

Проектирование и тестирование логических устройств

УДК 681.518.5:004.052.32

Вал. В. Сапожников, д-р техн. наук,

Вл. В. Сапожников, д-р техн. наук,

Д. В. Ефанов, канд. техн. наук

Кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах»,
Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I

ОБНАРУЖЕНИЕ ОПАСНЫХ ОШИБОК НА РАБОЧИХ ВЫХОДАХ КОМБИНАЦИОННЫХ ЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ

В статье рассматривается задача анализа ошибок на рабочих выходах систем функционального контроля комбинационных логических схем, построенных по методу вычисления контрольных разрядов. В качестве основы систем функционального контроля, построенных по такому способу, используются разделимые помехоустойчивые коды. В работе дается расширенная классификация ошибок на рабочих выходах систем функционального контроля. Приводятся понятия защитных и опасных ошибок в информационных векторах кодовых слов. Представлены формулы расчета числа защитных и опасных ошибок в информационных векторах произвольных разделимых кодов, а также показатели обнаружения защитных и опасных ошибок в информационных векторах. Показаны примеры кодов с указанием их особенностей по обнаружению защитных и опасных ошибок в информационных векторах.

система функционального контроля; рабочие выходы; разделимые коды; информационные векторы; ошибки в информационных векторах; классификация ошибок; защитная ошибка; опасная ошибка; обнаружение опасных ошибок

Введение

Современные системы автоматического управления и контроля строятся на базе микроэлектронной и микропроцессорной техники, включающей в себя как комбинационные, так и многотактные схемы. С течением времени надежность систем снижается и неизбежно наступает отказ – событие, связанное с нарушением работоспособности технического объекта [1]. Отказы могут быть устойчивыми, кратковременными, иметь различную физическую природу и про-

явления. Например, отказ в устройствах железнодорожной автоматики и телемеханики может не повлиять на технологический процесс перевозок, или повлечь за собой снижение пропускной способности линии, или же, в худшем случае, создать условия для развития аварии или катастрофы [2–4].

При проектировании и конструировании систем автоматического управления и контроля большое внимание уделяется обеспечению свойств их отказоустойчивости и контролепригодности [5]. Это достигается с помощью методов и средств технического диагностирования как на этапе проектирования, так и во время эксплуатации: тестирование аппаратных и программных средств, контроль выполняемых функций, прогнозирование технического состояния и т. д. [6–9].

Одним из значимых способов технического диагностирования логических устройств является организация систем их функционального контроля. При таком подходе контроль неисправностей в структуре логического устройства осуществляется в их рабочих режимах без отключения от объектов управления [10, 11].

На рис. 1 изображена структурная схема системы функционального контроля, построенная по методу вычисления контрольных разрядов [12–15]. В ней контролируемым устройством является блок $F(x)$ (блок основной логики), вычисляющий значения системы булевых функций $f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)$. С целью контроля неисправностей в структуре блока основной логики он снабжается контрольными схемами, включающими в себя блок контрольной логики и самопроверяемый тестер. Блок контрольной логики (на рис. 1 – блок $G(x)$) реализует

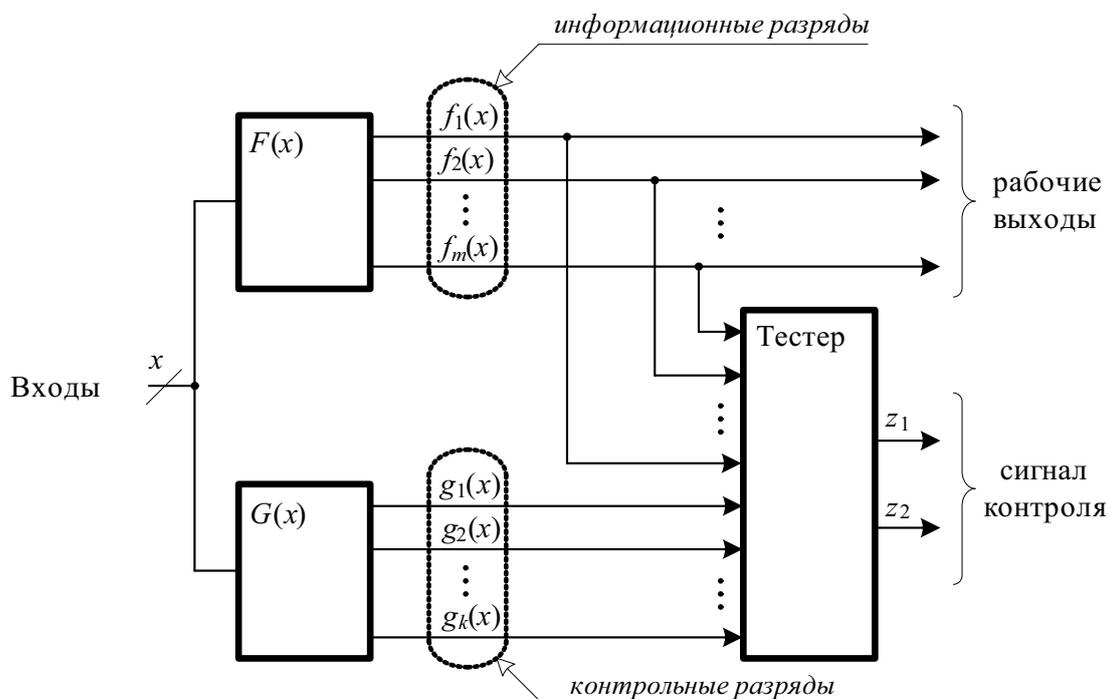


Рис. 1. Структурная схема системы функционального контроля

систему контрольных функций $g_1(x), g_2(x), \dots, g_k(x)$, а самопроверяемый тестер в любой момент времени фиксирует факт соответствия рабочих и контрольных функций, вырабатывая при этом сигнал контроля [16–19].

В структуре, изображенной на рис. 1, выходы блока основной логики отождествляются с информационным вектором длиной m , а выходы блока контрольной логики – с контрольным вектором длиной k . Между значениями информационных и контрольных разрядов на этапе проектирования устанавливается однозначное соответствие. При этом используются правила построения некоторого заранее выбранного помехоустойчивого кода с обнаружением или исправлением ошибок [20, 21]. Чаще выбирается код с обнаружением ошибок, так как он имеет меньшую избыточность, чем код с исправлением ошибок, и соответственно система функционального контроля при реализации имеет меньшую избыточность.

Неисправности в блоке $F(x)$ могут приводить к появлению искажений в значениях одного или нескольких разрядов информационного вектора; другими словами, приводить к возникновению ошибки кратностью $d \in \{1; 2; \dots; m\}$. Различные помехоустойчивые коды имеют различные свойства по обнаружению ошибок в информационных векторах кодовых слов. Например, классические коды с суммированием (коды Бергера [22]) не обнаруживают 50% двукратных ошибок в информационных векторах, однако обнаруживают 100% ошибок нечетной кратностью; коды Хэмминга [23] обнаруживают любые двукратные ошибки, но не обнаруживают некоторую долю ошибок бóльших кратностей и т. п. [24–27].

От структуры самого контролируемого устройства зависит, какие виды ошибок будут возникать в разрядах информационных векторов и соответственно какой именно вариант кодирования следует выбрать на этапе проектирования системы функционального контроля.

Отказы в системах автоматического управления и контроля классифицируют по различным признакам. Одной из значимых классификаций является разделение отказов по их проявлениям на защитные и опасные [28]. Первые не влияют на безопасность протекающего технологического процесса, а вторые – наоборот, приводят к возникновению угрозы аварии или катастрофы. В данной работе анализируются защитные и опасные отказы на выходах контролируемых логических устройств в структуре систем функционального контроля.

1 Классификация ошибок в информационных векторах

Ошибки в информационных векторах кодовых слов классифицируются на одиночные (их кратность $d = 1$) и кратные ($d \geq 2$). Любые помехоустойчивые коды должны обнаруживать 100% одиночных ошибок, иначе они не будут пригодными для организации систем функционального контроля.

Другая классификация ошибок в информационных векторах предусматривает разделение их на монотонные (однонаправленные) и немонотонные (разнонаправленные). Немонотонные ошибки, в свою очередь, делятся на симметричные и асимметричные. Такое деление связано с особенностями обнаружения ошибок в информационных векторах различными кодами [29].

Монотонная ошибка в информационном векторе – это ошибка, связанная с возникновением искажений только нулевых или только единичных значений разрядов. Немонотонная ошибка имеет хотя бы по одной группе искажений $\{0 \rightarrow 1; 1 \rightarrow 0\}$. Если искажается одинаковое количество нулевых и единичных значений информационных разрядов, то возникает симметричная ошибка, в противном случае – асимметричная. Свойства монотонных, симметричных и асимметричных ошибок в информационных векторах помехоустойчивых кодов подробно описываются в [29].

Введем понятие защитной и опасной ошибки в информационном векторе помехоустойчивого кода по аналогии с защитным и опасным отказами в аппаратных и программных средствах автоматики. Под *защитной ошибкой* будем понимать ошибку, связанную с возникновением искажений только единичных информационных разрядов. Защитная ошибка по своему виду относится к монотонной ошибке. *Опасной ошибкой* назовем ошибку, появляющуюся при возникновении искажений хотя бы одного нулевого информационного разряда.

Выделение в классе монотонных отдельно подкласса неопасных ошибок на практике позволяет организовывать системы функционального контроля с возможностью фиксации 100% опасных ошибок. Это актуально, так как позволяет снизить аппаратную избыточность системы функционального контроля.

Определим, какое число опасных ошибок может возникать в информационных векторах делимых кодов.

Рассмотрим информационный вектор длиной m . Пусть в нем r разрядов принимают единичные значения (вес такого вектора равен r), тогда $m - r$ – принимают нулевые значения (рис. 2).

$$\langle \underbrace{0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 0}_{m-r} \ \underbrace{1 \ 1 \ \dots \ 1 \ 1}_r \rangle$$

Рис. 2. Информационный вектор с весом r

Найдем количество возможных опасных ошибок в информационном векторе длиной m и весом r , т. е. ошибок, содержащих хотя бы одно искажение типа $0 \rightarrow 1$. Кратность ошибки обозначим как d , а число искажаемых нулевых разрядов – как t . Тогда число ошибок кратностью d в информационном векторе с весом r будет определяться величиной

$$N_{r,d} = C_{m-r}^t C_r^{d-t}, \quad (1)$$

где множитель C_{m-r}^t определяет число вариантов искажений нулевых разрядов, а множитель C_r^{d-t} – число вариантов искажений единичных разрядов.

Общее количество опасных ошибок кратностью d в информационном векторе с весом r :

$$\sum_{t=1}^d N_{r,d} = \sum_{t=1}^d C_{m-r}^t C_r^{d-t}. \quad (2)$$

Используя (2) и тот факт, что кратность ошибки может изменяться от величины $d = 1$ до величины $d = m$, получим общее количество опасных ошибок в информационном векторе делимого кода с весом r :

$$\sum_{d=1}^m \sum_{t=1}^d N_{r,d} = \sum_{d=1}^m \sum_{t=1}^d C_{m-r}^t C_r^{d-t}. \quad (3)$$

Поскольку число информационных векторов с весом r равно числу C_m^r , общее число опасных ошибок будет:

$$N_m^{0 \rightarrow 1} = \sum_{r=0}^m \sum_{d=1}^m \sum_{t=1}^d N_{r,d} = \sum_{r=0}^m C_m^r \sum_{d=1}^m \sum_{t=1}^d C_{m-r}^t C_r^{d-t} = \sum_{r=0}^m \sum_{d=1}^m \sum_{t=1}^d C_m^r C_{m-r}^t C_r^{d-t}. \quad (4)$$

Приведем пример подсчета числа опасных ошибок по формуле (4) при $m = 4$. Подсчет сведем в табл. 1.

Несколько проще подсчитать число защитных ошибок в информационных векторах. Это монотонные искажения кратности d единичных информационных разрядов:

$$\sum_{d=1}^r C_r^d = 2^r - 1. \quad (5)$$

Общее количество защитных ошибок:

$$N_m^{1 \rightarrow 0} = \sum_{r=0}^m C_m^r \sum_{d=1}^r C_r^d = \sum_{r=0}^m \sum_{d=1}^r C_m^r C_r^d = \sum_{r=0}^m C_m^r (2^r - 1). \quad (6)$$

Используя выражение (6), найдем число защитных ошибок в информационных векторах длиной m (табл. 2).

Поскольку общее количество ошибок в информационных векторах складывается из числа защитных и опасных ошибок, сумма выражений (4) и (6):

Таблица 1. Определение числа опасных ошибок

Группа векторов по весу	Кратность ошибки, d											
	$d = 1$		$d = 2$		$d = 3$		$d = 4$					
Вес	Немонотонные	Монотонные	Немонотонные	Монотонные	Немонотонные	Монотонные	Немонотонные	Монотонные	Немонотонные	Монотонные	Немонотонные	
0	0	$C_4^1 C_0^0 = 4$	0	$C_4^2 C_0^0 = 6$	0	$C_4^3 C_0^0 = 4$	0	$C_4^4 C_0^0 = 1$	0	0	0	
1	0	$C_3^1 C_1^0 = 3$	$C_3^1 C_1^1 = 3$	$C_3^2 C_1^0 = 3$	$C_3^2 C_1^1 = 3$	$C_3^3 C_1^0 = 1$	$C_3^3 C_1^1 = 1$	0	0	0	0	
2	0	$C_2^1 C_2^0 = 2$	$C_2^1 C_2^1 = 4$	$C_2^2 C_2^0 = 1$	$C_2^2 C_2^1 = 4$	0	0	$C_2^1 C_2^2 + C_2^2 C_2^1 = 4$	0	0	0	
3	0	$C_1^1 C_3^0 = 1$	$C_1^1 C_3^1 = 3$	0	$C_1^1 C_3^2 = 3$	0	0	$C_1^1 C_3^3 = 1$	0	0	0	
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
По всем группам	0	32	48	24	48	8	14	14	1	1	1	
Всего	175											

$$\begin{aligned}
 N_m &= N_m^{0 \rightarrow 1} + N_m^{1 \rightarrow 0} = \sum_{r=0}^m \sum_{d=1}^m \sum_{t=1}^d C_m^r C_{m-r}^t C_r^{d-t} + \sum_{r=0}^m \sum_{d=1}^r C_m^r C_r^d = \\
 &= \sum_{r=0}^m \sum_{d=1}^m C_m^r \left(\sum_{t=1}^d C_{m-r}^t C_r^{d-t} + C_m^r C_r^d \right) = 2^m (2^m - 1).
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

Например, при $m = 4$ (см. табл. 1 и табл. 2) получаем ($N^{0 \rightarrow 1} = 175$ и $N^{1 \rightarrow 0} = 65$):

$$N_m = N_m^{0 \rightarrow 1} + N_m^{1 \rightarrow 0} = 175 + 65 = 240 = 2^4 (2^4 - 1) = 16 \cdot 15.$$

Таким образом, при $m = 4$ 27,08% ошибок являются защитными и 72,92% ошибок являются опасными.

Поскольку защитные ошибки составляют половину монотонных ошибок в информационных векторах, можно сделать вывод о том, что число монотонных опасных ошибок также вычисляется по формуле (6), а общее число монотонных ошибок соответственно:

$$N_{UNI} = 2 \sum_{r=0}^m \sum_{d=1}^r C_m^r C_r^d = 2 \sum_{r=0}^m C_m^r (2^r - 1).
 \tag{8}$$

Расширенная классификация ошибок в информационных векторах, где учтено их разделение на защитные и опасные ошибки, приведена в диаграмме на рис. 3.

Таблица 2. Определение числа защитных ошибок

Группа векторов по весу		Кратность ошибки, d			
Вес	Число векторов	$d = 1$	$d = 2$	$d = 3$	$d = 4$
0	C_4^0	0	0	0	0
1	C_4^1	$C_1^1 = 1$	0	0	0
2	C_4^2	$C_2^1 = 2$	$C_2^2 = 1$	0	0
3	C_4^3	$C_3^1 = 3$	$C_3^2 = 3$	$C_3^3 = 1$	0
4	C_4^4	$C_4^1 = 4$	$C_4^2 = 6$	$C_4^3 = 4$	$C_4^4 = 1$
По всем группам		32	24	8	1
Всего		65			

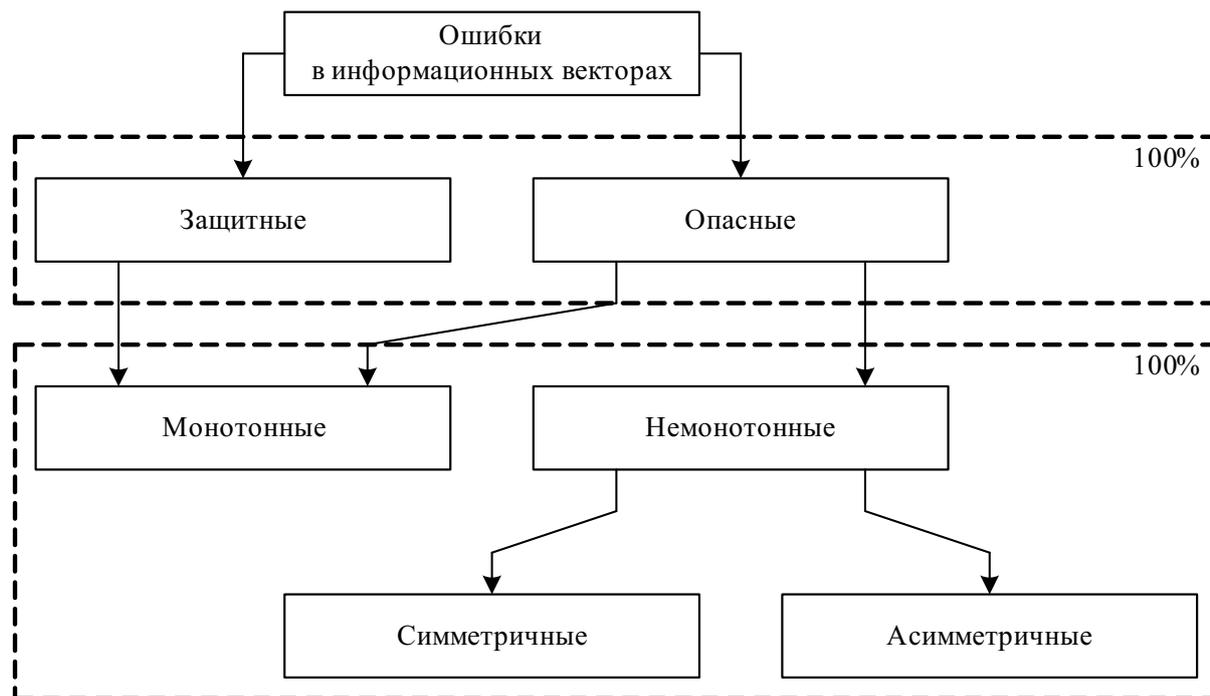


Рис. 3. Классификация ошибок в информационных векторах

2 Показатели обнаружения ошибок в информационных векторах

Число опасных ошибок в сравнении с общим числом ошибок в информационных векторах можно оценить коэффициентом:

$$\chi_m = \frac{N_m^{0 \rightarrow 1}}{N_m} = \frac{N_m - N_m^{1 \rightarrow 0}}{N_m} = 1 - \frac{N_m^{1 \rightarrow 0}}{N_m} = 1 - \frac{\sum_{r=0}^m C_m^r (2^r - 1)}{2^m (2^m - 1)}. \quad (9)$$

Следующая формула определяет долю защитных ошибок от общего числа ошибок в информационных векторах:

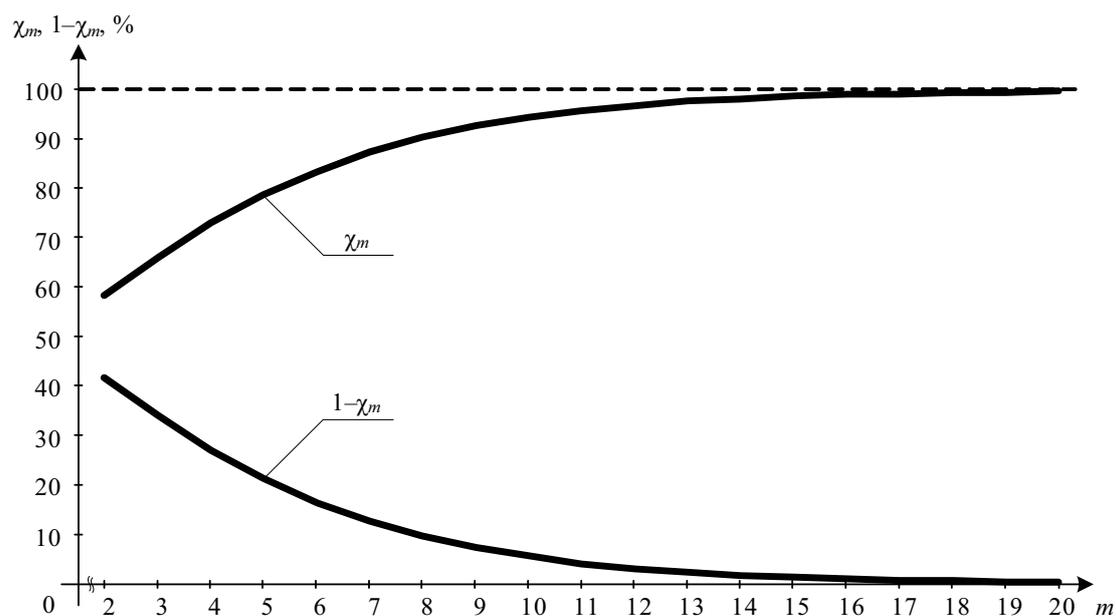
$$1 - \chi_m = \frac{N_m^{1 \rightarrow 0}}{N_m} = \frac{\sum_{r=0}^m C_m^r (2^r - 1)}{2^m (2^m - 1)}. \quad (10)$$

Расчеты количества ошибок различных видов приведены в табл. 3.

С увеличением длины информационного вектора доля опасных ошибок от общего числа ошибок в информационных векторах (величина χ_m) стремительно уменьшается (рис. 4). Например, при наименьшей длине информационного

Таблица 3. Защитные и опасные ошибки в информационных векторах

m	N_m	$N_m^{0 \rightarrow 1}$	$N_m^{1 \rightarrow 0}$	$\chi_m, \%$	$1 - \chi_m, \%$	δ_m
2	12	5	7	41,667	58,333	0,7143
3	56	19	37	33,929	66,071	0,5135
4	240	65	175	27,083	72,917	0,3714
5	992	211	781	21,27	78,73	0,2702
6	4032	665	3367	16,493	83,507	0,1975
7	16256	2059	14197	12,666	87,334	0,145
8	65280	6305	58975	9,658	90,342	0,1069
9	261632	19171	242461	7,327	92,673	0,0791
10	1047552	58025	989527	5,539	94,461	0,0586
11	4192256	175099	4017157	4,177	95,823	0,0436
12	16773120	527345	16245775	3,144	96,856	0,0325
13	67100672	1586131	65514541	2,364	97,636	0,0242
14	268419072	4766585	263652487	1,776	98,224	0,0181
15	1073709056	14316139	1059392917	1,333	98,667	0,0135
16	4294901760	42981185	4251920575	1,001	98,999	0,0101
17	17179738112	129009091	17050729021	0,751	99,249	0,0076
18	68719214592	387158345	68332056247	0,563	99,437	0,0057
19	274877382656	1161737179	273715645477	0,423	99,577	0,0042
20	1099510579200	3485735825	1096024843375	0,317	99,683	0,0032

Рис. 4. Графики зависимостей величин χ_m и $1 - \chi_m$ от значения m

вектора $m = 2$ имеем $\chi_2 = 41,667\%$, с увеличением длины информационного вектора на десять значений коэффициент опасных ошибок уменьшается в 13,25 раза и достигает значения $\chi_{12} = 3,144\%$. Уже при $m = 20$ имеем $\chi_{20} = 0,317\%$. Число же защитных ошибок в сравнении с опасными с ростом значения m уменьшается.

Найдем предел величины (9) при $m \rightarrow \infty$:

$$\begin{aligned} \lim_{m \rightarrow \infty} \chi_m &= \lim_{m \rightarrow \infty} \left(1 - \frac{\sum_{r=0}^m C_m^r (2^r - 1)}{2^m (2^m - 1)} \right) = \\ &= 1 - \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{C_m^0 (2^0 - 1) + C_m^1 (2^1 - 1) + \dots + C_m^m (2^m - 1)}{2^m (2^m - 1)} = \\ &= 1 - \left(\lim_{m \rightarrow \infty} \frac{C_m^0 (2^0 - 1)}{2^m (2^m - 1)} + \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{C_m^1 (2^1 - 1)}{2^m (2^m - 1)} + \dots + \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{C_m^m (2^m - 1)}{2^m (2^m - 1)} \right) = 1. \end{aligned} \quad (11)$$

В силу того, что каждое слагаемое в скобках в пределе при $m \rightarrow \infty$ становится равным нулю, значение всего предела $\lim_{m \rightarrow \infty} \chi_m = 0$.

Таким образом, еще раз показано, что увеличение длины информационного вектора влечет за собой уменьшение количества опасных ошибок.

Введем коэффициент, отражающий зависимость между числом защитных и опасных ошибок при заданном значении m :

$$\delta_m = \frac{N_m^{0 \rightarrow 1}}{N_m^{1 \rightarrow 0}} = \frac{\chi_m}{1 - \chi_m}. \quad (12)$$

$$\text{Например, } \delta_4 = \frac{N_4^{0 \rightarrow 1}}{N_4^{1 \rightarrow 0}} = \frac{65}{175} = 0,3714.$$

Из формул (11) и (12) следует, что $\lim_{m \rightarrow \infty} \delta_m = 0$, т. е. с увеличением длины информационного вектора число опасных ошибок в сравнении с числом защитных ошибок уменьшается и при $m \rightarrow \infty$ стремится к нулю.

3 Обнаружение опасных и защитных ошибок разделимыми кодами

Рассмотрим особенности часто используемых в задачах диагностики кодов с суммированием, или (m, k) -кодов (в обозначении кода m – длина информаци-

онного вектора, k – длина контрольного вектора), по обнаружению защитных и опасных ошибок в информационных векторах.

Классические коды с суммированием, или $S(m,k)$ -коды, не обнаруживают любые ошибки в информационных векторах, при которых сохраняется вес информационного вектора. Такие ошибки являются симметричными и содержат группы искажений $\{0 \rightarrow 1$ и $1 \rightarrow 0\}$. Общее количество таких ошибок данной кратностью d определяется выражением [30, 31]:

$$N_d = 2^{m-d} C_m^d C_d^{\frac{d}{2}}. \quad (13)$$

Всего опасных необнаруживаемых ошибок в информационных векторах соответственно:

$$N = \sum_{d=2}^{m,(m-1)} N_d = \sum_{d=2}^{m,(m-1)} 2^{m-d} C_m^d C_d^{\frac{d}{2}}. \quad (14)$$

Любые ошибки, не обнаруживаемые $S(m,k)$ -кодами, таким образом, являются опасными.

В общем случае, это сравнительно большое количество ошибок: 50% двукратных ошибок, 37,5% четырехкратных ошибок и т. д. Вообще любой $S(m,k)$ -код не обнаруживает одинаковую долю ошибок кратности d от общего количества ошибок данной кратностью [30]:

$$\sigma_d = 2^{-d} C_d^{\frac{d}{2}}. \quad (15)$$

$S(m,k)$ -коды часто применяют при организации контроля логических устройств, на выходах которых допускаются только монотонные ошибки. Такие устройства в литературе получили название устройств с независимыми или монотонно независимыми выходами [32, 33]. Для таких устройств $S(m,k)$ -кодами будут обнаруживаться все 100% защитных и опасных ошибок.

Коды с суммированием по модулю M [13, 17, 34, 35], или $SM(m,k)$ -коды, при $M \in \{2; 4; \dots; 2^{\lceil \log_2(m+1) \rceil}\}$, так же как и классические коды с суммированием, не обнаруживают 100% симметричных ошибок в информационных векторах. Кроме того, ими не обнаруживается 100% монотонных ошибок кратностью $d = iM$, $i = 1, 2, \dots, iM \leq m$ и часть асимметричных ошибок кратностью $d = M + 2i$, $i = 1, 2, \dots, iM \leq m$. $SM(m, k)$ -коды, исходя из этого, также могут быть применены для контроля логических устройств с независимыми и монотонно независимыми выходами, однако, с некоторыми ограничениями – в контролируемом

устройстве необходимо разделить выходы на группы по $M - 1$ элементу в каждой. Тогда будет обеспечено 100%-е обнаружение ошибок на выходах логического устройства [36].

Если контроль устройства с монотонно независимыми выходами осуществляется с применением $SM(m, k)$ -кода, то опасными ошибками будет являться половина всех монотонных ошибок кратностью M :

$$N_m^{0 \rightarrow 1} = \frac{1}{2} N_{UNI} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{\lfloor \frac{m}{M} \rfloor} 2^{m+1-jM} C_m^{jM} = 2^m \sum_{j=1}^{\lfloor \frac{m}{M} \rfloor} 2^{-jM} C_m^{jM}. \quad (16)$$

Величина jM в формуле (16) представляет собой кратность необнаруживаемой ошибки.

Таким образом, классические $S(m, k)$ -коды могут быть всегда применены для организации контроля 100% опасных ошибок в блоке основной логики, а модульные $SM(m, k)$ -коды – с некоторыми ограничениями.

4 Экспериментальные результаты

Для определения количества опасных и защитных ошибок на выходах реальных схем были проведены эксперименты с системой контрольных комбинационных схем *LGSynth`89* [37–39]. В *LGSynth`89* каждая комбинационная схема задана в виде *net*-листа в базисе *nor* (ИЛИ-НЕ). Исследовался характер влияния всех одиночных константных неисправностей на выходах внутренних логических элементов контрольных примеров, при этом ставилась задача оценки количества опасных ошибок на выходах контрольных примеров в сравнении с общим количеством ошибок. В табл. 4 приведены результаты экспериментов для 13 контрольных схем. В среднем доля опасных ошибок от общего количества ошибок составляет менее 50%, а для некоторых схем, например *cm138a* и *cm42a*, и вовсе менее 20%.

Следует также заметить, что во всем множестве опасных ошибок присутствует свыше 90% одиночных ошибок (искажается только один выход комбинационной схемы). Такие искажения обнаруживаются известными кодами, применяемыми для организации контроля комбинационных схем. Для многих контрольных схем доля одиночных опасных ошибок от общего числа опасных ошибок превышает 95%. Отсюда следует, что для организации контроля только опасных ошибок может быть проведена модификация структуры комбинационной схемы или же выбран соответствующий помехоустойчивый код. Модификация, однако, потребует меньшей избыточности, чем, например, по алгоритму [33].

Таблица 4. Ошибки на рабочих выходах контрольных схем

№	Контрольная схема	Параметры (число входов – число выходов)	Всего ошибок	Опасных ошибок	Защитных ошибок	Доля от общего количества, %		Одиночных опасных ошибок	Доля одиночных ошибок, %	
						опасных	защитных		от числа опасных	от общего числа
1	<i>x2</i>	10–7	19708	8856	10852	44,94	55,06	7568	85,46	38,4
2	<i>tcon</i>	17–16	4849664	2752512	2097152	56,76	43,24	2752512	100	56,76
3	<i>set</i>	19–15	446948	190868	256080	42,7	53,3	185812	97,35	41,57
4	<i>f51m</i>	8–8	13008	7742	5266	59,52	40,48	7401	95,6	56,9
5	<i>cu</i>	14–11	137984	64128	73856	46,47	53,53	41504	64,72	30,08
6	<i>cm138a</i>	6–8	680	44	636	6,47	93,53	44	100	6,47
7	<i>cm42a</i>	4–10	278	37	241	13,31	86,69	37	100	13,31
8	<i>alu2</i>	10–6	61988	31917	30071	51,49	48,51	29361	91,99	47,37
9	<i>alu4</i>	14–8	1966881	1110998	855883	56,49	43,51	979043	88,12	49,78
10	<i>cc</i>	21–20	35167192	15693894	19473298	44,63	55,37	13705856	87,33	38,97
11	<i>ladd</i>	9–19	28198	21820	6378	77,38	22,62	16704	76,55	59,24
12	<i>pcle</i>	19–9	17472087	12280151	5191936	70,28	29,72	11274520	91,81	64,53
13	<i>pm1</i>	16–13	189440	71232	118208	37,6	62,4	69728	97,89	36,81
Средние значения			4642620	2479554	2163066	47	53	2236161	91	42

Заключение

При построении систем автоматического управления и контроля важной задачей является обеспечение их безопасного поведения при отказах. Отказ, с точки зрения безопасности, допустим, но он должен переводить систему в защитное состояние. Для выявления сбоев и устойчивых неисправностей в работе компонентов управляющих комплексов организуются системы их функционального контроля. Такие системы должны обнаруживать 100% одиночных неисправностей на выходах логических элементов внутренней структуры. Однако часть неисправностей может приводить только к защитным искажениям выходных функций, что, в свою очередь, можно учитывать при синтезе системы функционального контроля.

Показаны результаты исследования особенностей защитных и опасных ошибок в векторах функций выходов контролируемых логических устройств (в информационных векторах). В общем случае некоторая часть искажений в информационных векторах является опасными ошибками, а при больших значениях количества выходных функций доля опасных ошибок от общего количества ошибок в информационных векторах является незначительной. Практические результаты с набором контрольных комбинационных схем говорят о том, что более половины ошибок на выходах реальных устройств являются защитными.

Установлены свойства классических и модульных кодов с суммированием по обнаружению опасных ошибок в информационных векторах. Отмечается, что модульные коды с суммированием могут быть эффективно использованы при организации контроля логических устройств с независимыми и монотонно независимыми выходами при их разделении на группы по $M - 1$ элементу в каждой.

Результаты работы, изложенные в данной статье, могут быть использованы при проектировании надежных дискретных систем управления и контроля ответственными технологическими процессами.

Библиографический список

1. Надежность и эффективность в технике : справочник : в 10 т. Т. 9 : Техническая диагностика / Под ред. В. В. Клюева и П. П. Пархоменко. – М. : Машиностроение, 1987. – 352 с.
2. Системы управления движением поездов на перегонах : учебник для вузов ж.-д. транспорта : в 3 ч. Ч. 2 / В. М. Лисенков, П. Ф. Бестемьянов, В. Б. Леушин, А. В. Лисенков, А. Е. Ваньшин ; под ред. В. М. Лисенкова. – М. : ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2009. – 324 с.

3. Антоненко В. С. Анализ работоспособности автоматической локомотивной сигнализации числового кода / В. С. Антоненко, Ю. А. Кравцов, В. М. Сафро, А. Б. Чегуров // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2011. – № 1. – С. 101–113.
4. Горелик А. В. Методы анализа безопасности функционирования систем железнодорожной автоматики и телемеханики / А. В. Горелик, Н. А. Тарадин, И. А. Журавлев // Надежность. – 2011. – № 1. – С. 40–46.
5. Закревский А. Д. Логические основы проектирования дискретных устройств / А. Д. Закревский, Ю. В. Поттосин, Л. Д. Черемисинова. – М. : Физматлит, 2007. – 592 с.
6. Мозгалевский А. В. Техническая диагностика (непрерывные объекты) / А. В. Мозгалевский, Д. В. Гаскаров. – М. : Высшая школа, 1975. – 207 с.
7. Биргер И. А. Техническая диагностика / И. А. Биргер. – М. : Машиностроение, 1978. – 240 с.
8. Хаханов В. И. Техническая диагностика цифровых и микропроцессорных структур / В. И. Хаханов. – Киев : ІЗМН, 1995. – 252 с.
9. Калявин В. П. Надежность и диагностика автотранспортных средств / В. П. Калявин, Н. А. Давыдов. – СПб. : Элмор, 2014. – 480 с.
10. Рабочее диагностирование безопасных информационно-управляющих систем / А. В. Дрозд, В. С. Харченко, С. Г. Антощук и др. ; под ред. А. В. Дрозда и В. С. Харченко. – Харьков : Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского (ХАИ), 2012. – 614 с.
11. Wang L.-T. System-on-Chip Test Architectures : Nanometer Design for Testability / L.-T. Wang, C. E. Stroud, N. A. Touba. Morgan Kaufmann Publishers, 2008. – 856 p.
12. Пархоменко П. П. Основы технической диагностики (оптимизация алгоритмов диагностирования, аппаратурные средства) / П. П. Пархоменко, Е. С. Согомоян. – М. : Энергоатомиздат, 1981. – 320 с.
13. Согомоян Е. С. Самопроверяемые устройства и отказоустойчивые системы / Е. С. Согомоян, Е. В. Слабаков. – М. : Радио и связь, 1989. – 208 с.
14. Touba N. A. Logic Synthesis of Multilevel Circuits with Concurrent Error Detection / N. A. Touba, E. J. McCluskey // IEEE Trans. Computer-Aided Design of Integrated Circuits and System. – Vol. 16. – Jul. 1997. – Pp. 783–789.
15. Nicolaidis M. On-Line Testing for VLSI – A Compendium of Approaches / M. Nicolaidis, Y. Zorian // Journal of Electronic Testing: Theory and Applications. – 1998. – Issue 12. – Pp. 7–20.
16. Сапожников Вал. В. Самопроверяемые дискретные устройства / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников. – СПб. : Энергоатомиздат, 1992. – 224 с.
17. Piestrak S. J. Design of Self-Testing Checkers for Unidirectional Error Detecting Codes / S. J. Piestrak. – Wrocław : Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 1995. – 111 p.
18. Lala P. K. Self-Checking and Fault-Tolerant Digital Design / P. K. Lala. – University of Arkansas, 2001. – 216 p.
19. Butorina N. Self-Testing Checker Design for Incomplete m-out-of-n Codes / N. Butorina // Proceedings of 12th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2014), Kyev, Ukraine. September 26–29, 2014. – Pp. 258–261.
20. Fujiwara E. Code Design for Dependable Systems: Theory and Practical Applications / E. Fujiwara. – New Jersey, John Wiley & Sons, 2006. – 720 p.

21. Jha N. K. Totally Self-Checking Checker Designs for Bose-Lin, Bose and Blaum Codes / N. K. Jha // *IEEE Trans, Computer-Aided Design*. – Vol. CAD-10. – February 1991. – Pp. 136–143.
22. Berger J. M. A Note on Error Detecting Codes for Asymmetric Channels / J. M. Berger // *Information and Control*. – 1961. – Vol. 4. – Issue 1. – Pp. 68–73.
23. Hamming R. W. Error Detecting and Correcting Codes / R. W. Hamming // *Bell System Technical Journal*. – 1950. – 29 (2). – Pp. 147–160.
24. Sapozhnikov Val. Analysis of Error-Detection Possibilities of CED Circuits Based on Hamming and Berger Codes / Val. Sapozhnikov, Vl. Sapozhnikov, D. Efanov, A. Blyudov // *Proceedings of 11th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2013)*, Rostov-on-Don, Russia, September 27–30, 2013. – Pp. 200–207.
25. Ефанов Д. В. Предельные свойства кода Хэмминга в схемах функционального диагностирования / Д. В. Ефанов // *Информатика и системы управления*. – 2011. – № 3. – С. 70–79.
26. Ефанов Д. В. Три теоремы о кодах Бергера в схемах встроенного контроля / Д. В. Ефанов // *Информатика и системы управления*. – 2013. – № 1. – С. 77–86.
27. Сапожников Вал. В. Применение кодов Бергера и Хэмминга в схемах функционального контроля / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов, А. А. Блюдов // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. – 2013. – № 2. – С. 168–182.
28. Гавзов Д. В. Методы обеспечения безопасности дискретных систем / Д. В. Гавзов, Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // *Автоматика и телемеханика*. – 1994. – № 8. – С. 3–50.
29. Сапожников Вал. В. Классификация ошибок в информационных векторах систематических кодов / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов // *Известия вузов. Приборостроение*. – 2015. – Т. 58, № 5. – С. 333–343.
30. Ефанов Д. В. О свойствах кода с суммированием в схемах функционального контроля / Д. В. Ефанов, Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // *Автоматика и телемеханика*. – 2010. – № 6. – С. 155–162.
31. Сапожников Вал. В. Предельные свойства кода с суммированием / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. – 2010. – № 3. – С. 290–299.
32. Busaba F. Y. Self-Checking Combinational Circuit Design for Single and Unidirectional Multibit Errors / F. Y. Busaba, P. K. Lala // *Journal of Electronic Testing : Theory and Applications*. – 1994. – Issue 5. – Pp. 19–28.
33. Morosow A. Self-Checking Combinational Circuits with Unidirectionally Independent Outputs / A. Morosow, Val. V. Saposhnikov, Vl. V. Saposhnikov, M. Goessel // *VLSI Design*. – 1998. – Vol. 5. – Issue 4. – Pp. 333–345.
34. Bose B. Systematic Unidirectional Error-Detection Codes / B. Bose, D. J. Lin // *Proceedings of IEEE Trans. Comput.* – 1985. – Vol. C-34, November. – Pp. 1026–1032.
35. Das D. Synthesis of Circuits with Low-Cost Concurrent Error Detection Based on Bose-Lin Codes / D. Das, N. A. Touba // *Journal of Electronic Testing: Theory and Applications*. – 1999. – Vol. 15. – Issue 1–2. – Pp. 145–155.
36. Sapozhnikov Val. On the Synthesis of Unidirectional Combinational Circuits Detecting All Single Faults / Val. Sapozhnikov, Vl. Sapozhnikov, D. Efanov, A. Blyudov //

- Proceedings of 12th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2014), Kyev, Ukraine. September 26–29. – 2014. – Pp. 116–125.
37. Yang S. Logic Synthesis and Optimization Benchmarks User guide: Version 3.0, Technical report Microelectronics Center of North Carolina, P.O. Box 12889 / S. Yang // Research Triangle Park, NC 27709. – January 15. – 1991. – 44 p.
 38. Benchmarks: LGSynth89. – URL : <http://www.cbl.ncsu.edu:16080/benchmarks/LGSynth89/mlexamples>.
 39. Gopalakrishan P. Direct Transistor-Level Layout for Digital Blocks / P. Gopalakrishan, R.A. Rutenbar. – Boston : Kluwer Academic Publishers, 2004. – 125 p.

Val. V. Sapozhnikov, Vl. V. Sapozhnikov, D. V. Efanov
«Automation and Remote Control on Railways» department,
Petersburg State Transport University

Detection of hazardous errors at the operative outputs of combinational logic circuits

The article considers the problem of analysis of errors at the operative outputs of concurrent error detection (CED) systems of combinational logic circuits, constructed using the method of calculating the check bits. As the basis of CED systems, built using this method, the separable antijamming codes are used. This article presents an extended classification of errors at the operational outputs of CED systems. It also provides the definitions of protective and hazardous errors in the data vectors of code words. The article provides the derivation of the formulas for calculating the number of protective and hazardous errors in data vectors of an arbitrary separable codes, as well as detection indicators of protective and hazardous errors in data vectors. The article gives the examples of code with description of its features for detection of protective and hazardous errors in data vectors.

concurrent error detection system; operative outputs; separable codes; data vectors; errors in data vectors; error classification; protective error; hazardous error; detection of hazardous errors

*Статья представлена к публикации членом редколлегии М. Н. Василенко
Поступила в редакцию 11.03.2015
Контактная информация: TrES-4b@yandex.ru*

© Сапожников Вал. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В., 2015