

## МЕТОД СИНТЕЗА СИСТЕМ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ЛОГИЧЕСКОГО ДОПОЛНЕНИЯ С УМЕНЬШЕННЫМ ЧИСЛОМ ЭЛЕМЕНТОВ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

В. В. САПОЖНИКОВ<sup>1</sup>, Вл. В. САПОЖНИКОВ<sup>1</sup>, Д. В. ЕФАНОВ<sup>2</sup>, Д. В. ПИВОВАРОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I,  
190031, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Российский университет транспорта, 127994, Москва, Россия  
E-mail: TrES-4b@yandex.ru

Рассматривается метод логического дополнения для синтеза самопроверяемых комбинационных устройств. Предложен способ уменьшения числа элементов преобразования в базовой структурной схеме системы диагностирования исходного комбинационного устройства по равновесному коду „1 из 3“, основанный на преобразовании только одной рабочей функции и дополнении трехразрядного кодового слова в схеме контроля до четырехразрядного, принадлежащего коду „2 из 4“. Такой подход к построению системы диагностирования упрощает обеспечение самопроверяемости структуры, а также позволяет уменьшить сложность технической реализации конечного устройства за счет вариативности структуры блока контрольной логики, а также того факта, что тестеры равновесных кодов „2 из 4“ имеют более простые схемы, чем кодов „1 из 3“. Приводятся примеры использования представленного способа для синтеза самопроверяемых комбинационных устройств как с тремя выходами, так и с большим их числом.

**Ключевые слова:** самопроверяемое комбинационное устройство, метод логического дополнения, элемент сложения по модулю два, равновесный код, тестер равновесного кода, структурная избыточность устройства

**Введение.** Для контроля комбинационных логических устройств эффективно применять разнообразные равномерные двоичные коды [1—8]. Выбор кода для решения поставленной задачи осуществляется на этапе проектирования системы диагностирования, как правило, с целью снижения структурной избыточности конечного устройства по сравнению с дублированием, обеспечения его самопроверяемости для заданной модели неисправностей, снижения энергопотребления и т.д. Именно поэтому при синтезе систем диагностирования комбинационных логических устройств используются коды с малой избыточностью, зачастую ориентированные на обнаружение ошибок в информационных векторах или кодовых словах, а не на их коррекцию [9]. Одними из таких кодов являются равновесные коды, или коды „ $r$  из  $m$ “, где  $m$  — длина кодовых слов (число разрядов), а  $r$  — вес (число единичных разрядов в кодовом слове). Равновесные коды образованы всеми кодовыми словами определенной длины с одинаковым весом [10]. Равновесные коды получают с помощью простых схем кодирования, кроме того, широко известны методы синтеза самопроверяемых тестеров равновесных кодов [11—15].

Использование равновесных кодов [16] с некоторыми ограничениями позволяет синтезировать полностью самопроверяемые структурные схемы систем диагностирования комбинационных устройств по методу логического дополнения. Этот метод позволяет во многих случаях строить самопроверяемые устройства для таких исходных объектов диагностирования, для которых невозможно построение самопроверяемых структур по методу дублирования [17]. При использовании метода логического дополнения кодовый информационный вектор, формируемый на выходах логического устройства, с помощью блоков контрольной логики и логического дополнения преобразуется в кодовое слово выбранного равновесного кода. Наиболее проста процедура построения полностью самопроверяемых структур с использованием равновесного кода „1 из  $m$ “ ( $1/m$ -кода) [18]. Однако с увеличением числа  $m$  существенно возрастает сложность технической реализации тестера равновесного кода, а также увеличивается мощность множества его кодовых слов, что усложняет задачу формирования множества проверяющих комбинаций для тестера равновесного кода [13, 14]. Целесообразным оказывается разбиение всех выходов исходного комбинационного устройства на группы и применение для их контроля более простых равновесных кодов [19]. К ним относятся  $1/3$ ,  $1/4$ ,  $2/4$ ,  $1/5$ ,  $2/5$  коды. Методы синтеза систем диагностирования комбинационных логических устройств рассмотрены во многих работах соавторов настоящей статьи, в том числе в [20—23].

Основной проблемой при синтезе систем диагностирования по рассматриваемому методу является необходимость одновременного обеспечения полной самопроверяемости элементов структуры блока логического дополнения, а также тестера равновесного кода. Это требует формирования определенного множества кодовых векторов на выходах исходного комбинационного устройства. Данная особенность метода логического дополнения определяет приоритет группового контроля выходов комбинационного устройства перед контролем всех выходов одновременно, так как в этом случае удастся уменьшить число элементов блока логического преобразователя. Настоящая работа посвящена описанию разработанного авторами метода синтеза систем диагностирования на основе логического дополнения с уменьшенным числом элементов преобразования, что позволяет не только снизить структурную избыточность конечного устройства, но и обеспечить самопроверяемость его структурной схемы.

**Обобщенная структурная схема системы диагностирования многовыходных комбинационных устройств.** На рис. 1 приведена известная структурная схема системы диагностирования, синтезированная по методу логического дополнения [24]. Объектом диагностирования в ней является комбинационное логическое устройство  $F(x)$ , вычисляющее значения разрядов кодового информационного вектора  $\langle f_m f_{m-1} \dots f_2 f_1 \rangle$ . Для преобразования данного кодового вектора в кодовое слово равновесного  $r/m$ -кода используется блок контрольной логики  $G(x)$ , вычисляющий значения разрядов вектора контрольных функций  $\langle g_m g_{m-1} \dots g_2 g_1 \rangle$ , а также блок логического дополнения, образованный каскадом двухвыходовых элементов сложения по модулю два ( $XOR$ ). Преобразования осуществляются по формуле:

$$h_i = f_i \oplus g_i, \quad i = \overline{1, m}. \quad (1)$$

Для контроля принадлежности кодового вектора  $\langle h_m h_{m-1} \dots h_2 h_1 \rangle$  равновесному коду устанавливается тестер данного кода ( $r/m$ -TSC) с двумя выходами  $z^0$  и  $z^1$ . На этих выходах вырабатываются сигналы с противоположными значениями  $z^0 \neq z^1$ , если система диагностирования работает безошибочно. Если в каком-либо блоке системы диагностирования возникает неисправность, вызывающая искажение вектора  $\langle h_m h_{m-1} \dots h_2 h_1 \rangle$  и преобразующая его в вектор, не принадлежащий выбранному равновесному коду, то на выходах тестера устанавливаются равные значения  $z^0 = z^1$ .

Следует отметить, что число элементов  $XOR$  для некоторого класса комбинационных устройств может быть сокращено.

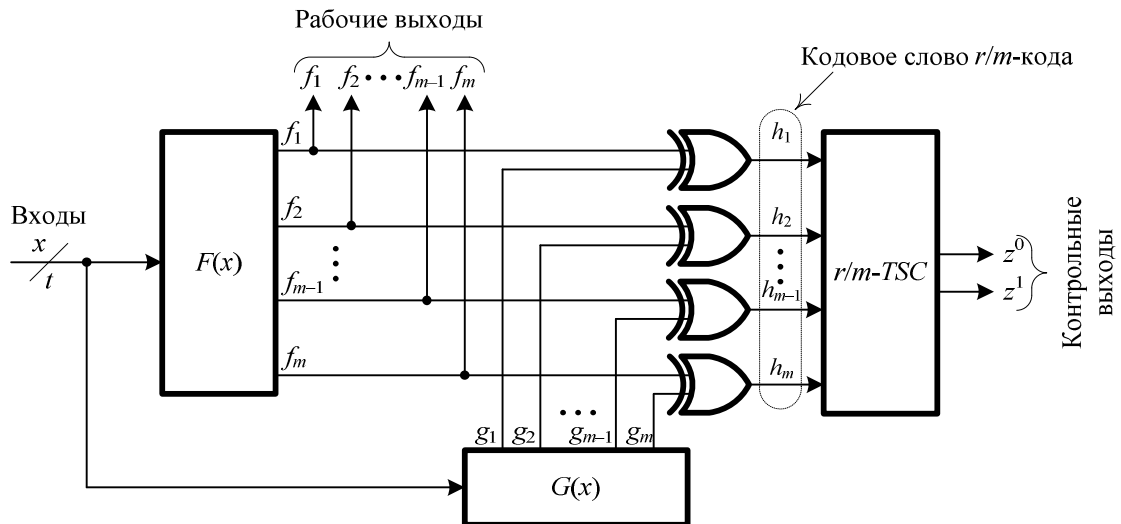


Рис. 1

Для построения полностью самопроверяемого устройства по методу логического дополнения необходимо обеспечить выполнение следующих условий.

1. Структурные схемы блоков  $F(x)$  и  $G(x)$  должны быть проверяемыми, т.е. неисправность, принадлежащая заданному классу, должна проявляться на выходах данных устройств хотя бы на одной входной комбинации [25].

2. Должна быть обеспечена полная самопроверяемость блока логического дополнения, что требует поступления в процессе эксплуатации устройства на входы каждого элемента  $XOR$  хотя бы единожды каждой из тестовых комбинаций множества  $\{00; 01; 10; 11\}$  [26].

3. Должна быть обеспечена полная самопроверяемость тестера, что требует подачи определенного множества кодовых векторов на его входы [13, 14].

4. На структуры блоков  $F(x)$  и  $G(x)$  также накладывается определенное ограничение, связанное с необходимостью исключения возможностей возникновения необнаруживаемых ошибок в равновесных кодах: должны быть исключены симметричные искажения (искажения равного числа нулевых и единичных разрядов) на выходах блока логического дополнения [16].

Все эти условия должны учитываться в комплексе при синтезе системы диагностирования.

**Базовые структурные схемы систем диагностирования.** В работах [24, 27, 28] рассматриваются способы применения равновесного 1/3-кода при построении самопроверяемых комбинационных устройств. При этом множества выходов исходного устройства разбиваются на трехэлементные подмножества, и каждая из этих групп контролируется на основе 1/3-кода собственной схемой контроля. Затем выходы отдельных схем контроля объединяются на входах самопроверяемого компаратора [29]. Базовая схема контроля по 1/3-коду изображена на рис. 2. Для преобразования любого информационного трехразрядного вектора в кодовое слово 1/3-кода требуется коррекция не более двух разрядов, что позволяет использовать в блоке логического дополнения два элемента  $XOR$ .

При использовании структурной схемы, приведенной на рис. 2, на практике следует учитывать необходимость формирования полного множества тестовых комбинаций на все элементы сложения по модулю два и 1/3-TSC. При этом, как показано в [30], самопроверяемый тестер для 1/3-кода может быть реализован только в виде схемы с памятью. Если используется несколько схем контроля для многовыходного устройства, то самопроверяемый тестер может быть реализован и в виде комбинационной схемы из базовых модулей, приведенных в [24].

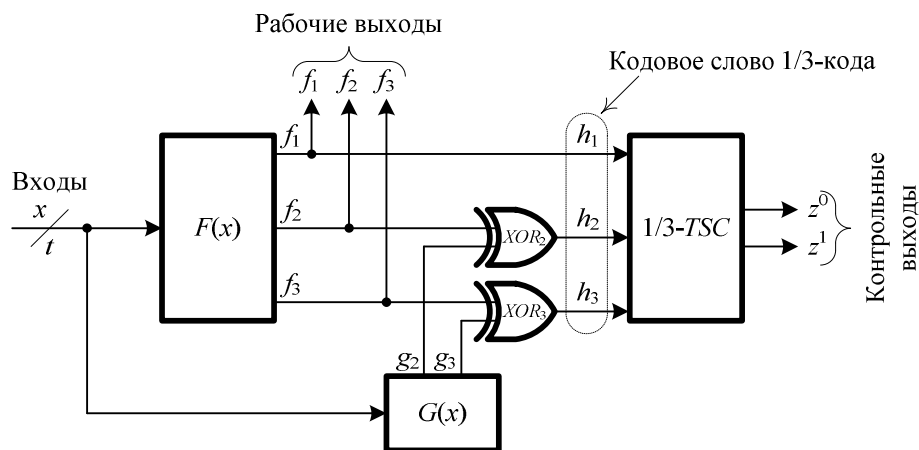


Рис. 2

Модифицируем базовую схему системы диагностирования, приведенную на рис. 2, таким образом, чтобы в ней можно было использовать только один элемент сложения по модулю два, что существенно упрощает процедуру синтеза самопроверяемой структуры. Пусть преобразуемым в базовой структуре будет только один выход, например  $f_3$ , а блок контрольной логики будет вычислять две контрольные функции — преобразования  $g_3$  и дополнения  $g_4$  кодового вектора, состоящего из трех разрядов, до четырехразрядного. В этом случае два выхода устройства  $F(x)$  не преобразуются, и контроль можно осуществить с использованием равновесного 2/4-кода (рис. 3).

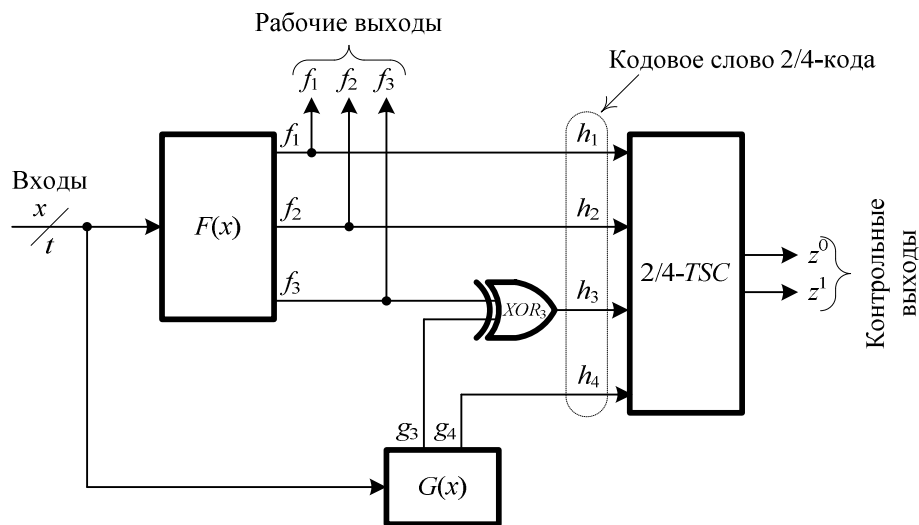


Рис. 3

Достоинством структурной схемы, приведенной на рис. 3, является не только наличие в блоке логического дополнения всего одного элемента сложения по модулю два, но и использование в качестве контролирующего устройства тестера 2/4-кода, имеющего простую структурную схему (рис. 4, а — 1/3-TSC; б — 1/4-TSC; в — 2/4-TSC; г — TRC). В качестве устройства контроля может быть использован и стандартный модуль сжатия парафазных сигналов, применение которого при синтезе систем диагностирования на основе метода логического дополнения описано в [31].

В основе способа построения базовой структурной схемы системы диагностирования, приведенной на рис. 3, лежит дополнение  $m$  выходов устройства до кодового вектора с  $m+1$  разрядом за счет использования контрольной функции  $g_{m+1}$ . Этот подход к построению системы диагностирования можно обобщить и для других равновесных кодов, например, 1/4 (рис. 5). При этом число элементов в логическом преобразователе будет увеличиваться и возрастет сложность тестера равновесного кода.

На рис. 4 приведены схемы тестеров [13, 14, 32], которые используются в базовых структурах.

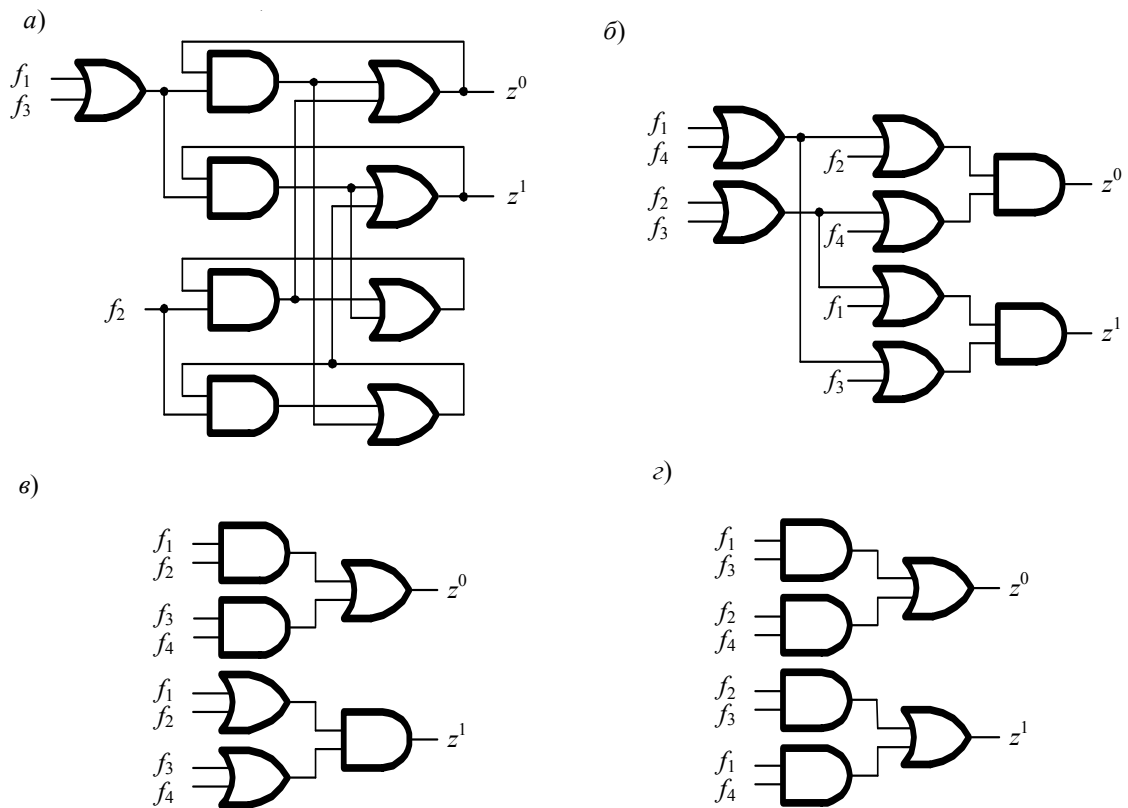


Рис. 4

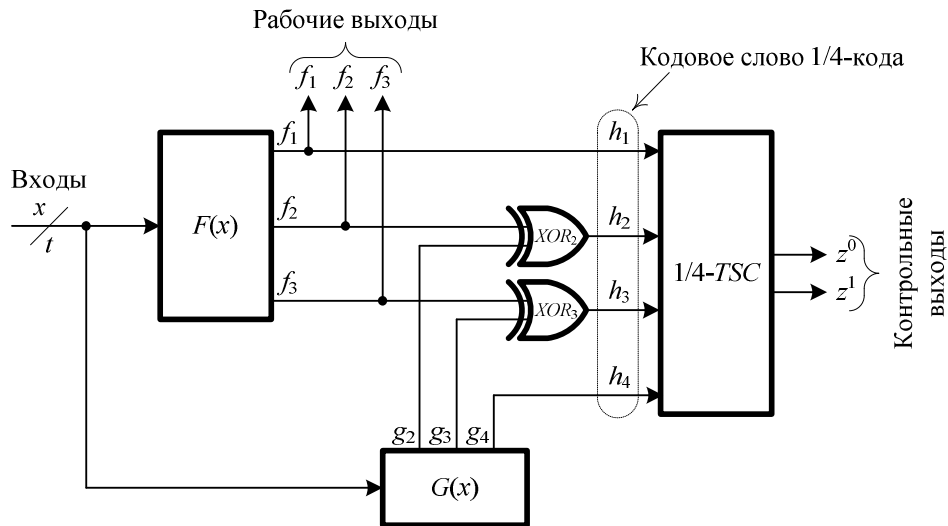


Рис. 5

**Синтез систем диагностирования для устройств с тремя выходами.** Рассмотрим особенности синтеза самопроверяемых устройств с тремя выходами на примере схемы, заданной таблицей истинности (первые два столбца табл. 1 и 2). Пользуясь методом доопределения контрольных функций, описанным в [33], получим значения всех функций в системах технического диагностирования, построенных по структурным схемам рис. 2 и 3. Результаты доопределения показаны в третьих столбцах обеих таблиц. Серым фоном выделены те строки, для которых существует несколько вариантов заполнения, что позволяет подобрать значения функций с учетом необходимости обеспечения формирования полных множеств тестовых комбинаций для тестера и элементов сложения по модулю два.

Таблица 1

**Пример получения значений  
функций логического дополнения до 1/3-кода**

$x_1x_2x_3$	$f_1f_2f_3$	$g_2g_3$	$h_1h_2h_3$	Тестовые комбинации для	
				$XOR_2$	$XOR_3$
<b>000</b>	<b>000</b>	<b>10</b>	<b>010</b>	<b>10</b>	<b>00</b>
<b>001</b>	<b>010</b>	<b>00</b>	<b>010</b>	<b>10</b>	<b>00</b>
010	100	00	100	00	00
011	111	11	100	11	11
100	110	10	100	11	00
101	101	01	100	00	11
110	110	10	100	11	00
<b>111</b>	<b>000</b>	<b>01</b>	<b>001</b>	<b>00</b>	<b>01</b>

Из табл. 1 следует, что для тестера 1/3-кода формируются все необходимые проверяющие комбинации. Для элемента  $XOR_2$  не удастся получить тестовую комбинацию  $\langle 01 \rangle$ , а для  $XOR_3$  — сформировать проверяющую комбинацию  $\langle 10 \rangle$  ни при каких условиях доопределения. Этот недостаток устранен в модифицированной структуре: из табл. 2 следует, что удастся сформировать полные множества проверяющих комбинаций как для тестера 2/4-кода, так и для единственного элемента преобразования  $XOR_3$ .

Таблица 2

**Пример получения значений  
функций логического дополнения до 2/4-кода**

$x_1x_2x_3$	$f_1f_2f_3$	$g_3g_4$	$h_1h_2h_3h_4$	Тестовые комбинации для
				$XOR_3$
000	000	11	0011	01
<b>001</b>	<b>010</b>	<b>10</b>	<b>0110</b>	<b>01</b>
<b>010</b>	<b>100</b>	<b>01</b>	<b>1001</b>	<b>00</b>
011	111	10	1100	10
100	110	00	1100	00
<b>101</b>	<b>101</b>	<b>00</b>	<b>1010</b>	<b>10</b>
110	110	00	1100	00
111	000	11	0011	01

Таким образом, модифицированная структурная схема системы диагностирования (рис. 3) позволяет на практике решать задачу обеспечения самопроверяемости устройства.

Минимизируя контрольные функции в системе диагностирования по 1/3-коду, получим

$$g_2 = x_1\bar{x}_3 \vee \bar{x}_2\bar{x}_3 \vee \bar{x}_1x_2x_3;$$

$$g_3 = x_1x_3 \vee x_2x_3.$$

Аналогично получим контрольные функции в системе диагностирования по 2/4-коду:

$$g_3 = \bar{x}_1\bar{x}_2 \vee x_2x_3;$$

$$g_4 = \bar{x}_1\bar{x}_3 \vee x_1x_2x_3.$$

Из сравнения контрольных функций, полученных для систем диагностирования как по 1/3, так и по 2/4-коду, следует, что для рассматриваемого примера удастся уменьшить структурную избыточность конечного устройства. Это также является преимуществом рассматриваемого способа синтеза систем диагностирования по методу логического дополнения.

**Синтез систем диагностирования для многовыходных устройств.** При синтезе систем диагностирования для многовыходных комбинационных устройств используется разбиение выходов на группы с контролем каждой такой группы по выбранному коду [19]. Рассмотр-

рим, например, процедуру определения контрольных функций блоков контрольной логики для различных вариантов организации системы диагностирования устройства, снабженного шестью выходами. Условия работы устройства заданы таблицей истинности (см. табл. 3).

Таблица 3

Описание выходов  
исходной комбинационной схемы

$x_1x_2x_3$	$f_1f_2f_3f_4f_5f_6$
000	110010
001	110011
010	011001
011	011001
100	101101
101	000000
110	101111
111	110000

Существует несколько вариантов организации схемы контроля в данном случае. Рассмотрим три из них:

- 1) разбиение выходов на две контрольные группы по четыре выхода в каждой  $\{f_1, f_2, f_3, f_4\}$  и  $\{f_3, f_4, f_5, f_6\}$  с контролем обеих групп по 2/4-коду (структурная схема „2×2/4“);
- 2) разбиение выходов на две контрольные группы по три выхода в каждой  $\{f_1, f_2, f_3\}$  и  $\{f_4, f_5, f_6\}$  с контролем обеих групп по 1/3-коду (схема „2×1/3“);
- 3) разбиение выходов на две контрольные группы по три выхода в каждой  $\{f_1, f_2, f_3\}$  и  $\{f_4, f_5, f_6\}$  с контролем обеих групп по 2/4-коду (схема „2×2/4\*“, звездочка указывает на использование предложенной авторами структурной схемы).

Пользуясь алгоритмом доопределения контрольных функций, приведенным в [33], получим для каждого из трех вариантов (рис. 6—8) описательные таблицы (табл. 4—6). В них представлены как значения контрольных и контролируемых функций, так и тестовые комбинации для элементов сложения по модулю два в структуре блока логического дополнения.

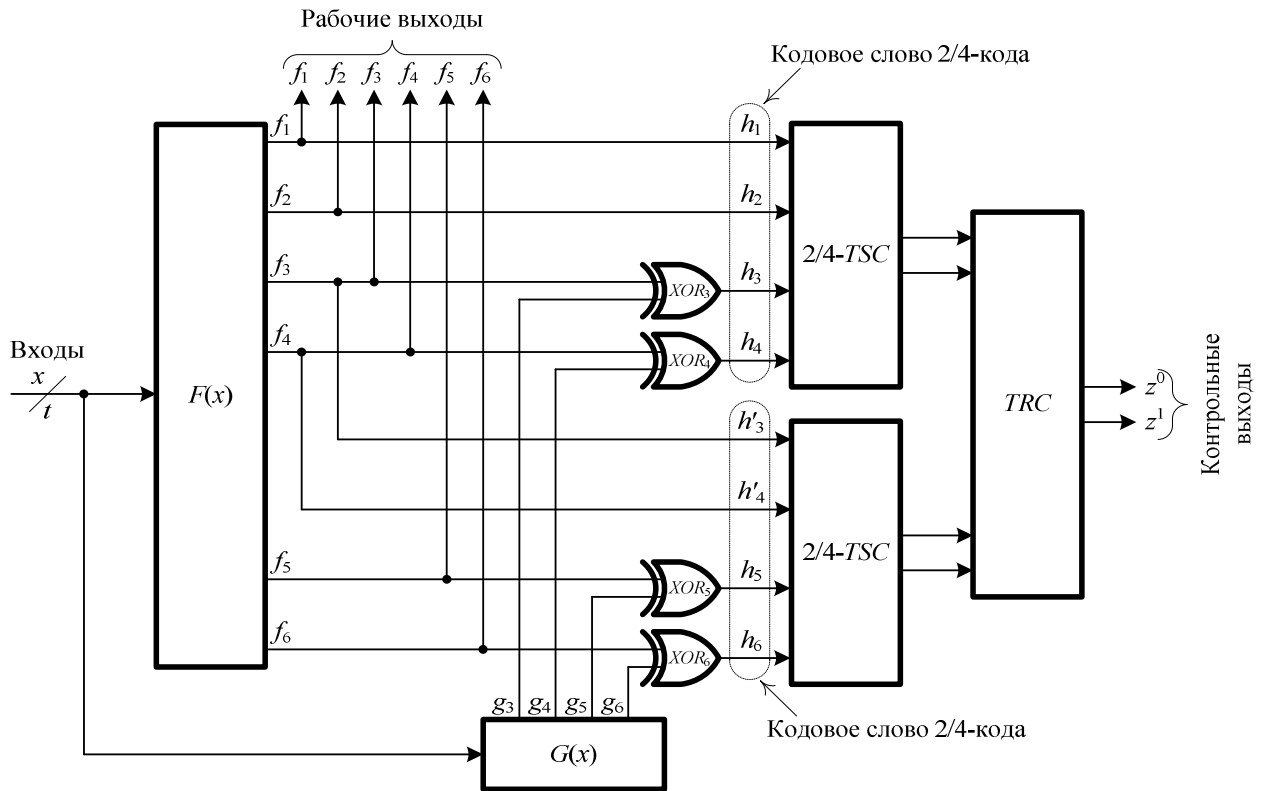


Рис. 6

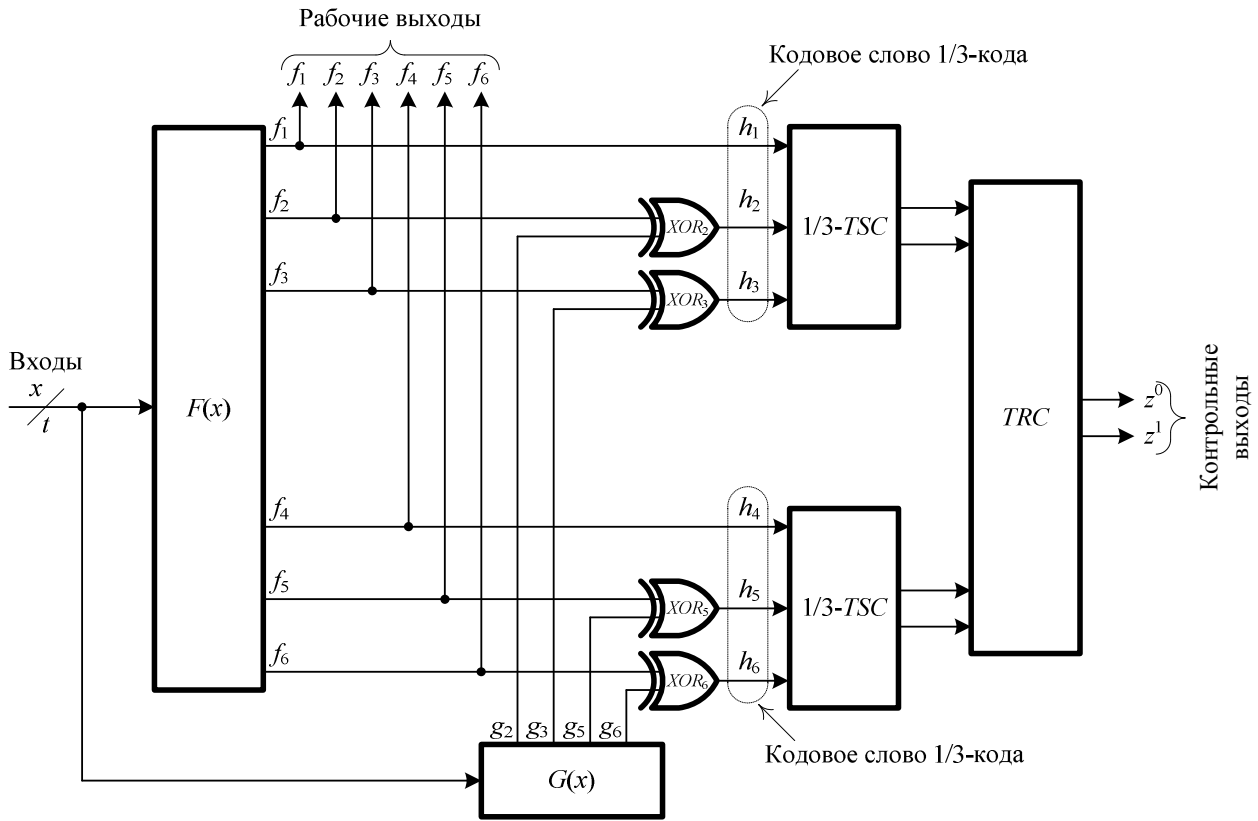


Рис. 7

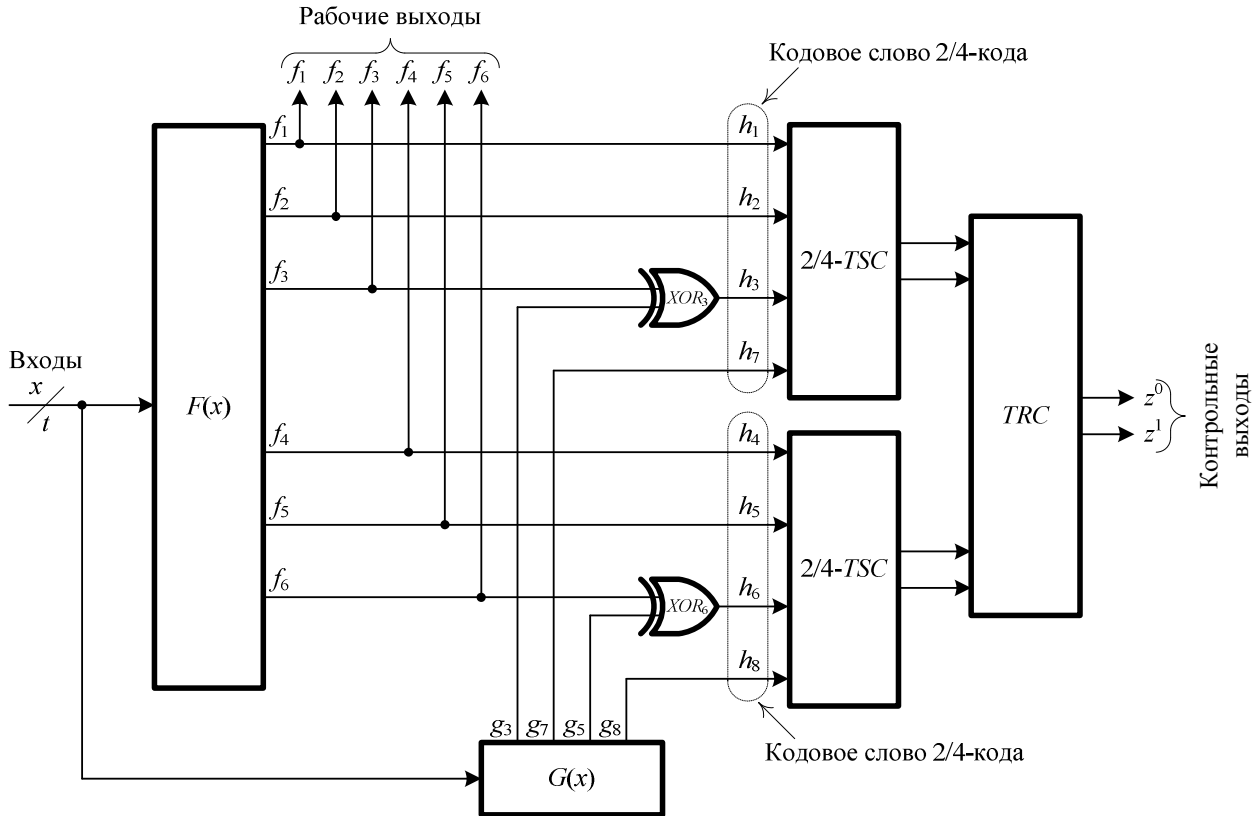


Рис. 8



Таблица 4

## Функции системы диагностирования для структуры „2×2/4“

$x_1x_2x_3$	$f_1f_2f_3f_4f_5f_6$	$g_3g_4$	$h_1h_2h_3h_4$	Тестовые комбинации для		$g_5g_6$	$h'_3h'_4h_5h_6$	Тестовые комбинации для	
				$XOR_3$	$XOR_4$			$XOR_5$	$XOR_6$
000	110010	00	1100	00	00	01	0011	10	01
001	110011	00	1100	00	00	00	0011	10	10
010	011001	00	0110	10	00	00	1001	00	10
011	011001	00	0110	10	00	00	1001	00	10
100	101101	01	1010	10	11	01	1100	00	11
101	000000	11	0011	01	01	11	0011	01	01
110	101111	10	1001	11	10	11	1100	11	11
111	110000	00	1100	00	00	11	0011	01	01

Таблица 5

## Функции системы диагностирования для структуры „2×1/3“

$x_1x_2x_3$	$f_1f_2f_3f_4f_5f_6$	$g_2g_3$	$h_1h_2h_3$	Тестовые комбинации для		$g_5g_6$	$h_4h_5h_6$	Тестовые комбинации для	
				$XOR_2$	$XOR_3$			$XOR_5$	$XOR_6$
000	110010	10	100	11	00	00	010	10	00
001	110011	10	100	11	00	01	010	10	11
010	011001	01	010	10	11	00	001	00	10
011	011001	10	001	11	10	00	001	00	10
100	101101	01	100	00	11	01	100	00	11
101	000000	01	001	00	01	10	010	01	00
110	101111	01	100	00	11	11	100	11	11
111	110000	10	100	11	00	01	001	00	01

Таблица 6

## Функции системы диагностирования для структуры „2×2/4\*“

$x_1x_2x_3$	$f_1f_2f_3f_4f_5f_6$	$g_3g_4$	$h_1h_2h_3h_7$	Тестовые комбинации для $XOR_3$	$g_5g_6$	$h_4h_5h_6h_8$	Тестовые комбинации для $XOR_6$
000	110010	00	1100	00	01	0101	00
001	110011	00	1100	00	00	0110	10
010	011001	00	0110	10	01	0011	10
011	011001	00	0110	10	01	0011	10
100	101101	00	1010	10	11	1001	11
101	000000	11	0011	01	11	0011	01
110	101111	11	1001	11	10	1100	11
111	110000	00	1100	00	11	0011	01

Отметим следующие особенности структур. Для „2×2/4“ не удастся обеспечить формирования проверяющей комбинации <00> для элемента  $XOR_6$ . Для „2×1/3“ не удастся обеспечить формирования проверяющей комбинации <01> для элемента  $XOR_2$ . Для структуры „2×2/4\*“ самопроверяемость обеспечить удастся.

Выпишем формулы, описывающие выходы блоков контрольной логики представленных на рис. 6—8 структур.

Контрольные функции для структуры „2×2/4“:

$$g_3 = x_1\bar{x}_2x_3 \vee x_1x_2\bar{x}_3;$$

$$g_4 = x_1\bar{x}_2;$$

$$g_5 = x_1 x_2 \vee x_1 x_3;$$

$$g_6 = x_1 \vee \bar{x}_2 \bar{x}_3.$$

Контрольные функции для структуры „2×1/3“:

$$g_2 = \bar{x}_1 \bar{x}_2 \vee x_2 x_3;$$

$$g_3 = x_1 \bar{x}_2 \vee x_2 \bar{x}_3 = \bar{g}_2;$$

$$g_5 = x_1 \bar{x}_2 x_3 \vee x_1 x_2 \bar{x}_3;$$

$$g_6 = x_1 x_2 \vee x_1 \bar{x}_3 \vee \bar{x}_1 \bar{x}_2 x_3.$$

Контрольные функции для структуры „2×2/4\*“:

$$g_3 = x_1 \bar{x}_2 x_3 \vee x_1 x_2 \bar{x}_3;$$

$$g_4 = x_1 \bar{x}_2 x_3 \vee x_1 x_2 \bar{x}_3 = \bar{g}_3;$$

$$g_5 = x_1;$$

$$g_6 = \bar{x}_1 \bar{x}_3 \vee x_2 x_3 \vee x_1 \bar{x}_2.$$

Контрольные функции для структуры „2×2/4\*“ имеют меньше букв в записи, что свидетельствует о более простой схеме блока контрольной логики именно для этого случая.

**Заключение.** Представленный способ синтеза систем диагностирования на основе метода логического дополнения позволяет гораздо проще обеспечивать полную самопроверяемость конечного устройства, чем известные способы [18—24]. Это достигается за счет уменьшения числа элементов преобразования в схеме блока логического дополнения. Например, в базовой структуре при контроле исходного устройства на основе 2/4-кода (см. рис. 3) такой элемент нужен только один. Кроме того, в ряде случаев возможно уменьшение сложности технической реализации и структурной избыточности конечного устройства.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Согомонян Е. С., Слабаков Е. В.* Самопроверяемые устройства и отказоустойчивые системы. М.: Радио и связь, 1989. 208 с.
2. *Piestrak S. J.* Design of Self-Testing Checkers for Unidirectional Error Detecting Codes. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 1995. 111 p.
3. *Nicolaidis M., Zorian Y.* On-Line Testing for VLSI — A Compendium of Approaches // J. of Electronic Testing: Theory and Applications. 1998. N 12. P. 7—20. DOI: 10.1023/A:1008244815697.
4. *Das D., Toubia N. A.* Weight-Based Codes and Their Application to Concurrent Error Detection of Multilevel Circuits // Proc. of 17th IEEE Test Symp. California, USA, 1999. P. 370—376. DOI: 10.1109/VTEST.1999.766691.
5. *Fujiwara E.* Code Design for Dependable Systems: Theory and Practical Applications. John Wiley & Sons, 2006. 720 p.
6. *Borecký J., Kohlík M., Kubátová H.* Parity Driven Reconfigurable Duplex System // Microprocessors and Microsystems. 2017. Vol. 52. P. 251—260. DOI: 10.1016/j.micpro.2017.06.015.
7. *Stempkovskiy A., Telpukhov D., Gurov S., Zhukova T., Demeneva A.* R-Code for Concurrent Error Detection and Correction in The Logic Circuits // 2018 IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). Moscow, Russia, 29 January—1 February 2018. P. 1430—1433. DOI: 10.1109/EIConRus.2018.8317365.
8. *Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В.* Коды Хэмминга в системах функционального контроля логических устройств: монография. СПб: Наука, 2018. 151 с.
9. *Efanov D., Sapozhnikov V., Sapozhnikov V.* Generalized Algorithm of Building Summation Codes for the Tasks of Technical Diagnostics of Discrete Systems // Proc. of 15th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2017). Novi Sad, Serbia, 29 September—2 October 2017. P. 365—371. DOI: 10.1109/EWDTS.2017.8110126.

10. *Freiman C. V.* Optimal Error Detection Codes for Completely Asymmetric Binary Channels // *Information and Control*. 1962. Vol. 5, is. 1. P. 64—71. DOI: 10.1016/S0019-9958(62)90223-1.
11. *Anderson D. A., Metzger G.* Design on Totally Self-Checking-Check Circuits for m-out-of-n Codes // *IEEE Transaction on Computers*. 1973. Vol. C-33, is. 3. P. 263—269.
12. *Мазнев В. И.* О синтезе самотестируемых 1/p-тестеров // *Автоматика и телемеханика*. 1978. № 9. С. 142—145.
13. *Сапожников В. В., Сапожников Вл. В.* Самопроверяемые тестеры для равновесных кодов // *Автоматика и телемеханика*. 1992. № 3. С. 3—35.
14. *Сапожников В. В., Сапожников Вл. В.* Самопроверяемые дискретные устройства. СПб: Энергоатомиздат, 1992. 224 с.
15. *Matrosova A., Ostrovsky V., Levin I., Nikitin K.* Designing FPGA based Self-Testing Checkers for m-out-of-n Codes // *Proc. of the 9th IEEE Intern. On-Line Testing Symposium (IOLTS'03)*. Kos Island, Greece, 7—9 July 2003. P. 49—53.
16. *Ефанов Д. В., Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Пивоваров Д. В.* Ограничения на структуры компонентов полностью самопроверяемых схем встроенного контроля, синтезированных методом логического дополнения до равновесного кода „1 из 3“ // *Электронное моделирование*. 2019. Т. 41, № 1. С. 27—42. DOI: 10.15407/emodel.41.01.027.
17. *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.
18. *Ефанов Д. В., Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Пивоваров Д. В.* Синтез самопроверяемых схем встроенного контроля на основе метода логического дополнения до равновесных кодов „1 из n“ // *Автоматика и вычислительная техника*. 2019. № 6. С. 62—75.
19. *Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В., Пивоваров Д. В.* Синтез систем функционального контроля многовыходных комбинационных схем на основе метода логического дополнения // *Вестн. Томского гос. ун-та. Управление, вычислительная техника и информатика*. 2017. № 4. С. 69—80. DOI: 10.17223/19988605/41/9.
20. *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.
21. *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.
22. *Sapozhnikov V., Sapozhnikov Vl., Efanov D., Bliudov A., Pivovarov D.* Combinational Circuit Check by Boolean Complement Method Based on “1-out-of-5” Code // *Proc. of 15<sup>th</sup> IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2017)*. Novi Sad, Serbia, 29 September—2 October 2017. P. 89—94. DOI: 10.1109/EWDTS.2017.8110076.
23. *Ефанов Д. В., Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Пивоваров Д. В.* Синтез самопроверяемых схем встроенного контроля на основе метода логического дополнения до равновесного кода „2 из 4“ // *Информатика*. 2018. Т. 15, № 4. С. 71—85.
24. *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.
25. *Пархоменко П. П., Согомонян Е. С.* Основы технической диагностики (оптимизация алгоритмов диагностирования, аппаратурные средства). М.: Энергоатомиздат, 1981. 320 с.
26. *Аксёнова Г. П.* Необходимые и достаточные условия построения полностью проверяемых схем свертки по модулю 2 // *Автоматика и телемеханика*. 1979. № 9. С. 126—135.
27. *Das D. K., Roy S. S., Dmitiriev A., Morozov A., Gössel M.* Constraint Don't Cares for Optimizing Designs for Concurrent Checking by 1-out-of-3 Codes // *Proc. of the 10th Intern. Workshops on Boolean Problems*. Freiberg, Germany, September 2012. P. 33—40.
28. *Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В.* Построение полностью самопроверяемых структур систем функционального контроля с использованием равновесного кода „1 из 3“ // *Электронное моделирование*. 2016. Т. 38, № 6. С. 25—43.

29. *Nikolos D.* Self-Testing Embedded Two-Rail Checkers // *J. of Electronic Testing: Theory and Applications*. 1998. Vol. 12, is. 1-2. P. 69—79. DOI: 10.1023/A:1008281822966.
30. *Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Чугуй Т. А.* Метод синтеза самопроверяемого тестера для кода „1 из 3“ // *Изв. вузов. Приборостроение*. 1991. Т. 34, № 6. С. 27—33.
31. *Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В.* Организация систем функционального контроля с обеспечением полной самопроверяемости структуры на основе модулей сжатия парафазных сигналов // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2017. Т. 60, № 5. С. 404—411. DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-5-404-411.
32. *Сапожников В. В., Сапожников Вл. В.* О синтезе самопроверяемых тестеров для кода „1 из 3“ // *Автоматика и телемеханика*. 1991. № 2. С. 178—188.
33. *Sapozhnikov V., Sapozhnikov Vl., Efanov D.* Concurrent Error Detection of Combinational Circuits by the Method of Boolean Complement on the Base of „2-out-of-4“ Code // *Proc. of 14<sup>th</sup> IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2016)*. Yerevan, Armenia, 14—17 October 2016. P. 126—133. DOI: 10.1109/EWDTS.2016.7807677.

#### Сведения об авторах

- Валерий Владимирович Сапожников** — д-р техн. наук, профессор; Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, кафедра автоматки и телемеханики на железных дорогах;  
E-mail: port.at.pgups@gmail.com
- Владимир Владимирович Сапожников** — д-р техн. наук, профессор; Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, кафедра автоматки и телемеханики на железных дорогах;  
E-mail: at.pgups@gmail.com
- Дмитрий Викторович Ефанов** — д-р техн. наук, доцент; ООО „ЛокоТех-Сигнал“; Российский университет транспорта (МИИТ), кафедра автоматки, телемеханики и связи на железнодорожном транспорте;  
E-mail: TrES-4b@yandex.ru
- Дмитрий Вячеславович Пивоваров** — Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, кафедра автоматки и телемеханики на железных дорогах; ассистент; E-mail: pivovarov.d.v.spb@gmail.com

Поступила в редакцию  
19.09.19 г.

**Ссылка для цитирования:** *Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В., Пивоваров Д. В.* Метод синтеза систем диагностирования на основе логического дополнения с уменьшенным числом элементов преобразования // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2019. Т. 62, № 12. С. 1039—1052.

#### METHOD OF DIAGNOSTIC SYSTEM SYNTHESIS BASED ON BOOLEAN COMPLEMENT WITH REDUCED NUMBER OF CORRECTION ELEMENTS

V. V. Sapozhnikov<sup>1</sup>, Vl. V. Sapozhnikov<sup>1</sup>, D. V. Efanov<sup>2</sup>, D. V. Pivovarov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 190031, St. Petersburg, Russia*

<sup>2</sup> *Russian University of Transport, 127994, Moscow, Russia*  
E-mail: TrES-4b@yandex.ru

Application of Boolean complement in self-checking combinational devices synthesis is considered. A method is proposed for reducing the number of correction elements in the basic block diagram of the initial combinational device diagnosis system using a 1-out-of-3 constant-weight code. The method is based on conversion of only one working function and the addition of three-digit code word in the check circuit to four-digit code word for 2-out-of-4 constant-weight code. Such an approach to the construction of diagnostic system simplifies the self-checking procedure of the structure and reduces the complexity of the final device implementation. The decrease is due to the variability of the check logic structure block and relative simplicity of codes checkers for 2-out-of-4 constant-weight codes as compared to 1-out-of-3 constant-weighted codes checkers. Examples of using the described method for synthesis of self-checking combinational devices with three or more outputs are presented.

**Keywords:** self-checking combinational device, Boolean complement method, addition modulo two element, constant-weight code, constant-weight code checker, device structural redundancy

## REFERENCES

1. Sogomonyan E.S., Slabakov E.V. *Samoproveryaemye ustroystva i otkazoustoychivye sistemy* (The Self-Checked Devices and Failure-Safe Systems), Moscow, 1989, 208 p. (in Russ.)
2. Piestrak S.J. *Design of Self-Testing Checkers for Unidirectional Error Detecting Codes*, Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 1995, 111 p.
3. Nicolaidis M., Zorian Y. *Journal of Electronic Testing: Theory and Applications*, 1998, no. 12, pp. 7–20. DOI: 10.1023/A:1008244815697.
4. Das D., Toubia N.A. *Proceedings of 17th IEEE Test Symposium*, California, USA, 1999, pp. 370–376, DOI: 10.1109/VTEST.1999.766691.
5. Fujiwara E. *Code Design for Dependable Systems: Theory and Practical Applications*, John Wiley & Sons, 2006, 720 p.
6. Borecký J., Kohlík M., Kubátová H. *Microprocessors and Microsystems*, 2017, no. 52, pp. 251–260, DOI: 10.1016/j.micpro.2017.06.015.
7. Stempkovskiy A., Telpukhov D., Gurov S., Zhukova T., Demeneva A. *2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*, 29 January–1 February 2018, Moscow, Russia, pp. 1430–1433, DOI: 10.1109/EIConRus.2018.8317365.
8. Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov VI.V., Efanov D.V. *Kody Khemminga v sistemakh funktsional'nogo kontrolya logicheskikh ustroystv* (Hamming Codes in Logic Devices Functional Control Systems), St. Petersburg, 2018, 151 p. (in Russ.)
9. Efanov D., Sapozhnikov V., Sapozhnikov VI. *Proceedings of 15th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2017)*, Novi Sad, Serbia, 29 September–2 October 2017, pp. 365–371, DOI: 10.1109/EWDTS.2017.8110126.
10. Freiman C.V. *Information and Control*, 1962, no. 1(5), pp. 64–71, DOI: 10.1016/S0019-9958(62)90223-1.
11. Anderson D.A., Metzger G. *IEEE Transaction on Computers*, 1973, no. 3(C-33), pp. 263–269.
12. Maznev V.I. *Automation and Remote Control*, 1978, no. 9, pp. 142–145. (in Russ.)
13. Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov VI.V. *Automation and Remote Control*, 1992, no. 3, pp. 3–35. (in Russ.)
14. Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov VI.V. *Samoproveryaemye diskretnyye ustroystva* (Self-Checked Discrete Devices), St. Petersburg, 1992, 224 p. (in Russ.)
15. Matrosova A., Ostrovsky V., Levin I., Nikitin K. *Proceedings of the 9th IEEE International On-Line Testing Symposium (IOLTS'03)*, 7–9 July 2003, Kos Island, Greece, pp. 49–53.
16. Efanov D.V., Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov VI.V., Pivovarov D.V. *Engineering Simulation*, 2019, no. 1(41), pp. 27–42. DOI: 10.15407/emodel.41.01.027.
17. 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.
18. Efanov D.V., Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov VI.V., Pivovarov D.V. *Automatic Control and Computer Sciences*, 2019, no. 6(53), pp. 481–491. DOI: 10.3103/S014641161906004X.
19. Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov VI.V., Efanov D.V., Pivovarov D.V. *Tomsk State University Journal. Control and Computer Science*, 2017, no. 4, pp. 69–80. DOI: 10.17223/19988605/41/9. (in Russ.)
20. Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov VI.V., Efanov D.V. *Control Sciences*, 2017, no. 1, pp. 57–64. (in Russ.)
21. Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov VI.V., Efanov D.V., Pivovarov D.V. *Modelling and Simulation in Engineering*, 2017, no. 2(39), pp. 15–34. (in Russ.)
22. Sapozhnikov V., Sapozhnikov VI., Efanov D., Bliudov A., Pivovarov D. *Proceedings of 15th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2017)*, Novi Sad, Serbia, September 29–October 2, 2017, pp. 89–94. DOI: 10.1109/EWDTS.2017.8110076.
23. Efanov D.V., Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov VI.V., Pivovarov D.V. *Informatics*, 2018, no. 4(15), pp. 71–85. (in Russ.)
24. Gessel M., Morozov A.V., Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov VI.V. *Automation and Remote Control*, 2003, no. 1(64), pp. 153–161.
25. Parkhomenko P.P., Sogomonyan E.S. *Osnovy tekhnicheskoy diagnostiki (optimizatsiya algoritmov diagnostirovaniya, apparaturnyye sredstva)* (Fundamentals of Technical Diagnostics (Optimization of Diagnostic Algorithms, Hardware)), Moscow, 1981, 320 p. (in Russ.)
26. Aksenova G.P. *Automation and Remote Control*, 1979, no. 9, pp. 126–135. (in Russ.)
27. Das D.K., Roy S.S., Dmitiriev A., Morozov A., Gössel M. *Proceedings of the 10th International Workshops on Boolean Problems*, Freiberg, Germany, September, 2012, pp. 33–40.
28. Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov VI.V., Efanov D.V. *Modelling and Simulation in Engineering*, 2016, no. 6(38), pp. 25–43. (in Russ.)
29. Nikolos D. *Journal of Electronic Testing: Theory and Applications*, 1998, no. 1-2(12), pp. 69–79. DOI: 10.1023/A:1008281822966.
30. Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov VI.V., Chuguy T.A. *Journal of Instrument Engineering*, 1991, no. 6(34), pp. 27–33. (in Russ.)
31. Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov VI.V., Efanov D.V. *Journal of Instrument Engineering*, 2017, no. 5(60), pp. 404–411. DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-5-404-411. (in Russ.)
32. Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov VI.V. *Automation and Remote Control*, 1991, no. 2pt 2(52), pp. 289–296.

33. Sapozhnikov V., Sapozhnikov Vl., Efanov D. *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.

**Data on authors**

<b>Valery V. Sapozhnikov</b>	—	Dr. Sci., Professor; Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Department of Automation and Remote Control on Railways; E-mail: port.at.pgups@gmail.com
<b>Vladimir V. Sapozhnikov</b>	—	Dr. Sci., Professor; Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Department of Automation and Remote Control on Railways; E-mail: at.pgups@gmail.com
<b>Dmitry V. Efanov</b>	—	Dr. Sci., Associate Professor; LocoTech-Signal Ltd.; Russian University of Transport; Department of Automation, Remote Control, and Communication in Railway Transport; E-mail: TrES-4b@yandex.ru
<b>Dmitry V. Pivovarov</b>	—	Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Department of Automation and Remote Control on Railways; Assistant; E-mail: pivovarov.d.v.spb@gmail.com

**For citation:** Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V., Efanov D. V., Pivovarov D. V. Method of diagnostic system synthesis based on Boolean complement with reduced number of correction elements. *Journal of Instrument Engineering*. 2019. Vol. 62, N 12. P. 1039—1052 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-12-1039-1052