	4 760	440	4 344	1 144	6 440	960	5 200
p82	14	4	2 368	7 456	2 304	6 336	1 736	5 608	1 496	5 208	736	4 288	1 480	6 464	1 112	5 064
m2	16	4	10 096	23328	4 656	16 416	4 064	15 664	2 888	14 328	1 464	12 744	3 400	17 016	2 536	14 272
m3	16	4	13 464	30 064	5 952	21 080	4 624	19 592	3 168	17 976	1 616	16 264	4 160	21 144	3 280	18 384
m4	16	4	18 704	40 544	8 952	29 320	7 032	27 240	5 392	25 440	3 064	22 952	7 224	29 448	4 920	25 288
tms	16	4	6 784	16 704	5 096	13 544	3 416	11 704	2 680	10 808	1 752	9 720	3 272	13 552	2 696	11 144
newcpla1	16	4	2 520	8 176	4 888	9 072	2 376	6 400	2 144	6 008	1 680	5 384	3 024	9 064	2 208	6 392
newxcpla1	23	6	3 760	12 112	5 920	12 272	3 008	9 120	3 288	9 160	1 856	7 488	2 672	12 056	2 352	8 816
max128	24	6	20 192	45 184	9 232	32 016	2 216	24 760	1 752	24 056	888	22 952	1 640	28 648	1 352	24 136

Результаты экспериментов. Значения показателей  $\mu$ ,  $\theta$ ,  $\zeta$ 

Тестовая схема	$\mu$				$\theta$				$\zeta$			
	$p = 4$	$p = 3$	$p = 2$	$p = 1$	$p = 4$	$p = 3$	$p = 2$	$p = 1$	$p = 4$	$p = 3$	$p = 2$	$p = 1$
rd84	88,303	73,318	63,991	63,456	99,142	82,318	71,845	71,245	96,25	79,917	69,75	69,167
sqrt8	91,622	82,703	83,243	69,73	101,497	91,617	92,216	77,246	107,619	97,143	97,778	81,905
sao2	105,918	79,227	71,014	62,077	129,351	96,755	86,726	75,811	140,77	105,297	94,382	82,504
dist	106,764	102,868	87,175	76,732	125,111	120,545	102,156	89,918	134,126	129,232	109,517	96,397
newcwp	113,426	102,315	82,407	75,926	129,63	116,931	94,18	86,772	172,535	155,634	125,352	115,493
root	97,755	92,755	86,837	70	123,613	117,29	109,806	88,516	123,613	117,29	109,806	88,516
max512	90,118	85,906	78,661	67,362	107,465	102,441	93,803	80,329	111,495	106,283	97,321	83,341
dc1	74,378	69,403	62,687	54,478	94,921	88,571	80	69,524	100,673	93,939	84,848	73,737
dekoder	78,947	69,006	63,743	55,263	100	87,407	80,741	70	102,273	89,394	82,576	71,591
wim	91,071	74,702	68,452	57,44	118,147	96,911	88,803	74,517	116,35	95,437	87,452	73,384
newapla2	97,727	77,597	66,234	50,649	120,4	95,6	81,6	62,4	127,004	100,844	86,076	65,823
dc2	103,796	97,251	92,67	82,592	117,481	110,074	104,889	93,481	132,609	124,247	118,395	105,518
newbyte	80,422	65,964	58,133	44,578	104,706	85,882	75,686	58,039	138,342	113,472	100	76,684
mlp4	95,427	89,397	81,156	65,729	107,288	100,508	91,243	73,898	120,878	113,24	102,801	83,259
f51m	135,505	123,537	91,888	79,92	106,367	96,973	72,129	62,735	157,253	143,364	106,636	92,747
inc	94,154	84,701	81,841	67,289	113,493	102,099	98,651	81,109	127,656	114,84	110,961	91,231
dk27	145,614	104,094	88,012	85,088	151,829	108,537	91,768	88,72	199,2	142,4	120,4	116,4
newcpla2	121,408	80,845	75,352	58,169	141,544	94,253	87,849	67,816	163,878	109,125	101,711	78,517
sqr6	88,737	76,105	66,842	61,789	98,944	84,859	74,531	68,897	119,744	102,699	90,199	83,381
m1	73,245	62,239	56,452	51,518	95,901	81,491	73,913	67,453	118,769	100,923	91,538	83,538
p82	84,979	75,215	69,85	57,511	98,02	86,757	80,569	66,337	125,118	110,742	102,844	84,676
m2	70,37	67,147	61,42	54,63	96,474	92,055	84,203	74,894	115,022	109,753	100,392	89,294
m3	70,117	65,168	59,792	54,098	99,697	92,66	85,017	76,92	114,665	106,571	97,781	88,468
m4	72,316	67,186	62,747	56,61	99,565	92,502	86,39	77,941	115,944	107,719	100,601	90,762
tms	81,082	70,067	64,703	58,19	99,941	86,364	79,752	71,724	121,536	105,025	96,985	87,222
newcpla1	110,959	78,278	73,483	65,851	100,088	70,609	66,284	59,4	141,927	100,125	93,992	84,23
newxcpla1	101,321	75,297	75,627	61,823	101,792	75,647	75,979	62,11	139,201	103,448	103,902	84,936
max128	70,857	54,798	53,24	50,797	111,756	86,428	83,971	80,117	132,648	102,585	99,669	95,094



Результаты экспериментов. Значения показателей  $\Delta\mu$ ,  $\Delta\theta$ ,  $\Delta\zeta$ 

Тестовая схема	$\Delta\mu$				$\Delta\theta$				$\Delta\zeta$			
	$p = 4$	$p = 3$	$p = 2$	$p = 1$	$p = 4$	$p = 3$	$p = 2$	$p = 1$	$p = 4$	$p = 3$	$p = 2$	$p = 1$
rd84	11,697	26,682	36,009	36,544	0,858	17,682	28,155	28,755	3,75	20,083	30,25	30,833
sqrt8	8,378	17,297	16,757	30,27	-1,497	8,383	7,784	22,754	-7,619	2,857	2,222	18,095
sao2	-5,918	20,773	28,986	37,923	-29,351	3,245	13,274	24,189	-40,77	-5,297	5,618	17,496
dist	-6,764	-2,868	12,825	23,268	-25,111	-20,545	-2,156	10,082	-34,126	-29,232	-9,517	3,603
newcwp	-13,426	-2,315	17,593	24,074	-29,63	-16,931	5,82	13,228	-72,535	-55,634	-25,352	-15,493
root	2,245	7,245	13,163	30	-23,613	-17,29	-9,806	11,484	-23,613	-17,29	-9,806	11,484
max512	9,882	14,094	21,339	32,638	-7,465	-2,441	6,197	19,671	-11,495	-6,283	2,679	16,659
dc1	25,622	30,597	37,313	45,522	5,079	11,429	20	30,476	-0,673	6,061	15,152	26,263
dekoder	21,053	30,994	36,257	44,737	0	12,593	19,259	30	-2,273	10,606	17,424	28,409
wim	8,929	25,298	31,548	42,56	-18,147	3,089	11,197	25,483	-16,35	4,563	12,548	26,616
newapla2	2,273	22,403	33,766	49,351	-20,4	4,4	18,4	37,6	-27,004	-0,844	13,924	34,177
dc2	-3,796	2,749	7,33	17,408	-17,481	-10,074	-4,889	6,519	-32,609	-24,247	-18,395	-5,518
newbyte	19,578	34,036	41,867	55,422	-4,706	14,118	24,314	41,961	-38,342	-13,472	0	23,316
mlp4	4,573	10,603	18,844	34,271	-7,288	-0,508	8,757	26,102	-20,878	-13,24	-2,801	16,741
f51m	-35,505	-23,537	8,112	20,08	-6,367	3,027	27,871	37,265	-57,253	-43,364	-6,636	7,253
inc	5,846	15,299	18,159	32,711	-13,493	-2,099	1,349	18,891	-27,656	-14,84	-10,961	8,769
dk27	-45,614	-4,094	11,988	14,912	-51,829	-8,537	8,232	11,28	-99,2	-42,4	-20,4	-16,4
newcpla2	-21,408	19,155	24,648	41,831	-41,544	5,747	12,151	32,184	-63,878	-9,125	-1,711	21,483
sqr6	11,263	23,895	33,158	38,211	1,056	15,141	25,469	31,103	-19,744	-2,699	9,801	16,619
m1	26,755	37,761	43,548	48,482	4,099	18,509	26,087	32,547	-18,769	-0,923	8,462	16,462
p82	15,021	24,785	30,15	42,489	1,98	13,243	19,431	33,663	-25,118	-10,742	-2,844	15,324
m2	29,63	32,853	38,58	45,37	3,526	7,945	15,797	25,106	-15,022	-9,753	-0,392	10,706
m3	29,883	34,832	40,208	45,902	0,303	7,34	14,983	23,08	-14,665	-6,571	2,219	11,532
m4	27,684	32,814	37,253	43,39	0,435	7,498	13,61	22,059	-15,944	-7,719	-0,601	9,238
tms	18,918	29,933	35,297	41,81	0,059	13,636	20,248	28,276	-21,536	-5,025	3,015	12,778
newcpla1	-10,959	21,722	26,517	34,149	-0,088	29,391	33,716	40,6	-41,927	-0,125	6,008	15,77
newxcpla1	-1,321	24,703	24,373	38,177	-1,792	24,353	24,021	37,89	-39,201	-3,448	-3,902	15,064
max128	29,143	45,202	46,76	49,203	-11,756	13,572	16,029	19,883	-32,648	-2,585	0,331	4,906

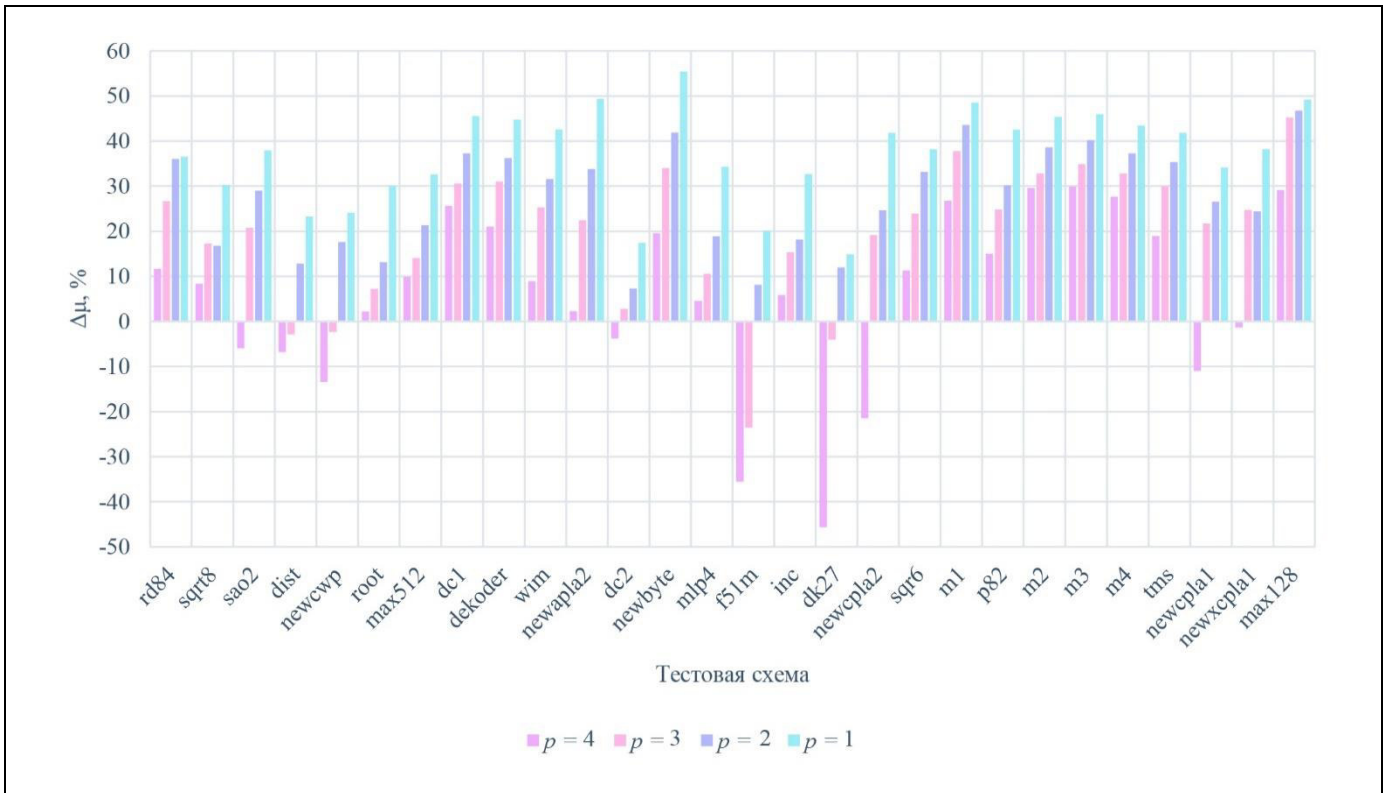


Рис. 2. Значения показателей  $\Delta\mu$  для различных тестовых схем

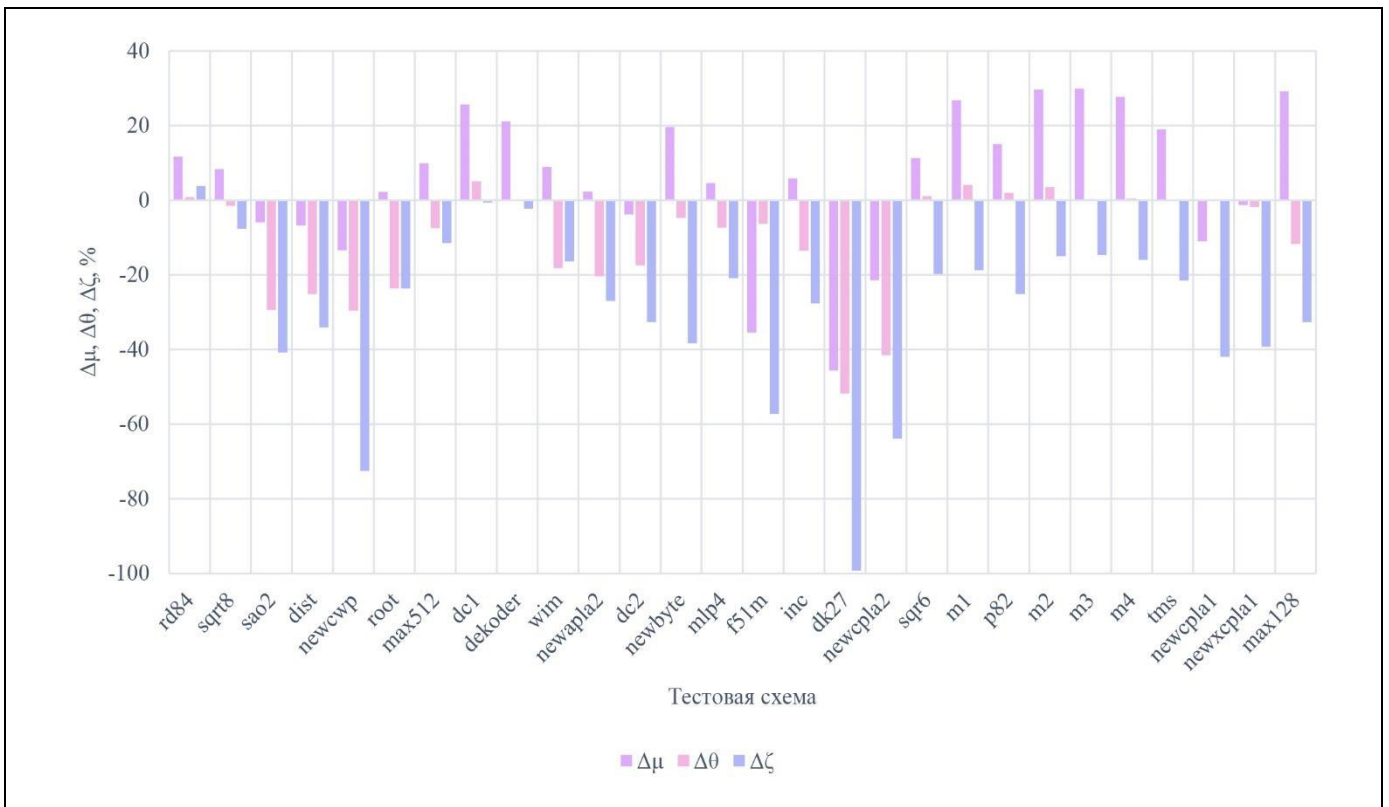
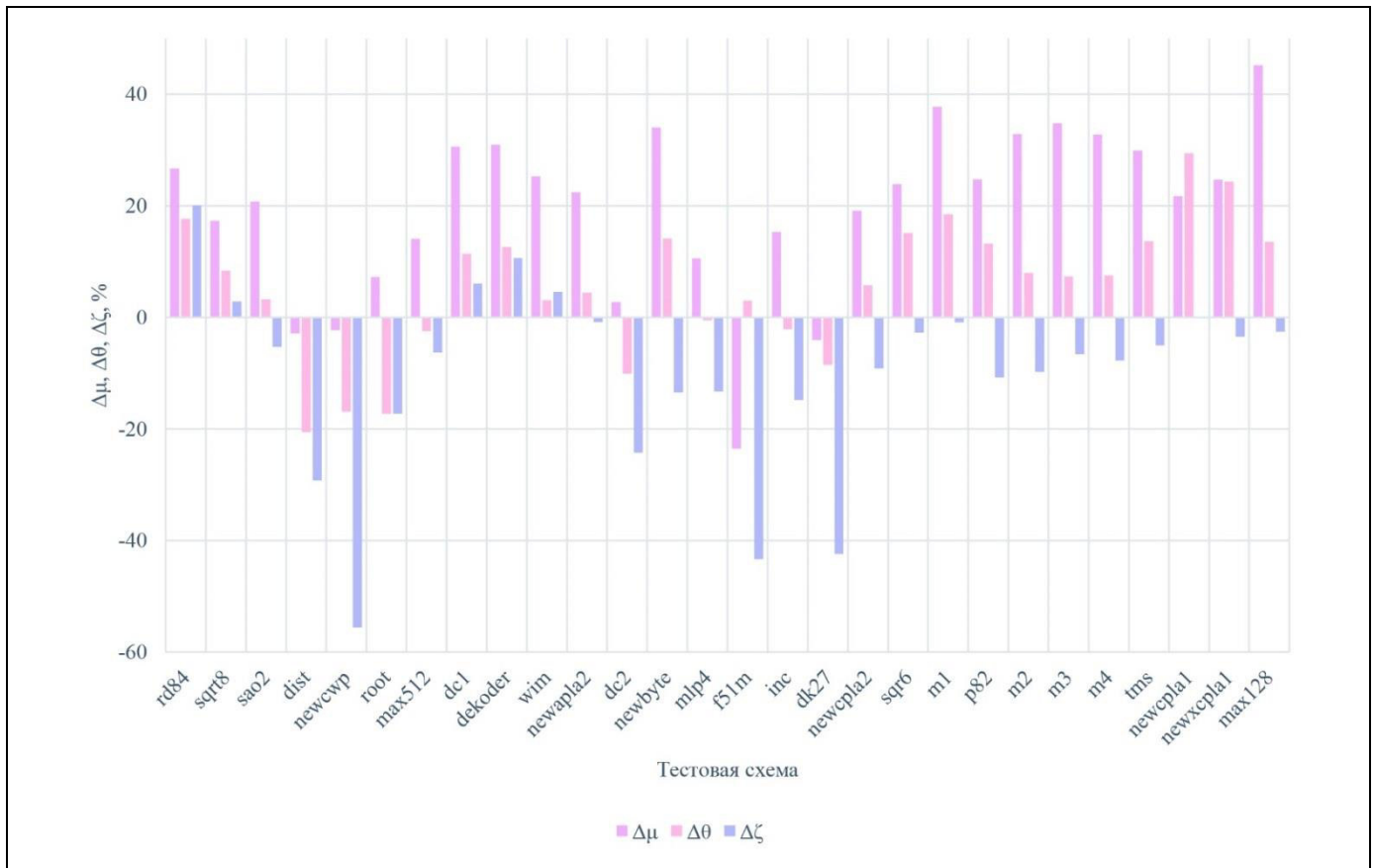
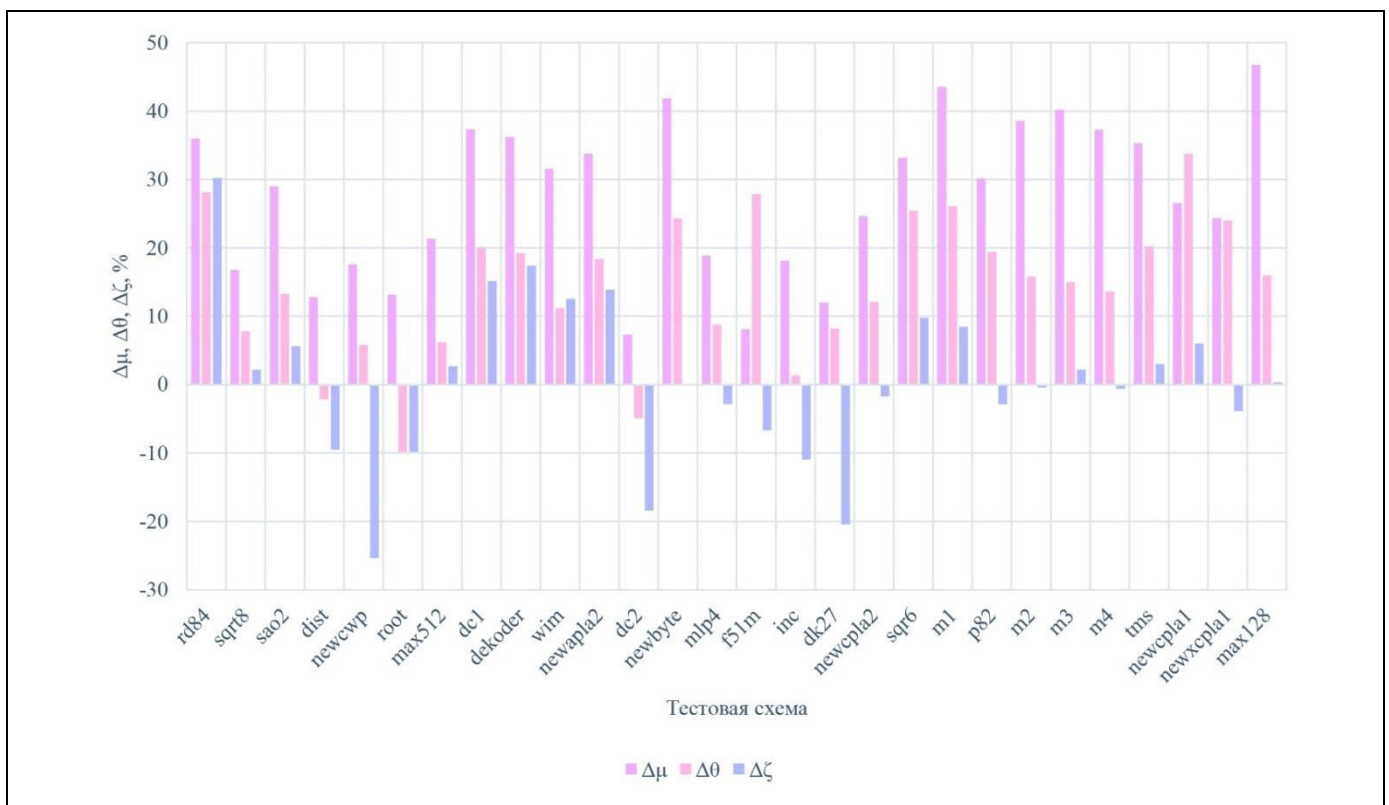


Рис. 3. Значения показателей  $\Delta\mu$ ,  $\Delta\theta$  и  $\Delta\zeta$  для различных тестовых схем при  $p = 4$

Рис. 4. Значения показателей  $\Delta\mu$ ,  $\Delta\theta$  и  $\Delta\zeta$  для различных тестовых схем при  $p = 3$ Рис. 5. Значения показателей  $\Delta\mu$ ,  $\Delta\theta$  и  $\Delta\zeta$  для различных тестовых схем при  $p = 2$

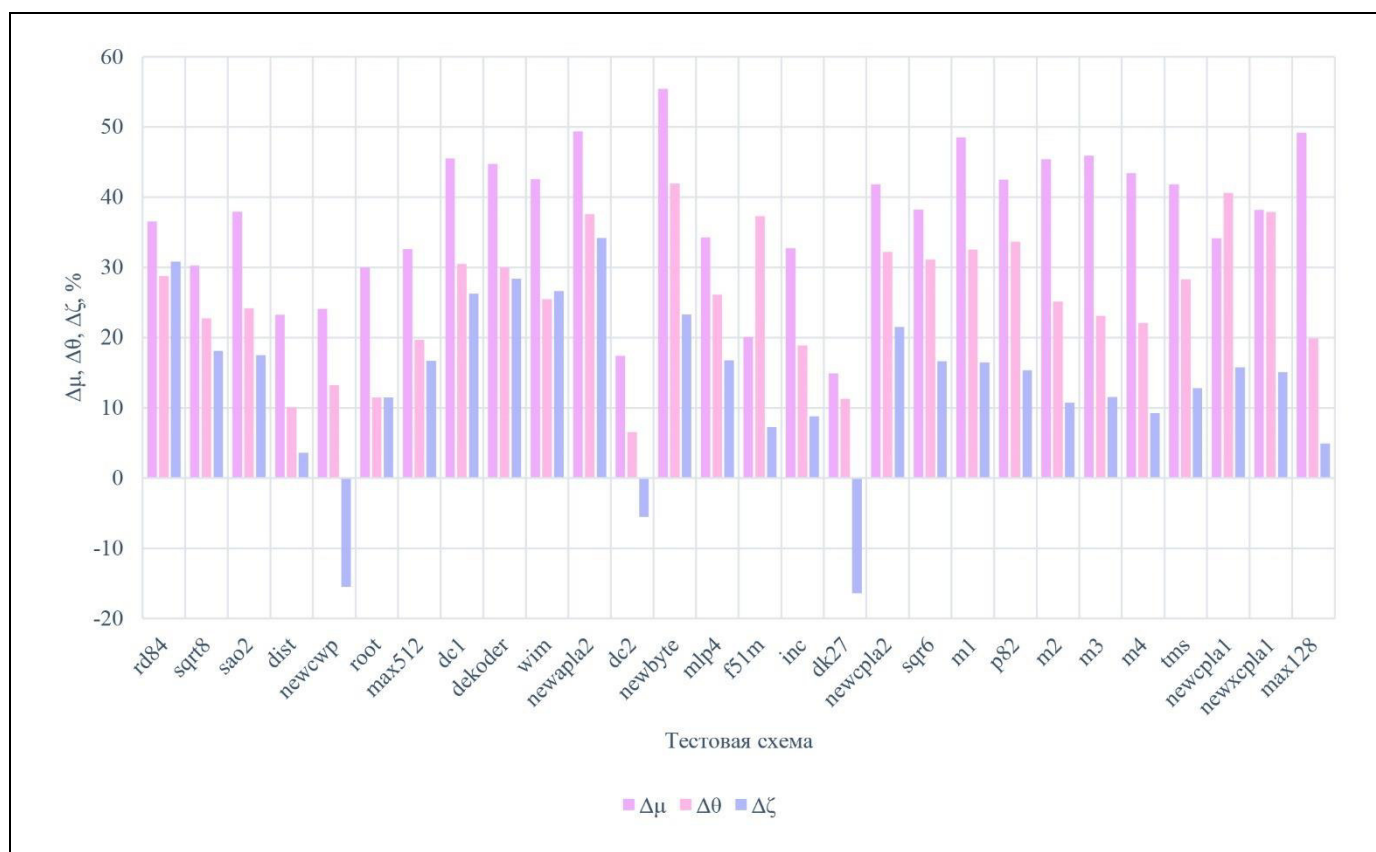


Рис. 6. Значения показателей  $\Delta\mu$ ,  $\Delta\theta$  и  $\Delta\zeta$  для различных тестовых схем при  $p = 1$

Анализируя рис. 3, можно сделать вывод о том, что при  $p = 4$  эффект от применения разработанного метода в основном есть только по сравнению с дублированием. При этом для некоторых схем (мало их количества) достигается выигрыш по сравнению с методом, изложенным в работе [17].

Несколько лучшие результаты дает применение разработанного метода для случая  $p = 3$  (см. рис. 4). Здесь уже для подавляющего большинства тестовых схем достигнут эффект и по сравнению с дублированием, и по сравнению с методом из работы [17]. В сравнении же с методом из статьи [7] здесь разработанный метод показал себя гораздо хуже и дает выигрыш лишь для нескольких тестовых схем.

Из рис. 5 и 6 видно, что именно при  $p = 2$  и  $p = 1$  получают максимальные выигрыши перед всеми рассматриваемыми методами, имеющие место практически для всех схем. Результаты для случая  $p = 1$ , естественно, лучше, чем для  $p = 2$ .

Результаты экспериментов наглядно демонстрируют преимущества и недостатки разработанного метода синтеза самопроверяемых дискретных устройств по сравнению с известными для различных значений  $p$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанные в настоящей статье методы синтеза самопроверяемых дискретных устройств на основе ЛКС и композиции равновесных кодов «1 из 4» и «3 из 4» дают возможность синтеза менее избыточных структур по сравнению с применением известных методов. При этом возможно решение оптимизационных задач для заданного объекта диагностирования, поскольку методы подразумевают большое количество способов реализации СВК для одного и того же объекта диагностирования. С уменьшением числа  $p$ , конечно, количество способов синтеза СВК для выбранной четверки выходов снижается, но с учетом возможностей перестановок выходов в четверках и среди всех выходов объекта диагностирования оно остается по-прежнему большим и зависит в существенной мере от числа  $t$  входов объекта диагностирования. К слову, метод, использующий различное число преобразуемых сигналов, может применяться и совместно для одного и того же объекта диагностирования с числом выходов  $n > 4$ .

Применение композиции равновесных кодов «1 из 4» и «3 из 4», в отличие от известных подхо-

дов к синтезу, дает возможность построения СВК на основе ЛКС с преобразованием только одного сигнала из четверки сигналов с выходов объекта диагностирования. Этого невозможно добиться применением отдельных равновесных кодов, таких, например, как «1 из 3», «1 из 4» или «2 из 4», использование которых хорошо описано в научной литературе. Таким образом, существенно расширяется поле выбора способа синтеза самопроверяемого дискретного устройства по сравнению с уже известными методами.

Достоинства разработанных методов состоят в том, что варьированием значения  $p$  при большом числе способов синтеза СВК удастся влиять на показатели сложности технической реализации самопроверяемых дискретных устройств. В качестве недостатка, опять-таки, следует подчеркнуть тезис, сформулированный в заключении к первой части статьи: требуется анализ особенностей распространения ошибок на выходы объекта диагностирования для решения задачи обнаружения любых неисправностей при искажении значений функций, вычисляемых объектом диагностирования на всех наборах значений аргументов, на которых ошибки проявляются, или хотя бы на одном из них (в зависимости от поставленной задачи).

Дальнейшие исследования могут быть сосредоточены на иных методах использования композиции равновесных кодов «1 из 4» и «3 из 4» при синтезе самопроверяемых дискретных устройств, поиске эффективных алгоритмов установки значений функций, вычисляемых блоком  $G(X)$ , на обобщении полученных результатов для иных композиций равновесных кодов и на изучении особенностей практических реализаций предлагаемых методов для синтеза самопроверяемых дискретных устройств на различной элементной базе в разных областях применения.

Использование композиции равновесных кодов «1 из 4» и «3 из 4» при синтезе самопроверяемых дискретных устройств на основе ЛКС является перспективным подходом к реализации высоконадежных и безопасных дискретных устройств.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ефанов Д.В., Елина Е.И. Синтез самопроверяемых дискретных устройств на основе логической коррекции сигналов и композиции равновесных кодов «1 из 4» и «3 из 4». Ч. 1. Метод синтеза с преобразованием всех сигналов от объекта диагностирования // Проблемы управления. – 2026. – № 1. – С. 34–46. [Efanov, D.V., Yelina, Y.I. Design of Self-Checking Discrete Devices Based on Boolean Signals Correction and Composition of Constant-Weight Codes of the “1-Out-Of-4” and “3-Out-Of-4” Types. Part I: The Design Method with Conversion of All Signals from the Object under Diagnosis // Control Sciences. – 2026. – No. 1. – P. 30–40.]
2. Goessel M., Graf S. Error Detection Circuits. – London: McGraw-Hill, 1994, 261 p.
3. Ефанов Д.В. Использование равновесного кода «1 из 4» при синтезе самопроверяемых схем встроенного контроля на основе логической коррекции сигналов // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2025. – № 72. – С. 114–133. – DOI: 10.17223/19988605/72/12 [Efanov, D.V. Using the “1-Out-Of-4” Constant-Weight Code in the Synthesis of Self-Checking Concurrent Error-Detection Circuit Based on Boolean Signal Correction // Tomsk State University Journal of Control and Computer Science. – 2025. – No. 72. – P. 114–133. – DOI: 10.17223/19988605/72/12 (In Russian)]
4. Бибило П.Н. Бинарные диаграммы решений в логическом проектировании. – М.: ЛЕНАНД, 2024, 560 с. [Bibilo, P.N. Binarnye diagrammy reshenii v logicheskom proektirovanii. – Moscow: LENAND, 2024. – 560 s. (In Russian)]
5. 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. [Gessel, M., Morozov, A.V., Sapozhnikov, V.V., Sapozhnikov, V.V. Logic Complement, a New Method of Checking the Combinational Circuits // Automation and Remote Control. – 2003. – Vol. 64, no. 1. – P. 153–161.]
6. Гессель М., Морозов А.В., Сапожников В.В., Сапожников Вл.В. Контроль комбинационных схем методом логического дополнения // Автоматика и телемеханика. – 2005. – № 8. – С. 161–172. [Goessel, M., Morozov, A.V., Sapozhnikov, V.V., Sapozhnikov, V.V. Checking Combinational Circuits by the Method of Logic Complement // Automation and Remote Control. – 2005. – Vol. 66, no. 8. – P. 1336–1346.]
7. 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. [Sapozhnikov, V.V., Sapozhnikov, V.V., Efanov, D.V. Design of Self-Checking Concurrent Error Detection Systems Based on “2-Out-Of-4” Constant-Weight Code // Control Sciences. – 2017. – No. 1. – P. 57–64. (In Russian)]
8. Ефанов Д.В., Елина Е.И. Синтез самопроверяемых цифровых устройств на основе логической коррекции сигналов с применением взвешенных кодов Боуза – Лина // Проблемы управления. – 2024. – № 4. – С. 26–43. – DOI: <http://doi.org/10.25728/pu.2024.4.3>. [Efanov, D.V., Yelina, Y.I. Design of Self-Checking Digital Devices with Boolean Signals Correction Using Weight-Based Bose-Lin Codes // Control Sciences. – 2024. – No. 4. – P. 22–36. – DOI: <http://doi.org/10.25728/cs.2024.4.3> (In Russian)]
9. Слабаков Е.В., Согомонян Е.С. Построение полностью самопроверяемых комбинационных устройств с использованием равновесных кодов // Автоматика и телемеханика. – 1980. – № 9. – С. 173–181. [Slabakov, E.V., Sogomonyan, E.S. Design of Totally Self-Checking Combinational Networks Using m-Out-Of-n Code // Automation and Remote Control. – 1981. – Vol. 41. – P. 1326–1333.]
10. Согомонян Е.С., Слабаков Е.В. Самопроверяемые устройства и отказоустойчивые системы. – М.: Радио и связь,



1989. – 208 с. [Sogomonyan, E.S., Slabakov, E.V. Samoproveryaemye ustroystva i otkazoustoichivye sistemy. – M.: Radio i svyaz', 1989. – 208 s. (In Russian)]
11. Гессель М., Морозов А.А., Сапожников В.В., Сапожников Вл.В. Исследование комбинационных самопроверяемых устройств с независимыми и монотонно независимыми выходами // Автоматика и телемеханика. – 1997. – № 2. – С. 180–193. [Goessel, M., Morozov, A.A., Sapozhnikov, V.V., and Sapozhnikov, V.V. Study of Combinational Self-Checking Devices with Independent and Monotonic Independent Outputs // Automation and Remote Control. – 1997. – Vol. 58, no. 2, pt. 2. – P. 299–309.]
  12. Matrosova, A., Levin, I., Ostanin, S.A. Self-Checking Synchronous FSM Network Design with Low Overhead // VLSI Design. – 2000. – Vol. 11, iss. 1. – P. 47–58. – DOI: 10.1155/2000/46578
  13. Efanov, D.V., Sapozhnikov, V.V., Sapozhnikov, V.V. Organization of a Fully Self-Checking Structure of a Combinational Device Based on Searching for Groups of Symmetrically Independent Outputs // Automatic Control and Computer Sciences. – 2020. – Vol. 54, iss. 4. – P. 279–290. – DOI: 10.3103/S0146411620040045
  14. Ефанов Д.В. Синтез самопроверяемых вычислительных устройств на основе полной системы особых групп выходов объекта диагностирования // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2023. – Т. 66, № 5. – С. 355–372. – DOI: 10.17586/0021–3454–2023–66–5–355–372 [Efanov, D.V. Synthesis of Self-Checking Computing Devices Based on a Complete System of Special Groups of the Diagnostic Object Outputs // Journal of Instrument Engineering. – 2023. – Vol. 66, no. 5. – P. 355–372. – DOI: 10.17586/0021–3454–2023–66–5–355–372 (In Russian)]
  15. McElvain, K. IWLS'93 Benchmark Set: Version 4.0: Distributed as a Part of IWLS'93 Benchmark Set. – 1993.
  16. Collection of Digital Design Benchmarks. – URL: <https://ddd.fit.cvut.cz/www/prj/Benchmarks/> (дата обращения: 26.08.2025 г.) [Accessed August 26, 2025.]
  17. Сапожников В.В., Сапожников Вл.В., Ефанов Д.В., Пивоваров Д.В. Метод логического дополнения на основе равновесного кода «1 из 4» для построения полностью самопроверяемых структур систем функционального контроля // Электронное моделирование. – 2017. – Т. 39, № 2. – С. 15–34. [Sapozhnikov, V.V., Sapozhnikov, V.V., Efanov, D.V., Pivovarov, D.V. Boolean Complement Method Based on Constant-Weight Code “1-Out-Of-4” for Formation of Totally Self-Checking Concurrent Error Detection Systems // Electronic Modeling. – 2017. – Vol. 39, no. 2. – P. 15–34. (In Russian)]

Статья представлена к публикации членом редколлегии Л. Ю. Филимоном.

Поступила в редакцию 14.09.2025,  
после доработки 27.11.2025.  
Принята к публикации 27.11.2025.

**Ефанов Дмитрий Викторович** – д-р техн. наук, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург; Институт проблем транспорта им. Н. С. Соломенко РАН, г. Санкт-Петербург,  
✉ TrES-4b@yandex.ru  
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-4563-6411>

**Елина Есения Игоревна** – аспирант, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург,  
✉ eseniya-elina@mail.ru  
ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0004-4167-3591>

© 2026 г. Ефанов Д. В., Елина Е. И.



Эта статья доступна по [лицензии Creative Commons «Attribution» \(«Атрибуция»\) 4.0 Всемирная](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

**DESIGN OF SELF-CHECKING DISCRETE DEVICES  
BASED ON BOOLEAN SIGNALS CORRECTION AND COMPOSITION  
OF CONSTANT-WEIGHT CODES OF THE “1-OUT-OF-4” AND “3-OUT-OF-4” TYPES.  
PART II: The Design Method with Conversion  
of Some Signals from the Object under Diagnosis**

D. V. Efanov\* and Y. I. Yelina\*\*

\*\*\*Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia  
\*Solomenko Institute of Transport Problems, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

\*✉ TrES-4b@yandex.ru, \*\*✉ eseniya-elina@mail.ru

**Abstract.** To reduce the implementation complexity of self-checking discrete devices in comparison with the design method described in part I of this study, the idea is to consider the composition properties of constant-weight codes of the “1-out-of-4” and “3-out-of-4” types. In this case, it is possible to decrease the number of signals converted in the Boolean signals correction block, fixing this number to  $p = 4, 3, 2,$  or  $1$ . Part II presents modified structures for organizing concurrent error-detection (CED) circuits for objects under diagnosis and a circuit design algorithm considering the choice of  $p$ . As established below, decreasing  $p$  reduces the variability in the choice of codewords belonging to the composition of 1-out-of-4 and 3-out-of-4 codes; this may affect the total checking property of the checker. This drawback can be eliminated by possible permutations of outputs in controlled output subsets and among all outputs of the object under diagnosis. Another solution here is to increase  $p$  to 2, 3, or 4. The advantages of the developed method are shown experimentally, and its efficiency is demonstrated in comparison with duplication and other methods based on Boolean signals correction. When converting  $p = 2$  or  $p = 1$  signals in the selected output subset, the gain over the above methods is achieved in almost all benchmarks. According to the experimental results, the developed method has high potential for practical design of self-checking discrete devices.

**Keywords:** self-checking discrete device, concurrent error-detection (CED) circuit, Boolean signals correction, composition of constant-weight codes, 1-out-of-4 and 3-out-of-4 codes, structural redundancy, controllable structure.