

ВЗВЕШЕННЫЙ КОД С СУММИРОВАНИЕМ БЕЗ ОПЕРАЦИИ ПЕРЕНОСА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ДИСКРЕТНЫХ СИСТЕМ

В. В. САПОЖНИКОВ, Вл. В. САПОЖНИКОВ, Д. В. ЕФАНОВ

*Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I,
190031, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: TrES-4b@yandex.ru*

Проанализированы характеристики взвешенного кода с суммированием без операции переноса переполняемого разряда по обнаружению ошибок в самопроверяемых схемах встроенного контроля логических устройств автоматики и вычислительной техники. Показано, что описываемый код при использовании последовательности весовых коэффициентов, образующей натуральный ряд чисел, обеспечивает обнаружение любых однократных и двукратных ошибок в информационных векторах. По этому показателю предлагаемый код сравним с классическими кодами Хэмминга, однако имеет более простые функции вычисления значений контрольных разрядов. При некоторых значениях числа информационных разрядов код имеет меньшее на единицу число контрольных разрядов. Это обстоятельство позволяет организовывать самопроверяемые схемы встроенного контроля логических устройств с уменьшенной структурной избыточностью как по сравнению с дублированием, так и по сравнению с использованием для этих целей кода Хэмминга. У кодов Хэмминга лучшие характеристики обнаружения ошибок различного вида (монотонная, симметричная или асимметричная) и кратности, что определяет и большее число идентифицируемых на выходах логических устройств ошибок, чем при использовании предлагаемого взвешенного кода. Эксперименты с системами контрольных комбинационных схем LGSynth'89 и MCNC Benchmarks подтверждают теоретически полученные закономерности.

Ключевые слова: *техническая диагностика, самопроверяемая схема встроенного контроля, обнаружение неисправностей, информационный вектор, ошибка, код Хэмминга, взвешенный код с суммированием без переносов, контрольная комбинационная схема, структурная избыточность*

Введение. При построении дискретных систем с обнаружением отказов эффективно используется помехоустойчивое кодирование [1—5]. На аппаратном уровне кодирование применяются как на этапе абстрактного синтеза во избежание некорректной работы устройства при переходах из состояния в состояние, так и на этапе разработки диагностического обеспечения устройства [6—9]. Кроме того, кодирование информации применяется и на программном уровне для повышения ее достоверности при обработке и передаче между блоками и узлами устройства [10].

Техническое состояние функционирующего дискретного устройства (без отключения от управляемых объектов) позволяет контролировать самопроверяемые схемы встроенного контроля (ССВК) [11—14]. При организации систем функционального контроля также используют избыточные коды, ориентированные на обнаружение ошибок [15, 16]. Свойства выбранного на этапе проектирования ССВК избыточного кода определяют и особенности технической реализации конечного устройства — его структурную избыточность и характеристики обнаружения ошибок на выходах объекта диагностирования [17].

Избыточные коды обладают разнообразными характеристиками обнаружения ошибок, в том числе по видам и кратностям. Например, равновесные коды, классические коды

Бергера и коды с суммированием взвешенных информационных разрядов обнаруживают любые монотонные ошибки (такие ошибки связаны с наличием искажений только нулевых или только единичных разрядов) в информационных векторах [8, 9, 18]. Эта особенность приведенных кодов при синтезе ССВК используется следующим образом. Для объекта диагностирования выявляются группы монотонно независимых выходов (они в совокупности должны покрывать все множество выходов). Затем для каждой группы таких выходов строится отдельная схема контроля на основе выбранного кода с обнаружением монотонных ошибок. Выходы отдельных схем контроля объединяются на входах самопроверяемого компаратора с целью получения одного контрольного сигнала [19]. Другой подход к использованию свойств кодов с обнаружением любых монотонных ошибок предполагает преобразование структуры объекта диагностирования в структуру с монотонно независимыми выходами по специальным алгоритмам и контроль всех выходов на основе кода с обнаружением монотонных ошибок [20]. Идея использования особенностей обнаружения определенного вида ошибок кодами широко используется в теории проектирования и тестирования логических устройств.

Вследствие особенностей логических устройств и преимущественного возникновения на их выходах ошибок с малой кратностью, при организации ССВК могут быть эффективно применены коды, ориентированные на обнаружение таких ошибок. Например, к подобным кодам относятся коды Хэмминга, в информационных разрядах которых обнаруживаются любые ошибки с кратностью $d \leq 2$ [21]. Свойства кода Хэмминга, проявляющиеся при функционировании ССВК, подробно изложены в ряде работ авторов, например, в [22—26]. Исследования показали, что может быть построен разделимый код, обеспечивающий обнаружение любых ошибок при $d \leq 2$ в информационных разрядах с более простыми функциями вычисления значений контрольных разрядов, чем у кодов Хэмминга [27, 28]. Настоящая статья посвящена исследованию особенностей обнаружения ошибок в информационных векторах. Выявленные особенности позволяют эффективно применять эти коды при организации ССВК.

Принципы построения кодов с обнаружением любых двукратных ошибок в информационных разрядах. Код с эффективным обнаружением ошибок с малой кратностью строится следующим образом [27]. Путем приписывания весовых коэффициентов разрядам информационных векторов устанавливается неравнозначность между ними. При этом используются весовые коэффициенты из натурального ряда чисел: каждому разряду информационного вектора, начиная с младшего, последовательно, по мере возрастания чисел, присваиваются соответствующие весовые коэффициенты: младшему (f_1) — $w_1=1$, следующему (f_2) — $w_2=2$ и т.д. В контрольный вектор кода записывается двоичное число $[W]_2$, равное сумме весовых коэффициентов единичных разрядов информационного вектора без использования операции переноса:

$$[W]_2 = \bigoplus_{i=1}^m f_i [w_i]_2, \quad (1)$$

где f_i — i -й разряд информационного вектора ($i = \overline{1, m}$); $[w_i]_2$ — значение весового коэффициента i -го разряда информационного вектора в двоичном виде.

$$\begin{array}{r} \oplus [w_1]_2 \\ \oplus [w_3]_2 \\ \oplus [w_4]_2 \\ \hline [W]_2 \end{array} \quad \begin{array}{r} \oplus 001 \\ \oplus 011 \\ \oplus 100 \\ \hline 110 \end{array}$$

Рис. 1

Код, получаемый по представленным правилам, обозначим $SWC(m, k)$ (*sum code without carries*), где m и k — длина информационных и контрольных векторов кода. Например, для информационного вектора $\langle 1101 \rangle$ при формировании разрядов контрольного вектора требуется сложить весовые коэффициенты разрядов f_1 , f_3 и f_4 : складываются числа

$[w_1]_2=001$, $[w_3]_2=011$ и $[w_4]_2=100$ (рис. 1).

Избыточность $SWC(m,k)$ -кода характеризуется величиной $k = \lceil \log_2(m+1) \rceil$ (по этому показателю данный код соответствует классическому коду Бергера [29]). Это объясняется тем, что при формировании значений разрядов контрольных векторов используется операция сложения двоичных чисел без переноса переполняемого разряда, а максимально возможная сумма значений весовых коэффициентов имеет разрядность максимального весового коэффициента, представленного в двоичном виде: $w_{\max} = m$.

Благодаря использованию операции суммирования значений весовых коэффициентов без переносов $SWC(m,k)$ -код имеет равномерное распределение всех 2^m информационных векторов между всеми 2^k контрольными векторами. Эта особенность определяет минимальное общее число необнаруживаемых кодом ошибок при соответствующих значениях m и k [30]:

$$N_{m,k} = 2^m (2^{m-k} - 1). \quad (2)$$

Например, с использованием формулы (2) нетрудно подсчитать общее число необнаруживаемых $SWC(4,3)$ -кодом ошибок: $N_{4,3} = 2^4 (2^{4-3} - 1) = 16$.

Другой, не менее важной, особенностью $SWC(m,k)$ -кода является возможность обнаружения любых ошибок с $d \leq 2$ в информационных векторах (по этому показателю рассматриваемый код соответствует классическому коду Хэмминга, или $H(m,k)$ -коду [21]). Именно это свойство $SWC(m,k)$ -кода может быть эффективно использовано при организации ССВК логических устройств.

Таблица 1

Контрольные функции кодов $SWC(m,k)$ и $H(m,k)$

m	$SWC(m,k)$ -код	$H(m,k)$ -код
4	$g_1 = f_1 \oplus f_3;$ $g_2 = f_2 \oplus f_3;$ $g_3 = f_4$	$g_1 = f_1 \oplus f_2 \oplus f_4;$ $g_2 = f_1 \oplus f_3 \oplus f_4;$ $g_3 = f_2 \oplus f_3 \oplus f_4$
5	$g_1 = f_1 \oplus f_3 \oplus f_5;$ $g_2 = f_2 \oplus f_3;$ $g_3 = f_4 \oplus f_5$	$g_1 = f_1 \oplus f_2 \oplus f_4 \oplus f_5;$ $g_2 = f_1 \oplus f_3 \oplus f_4;$ $g_3 = f_2 \oplus f_3 \oplus f_4;$ $g_4 = f_5$
6	$g_1 = f_1 \oplus f_3 \oplus f_5;$ $g_2 = f_2 \oplus f_3 \oplus f_6;$ $g_3 = f_4 \oplus f_5 \oplus f_6$	$g_1 = f_1 \oplus f_2 \oplus f_4 \oplus f_5;$ $g_2 = f_1 \oplus f_3 \oplus f_4 \oplus f_6;$ $g_3 = f_2 \oplus f_3 \oplus f_4;$ $g_4 = f_5 \oplus f_6$
7	$g_1 = f_1 \oplus f_3 \oplus f_5 \oplus f_7;$ $g_2 = f_2 \oplus f_3 \oplus f_6 \oplus f_7;$ $g_3 = f_4 \oplus f_5 \oplus f_6 \oplus f_7$	$g_1 = f_1 \oplus f_2 \oplus f_4 \oplus f_5 \oplus f_7;$ $g_2 = f_1 \oplus f_3 \oplus f_4 \oplus f_6 \oplus f_7;$ $g_3 = f_2 \oplus f_3 \oplus f_4;$ $g_4 = f_5 \oplus f_6 \oplus f_7$
8	$g_1 = f_1 \oplus f_3 \oplus f_5 \oplus f_7;$ $g_2 = f_2 \oplus f_3 \oplus f_6 \oplus f_7;$ $g_3 = f_4 \oplus f_5 \oplus f_6 \oplus f_7;$ $g_4 = f_8$	$g_1 = f_1 \oplus f_2 \oplus f_4 \oplus f_5 \oplus f_7;$ $g_2 = f_2 \oplus f_3 \oplus f_4 \oplus f_6 \oplus f_7;$ $g_3 = f_2 \oplus f_3 \oplus f_4 \oplus f_8;$ $g_4 = f_5 \oplus f_6 \oplus f_7 \oplus f_8$
9	$g_1 = f_1 \oplus f_3 \oplus f_5 \oplus f_7 \oplus f_9;$ $g_2 = f_2 \oplus f_3 \oplus f_6 \oplus f_7;$ $g_3 = f_4 \oplus f_5 \oplus f_6 \oplus f_7;$ $g_4 = f_8 \oplus f_9$	$g_1 = f_1 \oplus f_2 \oplus f_4 \oplus f_5 \oplus f_7;$ $g_2 = f_2 \oplus f_3 \oplus f_4 \oplus f_6 \oplus f_7;$ $g_3 = f_2 \oplus f_3 \oplus f_4 \oplus f_8 \oplus f_9;$ $g_4 = f_5 \oplus f_6 \oplus f_7 \oplus f_8 \oplus f_9$
10	$g_1 = f_1 \oplus f_3 \oplus f_5 \oplus f_7 \oplus f_9 \oplus f_{10};$ $g_2 = f_2 \oplus f_3 \oplus f_6 \oplus f_7;$ $g_3 = f_4 \oplus f_5 \oplus f_6 \oplus f_7;$ $g_4 = f_8 \oplus f_9$	$g_1 = f_1 \oplus f_2 \oplus f_4 \oplus f_5 \oplus f_7 \oplus f_9;$ $g_2 = f_2 \oplus f_3 \oplus f_4 \oplus f_6 \oplus f_7 \oplus f_{10};$ $g_3 = f_2 \oplus f_3 \oplus f_4 \oplus f_8 \oplus f_9 \oplus f_{10};$ $g_4 = f_5 \oplus f_6 \oplus f_7 \oplus f_8 \oplus f_9 \oplus f_{10}$

Следует отметить, что функции, описывающие разряды контрольных векторов $SWC(m,k)$ -кодов, являются линейными, так как при их формировании используются только операции суммирования по модулю два разрядов информационных векторов. В табл. 1 приводятся функции, описывающие разряды контрольных векторов кодов $SWC(m,k)$ и $H(m,k)$ при $m=4—10$.

Из табл. 1 следует, что выражения, описывающие контрольные функции $SWC(m,k)$ -кодов, являются более простыми, чем выражения для контрольных функций $H(m,k)$ -кодов. Более того, при некоторых значениях m разрядов в контрольных векторах $SWC(m,k)$ -кодов на единицу меньше, чем контрольных разрядов у $H(m,k)$ -кодов. Таким образом, сложность кодирующего оборудования, а следовательно и схемы контроля в ССВК, ниже при использовании $SWC(m,k)$ -кодов.

Особенности обнаружения ошибок $SWC(m,k)$ -кодами. С использованием специально разработанного программного модуля анализа характеристик равномерных блочных кодов в ССВК авторами были изучены особенности обнаружения ошибок $SWC(m,k)$ -кодами по кратностям $d \in \{1; m\}$ и по видам (монотонные, симметричные и асимметричные ошибки [31]).

При этом их показатели сравнивались с показателями $H(m,k)$ -кодов [26].

В табл. 2 представлены результаты расчета числа необнаруживаемых ошибок $SWC(m,k)$ -кодами в информационных векторах, а в табл. 3 — показатели $\gamma_{m,k}$ — доли необнаруживаемых ошибок в информационных векторах от их общего числа (%); доли необнаруживаемых монотонных $\nu_{m,k}$, симметричных $\sigma_{m,k}$ и асимметричных $\alpha_{m,k}$ ошибок в информационных векторах от их общего числа (%).

Проанализировав представленные данные, можно сделать вывод, что наибольшее количество необнаруживаемых ошибок в информационных векторах $SWC(m,k)$ -кодов принадлежит классу асимметричных. $SWC(m,k)$ -коды обнаруживают 100 % симметричных ошибок при $m \leq 4$ (при больших значениях m в $SWC(m,k)$ -кодах не обнаруживается некоторое количество симметричных ошибок).

Тенденции к изменению соотношений между ошибками различных видов при увеличении длины информационного вектора в $SWC(m,k)$ -кодах совпадают с тенденциями для аналогичных соотношений у $H(m,k)$ -кодов [26]. Однако различия проявляются, как правило, при тех значениях m , при которых у кодов Хэмминга на один контрольный разряд больше, чем у $SWC(m,k)$ -кодов. При $m=5—7$ и $12—15$ $SWC(m,k)$ -коды не обнаруживают больше ошибок, чем $H(m,k)$ -коды (при $m > 20$ также встречаются подобные случаи, определяемые особенностями построения кодов). На рис. 2 сравниваются показатели $\gamma_{m,k}$, $\nu_{m,k}$, $\sigma_{m,k}$ и $\alpha_{m,k}$ для кодов $SWC(m,k)$ и $H(m,k)$ — кривые 1 и 2 соответственно.

В диапазонах $m=5—7$ и $12—15$ для $SWC(m,k)$ -кодов наблюдается резкое, по сравнению с $H(m,k)$ -кодами, увеличение значений $\nu_{m,k}$, $\sigma_{m,k}$ и $\alpha_{m,k}$. Доля $\nu_{m,k}$ достигает наибольших значений в конце каждого диапазона. С дальнейшим увеличением m значения $\nu_{m,k}$ начинают уменьшаться, однако являются несколько большими, чем для кодов Хэмминга. Значения $\nu_{m,k}$ становятся практически равными для обоих кодов при $m=10, 11, 19, 20$. Аналогичная зависимость прослеживается и для $\sigma_{m,k}$: значения $\sigma_{m,k}$ практически равны для обоих кодов при $m=9—11, 16—20$ и т.д. Значения $\alpha_{m,k}$ для $SWC(m,k)$ -кодов также больше, чем для $H(m,k)$ -кодов в диапазонах длин информационных векторов, в которых у последних больше контрольных разрядов. Однако по сравнению с $\nu_{m,k}$ и $\sigma_{m,k}$ значения $\alpha_{m,k}$ постепенно уменьшаются с увеличением m в каждом из диапазонов. За пределами указанных диапазонов значения $\alpha_{m,k}$ для обоих кодов являются примерно равными.

Следует отметить, что $SWC(m,k)$ -коды, так же как и $H(m,k)$ -коды, обладают следующей особенностью. Доля необнаруживаемых ошибок различных видов для данной кратности от общего количества необнаруживаемых ошибок с данной кратностью в $SWC(m,k)$ -кодах не зависит от длины информационного вектора и является постоянной величиной [26].

Таблица 2

Количество необнаруживаемых SИС(m,k)-кодами ошибок

Число необнаруживаемых ошибок при d

m	k	3	4	5	6	7	8	9	10
4	3	16 4/0/12	0 0/0/0						
5	3	64 16/0/48	32 4/12/16	0 0/0/0					
6	3	256 64/0/192	192 24/72/96	0 0/0/0	0 0/0/0				
7	3	896 224/0/672	896 112/336/448	0 0/0/0	0 0/0/0	128 2/0/126			
8	4	1792 448/0/1344	1792 224/672/896	0 0/0/0	0 0/0/0	256 4/0/252	0 0/0/0		
9	4	4096 1024/0/3072	5120 640/1920/2560	2048 128/0/1920	2048 64/640/1344	2048 32/0/2016	512 4/140/368	0 0/0/0	
10	4	10240 2560/0/7680	16384 2048/6144/8192	12288 768/0/11520	12288 384/3840/8064	10240 160/0/10080	3072 24/840/2208	0 0/0/0	0 0/0/0
11	4	26624 6656/0/19968	53248 6656/19968/26624	49152 3072/0/46080	49152 1536/15360/32256	53248 832/0/52416	26624 208/7280/19136	0 0/0/0	0 0/0/0
12	4	69632 17408/0/52224	155648 19456/58368/77824	180224 11264/0/168960	212992 6656/66560/139776	221184 3456/0/217728	135168 1056/36960/97152	49152 192/0/48960	16384 32/4032/12320

Примечание. В каждой клетке указано: сверху — общее число необнаруживаемых ошибок с данной кратностью, снизу — число монотонных/симметричных/асимметричных необнаруживаемых ошибок

Таблица 3

Характеристики необнаруживаемых $SWC(m,k)$ -кодами ошибок различных видов

m	k	$\gamma_{m,k}, \%$	$\nu_{m,k}, \%$	$\sigma_{m,k}, \%$	$\alpha_{m,k}, \%$
3	2	14,286	3,571	0	10,714
4	3	6,667	1,667	0	5
5	3	9,677	2,016	1,21	6,452
6	3	11,111	2,183	1,786	7,143
7	3	11,811	2,079	2,067	7,665
8	4	5,882	1,036	1,029	3,817
9	4	6,067	0,723	1,032	4,311
10	4	6,158	0,567	1,033	4,558
11	4	6,204	0,452	1,016	4,736
12	4	6,227	0,355	0,989	4,883
13	4	6,239	0,275	0,959	5,004
14	4	6,244	0,212	0,929	5,103
15	4	6,247	0,161	0,9	5,185
16	5	3,124	0,081	0,45	2,593
17	5	3,124	0,051	0,425	2,648
18	5	3,125	0,036	0,413	2,676
19	5	3,125	0,026	0,402	2,697
20	5	3,125	0,02	0,392	2,714

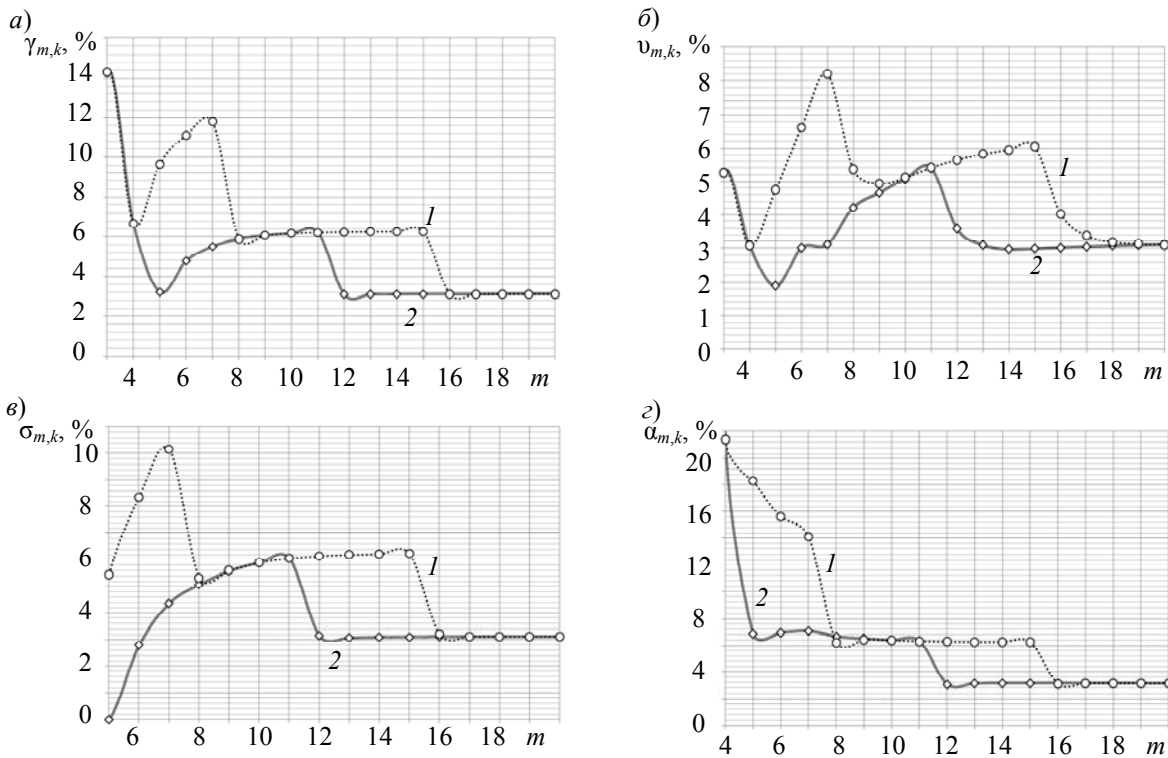


Рис. 2

Так как оба рассматриваемых кода относятся к кодам с обнаружением любых двукратных искажений, целесообразно сравнить их по показателям обнаружения ошибок с малой кратностью. На рис. 3 представлены зависимости долей необнаруживаемых ошибок при $d=3$ и 4 от общего числа ошибок с данными кратностями (величин $\beta_{m,3}$ и $\beta_{m,4}$).

Проанализировав представленные графики, можно сделать вывод о приоритете $H(m,k)$ -кодов (кривая 2) перед $SWC(m,k)$ -кодами (1) в области обнаружения ошибок с малой кратностью.

стью вследствие более высокой сложности функций, описывающих контрольные разряды $H(m,k)$ -кода, чем $SWC(m,k)$ -кода.

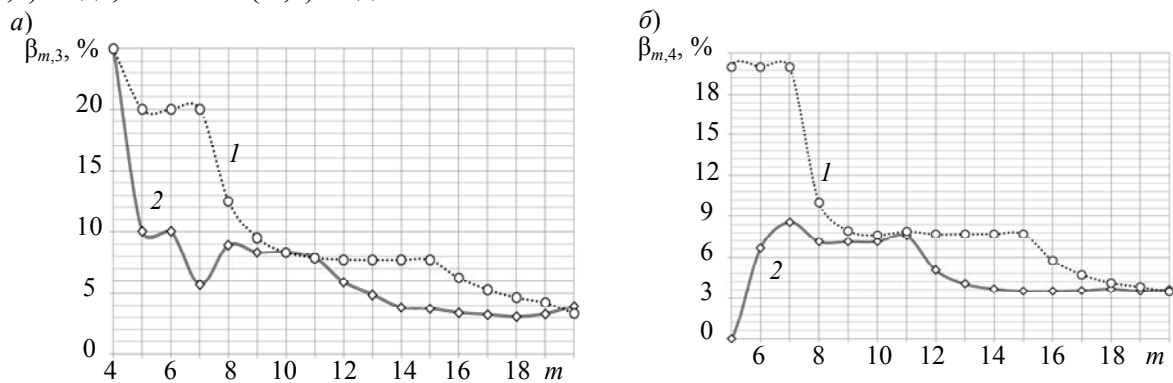


Рис. 3

Результаты экспериментальных исследований применения $SWC(m,k)$ -кодов при организации ССВК. В ходе исследований особенностей практического использования $SWC(m,k)$ -кодов при организации ССВК был проведен ряд экспериментов с системами контрольных комбинационных схем LGSynth`89 и MCNC Benchmarks [32]. Для каждой выбранной схемы строились ССВК методом дублирования, а также на основе кодов $H(m,k)$ и $SWC(m,k)$, после чего анализировалась сложность технической реализации систем функционального контроля и показатели обнаружения ошибок на выходах контрольных логических схем. В основе экспериментов лежала методика, описанная в работе [26].

Для анализа показателей обнаружения ошибок на выходах контрольных логических схем были выбраны комбинационные схемы, представленные в списочной форме (в формате *.netblif), из пакета LGSynth`89 [32]. С использованием специально разработанного программного модуля осуществлялось моделирование работы ССВК при внесении последовательно всех одиночных неисправностей выходов внутренних логических элементов контрольной комбинационной схемы. Для каждой неисправности осуществлялась подача всех входных наборов, а также фиксировалась реакция выходного вектора $\langle f_m f_{m-1} \dots f_2 f_1 \rangle$, после этого определялось множество необнаруживаемых на выходах объекта диагностирования ошибок (классифицированных по видам и кратностям) при контроле на основе кодов $H(m,k)$ и $SWC(m,k)$. Результаты экспериментов занесены в табл. 4.

Для 8 из 23 контрольных комбинационных схем использование при организации ССВК $SWC(m,k)$ -кода позволило синтезировать устройство с обнаружением любых одиночных неисправностей элементов внутренней структуры. Для всех остальных схем доля необнаруживаемых ошибок от общего их количества на выходах схемы (величина $\delta_{m,k}$) составила менее 2 % (за исключением схемы sm162a, для которой наблюдается небольшое превышение данного значения).

Сравнивая показатели $\delta_{m,k}$ для ССВК представленных комбинационных схем и кодов, следует отметить превосходство первого кода $H(m,k)$ над $SWC(m,k)$ (табл. 5 и рис. 4). Для всех комбинационных схем показатели обнаружения ошибок оказываются лучшими у классических кодов Хэмминга.

Анализ сложности технической реализации состоял в определении условного показателя площади системы диагностирования для каждой выбранной контрольной комбинационной схемы из пакета MCNC Benchmarks в условных единицах стандартной библиотеки функциональных элементов stdcell2_2.genlib. Для этого с использованием разработанного программного модуля были получены файлы-описания в формате *.pla каждого блока ССВК (включая сам объект диагностирования), а также с применением интерпретатора SIS [33] получены численные данные по площадям ССВК на основе дублирования и использования кодов $H(m,k)$ и $SWC(m,k)$ (табл. 6).

**Показатели обнаружения ошибок
на выходах логических схем при их контроле на основе $SWC(m,k)$ -кода**

№ п/п	Схема	Число входов	Число выходов	Число необнаруживаемых ошибок	Доля необнаруживаемых ошибок от общего их числа, %	Доля необнаруживаемых ошибок от общего числа ошибок данного вида, %			Доля необнаруживаемых ошибок от общего числа необнаруживаемых ошибок, %	
						монотонные	симметричные	асимметричные	$d=3$	$d \geq 4$
1	cm82a	5	3	4	0,617	0	0	100	100	0
2	cm85a	11	3	0	0	0	0	—	—	—
3	b1	3	4	0	0	0	0	—	—	—
4	cmb	16	4	0	0	0	0	—	—	—
5	z4ml	7	4	0	0	0	0	0	—	—
6	cm162a	14	5	6429	2,026	1,925	0	28,571	6,968	93,032
7	cm163a	16	5	21888	1,792	1,64	0	29,386	0,585	99,415
8	alu2	10	6	219	0,349	0,16	0,363	4,029	53,425	46,575
9	x2	10	7	138	0,7	0,421	0	46,667	47,826	52,174
10	alu4	14	8	5589	0,282	0,101	0,093	2,662	80,569	19,431
11	cm138a	6	8	0	0	0	—	—	—	—
12	f51m	8	8	20	0,151	0	13,008	4,651	20	80
13	pcl	19	9	107671	0,616	0,47	0	19,557	55,568	44,432
14	cm42a	4	10	0	0	0	0	—	—	—
15	cu	14	11	1536	1,113	0	0	54,545	100	0
16	pml	16	13	3696	0,488	0	6,133	9,968	54,545	45,455
17	sct	19	15	67660	0,408	0,04	2,269	10,702	53,662	46,338
18	decod	5	16	0	0	0	—	—	—	—
19	tcon	17	16	0	0	0	—	—	—	—
20	pcler8	27	17	55025280	1,27	1,173	0	14,249	27,081	72,919
21	ldd	9	19	196	0,649	0,649	—	—	0	100
22	cc	21	20	211800	0,602	0,564	0,309	3,041	24,869	75,131
23	ttt2	24	21	836944	0,111	0	4,101	2,944	17,748	82,252

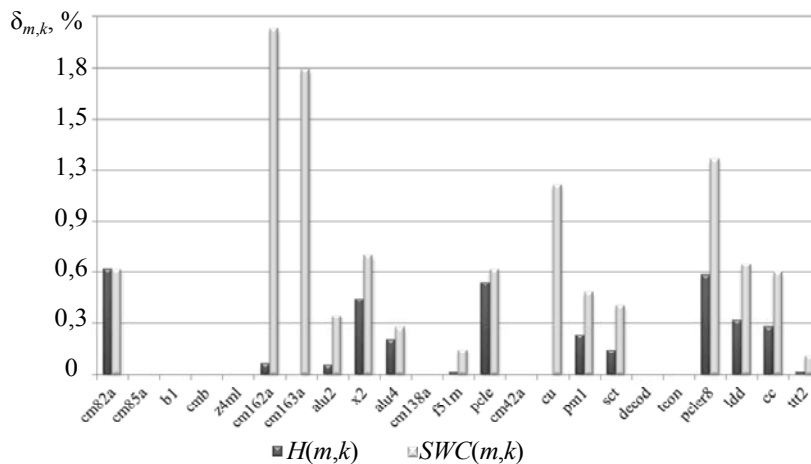


Рис. 4

В качестве показателей структурной избыточности ССВК на основе $SWC(m,k)$ -кодов были использованы коэффициенты μ и χ : μ — доля площади ССВК на основе $SWC(m,k)$ -кода от площади системы дублирования, χ — доля площади ССВК на основе $SWC(m,k)$ -кода от площади системы контроля на основе кода Хэмминга. Представленные на рис. 5 зависимости наглядно демонстрируют, что использование $SWC(m,k)$ -кода при организации ССВК подавляющего большинства логических схем более эффективно по показателям структурной избы-

точности по сравнению с использованием как дублирования, так и классических кодов Хэмминга. Средние значения показателей составляют $\mu=78,504$ и $\chi=92,799$ %. Причем для некоторых схем достигнуто уменьшение площади ССВК при использовании $SWC(m,k)$ -кода более чем на треть по сравнению с дублированием. Для большинства схем использование $SWC(m,k)$ -кода, по сравнению с ССВК кодами Хэмминга, дает уменьшение площади на 10—15 %.

Таблица 5

Значения $\delta_{m,k}$ для различных контрольных схем

Схема	$H(m,k)$	$SWC(m,k)$	Схема	$H(m,k)$	$SWC(m,k)$
cm82a	0,617	0,617	pclе	0,543	0,616
cm85a	0	0	cm42a	0	0
b1	0	0	cu	0	1,113
cmb	0	0	pm1	0,236	0,488
z4ml	0	0	sct	0,146	0,408
cm162a	0,071	2,026	decod	0	0
cm163a	0	1,792	tcon	0	0
alu2	0,059	0,349	pcler8	0,586	1,27
x2	0,447	0,7	ldd	0,318	0,649
alu4	0,205	0,282	cc	0,283	0,602
cm138a	0	0	ttt2	0,013	0,111
f51m	0,015	0,151			

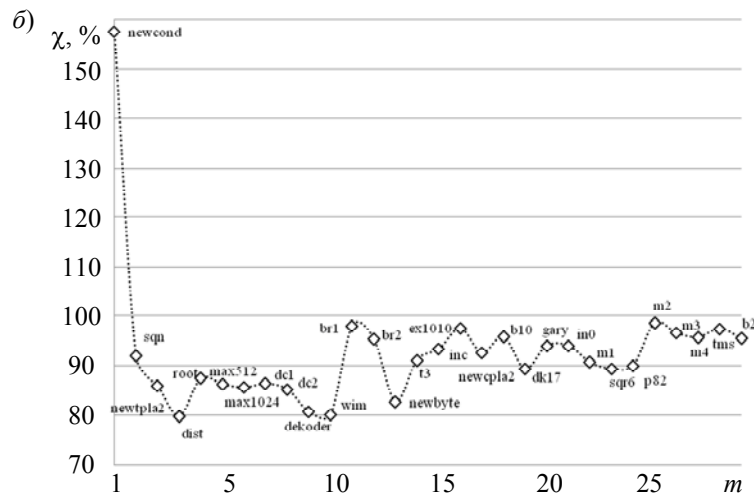
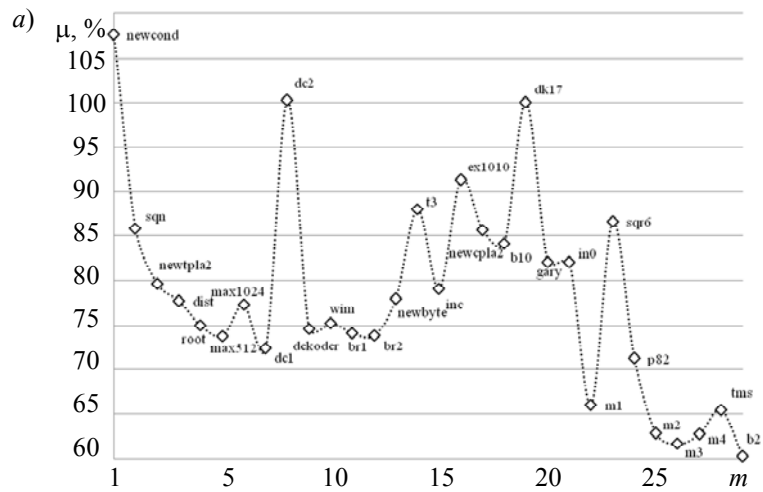


Рис. 5

Результаты анализа сложности технической реализации ССВК

№ п/п	Схема	Число входов	Число выходов	Площадь устройства, у.е.				μ, %	χ, %
				$F(x)$	система дублирования	система на основе $H(m,k)$ -кода	система контроля на основе $SWC(m,k)$ -кода		
1	newcond	11	2	1136	2496	1704	2688	107,692	157,746
2	sqn	7	3	2008	4448	4152	3816	85,791	91,908
3	newtpla2	10	4	840	2320	2152	1848	79,655	85,874
4	dist	8	5	6968	14784	14400	11496	77,76	79,833
5	root	8	5	3496	7840	6728	5880	75	87,396
6	max512	9	6	9632	20320	17384	14992	73,78	86,24
7	max1024	10	6	17816	36688	33168	28384	77,366	85,576
8	dc1	4	7	976	3216	2696	2328	72,388	86,35
9	dc2	8	7	2424	6112	7192	6128	100,262	85,206
10	dekoder	4	7	736	2736	2528	2040	74,561	80,696
11	wim	4	7	712	2688	2528	2024	75,298	80,063
12	br1	12	8	3608	8688	6576	6440	74,125	97,932
13	br2	12	8	2952	7376	5712	5448	73,861	95,378
14	newbyte	5	8	592	2656	2504	2072	78,012	82,748
15	t3	12	8	1768	5008	4840	4408	88,019	91,074
16	inc	7	9	2376	6432	5456	5088	79,104	93,255
17	ex1010	10	10	43296	88480	83000	80856	91,383	97,417
18	newcpla2	7	10	1096	4080	3776	3496	85,686	92,585
19	b10	15	11	9168	20432	17944	17192	84,143	95,809
20	dk17	10	11	1768	5632	6304	5632	100	89,34
21	gary	15	11	10688	23472	20504	19272	82,106	93,991
22	in0	15	11	10704	23504	20520	19288	82,063	93,996
23	m1	6	12	3064	8432	6144	5568	66,034	90,625
24	sqr6	6	12	2648	7600	7368	6584	86,632	89,359
25	p82	5	14	2368	7456	5904	5312	71,245	89,973
26	m2	8	16	10096	23328	14880	14672	62,894	98,602
27	m3	8	16	13464	30064	19216	18544	61,682	96,503
28	m4	8	16	18704	40544	26616	25464	62,806	95,672
29	tms	8	16	6784	16704	11232	10936	65,469	97,365
30	b2	16	17	40952	85248	53848	51400	60,295	95,454
Среднее значение								78,504	92,799

Заключение. Коды с суммированием весовых коэффициентов единичных информационных разрядов без операции переноса, обнаруживающие любые однократные и двукратные ошибки в информационных векторах, могут эффективно применяться при организации ССВК. По своим характеристикам описываемые $SWC(m,k)$ -коды схожи с классическими кодами Хэмминга, но обладают меньшей сложностью контрольных функций, а при некоторых значениях m — даже меньшим числом контрольных разрядов. По сравнению с использованием при организации ССВК классических кодов Хэмминга за счет более простых контрольных функций $SWC(m,k)$ -кода достигается уменьшение структурной избыточности, однако при этом коды Хэмминга более предпочтительны по обнаружению ошибок.

Учет выявленных в настоящей статье особенностей $SWC(m,k)$ -кодов может оказаться полезным при организации ССВК логических устройств автоматики и вычислительной техники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *McCluskey E. J.* Logic Design Principles: With Emphasis on Testable Semicustom Circuits. New Jersey: Prentice Hall PTR, 1986. 549 p.
2. *Rao T. R., Fujiwara E.* Error Control Coding for Computer Systems. NY: Prentice Hall, 1989. 584 p.
3. *Pradhan D. K.* Fault-Tolerant Computer System Design. NY: Prentice Hall, 1996. 560 p.
4. *Abramovici M., Breuer M. A., Friedman A. D.* Digital System Testing and Testable Design. Computer Science Press, 1998. 652 p.
5. *Fujiwara E.* Code Design for Dependable Systems: Theory and Practical Applications. New Jersey: John Wiley & Sons, 2006. 720 p.
6. *Пархоменко П. П., Согомонян Е. С.* Основы технической диагностики (оптимизация алгоритмов диагностирования, аппаратурные средства). М.: Энергоатомиздат, 1981. 320 с.
7. *Согомонян Е. С., Слабаков Е. В.* Самопроверяемые устройства и отказоустойчивые системы. М.: Радио и связь, 1989. 208 с.
8. *Сапожников В. В., Сапожников Вл. В.* Самопроверяемые дискретные устройства. СПб: Энергоатомиздат, 1992. 224 с.
9. *Piestrak S. J.* Design of Self-Testing Checkers for Unidirectional Error Detecting Codes. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 1995. 111 p.
10. *Гавзов Д. В., Сапожников В. В., Сапожников Вл. В.* Методы обеспечения безопасности дискретных систем // Автоматика и телемеханика. 1994. № 8. С. 3—50.
11. *Дрозд А. В., Харченко В. С., Антощук С. Г., Дрозд Ю. В., Дрозд М. А., Сулима Ю. Ю.* Рабочее диагностирование безопасных информационно-управляющих систем. Харьков: Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского „ХАИ“, 2012. 614 с.
12. *Kharchenko V., Kondratenko Yu., Kasprzyk J.* Green IT Engineering: Concepts, Models, Complex Systems Architectures. Book series "Studies in Systems, Decision and Control". Springer, 2017. Vol. 74. 305 p. DOI: 10.1007/978-3-319-44162-7.
13. *Nicolaidis M., Zorian Y.* On-Line Testing for VLSI — A Compendium of Approaches // J. of Electronic Testing: Theory and Application. 1998. Vol. 12, Is. 1—2. P. 7—20. DOI: 10.1023/A:1008244815697.
14. *Zeng C., McCluskey E. J.* Finite State Machine Synthesis with Concurrent Error Detection // Intern. Test Conf. Atlantic City, NJ, 1999. P. 672—679. DOI: 10.1109/TEST.1999.805795.
15. *Mitra S., McCluskey E. J.* Which Concurrent Error Detection Scheme to Choose? // Proc. of Intern. Test Conf. Atlantic City, NJ, 03—05 October 2000. P. 985—994, DOI: 10.1109/TEST.2000.894311.
16. *Das D., Toubia N. A.* Weight-Based Codes and Their Application to Concurrent Error Detection of Multilevel Circuits // Proc. of 17th IEEE Test Symposium. California, USA, 1999. P. 370—376.
17. *Ефанов Д. В., Сапожников В. В., Сапожников Вл. В.* Условия обнаружения неисправности логического элемента в комбинационном устройстве при функциональном контроле на основе кода Бергера // Автоматика и телемеханика. 2017. № 5. С. 152—165.
18. *Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В.* Взвешенные коды с суммированием для организации контроля логических устройств // Электронное моделирование. 2014. Т. 36, № 1. С. 59—80.
19. *Huches J. L. A., McCluskey E. J., Lu D. J.* Design of Totally Self-Checking Comparators with an Arbitrary Number of Inputs // IEEE Transact. on Computers. 1984. Vol. C-33, N 6. P. 546—550.
20. *Morosow A., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V., Goessel M.* Self-Checking Combinational Circuits with Unidirectionally Independent Outputs // VLSI Design. 1998. Vol. 5, Is. 4. P. 333—345. DOI: 10.1155/1998/20389.
21. *Hamming R. W.* Error Detecting and Correcting Codes // Bell System Technical J. 1950. Vol. 29, N 2. P. 147—160.
22. *Ефанов Д. В.* Предельные свойства кода Хэмминга в схемах функционального диагностирования // Информатика и системы управления. 2011. № 3. С. 70—79.
23. *Ефанов Д. В., Блюдов А. А.* Коды Хэмминга и их обнаруживающие способности в схемах функционального контроля // Информатика и системы управления. 2012. № 2. С. 100—111.

24. Sapozhnikov V., Sapozhnikov Vl., Efanov D., Blyudov A. Analysis of Error-Detection Possibilities of CED Circuits Based on Hamming and Berger Codes // Proc. of 11th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2013). Rostov-on-Don, Russia, 27—30 September 2013. P. 200—207. DOI: 10.1109/EWDTS.2013.6673097.
25. Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В. Исследование свойств кодов Хэмминга и их модификаций в системах функционального контроля // Автоматика на транспорте. 2015. Т. 1, № 3. С. 311—337.
26. Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В. Особенности применения кодов Хэмминга при организации самопроверяемых схем встроенного контроля // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 1. С. 47—59.
27. Sapozhnikov V., Sapozhnikov Vl., Efanov D., Dmitriev V. Weighted Sum Code Without Carries — is an Optimum Code with Detection of Any Double Errors in Data Vectors // Proc. of 14th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2016). Yerevan, Armenia, 14—17 October 2016. P. 134—141. DOI: 10.1109/EWDTS.2016.7807686.
28. Сапожников Вал. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В., Дмитриев В. В. Код с суммированием взвешенных информационных разрядов без переносов в системах функционального контроля // Автоматика на транспорте. 2017. Т. 3, № 3. С. 414—433.
29. Berger J. M. A Note on Error Detecting Codes for Asymmetric Channels // Information and Control. 1961. Vol. 4, Is. 1. P. 68—73. DOI:10.1016/S0019-9958(61)80037-5.
30. Блюдов А. А., Ефанов Д. В., Сапожников В. В., Сапожников Вл. В. Построение модифицированного кода Бергера с минимальным числом необнаруживаемых ошибок информационных разрядов // Электронное моделирование. 2012. Т. 34, № 6. С. 17—29.
31. 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.
32. Collection of Digital Design Benchmarks [Электронный ресурс]: <<http://ddd.fit.cvut.cz/prj/Benchmarks/>>.
33. SIS: A System for Sequential Circuit Synthesis / E. M. Sentovich, K. J. Singh, L. Lavagno, C. Moon, R. Murgai, A. Saldanha, H. Savoj, P. R. Stephan, R. K. Brayton, A. Sangiovanni-Vincentelli. Electronics Research Laboratory, Department of Electrical Engineering and Computer Science, University of California, Berkeley, 4 May 1992. 45 p.

Сведения об авторах

- Валерий Владимирович Сапожников** — д-р техн. наук, профессор; Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, кафедра автоматки и телемеханики на железных дорогах;
E-mail: port.at.pgups@gmail.com
- Владимир Владимирович Сапожников** — д-р техн. наук, профессор; Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, кафедра автоматки и телемеханики на железных дорогах;
E-mail: at.pgups@gmail.com
- Дмитрий Викторович Ефанов** — д-р техн. наук, доцент; Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, кафедра автоматки и телемеханики на железных дорогах;
E-mail: TrES-4b@yandex.ru

Поступила в редакцию
30.09.17 г.

Ссылка для цитирования: Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В. Взвешенный код с суммированием без операций переноса для решения задач технической диагностики дискретных систем // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 4. С. 323—335.

**WEIGHTED CODE WITH SUMMATION WITHOUT CARRIES
FOR SOLVING THE PROBLEMS OF TECHNICAL DIAGNOSTICS OF DISCRETE SYSTEMS****V. V. Sapozhnikov, VI. V. Sapozhnikov, D. V. Efanov***Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,
190031, St. Petersburg, Russia
E-mail: TrES-4b@yandex.ru*

Characteristics of weight-based code with summation without the operation of carries to the detection of errors in self-checking circuits of built-in test of logical devices of automation and computer technique are analyzed. It is shown that in the case when the described code uses a sequence of weight coefficients forming a natural series of numbers, it ensures detecting of any single and double errors in data vectors. For this indicator, the proposed code is comparable to the classic Hamming codes but has more simple functions describing check bits. For some values of data bits number, the new code has the number of check digits one less than the classic one. This makes it possible to organize self-checking circuits of built-in control for logical devices with reduced structural redundancy in comparison with both duplication and using Hamming code for these purposes. The characteristics of error detection by types (unidirectional, symmetrical or asymmetrical) and multiplicities are better for a Hamming code identifying more errors at the logical device output than with the use of the proposed weighted code. Experiments carried out with the systems of benchmarks LGSynth`89 and MCNC Benchmarks confirm the theoretically obtained patterns.

Keywords: technical diagnostics, self-checking built-in check circuit, fault detection, data vector, error, Hamming code, weighted code with summation without carries, benchmark, structural redundancy

Data on authors

- | | | |
|--------------------------------|---|--|
| Valery V. Sapozhnikov | — | Dr. Sci., Professor; Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University; Department of Automation and Remote Control on Railways; E-mail: port.at.pgups@gmail.com |
| Vladimir V. Sapozhnikov | — | Dr. Sci., Professor; Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University; Department of Automation and Remote Control on Railways; E-mail: at.pgups@gmail.com |
| Dmitry V. Efanov | — | Dr. Sci., Associate Professor; Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University; Department of Automation and Remote Control on Railways; E-mail: TrES-4b@yandex.ru |

For citation: Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov VI. V., Efanov D. V. Weighted code with summation without carries for solving the problems of technical diagnostics of discrete systems. *Journal of Instrument Engineering*. 2018. Vol. 61, N 4. P. 323—335 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-4-323-335