

УДК 681.518.5:004.052.32

В. А. Шагина

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

ДВУХМОДУЛЬНЫЕ КОДЫ С СУММИРОВАНИЕМ ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ СИСТЕМ АВТОМАТИКИ С ОБНАРУЖЕНИЕМ НЕИСПРАВНОСТЕЙ

Анализируются способы построения кодов с суммированием единичных информационных разрядов. Отмечается, что известные модульные коды с суммированием (или остаточные коды, или коды Боуза–Лина) не являются единственным классом кодов с малой избыточностью, которые можно применять при решении задач технической диагностики и синтезе контролепригодных дискретных систем. Вводится понятие многомодульного кода с суммированием и его подкласса – двухмодульного кода. Приведены результаты исследований двухмодульных кодов с суммированием, отмечаются преимущества и недостатки двухмодульных кодов с суммированием. Дана классификация кодов с суммированием единичных информационных разрядов.

техническая диагностика, дискретные системы, код с суммированием, код Бергера, модульный код с суммированием, код Боуза–Лина, двухмодульный код, информационный вектор, ошибка в информационном векторе.

DOI: 10.20295/2412-9186-2019-5-2-256-274

Введение

С конца прошлого столетия и по настоящее время в промышленности и на транспорте активно внедряются микропроцессорные системы автоматического и автоматизированного управления ответственными технологическими процессами [1–4]. Микропроцессорные устройства обладают рядом неоспоримых преимуществ перед релейными системами, главными из которых являются быстрдействие, малые габариты и, как следствие, малая площадь помещений, занимаемая оборудованием, а также гибкая логика. Ввиду того, что микропроцессорные системы строятся из элементов с симметричными характеристиками отказов, таких как транзисторы, диоды и многие другие, появляется задача обеспечения надежности и безопасности их функционирования [5].

Одним из наиболее известных аппаратных способов резервирования является дублирование, которое предполагает наличие копии контролируемого устройства и сравнения значений вычисляемых функций специальной схемой сравнения с получением на выходе сигнала контроля [6, 7]. Такая система

позволяет обнаруживать любые одиночные неисправности в контролируемых блоках и является достаточно простой в плане построения. Однако этот способ реализации контролепригодного устройства обладает большой структурной избыточностью. Поэтому часто для решения задачи обнаружения неисправностей используются системы функционального (рабочего) контроля, в основу которых положено использование каких-либо помехозащищенных кодов [8, 9]. Такие системы позволяют обеспечивать тестирование устройства без отключения его от объектов управления, что является немаловажным достоинством при использовании устройств «под нагрузкой» непрерывно. Задачей систем функционального контроля является только обнаружение ошибок на выходах контролируемого устройства. Задачу исправления или локализации дефекта, приводящего к искажению вычисляемых функций, системы функционального контроля не решают. Говоря о микропроцессорных системах, поиск места неисправности зачастую не требуется производить, так как достаточно перезагрузить устройство или же заменить отказавший блок [10].

Существует большое разнообразие помехозащищенных кодов [11]. Нередко для организации систем функционального контроля используются разделимые (m, k) -коды, где m – длина информационного вектора, k – длина контрольного вектора [12]. Известно достаточно много способов построения помехозащищенных кодов, применяемых в задачах синтеза систем автоматизации с обнаружением неисправностей, например классические и модифицированные коды с суммированием, полиномиальные коды, коды Хэмминга и т. д. [13–17].

Данная статья обращает внимание читателя на класс перспективных, по мнению автора, кодов для задач организации систем автоматизации с обнаружением неисправностей – двухмодульных кодов с суммированием единичных информационных разрядов.

1. Многомодульные коды с суммированием

Многомодульные коды с суммированием являются широким классом кодов, куда входят и известные коды [12]. Принцип построения многомодульных кодов с суммированием заключается в разбиении информационного вектора на i подвекторов, которые будут иметь длины в диапазоне $[1, m]$, подсчете веса r_i (количества единичных разрядов) подвекторов по заранее установленным модулям M_i . Полученные наименьшие неотрицательные вычеты весов подвекторов $r_i(\text{mod } M_i)$ в двоичном виде записываются в разряды контрольного вектора $k_i = \log_2 M_i$.

Таким образом, варьируя модули и пересечения подмножеств разрядов подвекторов, а также количество разрядов в подвекторах, получают целые семейства многомодульных кодов с суммированием. Все они будут

иметь как схожие свойства по обнаружению ошибок, так и уникальные для каждого способа построения кода. Стоит отметить, что при пересечении разрядов подвекторов каждый разряд информационного вектора должен контролироваться для обеспечения свойства помехозащищенности кода.

Стоит отметить, что длина контрольного вектора будет зависеть как от способа выбора модуля подсчета, так и от количества подвекторов в информационном векторе. Ввиду этого при малом количестве выходов объекта диагностирования (до 20) не считается целесообразным применять трех- и четырехмодульные коды, так как они будут иметь большую избыточность и высокую сложность реализации.

Одним из наиболее целесообразных вариантов многомодульных кодов является двухмодульный код, способ построения которого был предложен в [18]. Рассмотрим алгоритм получения контрольных слов двухмодульного кода.

Алгоритм построения двухмодульного кода с суммированием

1. Устанавливаются значения модулей $M_1 \in [2, 4, \dots, 2^i]$ и $M_2 \in [2, 4, \dots, 2^i]$, где i – числа $1, 2, \dots, N$.

2. Из полного множества разрядов $Q = m$ выделяются два подмножества разрядов $D_1 \in [1, \dots, m]$ и $D_2 \in [1, \dots, m]$ такие, что $D_1 \cap D_2 = \emptyset$.

3. Подмножества разрядов D_1 и D_2 объединяются в подвекторы V_1 и V_2 соответственно.

4. Определяются наименьшие неотрицательные вычеты $r_1(\text{mod } M_1)$ и $r_2(\text{mod } M_2)$ весов подвекторов V_1 и V_2 соответственно.

5. Числа $r_1(\text{mod } M_1)$ и $r_2(\text{mod } M_2)$ в бинарной форме заносятся в $k_1 = \log_2 M_1$ младших разрядов и $k_2 = \log_2 M_2$ старших разрядов контрольного вектора соответственно.

Код, контрольные слова которого получают в соответствии с приведенным выше алгоритмом, получил название $TM(M_1/M_2)(m, k, D_1/D_2)$ -код (*Two-modulus codes*), где M_1/M_2 – установленные модули подсчета весов первого и второго подвекторов соответственно; D_1/D_2 – количество разрядов в первом и втором подмножествах соответственно. Получаемый таким образом код всегда будет иметь фиксированное значение контрольных разрядов. В ряде работ соавторов [19–22] исследуются двухмодульные коды со значениями обоих модулей $M_1 = M_2 = 4$. А в статье [23] представлен двухмодульный код с числом контрольных разрядов, как у классического кода с суммированием.

Например, на рис. 1 представлен способ образования контрольных слов для $TM(8 + 4)(8, 5, 6/4)$.

Как отмечено выше, в зависимости от количества разрядов в подвекторах, а также от различных пересечений самих подвекторов образуется целое семейство двухмодульных кодов для различных длин информацион-

ных векторов t . Наглядно это удобно представить в виде матрицы кодов (рис. 2); например, для $t = 8$ и установленных модулей $M_1 = 8$ и $M_2 = 4$ можно построить 32 различных кода.

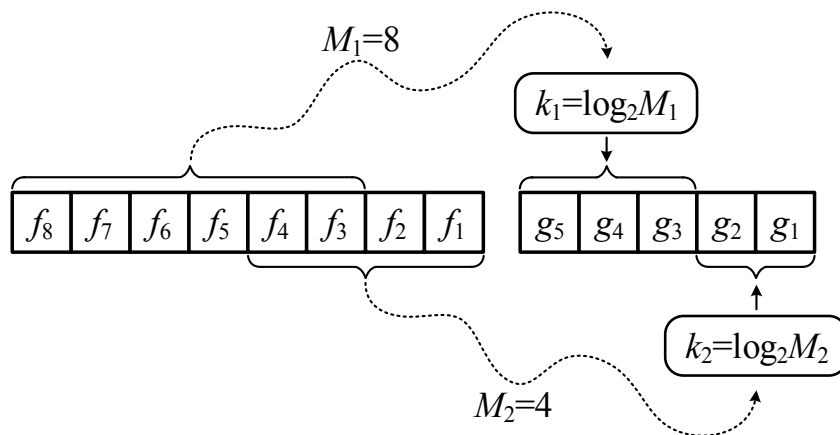


Рис. 1. Формирование контрольного вектора для $TM(8/4)(8,5,6/4)$ -кода

Подмножество $D_1, M_1=8$

		0	1	2	3	4	5	6	7	8
Подмножество $D_2, M_2=4$	0	-	-	-	-	-	-	-	-	S8
	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2	-	-	-	-	-	-	TM	TM	TM
	3	-	-	-	-	-	TM	TM	TM	TM
	4	-	-	-	-	TM	TM	TM	TM	TM
	5	-	-	-	-	TM	TM	TM	TM	TM
	6	-	-	-	-	TM	TM	TM	TM	TM
	7	-	-	-	-	TM	TM	TM	TM	TM
	8	S4	-	-	-	TM	TM	TM	TM	TM

Рис. 2. Матрица для $TM(8/4)(8, 5, D_1/D_2)$ -кодов

Рассмотрим данную матрицу: по горизонтали и по вертикали располагаются количества разрядов в первом подмножестве D_1 и во втором подмножестве D_2 . Знаком «-» отмечены те коды, которые не являются помехоустойчивыми, то есть при пересечении подмножеств D_1 и D_2 не образуется полное множество разрядов Q , например на пересечении 5-й строки и

2-го столбца матрицы. Стоит также отметить, что ввиду бинарной логики на свойства кодов не влияет тот факт, какие именно разряды входят в подмножества, на самом деле они зависят от взаимного пересечения подмножеств D_1 и D_2 , а также от количества разрядов в этих подмножествах. Поэтому коды, расположенные в матрице симметрично относительно главной диагонали $(0,0)–(8,8)$, имеют одинаковые характеристики. При подсчете веса по модулю $M = 4$ из-за равнозначности разрядов минимальное количество разрядов в подмножестве равно двум, а при $M = 8$ – четырем.

Также можно заметить, что в матрице располагаются уже известные модульные коды с суммированием (коды Боуза–Лина), отмеченные как S_4 , S_8 , они являются частным случаем двухмодульных кодов.

2. Классификация двухмодульных кодов с суммированием

Двухмодульные коды с суммированием являются обобщением ранее известных классических и модифицированных кодов. Это объясняется способом выбора подсчета модулей. В соответствии с этим можно представить следующую классификацию $TM(M_1/M_2)(m,k,D_1/D_2)$ -кодов (рис. 3).

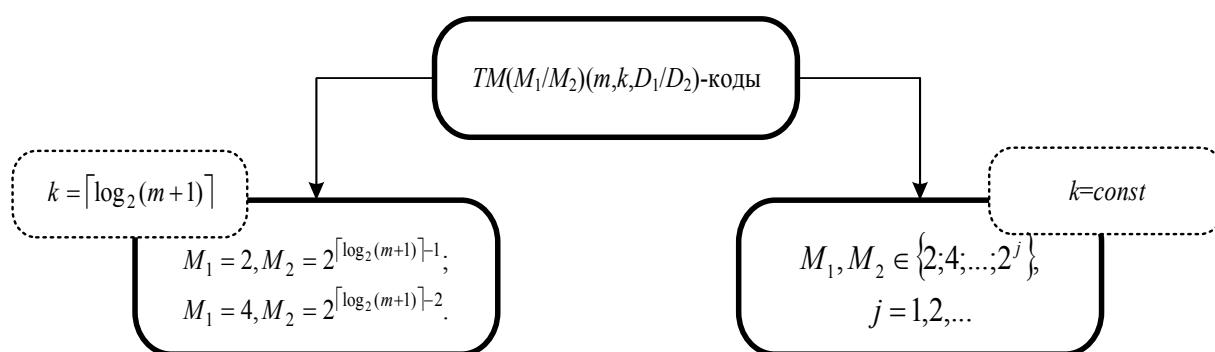


Рис. 3. Классификация двухмодульных кодов с суммированием

Нетрудно заметить, что если модули зависят от длины информационного вектора m , то, соответственно, и количество контрольных разрядов будет зависеть от значения числа m , а если модули выбираются из множества чисел, являющихся степенями числа два, то количество контрольных разрядов будет фиксированным для любой длины информационного вектора m .

Двухмодульные коды, описываемые в данной статье, принадлежат к кодам с фиксированным количеством контрольных разрядов $k = \text{const}$, как и модульные коды Боуза–Лина [24], обозначаемые как $SM(m,k)$ -коды, контрольные слова которых формируются путем записи в них наименьшего неотрицательного вычета веса всего информационного вектора в двоичном виде.

К двухмодульным кодам с количеством контрольных разрядов, зависящим от длины информационного вектора m , принадлежат предложенные в [25, 26] модифицированные коды с суммированием, такие как RS -, $RSM(m,k)$ -коды. Принцип построения таких кодов заключается в подсчете модифицированного веса информационного вектора по формуле: $W = \alpha M + r \pmod{M}$, где α – специальный поправочный коэффициент, равный сумме по модулю двух заранее выбранных информационных разрядов. Стоит отметить, что код Бергера [27] – $S(m,k)$ -код – имеет модуль $M = m + 1$ и также может быть отнесен к двухмодульным кодам с варьируемым значением контрольных разрядов в зависимости от длины m .

Раскрывая правую ветвь двухмодульных кодов с фиксированным количеством контрольных разрядов (см. рис. 3), можно представить следующую классификацию кодов (рис. 4). Данная классификация (m,k) -кодов включает в себя уже известные модульные коды с суммированием для определенной величины k , где также выделены новые двухмодульные коды, которые расширяют данную классификацию.

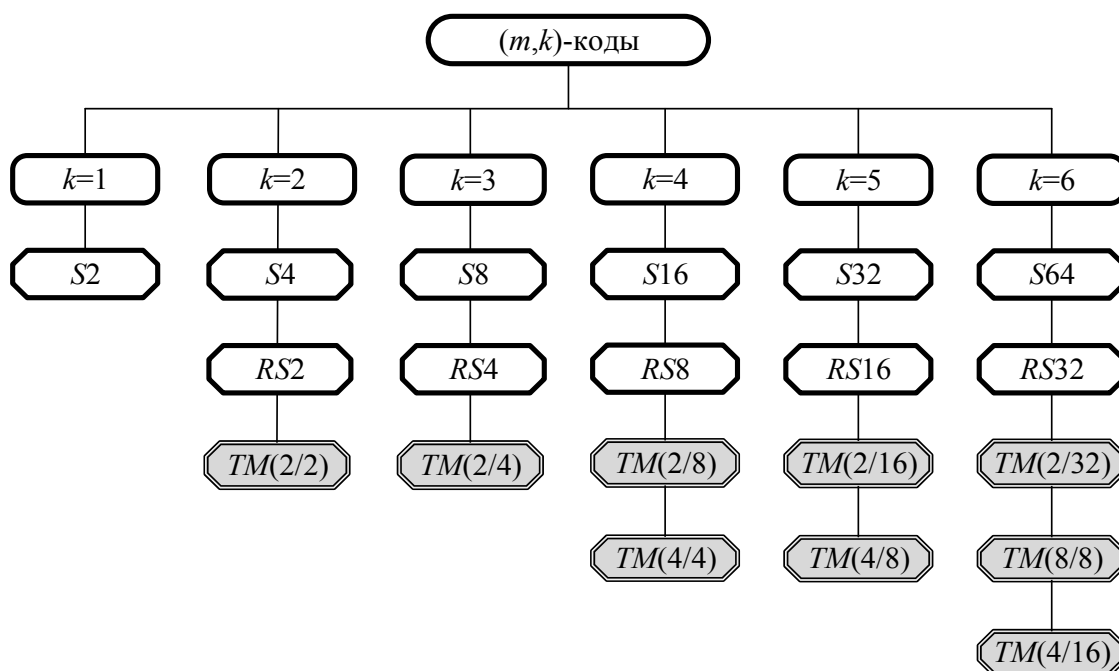


Рис. 4. Классификация двухмодульных кодов с фиксированным количеством контрольных разрядов

В соответствии со сказанным выше можно свести все коды с суммированием единичных информационных разрядов в одной матрице, где в каждой клетке отмечен конкретный код, характеризующийся выбором модулей M_1 и M_2 (рис. 5).

Представленная матрица систематизирует все ранее существующие способы построения кодов с суммированием и дает целостный образ класса кодов с суммированием единичных информационных разрядов.

$M_2 \backslash M_1$	–	2	4	8	...	$2^{\lceil \log_2(m+1) \rceil - 2}$	$2^{\lceil \log_2(m+1) \rceil - 1}$...	$m+1$
–	–	<i>S2</i>	<i>S4</i>	<i>S8</i>	...	<i>SM</i>	<i>SM</i>	...	<i>S</i>
2	<i>S2</i>	<i>RS2</i>	<i>RS4</i>	<i>RS8</i>	...	<i>RSM</i>	<i>RS</i>	...	–
4	<i>S4</i>	<i>RS4</i>	<i>TM</i>	<i>TM</i>	...	<i>TM</i>	–	...	–
8	<i>S8</i>	<i>RS8</i>	<i>TM</i>	<i>TM</i>	...	–	–	...	–
...
$2^{\lceil \log_2(m+1) \rceil - 2}$	<i>SM</i>	<i>RSM</i>	–	–	...	–	–	...	–
$2^{\lceil \log_2(m+1) \rceil - 1}$	<i>SM</i>	<i>RS</i>	–	–	...	–	–	...	–
...
$m+1$	<i>S</i>	–	–	–	...	–	–	...	–

Рис. 5. Матрица двухмодульных кодов с суммированием

3. Анализ характеристик по обнаружению ошибок класса двухмодульных кодов

Классический код Бергера имеет важное свойство: обнаруживается 100 % монотонных ошибок в информационных векторах. Однако ввиду неравномерности распределения информационных слов между контрольными не обнаруживается достаточно большое общее количество ошибок. Введение модуля для подсчета веса информационного вектора позволяет достигнуть более равномерного распределения информационных слов между контрольными, что обеспечивает уменьшение количества необнаруживаемых ошибок. Улучшенными свойствами в сравнении с классическим кодом Бергера обладают *RS(m,k)*-коды.

В статье [28] показано, что свойства кодов могут быть улучшены, так как любой разделимый (m,k) -код, у которого $k < m$, может быть сравним с некоторым оптимальным кодом по критерию минимума необнаруживаемых ошибок с помощью специального коэффициента эффективности $\xi_{m,k}$, вычисляемого по следующей формуле:

$$\xi_{m,k} = \frac{N_{m,k}^{\min}}{N_m} \cdot 100 \%,$$

где $N_{m,k}^{\min}$ – минимальное количество необнаруживаемых ошибок m,k -кодом, вычисляемое как $N_{m,k}^{\min} = 2^m (2^{m-k} - 1)$; N_m – фактическое количество необнаруживаемых ошибок m,k -кодом.

Так, например, для кода Бергера коэффициент эффективности составляет 35,152 %, а для $RS(m,k)$ -кода 72,322 %.

Двухмодульные коды могут быть сравнимы с S -, $RS(m,k)$ -кодами при длинах информационных векторов $m = 8 \dots 15$.

В таблице 1 представлен результат расчета коэффициента эффективности для S -, $RS(m,k)$ -, $TM(4+4)(m,k,D_1/D_2)$ -кодов при длине информационного вектора $m = 8$ [21].

Таблица 1. Сравнение коэффициентов эффективности S -, RS -, $TM(m,k)$ -кодов

D_1/D_2	Количество необнаруживаемых ошибок N_m			$N_{m,k}^{\min}$	Коэффициент эффективности $\xi_{m,k}$		
	S	RS	TM		S	RS	TM
8/2	12614	6216	6080	3840	30,442	61,776	63,158
8/3			5184				74,074
8/4			4928				77,922
8/5			5184				74,074
8/6			6080				63,158
8/7			8064				47,619
8/8			16 256				23,622
7/2			6016				63,83
7/3			5056				75,949
7/4			4672				82,192
7/5			4672				82,192
7/6			5056				75,949
7/7			6016				63,83
7/8			8064				47,619
6/2			6080				63,158
6/3			5056				75,949
6/4			4608				83,333
6/5			4480				85,714
6/6			4608				83,333
6/7			5056				75,949
6/8			6080				63,158
5/3			5184				74,074
5/4			4672				82,192
5/5			4480				85,714
5/6			4480				85,714
5/7			4672				82,192
5/8			5184				74,074
4/4			4928				77,922
4/5			4672				82,192
4/6			4608				83,333
4/7			4672				82,192
4/8			4928				77,922
Среднее значение							72,916

На рис. 6 представлены значения коэффициентов эффективности для большей наглядности.

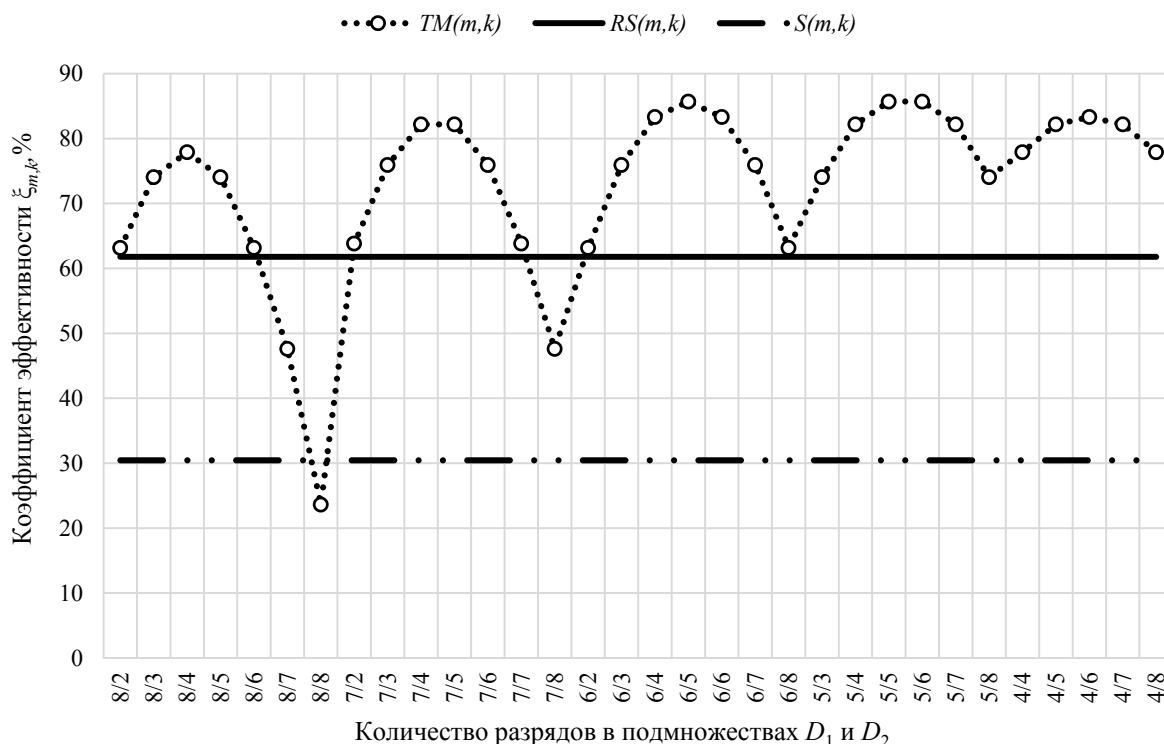


Рис. 6. Значения коэффициентов эффективности для S -, RS -, $TM(m,k)$ -кодов

Из графика видно, что для некоторых двухмодульных кодов, например при вариантах разбиения 6/5, 5/5, 7/4, значение коэффициента эффективности достигает почти 90 %. Это значит, что двухмодульные коды обладают наименьшим общим количеством необнаруживаемых ошибок, что фактически указывает на то, что они эффективнее используют свои контрольные разряды, чем сравниваемые с ним коды.

Покажем также результаты сравнения количества необнаруживаемых ошибок среди рассматриваемых кодов с суммированием, которые представлены в таблице 2. Для этого были выведены некоторые показатели ψ^S , ψ^{RS} , вычисляемые по следующим формулам:

$$\psi^S = \frac{N^S}{N^{TM}};$$

$$\psi^{RS} = \frac{N^{RS}}{N^{TM}},$$

где N^S , N^{RS} , N^{TM} – количество необнаруживаемых ошибок S -, RS -, $TM(m,k)$ -кодами соответственно.

Если значение показателей ψ^S , ψ^{RS} больше единицы, то $TM(m,k)$ -код имеет меньшее количество необнаруживаемых ошибок.

Таблица 2. Результаты расчета значений показателей Ψ^S , Ψ^{RS}

D_1/D_2	Количество необнаруживаемых ошибок N_m			Ψ^S	Ψ^{RS}
	$S(m,k)$	$RS(m,k)$	$TM(4+4)(m,k, D_1/D_2)$		
8/2	12614	6216	6080	2,075	1,022
8/3			5184	2,433	1,199
8/4			4928	2,560	1,261
8/5			5184	2,433	1,199
8/6			6080	2,075	1,022
8/7			8064	1,564	0,771
8/8			16 256	0,776	0,382
7/2			6016	2,097	1,033
7/3			5056	2,495	1,229
7/4			4672	2,700	1,330
7/5			4672	2,700	1,330
7/6			5056	2,495	1,229
7/7			6016	2,097	1,033
7/8			8064	1,564	0,771
6/2			6080	2,075	1,022
6/3			5056	2,495	1,229
6/4			4608	2,737	1,349
6/5			4480	2,816	1,388
6/6			4608	2,737	1,349
6/7			5056	2,495	1,229
6/8			6080	2,075	1,022
5/3			5184	2,433	1,199
5/4			4672	2,700	1,330
5/5			4480	2,816	1,388
5/6			4480	2,816	1,388
5/7			4672	2,700	1,330
5/8			5184	2,433	1,199
4/4			4928	2,560	1,261
4/5			4672	2,700	1,330
4/6			4608	2,737	1,349
4/7			4672	2,700	1,330
4/8			4928	2,560	1,261
Среднее значение				2,4	1,18

Анализируя таблицу 2, можно сказать, что в среднем системы функционального контроля, организованные на основе двухмодульных кодов, обнаруживают почти в 2,5 раза больше ошибок в информационных векторах, в отличие от классического кода с суммированием – $S(m,k)$ -кода. Для некоторых видов разбиения показатель Ψ^S стремится к значению 3.

Стоит отметить, что при такой модификации двухмодульные коды теряют свойства обнаруживать любые монотонные ошибки в информацион-

ных векторах, что присуще коду Бергера. Однако двухмодульные коды обнаруживают большее количество симметричных ошибок.

Распределение доли необнаруживаемых симметричных ошибок от общего их количества при длине информационного вектора $m = 9$ по кратностям представлено на рис. 8. Наблюдается некоторая зависимость количества необнаруживаемых ошибок от длины информационного вектора и количества разрядов в подмножестве D_1 . Так, при четном m , когда подмножество D_1 содержит четное количество разрядов, а подмножество D_2 содержит нечетное количество разрядов, или когда подмножество D_1 содержит нечетное количество разрядов, а количество разрядов в подмножестве D_2 не имеет значения, двухмодульными кодами обнаруживается 100 % симметричных ошибок кратности $d = m$. Если длина информационного вектора m – нечетное число, то двухмодульными кодами обнаруживается 100 % симметричных ошибок кратности $d = m - 1$ только в том случае, когда подмножества D_1 и D_2 содержат четное количество разрядов. Такая зависимость сохраняется и для $TM(8/4)(m,k,D_1/D_2)$ -кодов.

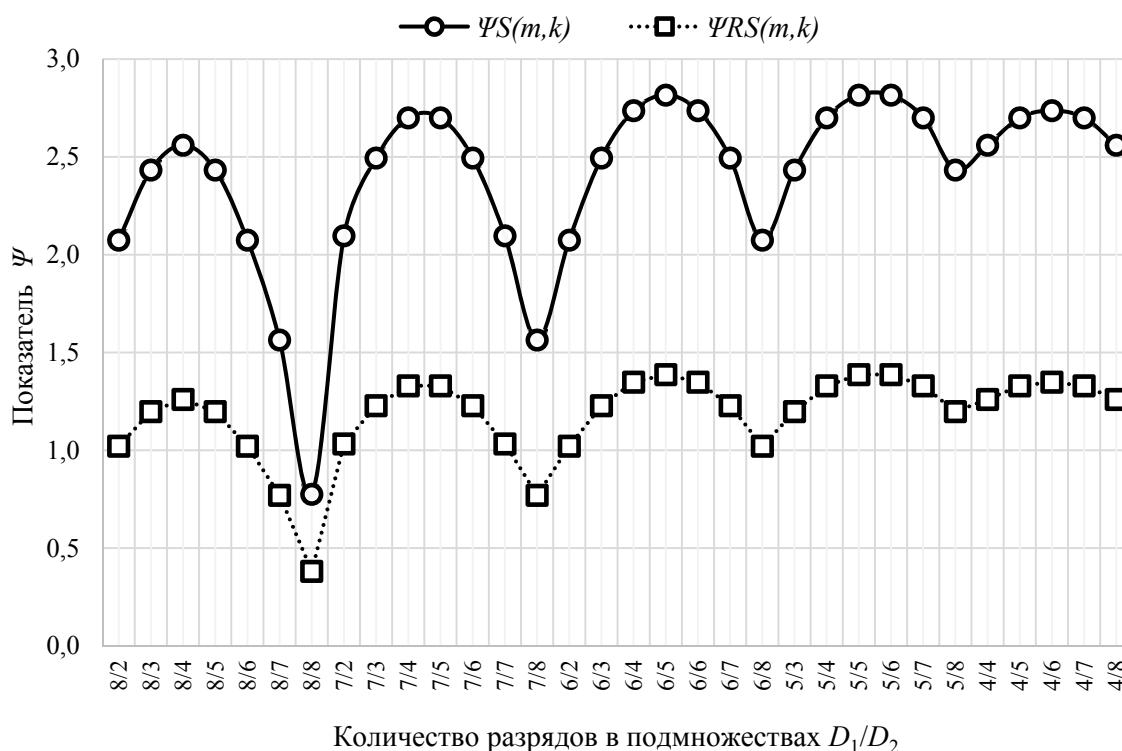


Рис. 7. Значения показателей ψ^S, ψ^{RS}

Опишем некоторые особенности обнаружения асимметричных ошибок двухмодульными кодами. Как и для симметричных ошибок, обнаружение асимметричных ошибок двухмодульными кодами также зависит от длины информационного вектора m и количества разрядов в первом и втором подмножествах D_1 и D_2 . Так, например, когда длина информационного вектора m является нечетным числом, тогда свойство обнаружения асим-

метричных ошибок кратности $d = m - 1$ будет такое же, как и при симметричных ошибках, а для обнаружения 100 % асимметричных ошибок кратности $d = m$ необходимо, чтобы соблюдалось условие: либо подмножество D_1 должно содержать четное количество разрядов и подмножество D_2 должно содержать нечетное количество разрядов, либо подмножество D_1 должно содержать нечетное количество разрядов независимо от того, какое количество разрядов будет содержаться во втором подмножестве D_2 и от длины информационного вектора m . При четном значении длины информационного вектора для обнаружения 100 % асимметричных ошибок кратностью $d = m - 1$ необходимо и достаточно, чтобы первое подмножество D_1 включало в себя четное количество разрядов. Двухмодульными кодами не обнаруживаются все ошибки кратностью $d = 6$. Кроме того, если одно из подмножеств содержит в себе всё множество разрядов, то двухмодульными кодами будут обнаружены все асимметричные ошибки кратностью $d = 1, 2, 3, 4, 5$.

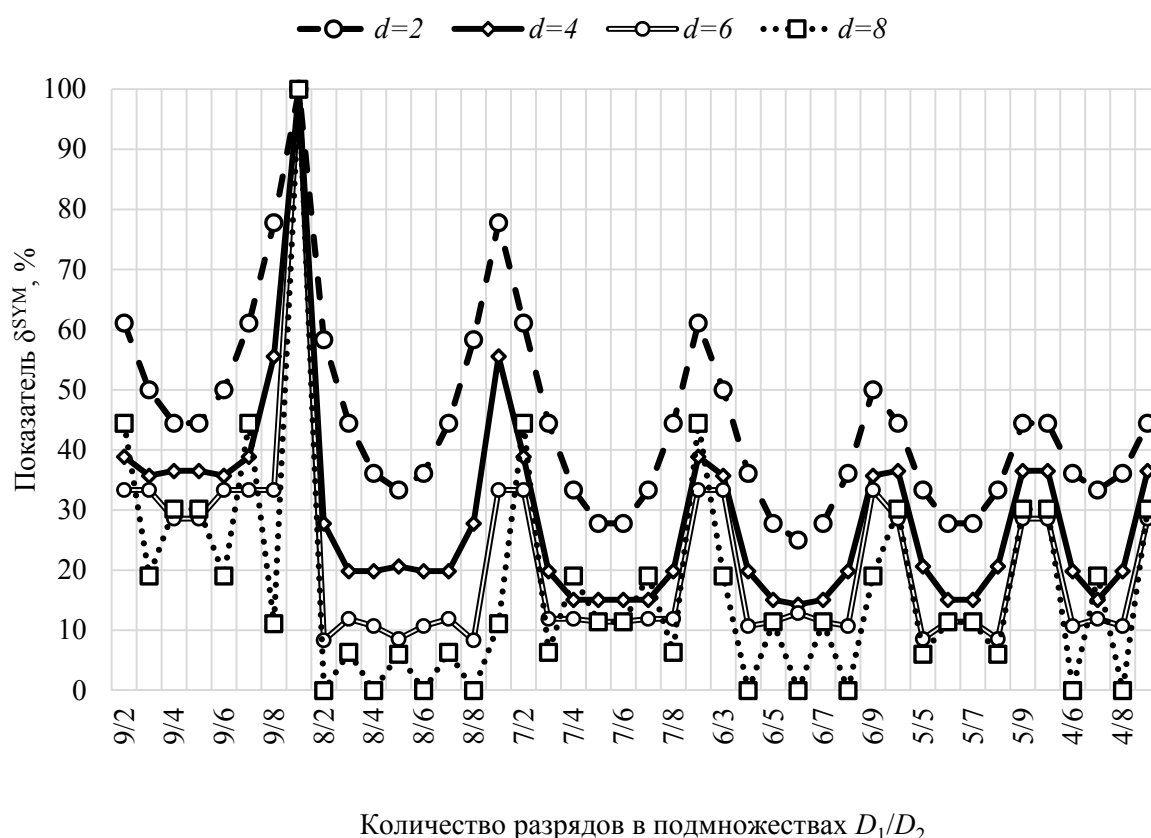


Рис. 8. Распределение доли необнаруживаемых симметричных ошибок по кратностям для $TM(4+4)(9,4,D_1/D_2)$

Стоит отметить, что, как и любые модульные коды с суммированием, двухмодульные коды сохраняют свойство не обнаруживать все монотонные ошибки кратности $d = M$. Все двухмодульные коды обнаруживают все

монотонные ошибки кратностью $d = 1, 2, 3$. На рис. 9 представлено распределение доли необнаруживаемых монотонных ошибок от общего их количества.

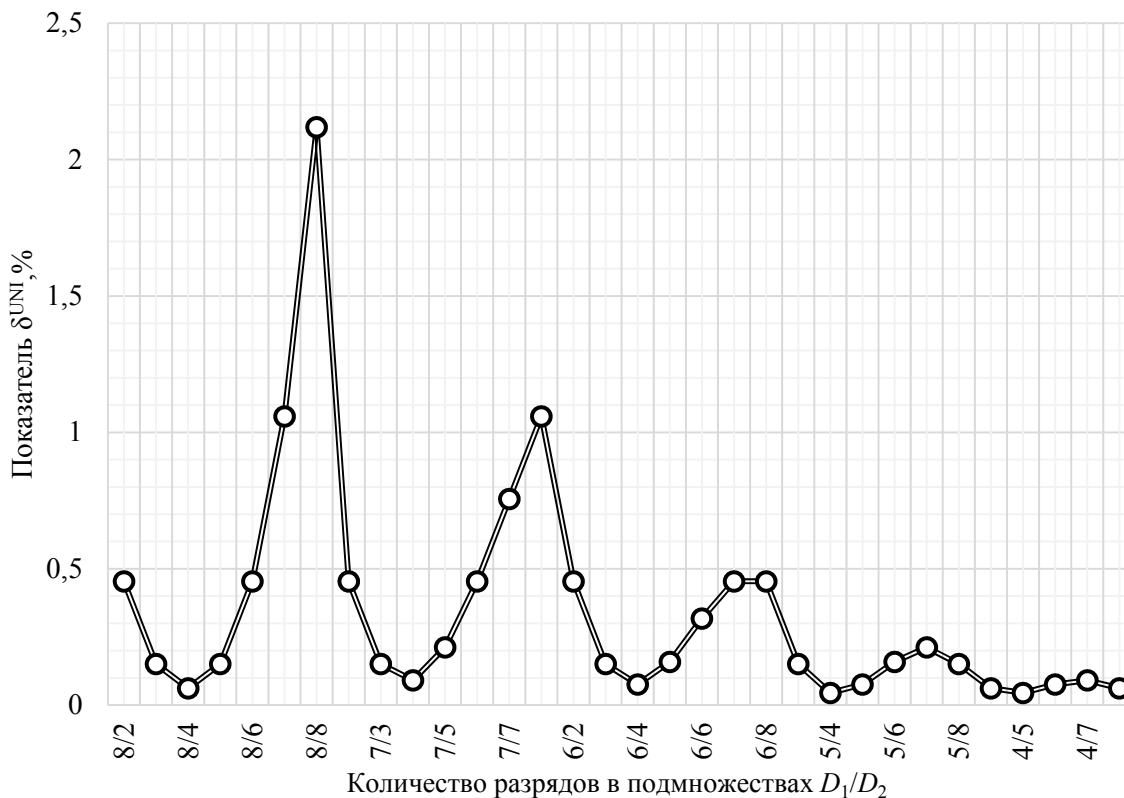


Рис. 9. Распределение доли необнаруживаемых монотонных ошибок для $TM(4+4)(8,4,D_1/D_2)$

Из графика видно, что наименьшим количеством необнаруживаемых ошибок обладают двухмодульные коды, в одном из подмножеств которых содержится количество разрядов, равное модулю счета M .

Немаловажно отметить еще одно свойство, которое заключается в том, что двухмодульными кодами обнаруживаются все ошибки нечетной кратности в том случае, если одно из подмножеств содержит в себе все разряды информационного вектора или одно из подмножеств дополняется до полного подмножества. Все указанные выше свойства принадлежат как $TM(4+4)(m,k,D_1/D_2)$ -кодам, так и $TM(8+4)(m,k,D_1/D_2)$ -кодам.

Таким образом, потеряв свойство обнаруживать 100 % однонаправленных ошибок, присущее S -, $RS(m,k)$ -кодам, $TM(M_1/M_2)(m,k,D_1/D_2)$ -коды за счет уменьшения количества необнаруживаемых симметричных ошибок способны уменьшать и общее количество необнаруживаемых ошибок, что делает эти коды своего рода «интересными» для дальнейшего их исследования и модификаций. Представленные выше утверждения о характеристиках обнаружения ошибок двухмодульными кодами могут быть полезны

для решения задач технической диагностики и организации систем с обнаружением неисправностей.

Известно, что системы функционального контроля обладают двумя основными характеристиками, такими как обнаруживающая способность и сложность технической реализации. Исследования этих характеристик подробно изложены в статье [21], где показано, что системы функционального контроля, организованные на основе двухмодульных кодов, имеют высокую обнаруживающую способность в сравнении с уже известными кодами с суммированием, а также меньшую структурную избыточность.

Заключение

Все модульные коды, классические и модифицированные коды с суммированием единичных информационных разрядов, изученные ранее, как теперь известно, являются частными случаями двухмодульных кодов. Исследование свойств и характеристик двухмодульных кодов позволило представить целостный образ кодов с суммированием. Главной особенностью описанного класса двухмодульных кодов является их многообразие и вариативность. Благодаря уникальным свойствам каждого двухмодульного кода разработчику на этапе проектирования системы функционального контроля предоставляется возможность подобрать такой код, который будет удовлетворять заданным требованиям как по обнаруживающей способности системы, так и по сложности ее реализации.

Надо отметить, что предложенный способ образования контрольных разрядов не является единственным, в дальнейшем контрольные слова могут быть образованы за счет не только суммирования по модулю единичных разрядов информационного вектора, но и весов этих разрядов, а также переходов между ними [29–31]. Показанное в статье превосходство двухмодульных кодов по сравнению с уже существующими кодами с суммированием дает перспективу дальнейшего их изучения и модификации.

Библиографический список

1. Pradhan D. K. Fault-Tolerant Computer System Design. – New York : Prentice Hall, 1996. – 560 p.
2. 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.
3. Hahanov V. Cyber Physical Computing for IoT-driven Services. – New York, Springer International Publishing AG, 2018. – 279 p.
4. Theeg G., Vlasenko S. Railway Signalling & Interlocking: 2nd Edition. – Germany, Hamburg: PMC Media House GmbH, 2018. – 458 p.

5. Сапожников В. В. Методы построения безопасных микроэлектронных систем железнодорожной автоматики / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Х. А. Христов, Д. В. Гавзов ; под ред. Вл. В. Сапожникова. – М. : Транспорт, 1995. – 272 с.
6. Goessel M., Graf S. Error Detection Circuits. – London : McGraw-Hill, 1994. – 261 p.
7. Borecký J., Kohlík M., Kubátová H. Parity Driven Reconfigurable Duplex System // *Microprocessors and Microsystems*. – 2017. – Vol. 52. – Pp. 251–260. – DOI: 10.1016/j.micpro.2017.06.015.
8. Согомоян Е. С., Слабаков Е. В. Самопроверяемые устройства и отказоустойчивые системы. – М. : Радио и связь, 1989. – 208 с.
9. Nicolaidis M., Zorian Y. On-Line Testing for VLSI – A Compendium of Approaches // *Journal of Electronic Testing: Theory and Application*. – 1998. – Vol. 12. – Issue 1–2. – Pp. 7–20. – DOI: 10.1023/A:1008244815697.
10. Дрозд А. В. Рабочее диагностирование безопасных информационно-управляющих систем / А. В. Дрозд, В. С. Харченко, С. Г. Антошук и др. ; под ред. А. В. Дрозда и В. С. Харченко. – Харьков : Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», 2012. – 614 с.
11. Ryan W. E., Lin S. Channel Codes: Classical and Modern. – Cambridge University Press, 2009. – 708 p.
12. Efanov D., Sapozhnikov V., Sapozhnikov V. Generalized Algorithm of Building Summation Codes for the Tasks of Technical Diagnostics of Discrete Systems // *Proceedings of 15th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2017)*, Novi Sad, Serbia, September 29 – October 2, 2017. – Pp. 365–371. – DOI: 10.1109/EWDTS.2017.8110126.
13. Sellers F. F., Hsiao M.-Y., Bearnson L. W. Error Detecting Logic for Digital Computers. – New York : McGraw-Hill, 1968, XXI + 295 p.
14. Piestrak S.J. Design of Self-Testing Checkers for Unidirectional Error Detecting Codes. – Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 1995. – 111 p.
15. Fujiwara E. Code Design for Dependable Systems: Theory and Practical Applications. – John Wiley & Sons, 2006. – 720 p.
16. Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В. Коды Хэмминга в системах функционального контроля логических устройств. – СПб. : Наука, 2018. – 151 с.
17. Stempkovskiy A., Telpukhov D., Gurov S., Zhukova T., Demeneva A. R-code for concurrent error detection and correction in the logic circuits // *2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*, 29 January – 1 February 2018, Moscow, Russia. – Pp. 1430–1433. – DOI: 10.1109/EIConRus.2018.8317365.
18. Efanov D., Sapozhnikov V., Sapozhnikov V. Generic Two-Modulus Sum Codes for Technical Diagnostics of Discrete Systems Problems // *Proceedings of 14th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2016)*, Yerevan, Armenia, October 14–17, 2016. – Pp. 256–260. – DOI: 10.1109/EWDTS.2016.7807713.
19. Efanov D., Sapozhnikov V., Sapozhnikov V., Schagina V. The Analysis of Two-Modulus Codes Detection Ability with Summation of Unit Data Bits Compared to Classical and Modified Berger Codes // *Proceedings of 15th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2017)*, Novi Sad, Serbia, September 29 – October 2, 2017. – Pp. 141–148. – DOI: 10.1109/EWDTS.2017.8110134.
20. Efanov D. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V. Two-Modulus Codes with Summation of One-Data Bits for Technical Diagnostics of Discrete Systems // *Automatic Control and Computer Sciences*. – 2018. – Vol. 52. – Issue 1. – Pp. 1–12. – DOI: 10.3103/S0146411618010029.
21. Сапожников В. В. Двухмодульные коды с суммированием единичных информационных разрядов в эксперименте по анализу структурной избыточности и обнаруживающей способности систем функционального контроля / В. В. Сапожников,

- Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов, В. А. Щагина // Информатика и системы управления. – 2018. – № 1. – С. 75–87. – DOI: 10.22250/isu.2018.55.75-87.
22. Ефанов Д. В. Исследование двухмодульных кодов с суммированием единичных разрядов со счетом по модулю четыре / Д. В. Ефанов, В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Электронное моделирование. – 2018. – Том 40. – № 4. – С. 29–54. – DOI: 10.15407/emodel.40.04.029.
 23. Ефанов Д. В. Двухмодульные коды с суммированием – эффективный класс разделимых кодов для синтеза диагностического обеспечения устройств и систем управления // Информационные технологии. – 2019. – Том 25. – № 1. – С. 26–34. – DOI: 10.17587/it.25.26-34.
 24. Das D., Touba N.A. Synthesis of Circuits with Low-Cost Concurrent Error Detection Based on Bose-Lin Codes // Journal of Electronic Testing: Theory and Applications. – 1999. – Vol. 15. – Issue 1–2. – Pp. 145–155. – DOI: 10.1023/A:1008344603814.
 25. Блюдов А. А. О кодах с суммированием единичных разрядов в системах функционального контроля / А. А. Блюдов, Д. В. Ефанов, В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. – 2014. – № 8. – С. 131–145.
 26. Сапожников В. В. Эффективный способ модификации кодов с суммированием единичных информационных разрядов / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов // Известия вузов. Приборостроение. – 2017. – Т. 60. – № 11. – С. 1020–1032. – DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-11-1020-1032.
 27. Berger J. M. 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.
 28. Блюдов А. А. Построение модифицированного кода Бергера с минимальным числом необнаруживаемых ошибок информационных разрядов / А. А. Блюдов, Д. В. Ефанов, В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Электронное моделирование. – 2012. – Том 34. – № 6. – С. 17–29.
 29. Сапожников В. В. Новые структуры систем функционального контроля логических схем / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов, В. В. Дмитриев // Автоматика и телемеханика. – 2017. – № 2. – С. 127–143.
 30. Сапожников В. В. Модульно-взвешенные коды с суммированием с наименьшим общим числом необнаруживаемых ошибок в информационных векторах / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов // Электронное моделирование. – 2017. – Том 39. – № 4. – С. 69–88.
 31. Дмитриев В. В. Коды с суммированием с эффективным обнаружением двукратных ошибок для организации систем функционального контроля логических устройств / В. В. Дмитриев, Д. В. Ефанов, В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. – 2018. – № 4. – С. 105–122.

Vladislava A. Schagina

«Automation and remote control on railways» department
Emperor Alexander I St. Petersburg state transport university

Two-modulo codes with summation for the organization of automation systems with fault detection

The article analyzes the methods of formation of codes with the summation of data bits. It is noted that the well-known modular codes with summation (either residual codes or Bose-Lin codes) are not the only class of codes with low redundancy that can be used in solving

problems of technical diagnostics and synthesis of test-able digital systems. The concept of multi-module code with summation and its subclass – two-module code is introduced. The results of studies of two-module codes with summation are presented, the advantages and disadvantages of two-module codes with summation are noted. The classification of codes with the summation of data bits is given.

technical diagnostics, digital systems, code with summation, Berger code, modular code with summation, Bose-Lin code, two-module code, data vector, error in the data vector.

References

1. Pradhan D. K. (1996) *Fault-Tolerant Computer System Design*. – New York : Prentice Hall, 1996. – 560 p.
2. 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, 2011. – 578 p.
3. Hahanov V. (2018) *Cyber Physical Computing for IoT-driven Services*. – New York, Springer International Publishing AG. – 279 p.
4. Theeg G., Vlasenko S. (2018) *Railway Signalling & Interlocking: 2nd Edition*. – Germany, Hamburg: PMC Media House GmbH, 2018. – 458 p.
5. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V., Khristov Kh. A., Gavzov D. V. (1995) *Methods for building safety microelectronic systems for railway automatics [Metody postroeniya bezopasnyh mikroelektronnyh sistem zheleznodorozhnoj avtomatiki]*, ed. Vl. V. Sapozhnikov, Moscow : Transport, 1995. – 272 p.
6. Goessel M., Graf S. (1994) *Error Detection Circuits*. – London : McGraw-Hill, 1994. – 261 p.
7. Borecky J., Kohlik M., Kubatova H. (2017) Parity Driven Reconfigurable Duplex System, *Microprocessors and Microsystems*, 2017, Vol. 52. – Pp. 251–260. – DOI: 10.1016/j.micpro.2017.06.015.
8. Sogomonyan E. S., Slabakov E. V. (1989) *Self-checking devices and fault-tolerant systems [Samoproveryaemye ustrojstva i otkazoustojchivye sistemy]*. Moscow : Radio & Communication [Radio i svyaz’], 1989. – 208 p.
9. Nicolaidis M., Zorian Y. (1998) On-Line Testing for VLSI – A Compendium of Approaches, *Journal of Electronic Testing: Theory and Application*, 1998, Vol. 12, Issue 1–2. – Pp. 7–20. – DOI: 10.1023/A:1008244815697.
10. *Objects and Methods of On-Line Testing for Safe Instrumentation and Control Systems [Rabochee diagnostirovanie bezopasnyh informatsionno-upravlyayushchih sistem]*, A. V. Drozd, V. S. Harchenko, S. G. Antoshchuk, Yu. V. Drozd, M. A. Drozd, Yu. Yu. Sulima, Pod red. A. V. Drozda i V. S. Harchenko. – Khar’kov : Natsional’nyj aerokosmicheskij universitet im. N. E. Zhukovskogo «KhAI», 2012. – 614 p.
11. Ryan W.E., Lin S. (2009) *Channel Codes: Classical and Modern*. – Cambridge University Press, 2009. – 708 p.
12. Efanov D., Sapozhnikov V., Sapozhnikov Vl. (2017) Generalized Algorithm of Building Summation Codes for the Tasks of Technical Diagnostics of Discrete Systems // *Proceedings of 15th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS’2017)*, Novi Sad, Serbia, September 29 – October 2, 2017. – Pp. 365–37. – DOI:10.1109/EWDTS.2017.8110126.

13. Sellers F. F., Hsiao M.-Y., Bearnson L. W. (1968) Error Detecting Logic for Digital Computers. – New York : McGraw-Hill, 1968, XXI + 295 p.
14. Piestrak S. J. (1995) Design of Self-Testing Checkers for Unidirectional Error Detecting Codes. – Wrocław : Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 1995. – 111 p.
15. Fujiwara E. (2006) Code Design for Dependable Systems: Theory and Practical Applications. – John Wiley & Sons, 2006. – 720 p.
16. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V., Efanov D. V. (2018) Hamming Codes in Concurrent Error Detection Systems of Logic Devices [Kody Hemminga v sistemah funkcional'nogo kontrolya logicheskikh ustrojstv], St. Petersburg: Science [Nauka], 2018. – 151 p.
17. Stempkovskiy A., Telpukhov D., Gurov S., Zhukova T., Demeneva A. (2018) Rcode for concurrent error detection and correction in the logic circuits // 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), 29 January – 1 February 2018, Moscow, Russia. – Pp. 1430–1433. – DOI: 10.1109/EIConRus.2018.8317365.
18. Efanov D., Sapozhnikov V., Sapozhnikov Vl. (2016) Generic Two-Modulus Sum Codes for Technical Diagnostics of Discrete Systems Problems // Proceedings of 14th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2016), Yerevan, Armenia, October 14–17, 2016. – Pp. 256–260. – DOI: 10.1109/EWDTS.2016.7807713.
19. Efanov D., Sapozhnikov V., Sapozhnikov Vl., Schagina V. (2017) The Analysis of Two-Modulus Codes Detection Ability with Summation of Unit Data Bits Compared to Classical and Modified Berger Codes // Proceedings of 15th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2017), Novi Sad, Serbia, September 29 – October 2, 2017. – Pp. 141–148. – DOI: 10.1109/EWDTS.2017.8110134.
20. Efanov D. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V. (2018) Two-Modulus Codes with Summation of One-Data Bits for Technical Diagnostics of Discrete Systems // Automatic Control and Computer Sciences. – 2018. – Vol. 52. – Issue 1. – Pp. 1–12. – DOI: 10.3103/S0146411618010029.
21. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V., Efanov D. V., Schagina V. A. (2018) Two-modulus on-bits sum codes in the experiment with analysis of structural redundancy and detection capacity of functional control systems [Dvuhmodul'nye kody s summirovaniem edinichnyh informacionnyh razryadov v ehksperimente po analizu strukturnoj izbytochnosti i obnaruzhivayushchej sposobnosti sistem funkcional'nogo kontrolya], Information Science and Control Systems [Informatika i sistemy upravleniya], 2018, Issue 1. – Pp. 75–87. – DOI: 10.22250/isu.2018.55.75-87.
22. Efanov D. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V. (2018) The research of two-modulus codes with summation of ones in data bits with calculation by modulo «four» [Issledovanie dvuhmodul'nyh kodov s summirovaniem edinichnyh razryadov so schetom po modulyu chetyre], Electronic Modeling [Elektronnoe modelirovanie]. – 2018, Vol. 40, Issue 4. – Pp. 29–54. – DOI: 10.15407/emodel.40.04.029.
23. Efanov D. V. (2019) Two-modulus codes with summation – an effective class of separable codes for the synthesis of diagnostic support for devices and control systems [Dvuhmodul'nye kody s summirovaniem – ehffektivnyj klass razdelimyyh kodov dlya sinteza diagnosticheskogo obespecheniya ustrojstv i sistem upravleniya], [Informacionnye tekhnologii], 2019, Vol. 25, Issue 1. – Pp. 26–34. – DOI:10.17587/it.25.26-34.
24. Das D., Toubia N. A. (1999) Synthesis of Circuits with Low-Cost Concurrent Error Detection Based on Bose-Lin Codes // Journal of Electronic Testing: Theory and Applications, 1999, Vol. 15, Issue 1–2. – Pp. 145–155. – DOI: 10.1023/A:1008344603814.

25. Blyudov A. A., Efanov D. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov VI. V. (2014) On codes with summation of data bits in concurrent error detection systems [O kodah s summirovaniem edinichnyh razryadov v sistemah funkcional'nogo kontrolya], Automation and Remote Control [Avtomatika i telemekhanika], 2014, Issue 8. – Pp. 131–145.
26. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov VI. V., Efanov D. V. (2017) Effective method of modifying code with on-bits summation [Effektivnyj sposob modifikacii kodov s summirovaniem edinichnyh informacionnyh razryadov], Journal of Instrument Engineering [Izvestiya vuzov. Priborostroenie], 2017, Vol. 60, Issue 11. – Pp. 1020–1032, doi: 10.17586/0021-3454-2017-60-11-1020-1032.
27. Berger J. M. (1961) 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.
28. Blyudov A. A., Efanov D. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov VI. V. (2012) Formation of the Berger Modified Code with Minimum Number of Undetectable Errors of Informational Bits [Postroenie modifitsirovannogo koda Bergera s minimal'nym chislom neobnaruzhivaemyh oshibok informacionnyh razryadov], Electronic Modeling [Elektronnoe modelirovanie], 2012, Vol. 34, Issue 6. – Pp. 17–29.
29. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov VI. V., Efanov D. V., Dmitriev V. V. (2017) New structures of the concurrent error detection systems for logic circuits [Novye struktury sistem funkcional'nogo kontrolya logicheskikh skhem], Automation and Remote Control [Avtomatika i telemekhanika], 2017, Issue 2. – Pp. 127–143.
30. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov VI. V., Efanov D. V. (2017) Modulo weighted codes with summation with minimum number of undetectable errors in data vectors [Modul'no-vzveshennye kody s summirovaniem s naimen'shim obshchim chislom neobnaruzhivaemyh oshibok v informacionnyh vektorah], Electronic Modeling [Elektronnoe modelirovanie], 2017, Vol. 39, Issue 4. – Pp. 69–88.
31. Dmitriev V. V., Efanov D. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov VI. V. (2018) Sum codes with efficient detection of twofold errors for organization of concurrent error-detection systems of logical devices [Kody s summirovaniem s ehffektivnym obnaruzheniem dvukratnyh oshibok dlya organizacii sistem funkcional'nogo kontrolya logicheskikh ustrojstv], Automation and Remote Control [Avtomatika i telemekhanika], 2018, Issue 4. – Pp. 105–122.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии В. И. Хахановым
Поступила в редакцию 01.11.2018, принята к публикации 25.01.2019*

ЩАГИНА Владислава Александровна – студентка кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» факультета «Автоматизация и интеллектуальные технологии» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I;

e-mail: vladislava1997@inbox.ru

© Щагина В. А., 2019