

УДК 004.052.32

Р. Б. Абдуллаев

*Кафедра «Автоматика и телемеханика»,
Ташкентский государственный транспортный университет, Ташкент*

СИНТЕЗ ПОЛНОСТЬЮ САМОПРОВЕРЯЕМЫХ СХЕМ ВСТРОЕННОГО КОНТРОЛЯ НА ОСНОВЕ ПОЛИНОМИАЛЬНЫХ КОДОВ ДЛЯ КОМБИНАЦИОННЫХ ЛОГИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

В статье исследуются способы синтеза систем функционального контроля логических комбинационных схем с полным обнаружением любых одиночных неисправностей с помощью свойств обнаружения ошибок полиномиальных кодов. Предложена классификация специальных образующих полиномов, формирующих коды с небольшим значением длины контрольного вектора и полной идентификацией ошибок определенного вида или кратностей. Предложен метод построения системы функционального контроля с полной идентификацией одиночных неисправностей на основе свойства полного обнаружения трехкратных ошибок полиномиальными кодами. Разработаны алгоритмы поиска и формирования контролепригодных Н1-, Н2- и Н3- групп выходов схем с учетом свойств полиномиальных кодов. Перечислены виды функциональной зависимости рабочих выходов комбинационных схем, при которых могут возникать ошибки разного вида. На основе свойства обнаружения любых симметричных и асимметричных ошибок полиномиальными кодами предложен метод построения систем функционального контроля с полной идентификацией этого вида ошибок. Для примерной схемы приводится разработка системы функционального контроля на основе предлагаемых методов.

Рабочее диагностирование, неисправность логических схем, кратность ошибки, вид ошибки, полиномиальные коды, классификация образующих полиномов

DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-3-452-476

Введение

С появлением помехоустойчивых кодов в значительной мере была решена проблема надежности каналов связи, методов обработки и хранения данных. Помехоустойчивое кодирование стало широко применяться при построении высоконадежных систем управления и контроля, например, при реализации задач функционального диагностирования [1–4] отдельных блоков, узлов или схем, а также в системах функционального контроля (СФК) для сокращения аппаратных затрат таких систем. Известны работы [5] об использовании кодов

Бергера [6] и его модификаций, кодов Хэмминга [7] и равновесных кодов при построении систем функционального контроля логических схем. В таких задачах часто учитываются свойства кодов по обнаружению ошибок. Эти свойства лежат в основе системы диагностирования для идентификации наибольшего количества, а при возможности и полного множества ошибок на выходах контролируемых устройств. С помощью кодов Бергера можно идентифицировать все однонаправленные ошибки типа $0 \rightarrow 1$ или $1 \rightarrow 0$, с учетом этого свойства приводятся методы построения СФК с полной идентификацией ошибок на выходах диагностируемых схем с проявлением только однонаправленных ошибок [8, 9]. Таким образом, свойства кодов позволяют с использованием специальных методов строить системы с полной идентификацией ошибок.

Ошибки на выходах устройств подразделяются на одиночные – при кратности (число искаженных разрядов в информационном векторе длиной m) ошибки $d=1$, и многократные – при кратности $d>1$. Многократные ошибки подразделяются на однонаправленные, или монотонные, и разнонаправленные. Разнонаправленные ошибки делятся на симметричные, возникающие при равном числе искажений $0 \rightarrow 1$ и $1 \rightarrow 0$, и асимметричные, которые появляются при неравном числе искажений $0 \rightarrow 1$ и $1 \rightarrow 0$ и имеют кратность $d \geq 3$ [10].

Проявление того или иного вида ошибок на выходах диагностируемых схем диктует их топология. Поэтому для построения систем функционального контроля с полным обнаружением ошибок требуется тщательный анализ самого устройства и использования в основе такой системы соответствующего кода, который бы мог находить все ошибки на выходах устройства. Свойства обнаружения ошибок вышеперечисленных кодов ограничиваются идентификацией только определенного вида или кратности ошибок. Так, коды Бергера хоть и хорошо находят монотонные и асимметричные ошибки, но полностью не обнаруживают симметричные ошибки; модификации данного кода позволяют отыскивать только часть симметричных ошибок либо полностью – ошибки кратностью $d=2$. Коды Хэмминга помогают обнаруживать полностью только двукратные ошибки, равновесные коды полностью не обнаруживают симметричные ошибки, и т. д.

Эти обстоятельства подталкивают к поиску новых кодов со специфическими свойствами в основе системы функционального контроля, в частности полиномиальных кодов [11]. Многие работы [12, 13] посвящены использованию полиномиальных кодов в создании систем встроенного контроля логических устройств. В тех же работах приводятся итоги исследований свойств кодов находить ошибки. По их результатам установлены новые свойства полного обнаружения ошибок определенного вида и кратностей. Учет этих свойств при синтезе СФК способствует построению систем с полным обнаружением.

Цель работы заключается в исследовании методов построения СФК логических устройств на основе полиномиальных кодов с полной идентификацией ошибок на выходах диагностируемых устройств.

1. Классификация полиномиальных кодов по их свойствам

Свойства обнаружения ошибок полиномиальных кодов задаются характеристиками образующих полиномов [11]. В ходе исследований были выявлены ранее не известные свойства обнаружения ошибок полиномиальными кодами. Например, установлены условия построения полиномиальных кодов, полностью идентифицирующие двукратные и трехкратные ошибки, а также ошибки больших кратностей, и свойства полного обнаружения симметричных и асимметричных ошибок в информационных векторах.

Установленные свойства и условия построения полиномиальных кодов с конкретными обнаруживающими характеристиками могут быть очень полезны при проектировании СФК логических устройств.

На основе свойств обнаружения ошибок полиномиальными кодами с небольшим значением длины контрольного разряда – k , $k \in [2; 5]$ в таблице 1 приводится классификация образующих полиномов, формирующих коды с определенными обнаруживающими характеристиками.

Образующие полиномы, формирующие коды с полным обнаружением симметричных ошибок (*Symmetrical Error Detection – SED*) и асимметричных ошибок (*Asymmetrical Error Detection – AED*), названы соответственно *SED*- и *AED*-полиномами.

Для удобства описаний введем условное обозначение образующих полиномов как PN полинома, где P означает принадлежность к полиномиальному коду, а N – десятичный эквивалент числа двоичных коэффициентов полинома. Допустим, полином $x^3+x^1+x^0$ имеет коэффициенты 1011, что в десятичной форме равно числу 11, следовательно, полином обозначим как $P11$. Обозначим код, сформированный $P11$ полиномом, как $P11(m,k)$ -кодом, где m и k – длины соответственно информационного и контрольного вектора полиномиального кода.

2. Метод синтеза СФК логических устройств на основе полиномиальных кодов с полной идентификацией ошибок определенных кратностей на рабочих выходах

Виды и кратность ошибок на выходах логических устройств зависят от их топологии. Сложная структура диагностируемых устройств часто затрудняет идентификацию всех возможных ошибок на рабочих выходах с помощью помехозащищенных кодов. К примеру, на рис. 1 приводится комбинационная схема со структурно независимыми и зависимыми рабочими выходами.

Определение 1. Структурно независимыми выходами называются выходы логического устройства, не имеющие внутренней структурной связи с остальными выходами устройства, а значит, подобные выходы реализуются отдельными подсхемами логического устройства (выходы f_1 и f_2 на рис. 1) [14–17].

Таблица 1. Классификация специальных образующих полиномов по их свойствам

Число контрольных разрядов k			
2	3	4	5
Полиномы, образующие коды с полным обнаружением ошибок нечетных кратностей, оптимальные коды с проверкой на четность			
x^2+x^0 x^2+x^1	x^3+x^0 x^3+x^2 $x^3+x^2+x^1+x^0$	x^4+x^0 x^4+x^1 x^4+x^2 $x^4+x^2+x^1+x^0$ x^4+x^3 $x^4+x^3+x^1+x^0$ $x^4+x^3+x^2+x^0$ $x^4+x^3+x^2+x^1$	x^5+x^0 x^5+x^1 x^5+x^2 $x^5+x^2+x^1+x^0$ x^5+x^3 $x^5+x^3+x^1+x^0$ $x^5+x^3+x^2+x^0$ и т. д.
Полиномы, образующие коды с обнаружением любых двукратных ошибок			
$x^2+x^1+x^0$	$x^3+x^1+x^0$ $x^3+x^2+x^0$	$x^4+x^1+x^0$ $x^4+x^3+x^0$	$x^5+x^1+x^0$ $x^5+x^4+x^0$
Полиномы, образующие коды с обнаружением любых трехкратных ошибок			
—	$x^3+x^2+x^1+x^0$	$x^4+x^2+x^1+x^0$ $x^4+x^3+x^2+x^0$	$x^5+x^3+x^1+x^0$ $x^5+x^4+x^2+x^0$ $x^5+x^2+x^1+x^0$ $x^5+x^4+x^3+x^0$
Полиномы, образующие коды с обнаружением любых ошибок $d < m$			
$x^2+x^1+x^0$	$x^3+x^2+x^1+x^0$	$x^4+x^3+x^2+x^1+x^0$	$x^5+x^4+x^3+x^2+x^1+x^0$
<i>SED</i> -полиномы			
$x^2+x^1+x^0$	$x^3+x^1+x^0$ $x^3+x^2+x^0$	$x^4+x^1+x^0$ $x^4+x^2+x^0$ $x^4+x^3+x^0$ $x^4+x^3+x^2+x^1+x^0$	$x^5+x^1+x^0$ $x^5+x^2+x^0$ $x^5+x^3+x^0$ $x^5+x^3+x^2+x^1+x^0$ $x^5+x^4+x^0$ $x^5+x^4+x^2+x^1+x^0$ $x^5+x^4+x^3+x^1+x^0$ $x^5+x^4+x^3+x^2+x^0$
<i>AED</i> -полиномы			
x^2+x^0	x^3+x^0	x^4+x^0	x^5+x^0

Наличие общих внутренних точек рабочих выходов f_3 и f_n , комбинационной схемы на рис. 1 говорит о **структурной зависимости** этих выходов, т. к. они связаны путями с выходом одного и того же логического элемента. При возникновении неисправности до общей точки H^* на этих выходах могут одновременно проявляться ошибки. Если на данных выходах исключено одновременное проявление ошибок, они называются функционально независимыми.

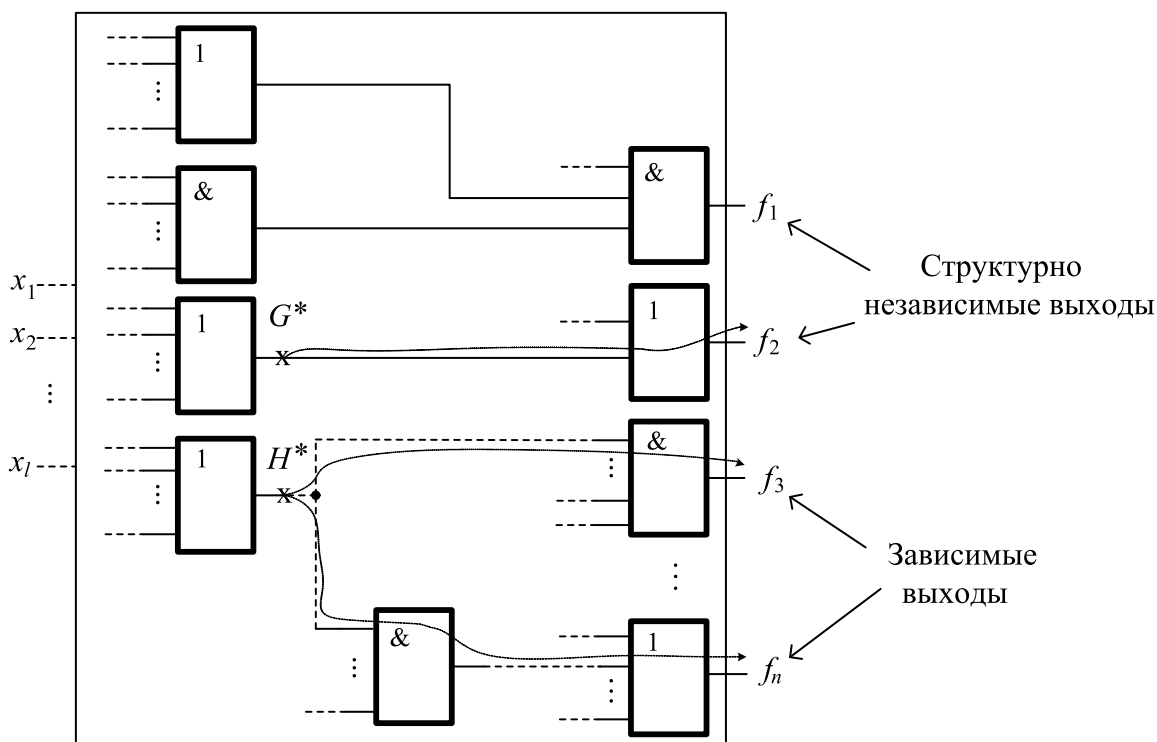


Рис. 1. Структурно независимые и зависимые выходы логической комбинационной схемы

Определение 2. Множество выходов логического устройства называется **функционально независимым**, если неисправность любого логического элемента не искажает более одного выхода группы [14–17].

Для их определения требуется выявить внутренние логические элементы, выходы которых связаны с несколькими выходами схемы, и сравнить попарно выходы на функциональную независимость по выражению [14]:

$$\frac{df_i}{dy_t} \frac{df_j}{dy_t} = 0. \quad (1)$$

где y_t – функция, реализуемая на выходе логического элемента t ; $t \in \{1; q\}$, q – количество логических элементов в структуре логического устройства.

Если все выходы диагностируемого устройства удовлетворяют условиям выражения (1), то полная идентификация ошибок на таких выходах может происходить с минимальными аппаратными затратами – при помощи кода паритета (или при помощи полиномов, формирующих коды с полным обнаружением ошибок нечетных кратностей, см. табл. 1). Но поскольку рабочие выходы реальных схем имеют зависимость от проявления ошибок различного вида и кратностей, то и использование кодов паритета в таких задачах встречается нечасто.

В этом случае предлагаются различные методы построения СФК с учетом свойств полного обнаружения ошибок определенных видов и кратностей ис-

пользуемых помехозащищенными кодами в целях полной идентификации одиночных внутренних неисправностей логических схем. Как показали исследования полиномиальных кодов со значением $k \in [2; 5]$ [12, 13] (и на основе вышеприведенной классификации), такими кодами могут полностью обнаруживаться двукратные, трехкратные, кратностью $d < m$, симметричные и асимметричные ошибки при определенных условиях построения этих кодов. Методы построения СФК на основе свойства полного обнаружения всех двукратных ошибок приведены в [15, 18]. Для полиномиальных кодов отличие заключается только в значении длины информационного вектора формируемых контролепригодных групп, которая определяется как $m \leq 2^k - 1$. В этом случае из множества выходов схемы осуществляется поиск 2-независимых групп выходов.

Определение 3. Множество выходов логической комбинационной схемы называется **2-независимой группой выходов** (Н2-группа) если неисправность любого логического элемента схемы искажает значения не более двух выходов группы [15].

Из определения 3 следует; если при наличии внутренней структурной связи любого логического элемента схемы с количеством рабочих выходов $N_{cs} \geq 3$, то на этих выходах могут проявляться ошибки кратностью больше $d=2$. Для проверки функциональной зависимости выходов на принадлежность Н2-группе достаточно выполнить относительно каждого логического элемента следующее условие [15]:

$$\frac{df_i}{dy_t} \frac{df_j}{dy_t} \frac{df_q}{dy_t} = 0. \quad (2)$$

Если выражение (2) выполняется для каждого подмножества выходов, то на множестве выходов устройства исключены проявления ошибок $d \geq 3$.

Анализируя предлагаемые в [15, 18] подходы, можно предположить, что сокращение структурной избыточности, при использовании специальных методов построения СФК на основе учета свойств кодов, полностью обнаруживающих ошибки до определенной кратности, можно достичь, используя полиномиальные коды, полностью обнаруживающие трехкратные ошибки. Так как при этом сокращается число контролепригодных групп, а, следовательно, и число контрольных схем.

Для данной задачи формируются множества 3-независимых групп выходов из числа рабочих выходов схемы.

Определение 4. Множество выходов логической комбинационной схемы $\{f_{i_1}, f_{i_2}, \dots, f_{i_q}\}$ ($q \geq 3$) называется **3-независимой группой выходов** (Н3-группа) если неисправность выхода любого логического элемента искажает не более трех выходов группы [19].

Если есть структурные связи, при которых выход логического элемента связан с тремя и менее выходами устройства $N_{cs} \leq 3$ относительно каждого логического

элемента, то на множестве выходов не могут проявляться ошибки большей кратности, чем $d=3$. При наличии $N_{сз} \geq 4$ необходимо проверять на функциональную зависимость проявления только трехкратных ошибок на выходах из общего их множества, для этого достаточно выполнить условие [19]:

$$\frac{df_i}{dy_i} \frac{df_j}{dy_j} \frac{df_r}{dy_r} \frac{df_q}{dy_q} = 0. \quad (3)$$

В выражении (3) проверяется возможность одновременного искажения значений четырех произвольных выходов множества.

Поиск и формирование НЗ-групп выходов устройства с учетом свойств полиномиальных кодов осуществляется по алгоритму, приведенному на рис. 2.

Если при анализе выходов ни одно из подмножеств выходов не образует НЗ-группу выходов, то осуществляется поиск Н2-групп выходов. В отличие от способа поиска только Н2-групп выходов и выделение их в отдельное множество выходов, при поиске НЗ-группы выходов необходим поиск также и Н2-и Н1-групп выходов. Делается это для последующего объединения идентифици-

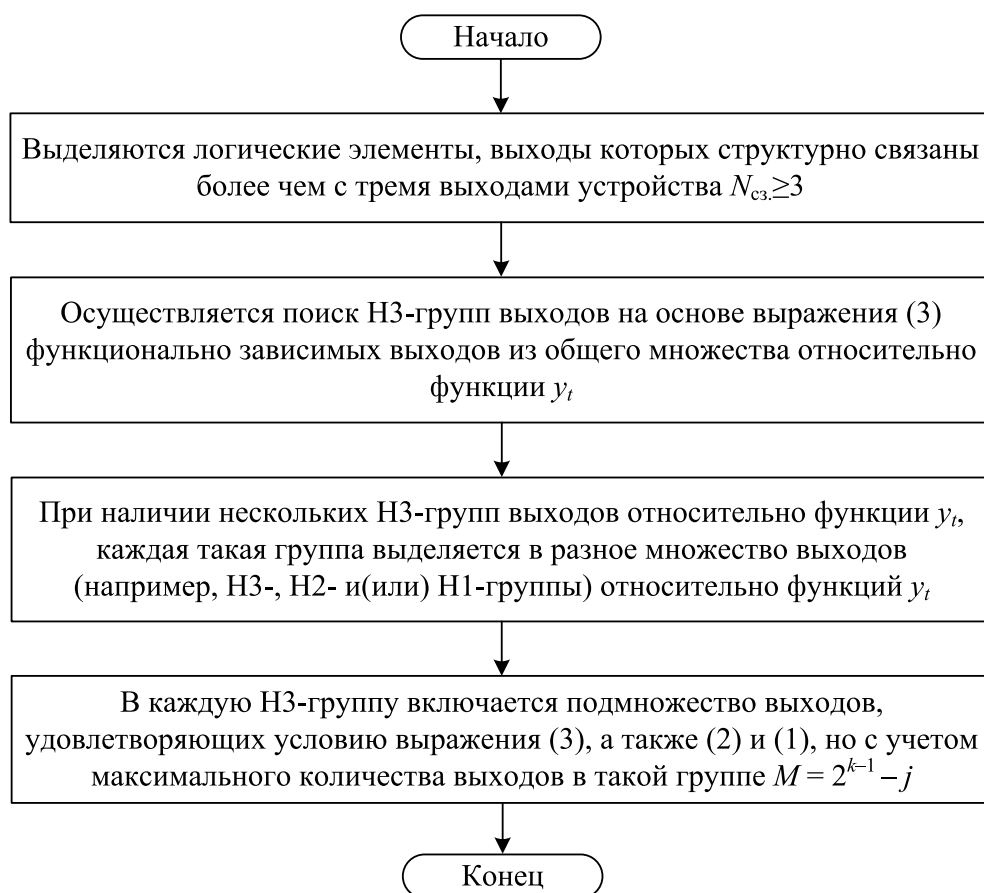


Рис. 2. Алгоритм поиска и формирование контролепригодных НЗ-групп выходов из множества

рованных НЗ-, Н2-и Н1-групп выходов относительно разных функций y или функционально независимых относительно одной функции в одну общую группу. Таким образом, уменьшается значение $\frac{k}{m}$, что напрямую влияет на структурную избыточность системы. При этом для обнаружения всех трехкратных ошибок полиномиальными кодами, необходимо, чтобы значение информационного вектора не превышало значение $m \leq 2^{k-1} - j$, где j – степень полинома вида $x^j + 1$, участвующего в разложении образующего полинома.

После определения функциональной зависимости всех выходов схемы формируются окончательные контролепригодные группы выходов, которые могут содержать и только одно наименование подгрупп, например, НЗ-или Н2-группы выходов, и несколько наименований, например, НЗ-, Н2-и Н1-группы (см. алгоритм на рис. 3). При формировании контролепригодных групп необходимо внимательно анализировать кратности возможных ошибок после объединения. Допускается объединение НЗ-, Н2-или Н1-групп выходов относительно общей функции y_i в одну контролепригодную группу, если они функционально независимы между собой, т. е. одновременное проявление ошибок на объединяемых выходах исключено, или при одновременной трансляции неисправности в их общей точке (y_i) на объединяемые выходы кратность ошибки не превышает трех.

При распределении выходов по контролепригодным группам необходимо учитывать и такой косвенный показатель, как «заполняемость» формируемой группы. При «незаполненной» группе отношение $\frac{k}{m}$ не имеет минимально возможного значения, что напрямую влияет на структурную избыточность СФК.

После формирования окончательных контролепригодных групп выходов подбирается соответствующий конкретной группе образующий полином для построения кода. Для НЗ-группы используются полиномы, формирующие коды с обнаружением всех трехкратных ошибок, а для Н2-группы – коды с обнаружением всех двукратных. Если некоторые Н1-группы выходов невозможно включить в Н2-или НЗ-группы либо все выходы диагностируемой схемы составляют Н1-группы, то для контроля этих выходов используется код паритета.

Рассмотрим пример построения СФК для комбинационной схемы (рис. 4) на выходах которой могут возникать ошибки кратностью больше трех.

Комбинационная схема на рис. 4 реализует следующие рабочие функции:

$$\begin{aligned} f_1 &= \overline{x_1 x_2 x_3} \vee x_4; & f_2 &= \overline{\overline{x_1 x_2 x_3} \vee x_4}; \\ f_3 &= \overline{x_1 x_2} \vee \overline{\overline{x_5}}; & f_4 &= \overline{\overline{x_5} \overline{x_2}}; \\ f_5 &= \overline{\overline{x_1 x_2} \vee \overline{\overline{x_5}}}; & f_6 &= \overline{\overline{\overline{x_2} \vee x_1 x_3}}; \\ f_7 &= \overline{\overline{\overline{x_2} x_1 x_3}}; & f_8 &= \overline{\overline{x_2} x_1 x_3}. \end{aligned}$$

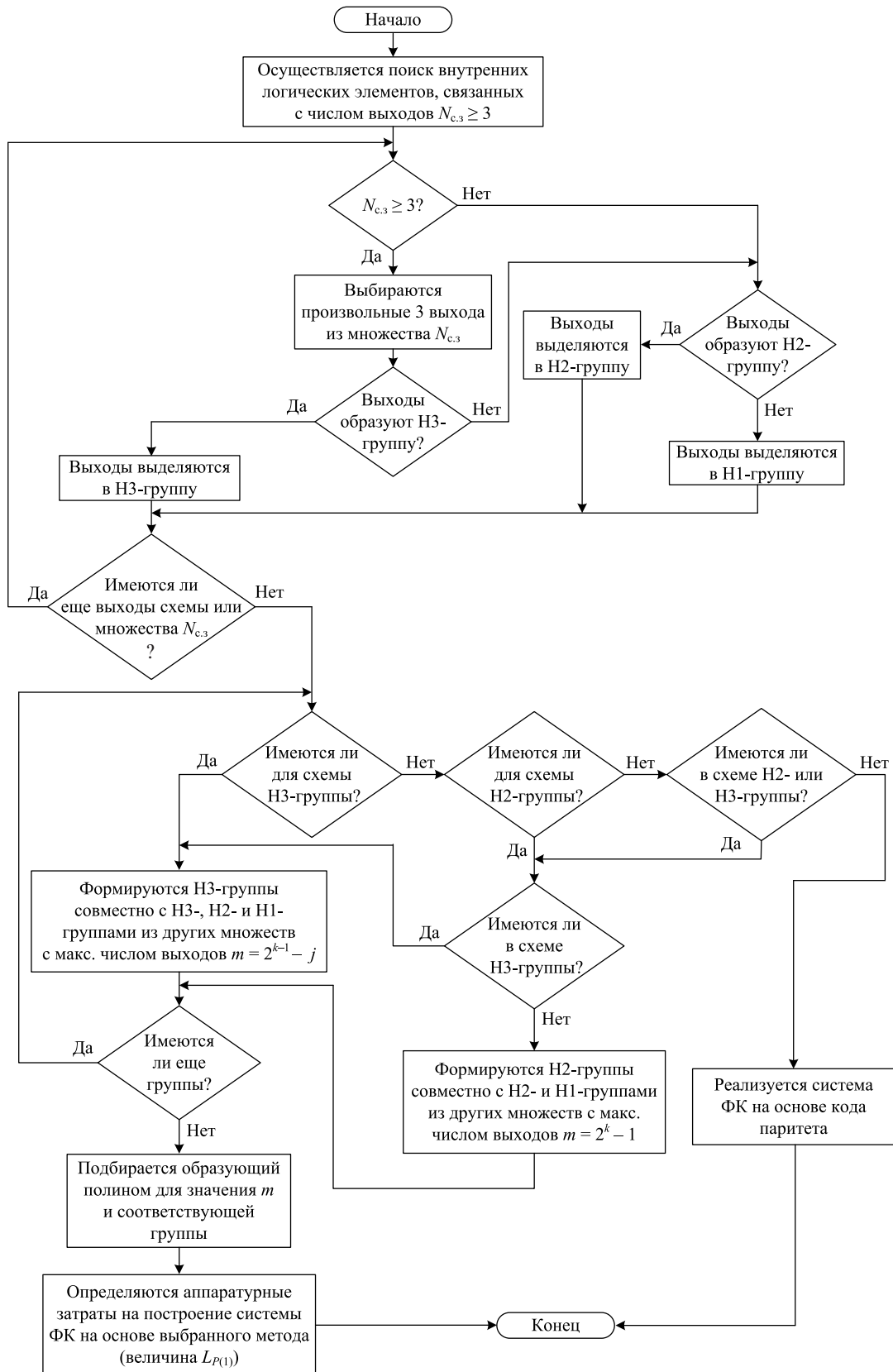


Рис. 3. Алгоритм поиска N3-, N2- и N1-независимых групп выходов схемы для построения систем функционального контроля с обнаружением всех одиночных неисправностей на основе полиномиальных кодов

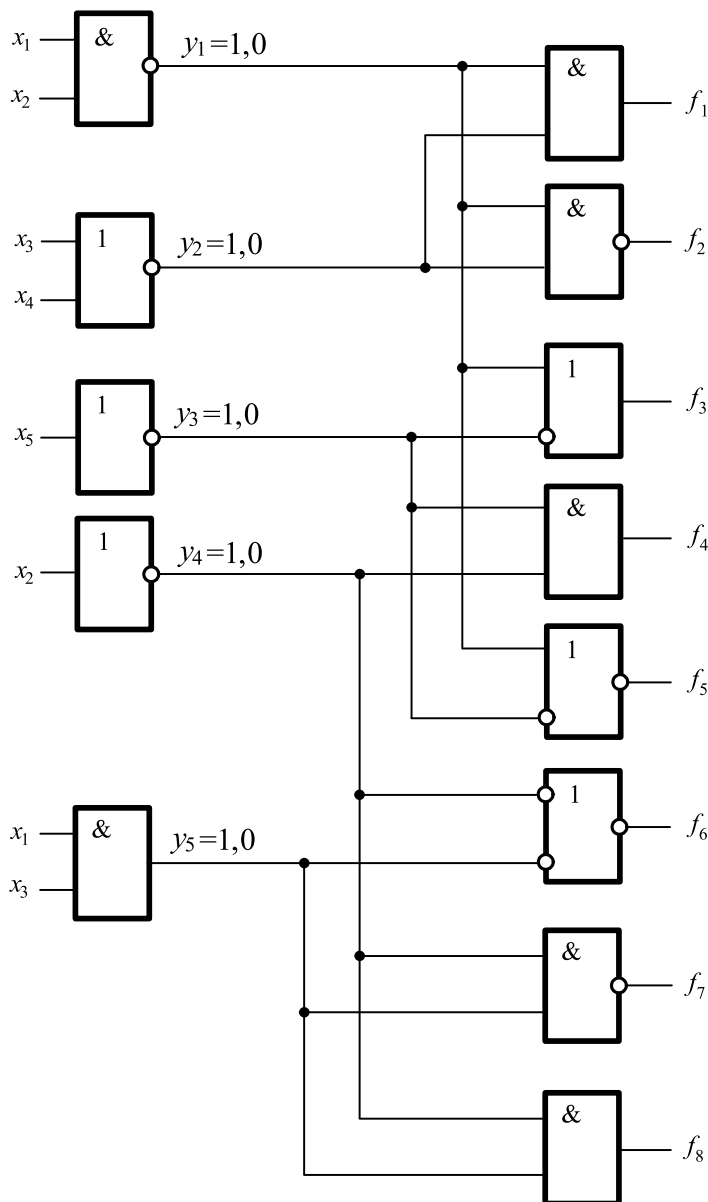


Рис. 4. Объект диагностирования

Определим условия трансляции внутренних неисправностей на все выходы диагностируемого устройства с помощью булевых производных:

$$\frac{df_1}{dy_1} = \frac{df_2}{dy_1} = \bar{x}_3 \bar{x}_4; \quad \frac{df_3}{dy_1} = \frac{df_5}{dy_1} = \bar{x}_5; \quad \frac{df_1}{dy_2} = \frac{df_2}{dy_2} = \bar{x}_1 \vee \bar{x}_2; \quad \frac{df_3}{dy_3} = \frac{df_5}{dy_3} = x_1 x_2;$$

$$\frac{df_4}{dy_3} = \bar{x}_2; \quad \frac{df_6}{dy_4} = \frac{df_7}{dy_4} = \frac{df_8}{dy_4} = x_1 x_3; \quad \frac{df_4}{dy_4} = \bar{x}_5; \quad \frac{df_6}{dy_5} = \frac{df_7}{dy_5} = \frac{df_8}{dy_5} = \bar{x}_2.$$

Определим условия всех возможных кратностей ошибок на выходах диагностируемой схемы:

$$\frac{df_1}{dy_1} \frac{df_2}{dy_1} \frac{df_3}{dy_1} \frac{df_5}{dy_1} = \bar{x}_3 \bar{x}_4 \bar{x}_3 \bar{x}_4 \bar{x}_5 \bar{x}_5 = \bar{x}_3 \bar{x}_4 \bar{x}_5 \neq 0, \quad \frac{df_1}{dy_2} \frac{df_2}{dy_2} = (\bar{x}_1 \vee \bar{x}_2)(\bar{x}_1 \vee \bar{x}_2) = \bar{x}_1 \vee \bar{x}_2 \neq 0.$$

$$\frac{df_3}{dy_3} \frac{df_4}{dy_3} \frac{df_5}{dy_3} = x_1 x_2 \bar{x}_2 x_1 x_2 = 0 \rightarrow \frac{df_3}{dy_3} \frac{df_5}{dy_3} = x_1 x_2 x_1 x_2 = x_1 x_2 \neq 0,$$

$$\frac{df_4}{dy_4} \frac{df_6}{dy_4} \frac{df_7}{dy_4} \frac{df_8}{dy_4} = \bar{x}_5 x_1 x_3 x_1 x_3 x_1 x_3 = \bar{x}_5 x_1 x_3 \neq 0, \quad \frac{df_6}{dy_5} \frac{df_7}{dy_5} \frac{df_8}{dy_5} = \bar{x}_2 \bar{x}_2 \bar{x}_2 = \bar{x}_2 \neq 0.$$

Для удобства анализа в правой части таблицы 2 приведены кратности и наименования видов ошибок, которые могут возникать на выходах диагностируемой схемы при искажении значения функций y_i . Для этого было имитировано возникновение неисправностей на выходах логических элементов 1 уровня и сняты значения выходных функций. Можно заметить, что на выходах диагностируемой схемы возникают ошибки с кратностью $d > 3$, а точнее — четырехкратные, на множествах выходов f_1, f_2, f_3, f_5 и f_4, f_6, f_7, f_8 . Для выделения из этих множеств НЗ-группы можно выбрать произвольные 3 выхода из каждого множества, т. к. $\frac{df_4}{dy_4} \frac{df_6}{dy_4} \frac{df_7}{dy_4} \frac{df_8}{dy_4} \neq 0$,

и с учетом условия выражения (3) любая комбинация из произвольных трех выходов соответствующего множества все равно не будет равна нулю.

Также заметим, что в схеме выходы f_3, f_4 и f_5 не составляют НЗ-группу при искажении функции y_3 , т. к. $\frac{df_3}{dy_3} \frac{df_4}{dy_3} \frac{df_5}{dy_3} = 0$, но при этом $\frac{df_3}{dy_3} \frac{df_5}{dy_3} \neq 0$, значит,

относительно функции y_3 выходы f_3 и f_5 составляют Н2-группу. Также они составляют Н2-группу и относительно функции y_1 , т. к. $\frac{df_3}{dy_1} \frac{df_5}{dy_1} \neq 0$. Выходы

f_1 и f_2 относительно функций y_1 и y_2 составляют еще одну Н2-группу выходов рассматриваемой схемы, что подтверждается выражениями $\frac{df_1}{dy_1} \frac{df_2}{dy_1} \neq 0$ и

$\frac{df_1}{dy_2} \frac{df_2}{dy_2} \neq 0$. На основе выделенных НЗ-и Н2-групп выходов диагностируемой

схемы предлагается объединить выходы в контролепригодные множества выходов, как представлено в таблице 3.

Как видно из таблицы 3, выходы Н2-групп участвуют и в НЗ-группах выходов в зависимости от выбранной комбинации НЗ-группы, что при некоторых объединениях исключает необходимость отдельного контроля указанных Н2-групп. Далее в таблице 3 приводятся варианты объединения выделенных групп выходов в контролепригодные множества выходов. В частности, для рассматриваемой схемы выделены только множества выходов, контролируемые

Таблица 2. Виды возможных ошибок на выходах комбинационной схемы на рис. 4 при подаче тестовых входных векторов и возникновении внутренних неисправностей на выходах логических элементов 1 уровня схемы

Тестовый входной вектор	Значение зависимых выходов при исправной схеме								Вид неисправности	Значение зависимых выходов при неисправной схеме								Кратность ошибки	Вид ошибки
	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7	f_8		f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7	f_8		
$\sim \sim \bar{x}_3 \bar{x}_4 \bar{x}_5$	0	1	0	\sim	1	\sim	\sim	\sim	$y_1=1$	1	0	\sim	0	\sim	\sim	\sim	4	Симметричные	
$\sim \sim \bar{x}_3 \bar{x}_4 \bar{x}_5$	1	0	1	\sim	0	\sim	\sim	\sim	$y_1=0$	0	1	\sim	1	\sim	\sim	\sim	4	Симметричные	
$\sim \sim \bar{x}_3 \bar{x}_4 1$	0	1	0	\sim	1	\sim	\sim	\sim	$y_1=1$	1	0	\sim	1	\sim	\sim	\sim	2	Симметричные	
$\sim \sim \bar{x}_3 \bar{x}_4 1$	1	0	1	\sim	0	\sim	\sim	\sim	$y_1=0$	0	1	\sim	0	\sim	\sim	\sim	2	Симметричные	
$\sim \sim 1 1 \bar{x}_5$	0	1	0	\sim	1	\sim	\sim	\sim	$y_1=1$	0	1	\sim	0	\sim	\sim	\sim	2	Симметричные	
$\sim \sim 1 1 \bar{x}_5$	1	0	1	\sim	0	\sim	\sim	\sim	$y_1=0$	1	0	\sim	1	\sim	\sim	\sim	2	Симметричные	
$\bar{x}_1 \sim \sim \sim \vee \sim \bar{x}_2 \sim \sim \sim$	0	1	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	$y_2=1$	1	0	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	2	Симметричные	
$\bar{x}_1 \sim \sim \sim \vee \sim \bar{x}_2 \sim \sim \sim$	1	0	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	$y_2=0$	0	1	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	2	Симметричные	
$x_1 x_2 \sim \sim \sim$	\sim	\sim	1	\sim	0	\sim	\sim	\sim	$y_3=1$	\sim	\sim	\sim	1	\sim	\sim	\sim	2	Симметричные	
$x_1 x_2 \sim \sim \sim$	\sim	\sim	0	\sim	1	\sim	\sim	\sim	$y_3=0$	\sim	\sim	\sim	0	\sim	\sim	\sim	2	Симметричные	
$\sim \bar{x}_2 \sim \sim \sim$	\sim	\sim	1	0	0	\sim	\sim	\sim	$y_3=1$	\sim	1	0	0	\sim	\sim	\sim	1	Одиочная	
$\sim \bar{x}_2 \sim \sim \sim$	\sim	\sim	1	1	0	\sim	\sim	\sim	$y_3=0$	\sim	1	0	0	\sim	\sim	\sim	1	Одиочная	
$x_1 \sim x_3 \sim \bar{x}_5$	\sim	\sim	\sim	0	\sim	0	1	0	$y_4=1$	\sim	1	\sim	1	\sim	0	1	4	Асимметричные	
$x_1 \sim x_3 \sim \bar{x}_5$	\sim	\sim	\sim	1	\sim	1	0	1	$y_4=0$	\sim	0	\sim	0	1	0	1	4	Асимметричные	
$x_1 \sim x_3 \sim 1$	\sim	\sim	\sim	0	\sim	0	1	0	$y_4=1$	\sim	0	\sim	1	0	1	3	Асимметричные		
$x_1 \sim x_3 \sim 1$	\sim	\sim	\sim	0	\sim	1	0	1	$y_4=0$	\sim	0	\sim	0	1	0	3	Асимметричные		
$0 \sim 0 \sim \bar{x}_5$	\sim	\sim	\sim	0	\sim	0	1	0	$y_4=1$	\sim	1	\sim	0	1	0	1	1	Одиочная	
$0 \sim 0 \sim \bar{x}_5$	\sim	\sim	\sim	1	\sim	0	1	0	$y_4=0$	\sim	0	\sim	0	1	0	1	1	Одиочная	
$\sim \bar{x}_2 \sim \sim \sim$	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	0	1	0	$y_5=1$	\sim	\sim	\sim	\sim	1	0	1	3	Асимметричные	
$\sim \bar{x}_2 \sim \sim \sim$	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	1	0	1	$y_5=0$	\sim	\sim	\sim	\sim	0	1	0	3	Асимметричные	

Таблица 3. Распределение зависимых выходов диагностируемой комбинационной схемы по контролепригодным множествам выходов и выбор образующего полинома для этих групп выходов

№	Наименование группы		
	Н3-группы	Н2-группы	Н1-группы
1	$f_1 f_2 f_3$	$f_1 f_2$	—
2	$f_1 f_3 f_5$	$f_3 f_5$	
3	$f_2 f_3 f_5$		
4	$f_1 f_2 f_5$		
5	$f_4 f_6 f_7$		
6	$f_4 f_7 f_8$		
7	$f_6 f_7 f_8$		
8	$f_4 f_6 f_8$		
Варианты объединений, а также разделений идентифицированных групп в контролепригодные множества выходов для заданной схемы			
№	Контролепригодное множество, контролируемое кодом с обнаружением всех трехкратных ошибок	Контролепригодное множество, контролируемое кодом с обнаружением всех двукратных ошибок	Контролепригодное множество, контролируемое кодом паритета
1 вариант	$f_1 f_2 f_3 f_4 f_6 f_7$	—	$f_5 f_8$
2 вариант	$f_1 f_2 f_3 f_6 f_7 f_8$	—	$f_4 f_5$
3 вариант	$f_2 f_3 f_5 f_6 f_7 f_8$	—	$f_1 f_4$
4 вариант	$f_1 f_3 f_5 f_6 f_7 f_8$	—	$f_2 f_4$
5 вариант	$f_1 f_2 f_3 f_4 f_7 f_8$	—	$f_5 f_6$
6 вариант	$f_1 f_3 f_5 f_4 f_7 f_8$	—	$f_2 f_6$
7 вариант	—	$f_1 f_2 f_4 f_6$ и $f_3 f_5 f_7 f_8$	—
8 вариант	—	$f_1 f_2 f_7 f_8$ и $f_3 f_5 f_4 f_6$	—
9 вариант	—	$f_1 f_3 f_4 f_6$ и $f_2 f_5 f_7 f_8$	—
10 вариант	—	$f_1 f_5 f_4 f_8$ и $f_2 f_3 f_6 f_7$ и т. д.	—
Рекомендуемые образующие полиномы при построении полиномиальных кодов с обнаружением всех одиночных неисправностей для отдельных множеств выходов			
1	$P23$	$P11$	Коды паритета
2	$P29$	$P13$	

на основе кодов и обнаруживающие любые трехкратные ошибки, и множества выходов, которые можно контролировать на основе кодов паритета.

Рассмотрим построение системы функционального контроля для диагностируемой схемы, например, по первому варианту объединения групп.

Информационный вектор для первых шести вариантов объединений имеет значение $m=6$. Образующими полиномами, которые формируют коды с обна-

ружением всех трехкратных ошибок и с наименьшим значением k являются полиномы $P23$ и $P29$. Соответственно, функции генератора кода, например, при использовании полинома $P23$, будут иметь следующий вид и принцип построения таких генераторов приводится в работе [12, 13]:

$$g_1 = f_1 \oplus f_3 \oplus f_4; \quad g_2 = f_1 \oplus f_2 \oplus f_3 \oplus f_6; \quad g_3 = f_1 \oplus f_2 \oplus f_7; \quad g_4 = f_2 \oplus f_3.$$

Для контроля выходов f_5 и f_8 будем использовать код паритета, т. к. на этих выходах структурно исключено одновременное проявление ошибок при внутренней одиночной неисправности.

Обозначим для удобства разряд контрольного вектора кода паритета как g_5 , тогда:

$$g_5 = f_5 \oplus f_8.$$

Контрольный вектор в этом примере реализуется двумя генераторами кода, следовательно, для удобства его сравнения с вектором блока контрольной логики $G(x)$ обозначим его узлы отдельно – как $G_1(x)$ и $G_2(x)$.

Система функционального контроля на основе выделения НЗ-и Н1-групп контролепригодных выходов для полиномиальных кодов и полным обнаружением всех ошибок на выходах при внутренних одиночных неисправностях рассматриваемой комбинационной схемы приведена на рис. 5.

В таблице 3 также дано выделение (разделение НЗ-групп) Н2-групп выходов и последующее их объединение в контролепригодные множества выходов (варианты 7–10). Для рассмотренной комбинационной схемы принципы построения системы контроля на основе кодов с обнаружением всех двукратных ошибок при таком группировании отдельных выходов не отличаются от принципов построения системы с выделением Н2-групп выходов, приведенной в [15].

Рассмотренный пример показывает основные особенности построения систем функционального контроля на основе выделения НЗ-групп выходов и использования полиномиальных кодов с обнаружением любых трехкратных ошибок. Такой метод построения даже визуально обладает преимуществом по сравнению с методом построения на основе выделения Н2-групп выходов. К примеру, при использовании метода построения на основе выделения Н2-групп выходов для реализации СФК рассматриваемой схемы число контролепригодных групп равно 2, в каждой из них по 4 выхода. Для контроля таких групп потребовалось бы использование полиномов $P11$ или $P13$, формирующих по 3 контрольных разряда, с общим числом контрольных разрядов равным 6. Далее нужно было бы использовать 2 компаратора с 6 парафазными входами против предлагаемого 1 с 8 входами. Также использовались бы 2 контрольные схемы с 3 выходами против 1 с 4 и 1 с 1 выходом.

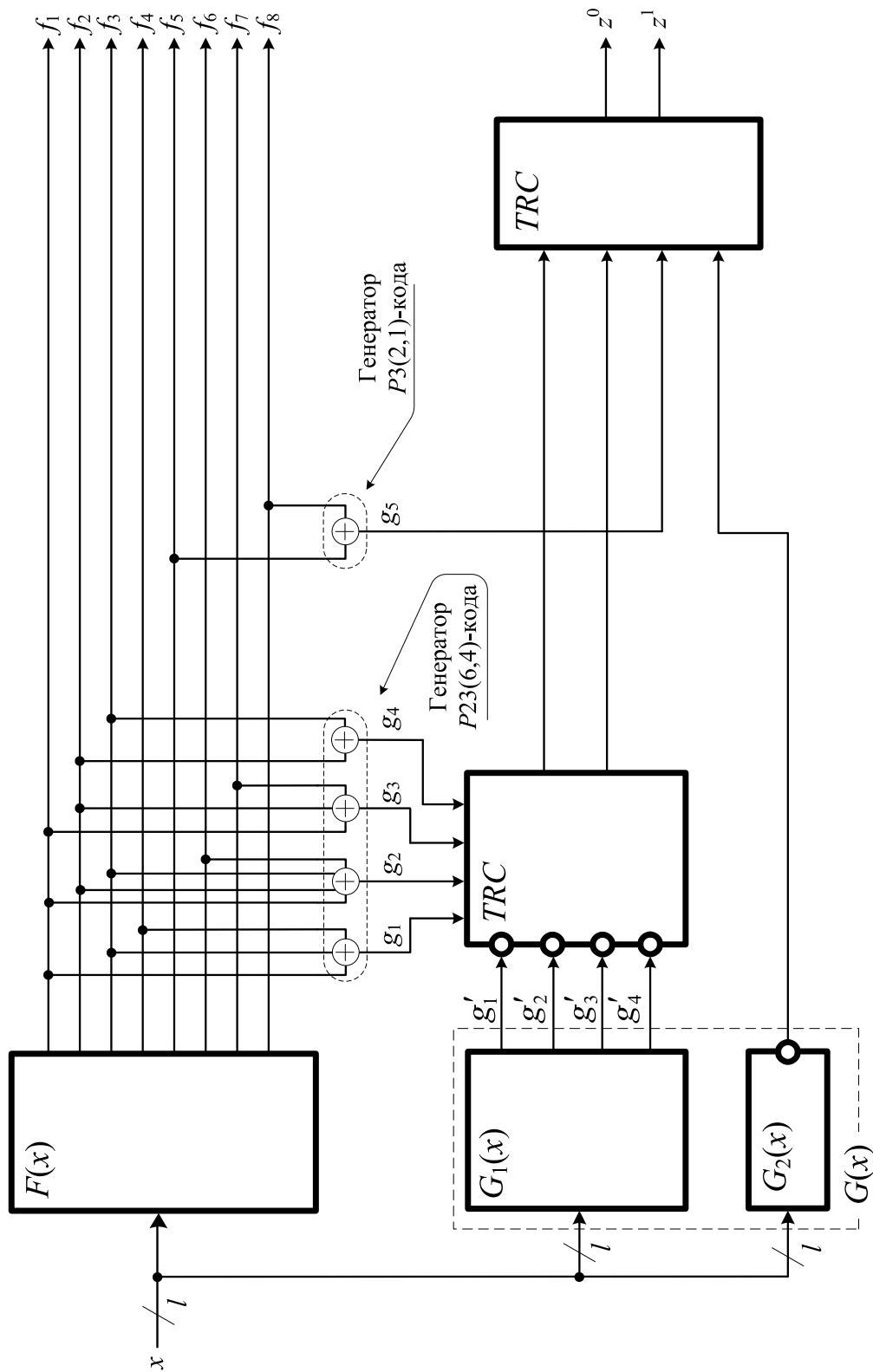


Рис. 5. Система функционального контроля с обнаружением всех одиночных неисправностей рассматриваемой дискретной схемы на основе группирования функционально зависимых выходов с проявлением ошибок $d \leq 3$

3. Метод синтеза СФК логических устройств на основе полиномиальных кодов с полным обнаружением ошибок определенного вида

Виды ошибок на выходах логических устройств могут быть разными. Например, на выходах рассмотренной выше схемы возникают симметричные, асимметричные и одиночные ошибки. Обнаружение одиночных ошибок может осуществляться любыми полиномиальными кодами, обнаруживающими ошибки. Задача полной идентификации симметричных и асимметричных ошибок решается с помощью *SED*- и *AED*-полиномов, приведенных в таблице 1. В случае возникновения при других схемах ошибок монотонного вида полную идентификацию последних следует осуществлять с помощью классических кодов Бергера или предложенным выше способом построения СФК.

Таким образом, подбирая специальные образующие полиномы или коды для отдельных групп выходов диагностируемых схем, можно полностью идентифицировать любые одиночные неисправности устройств.

По виду возникающих ошибок выходы комбинационных схем принято подразделять на группы [21–23].

Определение 5. Выходы логической комбинационной схемы называются *монотонно зависимыми* (МЗ-группа), если на них помимо ошибок другого вида проявляются также и монотонные ошибки.

Определение 6. Выходы логической комбинационной схемы называются *симметрично зависимыми* (СЗ-группа), если на них помимо ошибок другого вида также проявляются и симметричные ошибки.

Определение 7. Выходы логической комбинационной схемы называются *асимметрично зависимыми* (АЗ-группа), если на них помимо ошибок другого вида также проявляются и асимметричные ошибки.

Определение 8. Выходы логической комбинационной схемы называются *монотонно независимыми* (МН-группа), если на них проявляются только монотонные ошибки.

Определение 9. Выходы логической комбинационной схемы называются *симметрично независимыми* (СН-группа), если на них проявляются только симметричные ошибки.

Определение 10. Выходы логической комбинационной схемы называются *асимметрично независимыми* (АН-группа), если на них проявляются только асимметричные ошибки.

Из перечисленных видов выходов с различной функциональной зависимостью и на основе приведенной выше классификации образующих полиномов можно сделать вывод: при использовании определенных полиномов для группы выходов с определенной функциональной зависимостью можно достичь полного обнаружения ошибок на большинстве выделенных выше группах выходов.

Из [9] известно условие определения возникновения монотонных ошибок на двух структурно зависимых выходах:

$$\frac{df_i}{dy_t} \cdot \frac{df_j}{dy_t} (f_i \oplus f_j) = 0, \quad (4)$$

где f_i и f_j – два структурно зависимых выхода комбинационной схемы.

Левый множитель выражения (4) определяет те входные наборы, при которых происходит трансляция внутренней неисправности в точке y_t на рабочие выходы f_i и f_j . Правый множитель – это проверка вида ошибки, т. е. при исправной схеме и равных значениях выходов результат сложения по модулю 2 будет равным нулю, что приравнивает к нулю соответственно результат умножения левого и правого множителей выражения (4). Иначе говоря, если при исправной схеме логический сигнал в точке y_t транслируется на оба рабочих выхода при подаче тестового входного набора и значения этих выходов получаются одинаковыми, то при внутренней неисправности в рассматриваемой точке искаженный сигнал также будет транслироваться на данные выходы, одновременно изменяя значения разрядов обоих выходов, что говорит о проявлении монотонной ошибки.

Попарно сравнивая все выходы схемы, можно идентифицировать все выходы, на которых могут проявляться монотонные ошибки.

Для определения возможности проявления симметричных ошибок на выходах используют выражение [21]:

$$F^d F^\sigma \neq 0, \quad (5)$$

где $F^d = \frac{df_{i_1}}{dy_t} \frac{df_{i_2}}{dy_t} \dots \frac{df_{i_d}}{dy_t}$ – функция, определяющая искажение кратностью d ;

$F^\sigma = \bigvee_{f_{i_1} f_{i_2} \dots f_{i_d} \in C_d^{d/2}} f_{i_1} f_{i_2} \dots f_{i_d}$ – функция, позволяющая выявить, является ли

ошибка кратностью d симметричной; $f_{i_1} f_{i_2} \dots f_{i_d}$ – конъюнкция значений выходных функций длиной d ; $C_d^{d/2}$ – множество кодовых векторов весом $d/2$ и длиной d .

Для определения возможности проявления только симметричных ошибок на выходах используют выражение [21]:

$$F^d F^\sigma = 0, \quad (6)$$

для идентификации асимметрично зависимой группы выходов пользуются выражением:

$$F^d F^\alpha \neq 0, \quad (7)$$

а также асимметрично независимой группы:

$$F^d F^\alpha = 0, \quad (8)$$

где $F^\alpha = \bigvee_{f_1, f_2, \dots, f_d \in C_d^d} f_1 f_2 \cdot \dots \cdot f_d$ – функция, позволяющая определить, является ли ошибка кратностью d асимметричной; $d^* \in \{1, 2, \dots, d-1\} \setminus \left\{ \frac{d}{2} \right\}$ – если d

четное, и $d^* \in \{1, 2, \dots, d-1\}$ – если d нечетное.

На основе вышеприведенных выражений можно определить функциональную зависимость рабочих выходов логической схемы от проявления того или иного вида ошибок. Посредством этих выражений и имитирования внутренних неисправностей на выходах логических элементов первого уровня рассматриваемой схемы в правой части таблицы 2 приведены наименования видов ошибок, которые могут возникать на выходах диагностируемой схемы при искажении значения функций y_i .

В соответствии с предлагаемым в данном разделе методом осуществим распределение выходов диагностируемой схемы по группам на основе вида проявляющейся в них ошибки. Для схемы существует три вида групп (см. таблицу 4): асимметрично независимая, асимметрично зависимая и симметрично независимая группы выходов.

Для уменьшения количества групп можно включить асимметрично независимую группу выходов в асимметрично зависимую, т. к. включаемые выходы в последней группе участвуют. Такая операция воспроизводит одиночные ошибки в асимметрично зависимой группе, но при использовании для нее любого AED -полинома обнаружение подобных ошибок полиномиальными кодами осуществимо.

Подберем соответствующие полиномы для построения полиномиального кода каждой из групп с условием полного обнаружения всех ошибок на выходах

Таблица 4. Распределение зависимых выходов комбинационной схемы по группам и выбор образующего полинома для построения полиномиального кода

№	Наименование группы		
	Симметрично независимая	Асимметрично независимая	Асимметрично зависимая
1	$f_1 f_2$	$f_6 f_7 f_8$	$f_4 f_6 f_7 f_8$
2	$f_3 f_5$	–	–
3	$f_1 f_2 f_3 f_5$	–	–
Рекомендуемые образующие полиномы при построении полиномиальных кодов с условием $k < m$ и полным обнаружением одиночных неисправностей для отдельных групп выходов			
1	$P11$	$P5$	$P9$
2	$P13$		

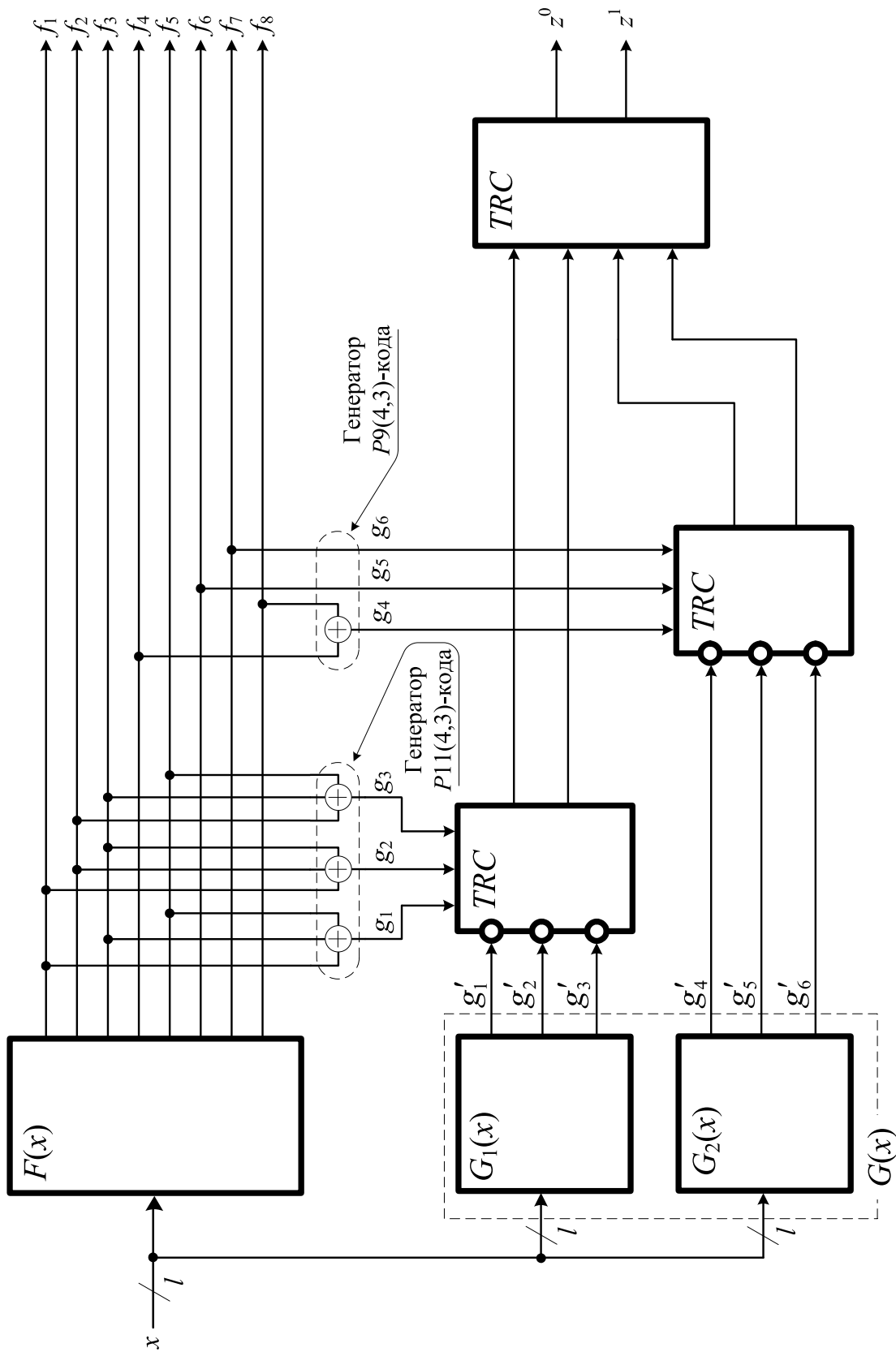


Рис. 6. Система функционального контроля с обнаружением всех одиночных неисправностей рассматриваемой дискретной схемы на основе группирования функционально зависящих выходов с проявлением определенного вида ошибок

группы, при этом максимально уменьшая значение k (см. таблицу 4). Для обеих групп подходят к использованию соответствующие SED - и AED -полиномы: $P11$ или $P13$ и $P9$.

Функции описаний генераторов кода при полиномах $P9$ и, например, $P11$, будут иметь следующий вид:

- для генератора с $P11$ – $g_1 = f_1 \oplus f_3 \oplus f_5$; $g_2 = f_1 \oplus f_2 \oplus f_3$; $g_3 = f_2 \oplus f_3 \oplus f_5$
- для генератора с $P9$ – $g_4 = f_4 \oplus f_8$; $g_5 = f_6$; $g_6 = f_7$.

В этом примере для удобства в последовательности наименований контрольные разряды, вырабатываемые генератором кода с $P9$, обозначены как $g_1 - g_4$, $g_2 - g_5$, $g_3 - g_6$. Следует заметить, что по количеству вычисляемых разрядов генераторы кода с $P9$ имеют низкие аппаратные затраты (используется малое количество логических вычислений) по сравнению с генератором кода на основе $P11$. В экспериментальных исследованиях [24] подтверждается такое заключение при разных значениях m .

В схеме сравнения TRC для данного примера будет использоваться «последовательное» сжатие парафазных сигналов.

Таким образом, система функционального контроля, построенная по методу выделения групп выходов с проявлением определенного вида ошибок для рассматриваемой комбинационной схемы, будет иметь вид, как на рис. 6.

Система функционального контроля, построенная по такому методу, будет обнаруживать любые одиночные неисправности исследуемой комбинационной схемы, а также блока дополнительной логики $G(x)$. Схемы тестеров являются самопроверяемыми. При сравнении полученной структуры СФК со структурой на основе метода дублирования видно, что при втором способе построения необходимо было бы использовать контрольную схему аналогичной контролируемой с восемью выходами против двух по три выхода в каждой, а также два компаратора с восемью парафазными входами против двух с шестью входами.

Заключение

В работе рассмотрены методы построения СФК на основе выделения специальных групп рабочих выходов логических комбинационных схем и их контроль с помощью полиномиальных кодов. Если построение СФК с полной идентификацией любых одиночных неисправностей не удастся с помощью простого подбора образующего полинома для построения кода в основе системы контроля, рекомендуется использовать рассмотренные в работе методы построения СФК. В этом случае хотелось бы выделить некоторые особенности использования таких методов построения на основе полиномиальных кодов: предложенный в литературе метод выделения $H2$ -групп выходов диагностируемых схем требует

использования большего числа контрольных групп по сравнению с методом выделения НЗ-групп выходов; наличие большего числа образующих полиномов, формирующих одинаковое число контрольных разрядов, способствует построению кодов с полной идентификацией ошибок разных видов, при этом с одинаковым значением k , что несущественно для большинства кодов; для реализации подгруппы схемы контроля на основе полиномиальных кодов для асимметрично независимых и асимметрично зависимых выходов требуется меньше аппаратных затрат, чем при контроле симметрично независимых и симметрично зависимых групп выходов. Учет этих особенностей позволяет строить СФК на основе полиномиальных кодов с правом выбора образующего полинома при заданном значении длины контрольного вектора, а также систем с уменьшенными аппаратными затратами.

Таким образом, использование полиномиальных кодов в основе СФК логических комбинационных схем позволяет строить системы диагностирования минимум тремя способами и производить отбор варианта системы с наименьшими аппаратными затратами при условии полной идентификации ошибок на выходах диагностируемых схем.

Библиографический список

1. E. Fujiwara. "Code Design for Dependable Systems: Theory and Practical Applications", John Wiley & Sons, 2006. – 720 p.
2. P. K. Lala. "Principles of Modern Digital Design". New-Jersey: John Wiley & Sons, 2007. – 436 p.
3. 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.
4. Z. Navabi. "Digital System Test and Testable Design: Using HDL Models and Architectures", Springer Science+Business Media, LLC 2011. – 435 p.
5. V. Sapozhnikov, Vl. Sapozhnikov, D. Efanov, and A. Blyudov "Analysis of Error-Detection Possibilities of CED Circuits Based on Hamming and Berger Codes", Proceedings of 11th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2013), Rostov-on-Don, Russia, September 27–30, 2013. – Pp. 200–207. DOI: 10.1109/EWDTS.2013.6673097.
6. J. M. Berger. "A Note on Error Detection Codes for Asymmetric Channels", Information and Control, 1961. – Vol. 4. – Issue 1. – Pp. 68–73. DOI: 10.1016/S0019-9958(61)80037-5.
7. R. W. Hamming. "Error Detecting and Correcting Codes", Bell System Technical Journal. – 1950. – Vol. 29. – Issue 2. – Pp. 147–160.
8. F. Y. Busaba, and P. K. Lala. "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.
9. A. Morozov, V. V. Sapozhnikov, Vl. V. Sapozhnikov, and M. Goessel. "Self-Checking Combinational Circuits with Unidirectionally Independent Outputs", VLSI Design, 1998. – Vol. 5. – Issue 4. – Pp. 333–345. DOI: 10.1155/1998/20389.

10. Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В. Классификация ошибок в информационных векторах систематических кодов // Известия вузов. Приборостроение. – 2015. – Т. 58. – № 5. – С. 333–343. DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-5-333-343.
11. W. W. Peterson. “Error Correcting Codes”, MT Press, Cambridge, L’ass, 1961.
12. D. Efanov, D. Plotnikov, V. Sapozhnikov, Vl. Sapozhnikov, and R. Abdullaev. “Experimental Studies of Polynomial Codes in Concurrent Error Detection Systems of Combinational Logical Circuits”, Proceedings of 16th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS’2018), Kazan, Russia, September 14–17, 2018. – Pp. 184–190. DOI: 10.1109/EWDTS.2018.8524684.
13. R. B. Abdullaev, D. V. Efanov, V. V. Sapozhnikov, and Vl. V. Sapozhnikov. “Polynomial Code with Detecting the Symmetric and Asymmetric Errors in the Data Vectors”, Proceedings of 17th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS’2019), Batumi, Georgia, September 13–16, 2019. – Pp. 157–161. DOI: 10.1109/EWDTS.2019.8884451.
14. E. S. Sogomonyan, and M. Gössel. “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.
15. Сапожников В. В. Коды Хэмминга в системах функционального контроля логических устройств: монография / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов. – СПб.: Наука, 2018. – 151 с.
16. Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В. Коды с суммированием для систем технического диагностирования. Т. 1: Классические коды Бергера и их модификации. – М.: Наука, 2020. – 383 с.
17. Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В. Коды с суммированием для систем технического диагностирования. Т. 2: Взвешенные коды с суммированием. – М.: Наука, 2021. – 456 с.
18. Ефанов Д. В., Сапожников В. В., Сапожников Вл. В. Синтез самопроверяемых комбинационных устройств на основе выделения специальных групп выходов // Автоматика и телемеханика. – 2018. – № 9. – С. 79–94.
19. Ефанов Д. В., Сапожников В. В., Сапожников Вл. В. Модифицированные коды с суммированием взвешенных переходов в системах функционального контроля комбинационных схем // Труды Института системного программирования РАН. – 2017. – Т. 29. – № 5. – С. 39–60. DOI: 10.15514/ISPRAS-2017-29(5)-3.
20. Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В. Коды с суммированием с обнаружением любых симметричных ошибок // Электронное моделирование. – 2017. – Т. 39. – № 3. – С. 47–60.
21. Ефанов Д. В. Синтез самопроверяемых комбинационных устройств на основе кодов с эффективным обнаружением симметричных ошибок // Труды СПИИРАН. – 2018. – Т. 59. – № 4. – С. 62–91.
22. Efanov D. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. 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. – Issue 4. – Pp. 279–290. – DOI: 10.3103/S0146411620040045.
23. Sapozhnikov V., Sapozhnikov Vl., Efanov D. Search Algorithm for Fully Tested Elements in Combinational Circuits, Controlled on the Basis of Berger Codes // Proceedings of 15th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS’2017), Novi Sad, Serbia, September 29 – October 2, 2017. – Pp. 99–108. DOI: 10.1109/EWDTS.2017.8110085.
24. Абдуллаев Р. Б. Полиномиальные коды с обнаружением любых симметричных и асимметричных ошибок в информационных векторах // Наука и техника транспорта. – 2020. – Вып. 1. – С. 80–92.

Abdullaev R. B.

Department of Automation and Remote Control,
Tashkent State Transport University, Tashkent

**SYNTHESIS OF FULLY SELF-CHECKED SCHEMES BUILT-IN
CONTROL BASED ON POLYNOMIAL CODES FOR COMBINATION
LOGIC DEVICES**

The article examines the methods of production of functional control systems for logic combinational circuits with full detection of any single faults using the error detection properties of polynomial codes. A classification of special generators of polynomials that form codes with a small value of the control vector length and complete identification of errors of a certain type or multiplicity is presented. A method is presented for constructing a functional control system with complete identification of single faults based on the complete detection of triple errors by polynomial codes. Algorithms for the search and formation of controllable H1-, H2- and H3-groups of circuit outputs, taking into account the properties of polynomial codes, have been developed. The types of functional dependence of the operating outputs for combinational circuits are listed, in which errors of various types can occur. Based on the detection of any symmetric and asymmetric errors by polynomial codes, a method is presented for the construction of functional control systems with full identification of these type of errors. For an approximate scheme, the development of a functional control system based on the proposed methods is given as:-

Working diagnostics, failure of logic circuits, the multiplicity of the error, type of error, polynomial codes, classification of generators of polynomials

DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-3-452-476

References

1. *Fujiwara E.* (2006) Code Design for Dependable Systems: Theory and Practical Applications. New-Jersey: John Wiley & Sons, 720 p.
2. *Lala P. K.* (2007) Principles of Modern Digital Design. New-Jersey: John Wiley & Sons, 436 p.
3. *Ubar R., Raik J., Vierhaus H.-T.* (2011) Design and Test Technology for Dependable Systems-on-Chip (Premier Reference Source). Information Science Reference, Hershey. New York, IGI Global, 578 p.
4. *Navabi Z.* (2011) Digital System Test and Testable Design: Using HDL Models and Architectures. Springer Science+Business Media, LLC, 435 p.
5. *Sapozhnikov V., Sapozhnikov Vl., Efanov D., Blyudov A.* (2013) Analysis of Error-Detection Possibilities of CED Circuits Based on Hamming and Berger Codes. *Proceedings of 11th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2013)*, Rostov-on-Don, Russia, September 27–30, pp. 200–207. DOI: 10.1109/EWDTS.2013.6673097.
6. *Berger J. M.* (1961) A Note on Error Detection Codes for Asymmetric Channels, *Information and Control*, vol. 4., iss. 1, pp. 68–73. DOI: 10.1016/S0019-9958(61)80037-5.
7. *Hamming R. W.* (1950) Error Detecting and Correcting Codes. *Bell System Technical Journal*, vol. 29, iss. 2, pp. 147–160.
8. *Busaba F. Y., Lala P. K.* (1994) Self-Checking Combinational Circuit Design for Single and Unidirectional Multibit Errors. *Journal of Electronic Testing: Theory and Applications*, vol. 5, iss. 1, pp. 19–28. DOI: 10.1007/BF00971960.

9. Morozov A., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V., Goessel M. (1998) Self-Checking Combinational Circuits with Unidirectionally Independent Outputs. *VLSI Design*, vol. 5, iss. 4, pp. 333–345. DOI: 10.1155/1998/20389.
10. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V., Efanov D. V. (2015) Klassifikatsiya oshibok v informatsionnykh vektorakh sistematicheskikh kodov [Classification of errors in information vectors of systematic codes]. *Izvestiya vuzov. Priborostroyeniye [News of Higher Educational Institutions. Instrumentation]*, vol. 58, no. 5, pp. 333–343. DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-5-333-343. (In Russian)
11. Peterson W. W. (1961) Error Correcting Codes. MT Press, Cambridge, L'ass.
12. Efanov D., Plotnikov D., Sapozhnikov V., Sapozhnikov Vl., Abdullaev R. (2018) Experimental Studies of Polynomial Codes in Concurrent Error Detection Systems of Combinational Logical Circuits. *Proceedings of 16th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2018)*, Kazan, Russia, September 14–17, pp. 184–190. DOI: 10.1109/EWDTS.2018.8524684.
13. Abdullaev R. B., Efanov D. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V. (2019) Polynomial Code with Detecting the Symmetric and Asymmetric Errors in the Data Vectors. *Proceedings of 17th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2019)*, Batumi, Georgia, September 13–16, pp. 157–161. DOI: 10.1109/EWDTS.2019.8884451.
14. Sogomonyan E. S., Goessel M. (1993) Design of Self-Testing and On-Line Fault Detection Combinational Circuits with Weakly Independent Outputs. *Journal of Electronic Testing: Theory and Applications*, vol. 4, iss. 4, pp. 267–281. DOI: 10.1007/BF00971975.
15. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V., Efanov D. V. (2018) Kody Khemminga v sistemakh funktsional'nogo kontrolya logicheskikh ustroystv [Hamming codes in functional control systems of logical devices]. Saint Petersburg, Nauka Publ., 151 p. (In Russian)
16. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V., Efanov D. V. (2020) Kody s summirovaniyem dlya sistem tekhnicheskogo diagnostirovaniya. Tom 1: Klassicheskiye kody Bergera i ikh modifikatsii [Summed codes for technical diagnostic systems. Vol. 1: Classic Berger codes and their modifications]. Moscow, Nauka Publ., 383 p. (In Russian)
17. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V., Efanov D. V. (2021) Kody s summirovaniyem dlya sistem tekhnicheskogo diagnostirovaniya. Tom 2: Vzveshennyye kody s summirovaniyem [Summed codes for technical diagnostic systems. Vol. 2: Weighted codes with summation]. Moscow, Nauka Publ., 455 p. (In Russian)
18. Efanov D. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V. (2018) Sintez samoproveryayemykh kombinatsionnykh ustroystv na osnove vydeleniya spetsial'nykh grupp vykhodov [Synthesis of self-checking combinational devices based on the allocation of special groups of outputs]. *Avtomatika i telemekhanika [Automation and Remote Control]*, no. 9, pp. 79–94. (In Russian)
19. Efanov D. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V. (2017) Modifitsirovannyye kody s summirovaniyem vzveshennykh perekhodov v sistemakh funktsional'nogo kontrolya kombinatsionnykh skhem [Modified codes with summation of weighted transitions in functional control systems of combinational circuits]. *Trudy Instituta sistemnogo programmirovaniya RAN [Proceedings of the Institute for System Programming of the Russian Academy of Sciences]*, vol. 29, no. 3, pp. 39–60. DOI: 10.15514/ISPRAS-2017-29(5)-3. (In Russian)
20. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V., Efanov D. V. (2017) Kody s summirovaniyem s obnaruzheniyem lyubykh simmetrichnykh oshibok [Summed codes with any symmetric error detection]. *Elektronnoye modelirovaniye [Electronic modeling]*, vol. 39, no. 3, pp. 47–60. (In Russian)
21. Efanov D. V. (2018) Sintez samoproveryayemykh kombinatsionnykh ustroystv na osnove kodov s effektivnym obnaruzheniyem simmetrichnykh oshibok [The synthesis of self-checking com-

- binational devices on the basis of codes with the effective symmetrical error detection]. *Trudy SPIIRAN [SPIIRAS Proceedings]*, vol. 59, no. 4, pp. 62–91. (In Russian)
22. Efanov D. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V. (2020) 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*, vol. 54, iss. 4, pp. 279–290. DOI: 10.3103/S0146411620040045.
 23. Sapozhnikov V., Sapozhnikov Vl., Efanov D. (2017) Search Algorithm for Fully Tested Elements in Combinational Circuits, Controlled on the Basis of Berger Codes. *Proceedings of 15th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2017)*, Novi Sad, Serbia, September 29 – October 2. Pp. 99–108. DOI: 10.1109/EWDTS.2017.8110085.
 24. Abdullaev R. B. (2020) Polinomial'nyye kody s obnaruzheniyem lyubykh simmetrichnykh i asimmetrichnykh oshibok v informatsionnykh vektorakh [Polynomial codes with detection of any symmetric and asymmetric errors in information vectors]. *Nauka i tekhnika transporta [Science and Technology in Transport]*, iss.1, pp. 80–92. (In Russian)

*Статья представлена к публикации членом редколлегии,
доцентом Д. В. Ефановым
Поступила в редакцию 18.02.2021, принята к публикации 11.03.2021*

АБДУЛЛАЕВ Руслан Борисович – ассистент кафедры «Автоматика и телемеханика» Ташкентского государственного транспортного университета
ruslan_0507@mail.ru

© Абдуллаев Р. Б., 2021