УДК 004.052.32+681.518.5
DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-7-621-631

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ОШИБОК РАВНОМЕРНЫМИ НЕРАЗДЕЛИМЫМИ КОДАМИ

Д. В. Ефанов

ООО „ЛокоТех-Сигнал“, 107113, Москва, Россия

Российский университет транспорта, 127994, Москва, Россия
E-mail: dmitrii.efanov@locotech-signal.ru; TrES-4b@yandex.ru

Проанализированы свойства неразделимых равномерных кодов, относящихся к классу равновесных и классу кодов Адамара. Данные коды широко применяются при передаче данных и организации контролепригодных дискретных систем. Установлены ключевые характеристики обоих классов неразделимых кодов, которые целесообразно учитывать при построении контролепригодных устройств и систем автоматики. Представлены формулы расчета количества ошибок, не обнаруживаемых рассматриваемыми кодами. Приведены характеристические таблицы для равновесных кодов и кодов Адамара. Отмечена особенность равновесных кодов „1 из *m*“, не свойственная другим равновесным кодам, — обнаружение любых искажений в кодовых словах, за исключением двукратных симметричных ошибок. Предложено применять коды Адамара при организации самопроверяемых схем встроенного контроля на основе метода логического дополнения.

Ключевые слова: *равновесные коды, обнаружение ошибок равновесными кодами, необнаруживаемая ошибка, свойства кода, техническая диагностика дискретных систем*

Введение. К неразделимым равномерным кодам относятся коды, для которых в кодовых словах невозможно выделить информационные и контрольные разряды. Наиболее известными среди таких кодов являются равновесные коды и коды Адамара. Равновесные коды ориентированы на обнаружение ошибок в кодовых словах, что обусловливает их широкое применение при решении задач обеспечения помехозащищенности при передаче данных, а также при построении систем автоматики с обнаружением неисправностей [1—4]. Коды Адамара несколько сложнее и относятся к корректирующим кодам [5]. Коды обоих классов могут быть эффективно использованы и при организации контролепригодных дискретных систем.

В настоящей статье рассматриваются особенности обнаружения ошибок равновесными кодами и кодами Адамара. Учет этих особенностей при выборе способа реализации устройств автоматики крайне важен и позволяет наделять их контролепригодными структурами при внесении малой избыточности.

Равновесные коды. Равновесные коды, или коды „*r* из *m*“ (r/m-коды), образуются множеством кодовых векторов длиной m с числом единичных разрядов, равным r. Например, равновесный 2/4-код включает в себя шесть кодовых векторов: <0011>, <0101>, <0110>, <1001>, <1010>, <1100>; остальные 4-битовые кодовые векторы не принадлежат к 2/4-коду.

Равновесными кодами обнаруживается не только любая одиночная ошибка в кодовом слове, но и любая ошибка, не содержащая группы искажений $\{0\to1,\ 1\to0\}$. Такая ошибка является симметричной и сохраняет вес кодового слова [6]. К обнаруживаемым равновесными кодами ошибкам относятся монотонные (связанные с искажениями только нулевых или только единичных разрядов) и асимметричные (связанные с неравным количеством искажений нулевых и единичных разрядов). Это свойство позволяет применять равновесные коды при передаче данных в асимметричных каналах связи, а также при построении контролепригодных дискретных систем. Например, в работе [7] предложено применять равновесные коды при построении конечных автоматов с функцией самоконтроля, вопросы разработки контролепригодных дискретных систем с кодированием данных равновесными кодами обсуждаются в работе [8], а в [9—14] описано построение самопроверяемых схем встроенного контроля на основе равновесных кодов. В работах [2, 4, 15—23] изложена теория синтеза тестеров равновесных кодов.

Во всех приложениях равновесных кодов, связанных с построением контролепригодных систем автоматики, используется их свойство обнаруживать любые монотонные (однонаправленные) искажения в кодовых словах. Согласно известной классификации равновесные коды относят к UED-кодам (Unidirectional Error-Detection Codes) [4]. При реализации схем автоматики они наделяются особым свойством — возможностью формирования в случае неисправностей на контролируемых выходах только монотонных ошибок (так называемые „монотонные реализации“) [8]. Это позволяет контролировать корректность работы устройств с помощью равновесных кодов. Целесообразно учитывать, что равновесными кодами обнаруживаются также и любые асимметричные искажения в кодовых словах и построение устройств возможно по схеме „монотонно-асимметричной реализации“ [24].

Обнаружение ошибок равновесными кодами „1 из m“. Рассмотрим частный случай равновесных кодов — коды „1 из m“. Данные коды обладают особыми свойствами как обнаружения ошибок, так и обеспечения контролепригодности их тестеров [21].

Утверждение 1. *Равновесными кодами не обнаруживаются только те ошибки, которые переводят кодовые слова данного кода в кодовые слова этого же кода.*

Справедливость формулировки утверждения очевидна: если вес кодового слова нарушается, то ошибка, приведшая к этому событию, обнаруживается. Данное положение важно при определении особенностей обнаружения ошибок равновесными кодами.

Для равновесного кода „1 из m“ (1/m-кода) необнаруживаемыми могут быть только двукратные ошибки:

$$N_{m,r=1} = C_m^1 C_{m-1}^1 C_1^1, \qquad (1)$$

где C_m^1 — число кодовых слов 1/m-кода; C_1^1 и C_{m-1}^1 — число вариантов искажений соответственно единичных и нулевых разрядов в кодовых словах, необходимых для возникновения двукратной ошибки.

Формула (1) может быть записана в ином виде:

$$N_{m,r=1} = C_m^1 C_{m-1}^1 C_1^1 = \frac{m!}{1!(m-1)!}\frac{(m-1)!}{1!(m-2)!}1 = \frac{(m-1)!m}{1!(m-1)!}\frac{(m-2)!(m-1)}{1!(m-2)!}1 = m(m-1) = m^2 - m. \qquad (2)$$

В табл. 1 представлены: $N_{m,r=1}$ — рассчитанное количество необнаруживаемых 1/m-кодами ошибок; N_m — общее количество возможных ошибок в кодовых словах длиной m, вычисляемое по формуле [6]

$$N_m = 2^m \left(2^m - 1\right); \qquad (3)$$

γ_m — показатель, характеризующий долю необнаруживаемых ошибок от общего количества ошибок в кодовых словах равновесных кодов:

$$\gamma_m = \frac{N_{m,r=1}}{N_m} \cdot 100\%; \qquad (4)$$

$N_{m,d}$ — число необнаруживаемых ошибок кратностью d; β_2 — доля необнаруживаемых двукратных ошибок от их общего количества.

Таблица 1

m	$N_{m,r=1}$	N_m	γ_m, %	$N_{m,d}$	β_2, %
2	2	12	16,66666667	4	50
3	6	56	10,71428571	24	25
4	12	240	5	96	12,5
5	20	992	2,016129032	320	6,25
6	30	4032	0,744047619	960	3,125
7	42	16256	0,258366142	2688	1,5625
8	56	65280	0,085784314	7168	0,78125
9	72	261632	0,027519569	18432	0,390625
10	90	1047552	0,008591459	46080	0,1953125
…	…	…	…	…	…
20	380	$1{,}09951\cdot10^{12}$	$3{,}45608\cdot10^{-8}$	199229440	0,0001907
…	…	…	…	…	…
50	2450	$1{,}26765\cdot10^{30}$	$1{,}93271\cdot10^{-25}$	$1{,}379\cdot10^{18}$	$1{,}776\cdot10^{-13}$
…	…	…	…	…	…
100	9900	$1{,}60694\cdot10^{60}$	$6{,}16079\cdot10^{-55}$	$6{,}275\cdot10^{33}$	$1{,}578\cdot10^{-28}$

С увеличением числа разрядов в кодовых словах количество необнаруживаемых ошибок увеличивается, однако их доля от общего числа возможных ошибок уменьшается. Например, равновесным 1/4-кодом не будут обнаружены 12 ошибок, что составляет 5 % от общего их числа, а равновесным 1/6-кодом — 30 ошибок, что составляет 0,74 %.

Утверждение 2. *Равновесными 1/m-кодами обнаруживаются любые ошибки в кодовых словах, кроме двукратных симметричных ошибок.*

Доказательство. Справедливость утверждения вытекает из следующих соображений. Для того чтобы ошибка не была обнаружена, кодовое слово $1/m$-кода должно при искажении перейти в кодовое слово $1/m$-кода. Для этого необходимо обязательное искажение единственного единичного разряда и одного из m–1 нулевых разрядов. В противном случае вес искаженного слова не будет равен r=1. Таким образом, необнаруженной может быть только двукратная ошибка. Вид ошибки определяется числом искаженных нулевых и единичных разрядов — в данном случае возникает только искажение двух разрядов $\{0\to1, 1\to0\}$. Все остальные ошибки любых видов и любой кратностью приведут к искажению кодового слова в некодовое и будут обнаружены. ■

На рис. 1 для примера приведены все возможные необнаруживаемые переходы в кодовых словах 1/4-кода.

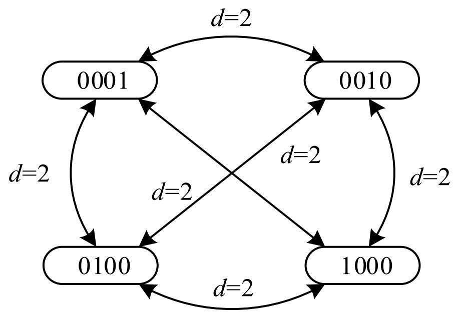

Рис. 1

Так как любые необнаруживаемые $1/m$-кодом ошибки имеют кратность d=2, можно сравнить их с общим числом двукратных искажений в кодовых словах, определяемым по формуле [6]

$$N_{m,d=2} = 2^m C_m^2 = 2^m \frac{m!}{2!(m-2)!} = 2^m \frac{(m-2)!(m-1)m}{2!(m-2)!} = 2^{m-1}\left(m^2 - m\right). \quad (5)$$

Доля необнаруживаемых двукратных ошибок от их общего количества вычисляется по формуле

$$\beta_{d=2} = \frac{N_{m,r=1}}{N_{m,d=2}} \cdot 100\ \%. \quad (6)$$

Естественно, с увеличением числа разрядов значение $\beta_{d=2}$ уменьшается; для 1/4-кода оно составляет 12,5 %, а для 1/6-кода — 3,125 %.

Обнаружение ошибок равновесными кодами „r из m“. В равновесном коде „*r* из *m*“ (*r*/*m*-коде) присутствуют кодовые слова с весом *r*. Для этих кодов справедливо следующее утверждение.

Утверждение 3. *Равновесными r/m-кодами обнаруживаются любые ошибки в кодовых словах, кроме симметричных ошибок кратностью*

$$d = 2, 4, ..., d_{\max}, \quad (7)$$

$$d_{\max} = \begin{cases} 2r, \text{ если } r \le m/2; \\ 2(m-r), \text{ если } r > m/2. \end{cases}$$

Доказательство. Справедливость утверждения обусловливается тем, что в кодовых словах равновесных кодов со значением $r \le m/2$ число возможных искажаемых единичных разрядов меньше числа нулевых возможных искажаемых разрядов и при возникновении искажения *r* единичных и *r* нулевых разрядов осуществляется перевод кодового слова данного равновесного кода в кодовое слово, принадлежащее также ему. При $r > m/2$ максимальная кратность определяется количеством нулей, равным $m - r$. ■

Количество необнаруживаемых *r*/*m*-кодами ошибок определяется по формуле

$$N_{m,r} = \sum_{d=2}^{d_{\max}} C_m^r C_{m-r}^{d/2} C_r^{d/2}, \quad (8)$$

$$d_{\max} = \begin{cases} 2r, \text{ если } r \le m/2; \\ 2(m-r), \text{ если } r > m/2. \end{cases}$$

В формуле (8) C_m^r — число кодовых слов *r*/*m*-кода; $C_r^{d/2}$ и $C_{m-r}^{d/2}$ — число вариантов искажений соответственно единичных и нулевых разрядов в кодовых словах, необходимых для возникновения симметричной ошибки кратностью *d*.

В табл. 2 представлены рассчитанные значения количества необнаруживаемых ошибок различными *r*/*m*-кодами. С увеличением числа разрядов в кодовых словах равновесного кода и увеличения *r* до значения $m/2$ количество необнаруживаемых кодом ошибок увеличивается. По этой причине явным приоритетом обладают 1/*m*-коды. Кроме того, для обеспечения полной самопроверяемости тестеров 1/*m*-кодов требуется подача на их входы *m* кодовых слов. Для остальных кодов при данном значении *m* с увеличением *r* до значения $m/2$ происходит увеличение количества тестовых комбинаций (за исключением специальных схемотехнических вариантов, описанных в работе [2]).

Таблица 2

m	r								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
4	12	30	12						
5	20	90	90						
6	30	210	360	210	30				
7	42	420	1190	1190	420	42			
8	56	756	3080	4830	3080	756	56		
9	72	1260	6972	15750	15750	6972	1260	72	
10	90	1980	14280	43890	63252	43890	14280	1980	90

Коды Адамара. Коды Адамара, в отличие от классических равновесных кодов, ориентированы на исправление ошибок; они известны достаточно давно, задолго до создания кодов Хэмминга, и являются первыми корректирующими кодами [25].

Коды Адамара строятся из матриц Адамара размером $m \times m$, составленных из чисел 1 и –1, столбцы которых ортогональны, так что справедливо соотношение

$$H_m H^T = mE_m, \tag{9}$$

где H_m — матрица Адамара, E_m — единичная матрица размером m.

Существует недоказанная гипотеза, согласно которой матрица Адамара порядка $4k$ имеется для каждого натурального k. Для задач синтеза контролепригодных устройств автоматики это означает, что код Адамара можно применить при построении устройств с 4, 8, 12, 16, … выходами или при контроле групп множества выходов с такой мощностью.

Рассмотрим 4×4-матрицу Адамара:

$$H_4 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{pmatrix}. \tag{10}$$

При построении кода Адамара все элементы „1“ матрицы меняются на „0“, а элементы „–1“ на „1“: например, матрица (10) примет вид

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Матрица Адамара позволяет построить три кода Адамара [5]:

1) код A_m, образованный из строк матрицы H_m с удаленным первым столбцом; этот код имеет следующие кодовые слова: <000>, <101>, <011> и <110>;

2) код B_m, образованный из векторов кода A_m и их дополнений; этот код имеет следующие кодовые слова: <000>, <101>, <011> и <110>, а также <111>, <010>, <100> и <001>;

3) код C_m, образованный из строк матрицы H_m и их дополнений; он содержит кодовые слова <0000>, <0101>, <0011>, <0110>, а также <1111>, <1010>, <1100>, <1001>.

Следующее утверждение, характеризующее коды Адамара, крайне важно для приложения их в задачах синтеза контролепригодных систем автоматики и систем с обнаружением неисправностей [5].

Утверждение 4. *Коды Адамара A_m и C_m будут обнаруживать любые ошибки кратностью $d < m/2$, а код Адамара B_m будет обнаруживать любые ошибки кратностью $d < m/2 - 1$.*

Это положение непосредственно обусловливается свойствами матрицы Адамара, а также тем, что получаемые по ней коды A_m и C_m содержат векторы с расстоянием Хэмминга $m/2$, а код B_m — векторы с расстоянием Хэмминга $m/2-1$.

К примеру, определим, какое минимальное кодовое расстояние будут иметь векторы кодов Адамара, построенных по матрице 8×8:

$$H_8 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 & 1 & -1 \end{pmatrix}, \qquad (11)$$

Согласно матрице (11) коды A_m и C_m содержат векторы с расстоянием Хэмминга $m/2=4$, а код B_m содержит векторы с расстоянием Хэмминга $m/2-1=3$. Соответственно все ошибки меньшей кратностью будут обнаружены кодами Адамара.

Количество необнаруживаемых кодами Адамара ошибок можно определить исходя из мощности множества кодовых слов:

$$N_{m,H_m} = Q_{H_m}\left(Q_{H_m}-1\right), \qquad (12)$$

где Q_{H_m} — число кодовых слов H_m-кода.

Для различных кодов Адамара число кодовых слов определяется согласно выражениям

$$Q_{A_m} = m; \quad Q_{B_m} = 2m; \quad Q_{C_m} = 2m. \qquad (13)$$

В табл. 3 приведены рассчитанные значения N_{m,H_m} для некоторых кодов Адамара, а также доли необнаруживаемых ошибок от их общего количества.

Отметим, что если из кодов Адамара A_m и C_m удалить комбинации <00…00> и <11..11>, в них будут присутствовать только равновесные векторы кодов „$\frac{m}{2}-1$ из m“ и „$\frac{m}{2}$ из m“ соответственно, а код B_m будет образован комбинациями равновесных кодов „$\frac{m}{2}$ из $m-1$“ и „$\frac{m}{2}-1$ из $m-1$“. Таким образом, при некоторой модификации из кодов Адамара могут быть получены равновесные коды, эффективно обнаруживающие ошибки в кодовых словах. Это обстоятельство позволяет применять коды Адамара в приложениях, аналогичных равновесным кодам.

Таблица 3

m	N_{m,A_m}	N_{m,B_m}, N_{m,C_m}	N_m	γ_m, %, для	
				A_m-кода	B_m-, C_m-кодов
4	12	56	240	5	23,33333333
8	56	240	65280	0,085784314	0,367647059
12	132	552	16773120	0,000786973	0,00329098
16	240	992	4294901760	$5{,}58802\cdot10^{-6}$	$2{,}30972\cdot10^{-5}$
20	380	1560	$1{,}09951\cdot10^{12}$	$3{,}45608\cdot10^{-8}$	$1{,}41881\cdot10^{-7}$
24	552	2256	$2{,}81475\cdot10^{14}$	$1{,}9611\cdot10^{-10}$	$8{,}01492\cdot10^{-10}$
…	…	…	…	…	…
100	9900	39800	$1{,}60694\cdot10^{60}$	$6{,}16079\cdot10^{-55}$	$2{,}47676\cdot10^{-54}$

Приведем пример использования кода Адамара, полученного по матрице H_8 (см. формулу (11)), при организации контроля комбинационных схем по методу логического дополнения [12]. Используем код C_8 для организации системы контроля комбинационной схемы с m=8 выходами (рис. 2).

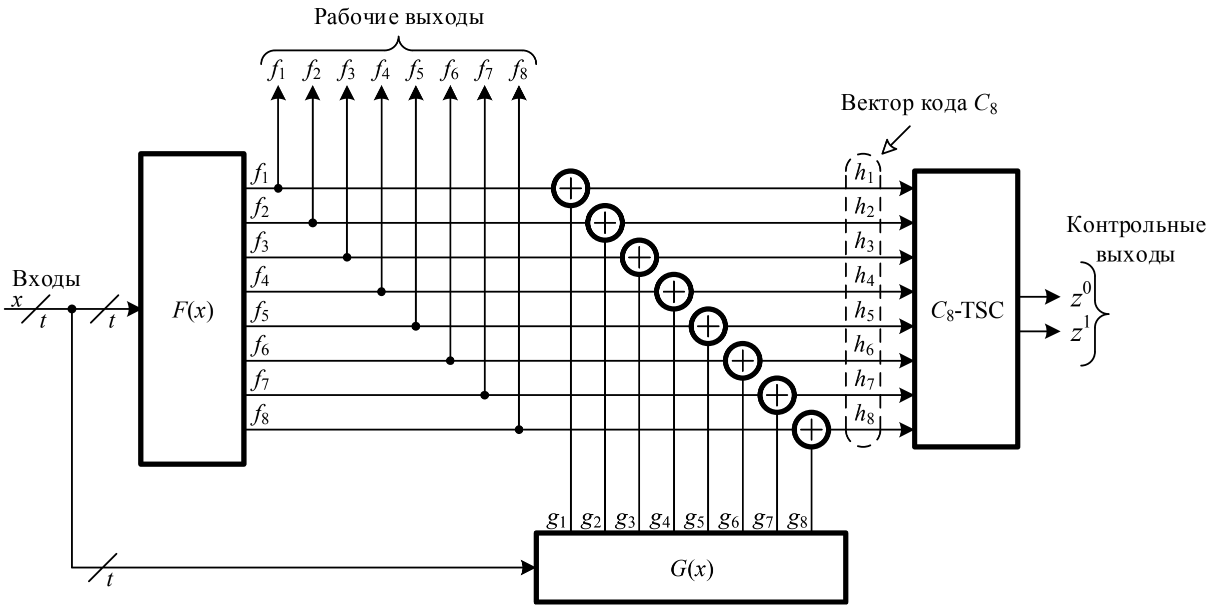

Рис. 2

Принцип контроля заключается в следующем. Рабочие функции f_1—f_8, значения которых формируются комбинационной схемой $F(x)$, корректируются с помощью функций дополнения g_1—g_8, вычисляемых блоком $G(x)$, таким образом, чтобы на выходе каскада сумматоров по модулю два формировался кодовый вектор $<h_8\ h_7\ \dots\ h_2\ h_1>$, принадлежащий коду C_8. Принадлежность формируемого кодового слова коду C_8 контролируется полностью самопроверяемым тестером C_8-TSC (Totally Self-Checking Checker). В отличие от применения, например, равновесного кода „1 из 8“, кодом C_8 будут обнаруживаться любые одно-, двух- и трехкратные искажения в векторах $<h_8\ h_7\ \dots\ h_2\ h_1>$.

Для схем с числом выходов m>8 представленная на рис. 2 структура может являться базовой. В этом случае множество выходов схемы разбивается на подмножества из восьми выходов (подмножества могут пересекаться). Для каждого подмножества строится отдельная схема контроля по коду C_8, а контрольные выходы отдельных схем объединяются на входах самопроверяемого компаратора, реализованного на основе модулей сжатия парафазных сигналов [26]. Для схем с числом выходов, кратным четырем, могут быть использованы соответствующие коды Адамара C_m.

Предложенный подход, связанный с применением кодов Адамара при организации контроля комбинационных схем, позволяет существенно расширить возможности при разработке систем диагностирования. В отличие от известных методов контроля выходов по свойствам независимости или монотонной независимости [24], можно предложить контроль по группам $\left(\frac{m}{2}-1\right)$-независимых выходов.

Определение. Множество, образованное m выходами комбинационной схемы, будет являться группой $\left(\frac{m}{2}-1\right)$-независимых выходов, если неисправность выхода любого логического элемента схемы искажает значения не более $\left(\frac{m}{2}-1\right)$ выходов группы.

Утверждение 5. *Множество, образованное m выходами комбинационной схемы, формирует группу* $\left(\frac{m}{2}-1\right)$*-независимых выходов, если для каждого элемента схемы выполняется условие*

$$\frac{\partial f_{i_1}}{\partial y_q}\frac{\partial f_{i_2}}{\partial y_q}\cdot\ldots\cdot\frac{\partial f_{i_{m/2-1}}}{\partial y_q}=0, \qquad (14)$$

где y_q — функция, реализуемая на выходе элемента G_q схемы; $f_{i_1}, f_{i_2}, ..., f_{i_{m/2-1}} \in \{f_1, f_2, ..., f_n\}$; n — общее число выходов комбинационной схемы.

Доказательство справедливости выражения (14) следует из того, что каждая производная в левой его части определяет входные комбинации, на которых неисправность элемента с выходом y_q проявляется на соответствующем выходе самой схемы, а произведение всех производных определяет входные наборы, на которых одновременно искажаются все m выходов схемы. Если для каждого элемента условие (14) выполняется, значит, на множестве, образованном m выходами, будут допустимы только искажения кратностью $d\leq m/2-1$. ■

Использование кодов Адамара для контроля комбинационных схем по группам $\left(\frac{m}{2}-1\right)$-независимых выходов позволяет синтезировать системы диагностирования, обладающие возможностью обнаружения любых одиночных неисправностей их внутренней структуры.

Заключение. Рассмотренные свойства равновесных кодов целесообразно учитывать при выборе способа реализации контролепригодных устройств автоматики или при разработке диагностического обеспечения. Помимо равновесных кодов, при построении устройств и систем автоматики возможно применение кодов Адамара и их модификаций, обладающих функцией эффективного обнаружения ошибок малой кратностью при числе выходов комбинационной схемы $m\geq 8$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Freiman C. V.* Optimal error detection codes for completely asymmetric binary channels // Information and Control. 1962. Vol. 5, iss. 1. P. 64—71. DOI: 10.1016/S0019-9958(62)90223-1.
2. *Сапожников В. В., Сапожников Вл. В.* Самопроверяемые дискретные устройства. СПб: Энергоатомиздат, 1992. 224 с.
3. *Согомонян Е. С., Слабаков Е. В.* Самопроверяемые устройства и отказоустойчивые системы. М.: Радио и связь, 1989. 208 с.
4. *Piestrak S. J.* Design of Self-Testing Checkers for Unidirectional Error Detecting Codes. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocłavskiej, 1995. 111 p.
5. *MacWilliams F. J., Sloane N. J. A.* The Theory of Error-Correcting Codes. Amsterdam: North-Holland, 1977. 785 p.
6. *Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В.* Классификация ошибок в информационных векторах систематических кодов // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 5. С. 333—343. DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-5-333-343.
7. *Дундуа А. А., Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Трохов В. Г.* Синтез самопроверяющихся тестеров в автоматах с обнаружением неисправностей // Автоматика и телемеханика. 1980. № 7. С. 150—160.
8. *Ostanin S.* Self-checking synchronous FSM network design for path delay faults // Proc. of 15th IEEE East-West Design & Test Symp. (EWDTS`2017), Novi Sad, Serbia, Sept. 29 — Oct. 2, 2017. P. 696—699. DOI: 10.1109/EWDTS.2017.8110129.
9. *Слабаков Е. В., Согомонян Е. С.* Построение полностью самопроверяемых комбинационных устройств с использованием равновесных кодов // Автоматика и телемеханика. 1980. № 9. С. 173—181.

10. *Слабаков Е. В., Согомонян Е. С.* Самопроверяемые вычислительные устройства и системы (обзор) // Автоматика и телемеханика. 1981. № 11. С. 147—167.
11. *Самофалов К. Г., Романкевич А. М., Валуйский В. Н., Каневский Ю. С., Пиневич М. М.* Прикладная теория цифровых автоматов / Под ред. *К. Г. Самофалова*. Киев: Вища школа, 1987. 375 с.
12. *Гессель М., Морозов А. В., Сапожников В. В., Сапожников Вл. В.* Контроль комбинационных схем методом логического дополнения // Автоматика и телемеханика. 2005. № 8. С. 161—172.
13. *Göessel M., Ocheretny V., Sogomonyan E., Marienfeld D.* New Methods of Concurrent Checking. Dordrecht: Springer Science+Business Media B.V., 2008. 184 p.
14. *Das D. K., Roy S. S., Dmitriev A., Morozov A., Gössel M.* Constraint don't cares for optimizing designs for concurrent checking by 1-out-of-3 codes // Proc. of the 10th Intern. Workshops on Boolean Problems, Freiberg, Germany, Sept., 2012. P. 33—40.
15. *Anderson D. A., Metze G.* Design on totally self-checking-check circuits for m-out-of-n codes // IEEE Transact. on Computers. 1973. Vol. C-33, iss. 3. P. 263—269.
16. *Мазнев В. И.* О синтезе самотестируемых $1/p$-тестеров // Автоматика и телемеханика. 1978. № 9. С. 142—145.
17. *Сапожников В. В., Рабара В.* Универсальный алгоритм синтеза $1/n$-тестеров // Проблемы передачи информации. 1982. Т. 18, № 3. С. 62—73.
18. *Сапожников В. В., Сапожников Вл. В.* Универсальный алгоритм синтеза самопроверяющихся тестеров для кодов с постоянным весом // Проблемы передачи информации. 1984. Т. 20, № 2. С. 65—76.
19. *Сапожников В. В., Сапожников Вл. В.* Синтез быстродействующих тестеров для кодов с постоянным весом // Проблемы передачи информации. 1988. Т. 24, № 4. С. 84—92.
20. *Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Цегловски Л.* Синтез самопроверяющихся m/n-тестеров с максимальным быстродействием // Автоматика и телемеханика. 1988. № 10. С. 139—154.
21. *Сапожников В. В., Сапожников Вл. В.* Самопроверяемые тестеры для равновесных кодов // Автоматика и телемеханика. 1992. № 3. С. 3—35.
22. *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 Symp. (IOLTS'03), Kos Island, Greece, 7—9 July, 2003. P. 49—53.
23. *Матросова А. Ю., Буторина Н. Б., Якимова Н. О.* Синтез детекторов равновесных кодов с использованием монотонных функций // Изв. вузов. Физика. 2013. Т. 56, № 9-2. С. 171—173.
24. *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.
25. *Ромащенко А. Е., Румянцев А. Ю., Шень А.* Заметки по теории кодирования. М.: Изд-во МЦНМО, 2011. 80 с.
26. *Nikolos D.* Self-testing embedded two-rail checkers // J. of Electronic Testing: Theory and Applications. 1998. Vol. 12, iss. 1—2. P. 69—79. DOI: 10.1023/A:1008281822966.

Сведения об авторе

Дмитрий Викторович Ефанов — д-р техн. наук, доцент; ООО „ЛокоТех-Сигнал“; Российский университет транспорта, кафедра автоматики, телемеханики и связи на железнодорожном транспорте; E-mail: dmitrii.efanov@locotech-signal.ru; TrES-4b@yandex.ru

Поступила в редакцию
29.03.19 г.

Ссылка для цитирования: *Ефанов Д. В.* Некоторые особенности обнаружения ошибок равномерными неразделимыми кодами // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 7. С. 621—631.

SOME FEATURES OF ERROR DETECTION BY UNIFORM INDIVISIBLE CODES

D. V. Efanov

LocoTech-Signal Ltd., 107113, Moscow, Russia

Russian University of Transport, 127994, Moscow, Russia
E-mail: dmitrii.efanov@locotech-signal.ru; TrES-4b@yandex.ru

Properties of indivisible uniform codes belonging to the class of equilibrium and the class of Hadamard codes are analyzed. The codes under consideration are widely used in data transmission and in organization of controllable discrete systems. The key characteristics of both classes of indivisible codes to be accounted for when building controllable devices and automation systems, are established. Formulas for calculating the number of errors not detected by the considered codes are presented. Characteristic tables for equilibrium codes and Hadamard codes are given. A noted feature of equilibrium codes “1 out of m” which is not characteristic of other equilibrium codes, is the ability to detect any distortions in code words except for double symmetrical errors. It is proposed to apply the Hadamard codes when organizing self-verifying embedded control schemes based on the logical addition method.

Keywords: equilibrium codes, error detection by equilibrium codes, undetectable error, code features, technical diagnostics of discrete systems

REFERENCES

1. Freiman C.V. *Information and Control*, 1962, no. 1(5), pp. 64–71. DOI: 10.1016/S0019-9958(62)90223-1.
2. Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov Vl.V. *Samoproveryaemye diskretnyye ustroystva* (Self-Checked Discrete Devices), St. Petersburg, 1992, 224 p. (in Russ.)
3. 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.)
4. Piestrak S.J. *Design of Self-Testing Checkers for Unidirectional Error Detecting Codes*, Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocłavskiej, 1995, 111 p.
5. MacWilliams F.J., Sloane N.J.A. *The Theory of Error-Correcting Codes*, Amsterdam, North-Holland, 1977, 785 p.
6. Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov Vl.V., Efanov D.V. *Journal of Instrument Engineering*, 2015, no. 5(58), pp. 333–343. DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-5-333-343.
7. Dundua A.A., Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov V.V., Trokhov V.G. *Automation and Remote Control*, 1980, no. 7, pp. 150–160. (in Russ.)
8. Ostanin S. *Proceedings of 15th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS`2017)*, Novi Sad, Serbia, September 29–October 2, 2017, pp. 696–699. DOI: 10.1109/EWDTS.2017.8110129.
9. Slabakov E.V., Sogomonyan E.S. *Automation and Remote Control*, 1980, no. 9, pp. 173–181. (in Russ.)
10. Slabakov E.V., Sogomonyan E.S. *Automation and Remote Control*, 1981, no. 11, pp. 147–167. (in Russ.)
11. Samofalov K.G., Romankevich A.M., Valuyskiy V.N., Kanevskiy Yu.S., Pinevich M.M. *Prikladnaya teoriya tsifrovykh avtomatov* (Applied Theory of Digital Machines), Kyiv, 1987, 375 p. (in Russ.)
12. Göessel M., Morosov A.V, Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov Vl.V. *Automation and Remote Control*, 2005, no. 8, pp. 161–172. (in Russ.)
13. 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.
14. 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.
15. Anderson D.A., Metze G. *IEEE Transaction on Computers*, 1973, no. 3(C-33), pp. 263–269.
16. Maznev V.I. *Automation and Remote Control*, 1978, no. 9, pp. 142–145. (in Russ.)
17. Sapozhnikov V.V., Rabara V. *Problems of Information Transmission*, 1982, no. 3(18), pp. 62–73. (in Russ.)
18. Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov Vl.V. *Problems of Information Transmission*, 1984, no. 2(20), pp. 65–76. (in Russ.)
19. Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov Vl.V. *Problems of Information Transmission*, 1988, no. 4(24), pp. 84–92.
20. Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov Vl.V., Tseglovski L. *Automation and Remote Control*, 1988, no. 10, pp. 139–154. (in Russ.)
21. Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov Vl.V. *Automation and Remote Control*, 1992, no. 3, pp. 3–35. (in Russ.)
22. Matrosova A., Ostrovsky V., Levin I., Nikitin K. *Proceedings of the 9th IEEE International On-Line Testing Symposium (IOLTS’03)*, Kos Island, Greece, 7–9 July 2003, pp. 49–53.
23. Matrosova A.Yu., Butorina N.B., Yakmova N.O. *Russian Physics Journal*, 2013, no. 9-2(56), pp. 171–173. (in Russ.)
24. Efanov D.V., Sapozhnikov V.V. *Automation and Remote Control*, 2018, no. 9(79), pp. 1609–1620.

25. Romashchenko A.E., Rumyantsev A.Yu., Shen' A. *Zametki po teorii kodirovaniya* (Notes on Coding Theory), Moscow, 2011, 80 p. (in Russ.)
26. Nikolos D. *Journal of Electronic Testing: Theory and Applications*, 1998, no. 1-2(12), pp. 69–79. DOI: 10.1023/A:1008281822966.

Data on author

Dmitry V. Efanov — Dr. Sci., Associate Professor; LocoTech-Signal Ltd.; Russian University of Transport, Department of Automation and Telemechanics on Railway Transport; E-mail: dmitrii.efanov@locotech-signal.ru; TrES-4b@yandex.ru

For citation: Efanov D. V. Some features of error detection by uniform indivisible codes. *Journal of Instrument Engineering*. 2019. Vol. 62, N 7. P. 621—631 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-7-621-631