

ТРЕХМОДУЛЬНЫЕ КОДЫ С СУММИРОВАНИЕМ ДЛЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ И СИНТЕЗА КОНТРОЛЕПРИГОДНЫХ ДИСКРЕТНЫХ СИСТЕМ

Д. В. ЕФАНОВ

*Российский университет транспорта (МИИТ), 127994, Москва, Россия
E-mail: TrES-4b@yandex.ru*

Представлен способ построения кода с суммированием единичных информационных разрядов. Предложено при построении кода с суммированием подсчитывать модифицированный вес информационного вектора путем определения наименьшего неотрицательного вычета его истинного веса по заранее установленному модулю, а затем корректировать полученное число с помощью двух поправочных коэффициентов. Эти коэффициенты вычисляются как свертки по модулю два некоторых различных подмножеств разрядов информационного вектора. Получаемый таким образом код является трехмодульным кодом с суммированием единичных информационных разрядов, он сравним по своей избыточности с классическим кодом Бергера. При этом код обнаруживает большее число ошибок в информационных векторах по сравнению с последним. Трехмодульные коды с суммированием расширяют класс известных кодов с малой избыточностью, применение которых позволяет снизить структурную избыточность контролепригодных дискретных устройств и технических средств диагностирования их компонентов.

Ключевые слова: *дискретная система, контролепригодная структура, тестирование, код Бергера, код с суммированием, обнаружение ошибок, генератор кода*

Введение. Важнейшей задачей при создании систем автоматического управления во всех областях промышленности и транспорта является использование высоконадежных компонентов. Для современных устройств, реализуемых на микроэлектронной основе, надежность обеспечивается аппаратурной и программной избыточностью, использованием принципов помехоустойчивого кодирования, а также развитых методов технической диагностики [1—7].

Непрерывное совершенствование вычислительной техники, увеличение числа элементов, размещаемых на единице площади, повышение производительности устройств — все это стимулирует развитие технологий технической диагностики блоков и компонентов создаваемых дискретных систем [8—10]. Важным направлением развития методов технической диагностики являются исследования в области модификации разделимых кодов с суммированием и построения кодов с малой избыточностью (как правило, не превышающей избыточности классических кодов Бергера [11]), однако обладающих улучшенными характеристиками обнаружения ошибок как в целом, так и по отдельным видам и кратностям [12].

В настоящей работе представлен еще один способ построения целого класса модифицированных кодов с суммированием — *трехмодульных кодов Бергера*.

Коды с суммированием, используемые при синтезе дискретных устройств. Коды с суммированием широко применяются при построении надежных дискретных устройств и систем автоматики [13—16]. Эти коды являются разделимыми кодами с обнаружением ошибок в информационных векторах, что позволяет их эффективно использовать при технической диагностике и организации контролепригодных структур дискретных систем.

Наверное, самым известным кодом с суммированием является классический код Бергера, разработанный в середине XX века [11]. Код Бергера, или $S(m,k)$ -код (m и k — длина информационного и контрольного векторов), строится следующим образом. Подсчитывается число единичных разрядов в информационном векторе (определяется вес r информационного вектора). Полученное число представляется в двоичном виде и записывается в разряды контрольного вектора.

$S(m,k)$ -коды позволяют обнаруживать любые монотонные ошибки в информационных векторах, что используется при проектировании контролепригодных дискретных систем и организации тестового и функционального диагностирования устройств [17—23]. Кроме того, как показано в [24, 25], $S(m,k)$ -коды обнаруживают любые асимметричные ошибки, что также может быть использовано на практике. К необнаруживаемым кодами Бергера ошибкам относятся все симметричные ошибки в информационных векторах, количество которых является существенным [26].

С целью уменьшения количества необнаруживаемых классическими кодами с суммированием ошибок, в частности, в области малой их кратности разработаны и разрабатываются разнообразные модификации. Некоторые из них сохраняют основные свойства кодов Бергера и обнаруживают любые монотонные ошибки в информационных векторах при уменьшенном количестве необнаруживаемых симметричных ошибок [27]. Для некоторых k необнаруживаемым относится малая часть монотонных ошибок, несущественная по отношению к общему количеству ошибок в информационных векторах [28].

Одной из эффективных модификаций $S(m,k)$ -кода является разработанный в [29] $RS(m,k)$ -код, при построении которого вычисляется модифицированный вес информационного вектора $W = r(\bmod M) + \alpha M$, где $r(\bmod M)$ — значение наименьшего неотрицательного вычета веса по модулю $M = 2^{\lceil \log_2(m+1) \rceil - 1}$ (запись $\lceil \dots \rceil$ обозначает целое сверху от вычисляемого значения), а α — поправочный коэффициент, подсчитываемый как свертка по модулю два заранее выбранных информационных разрядов. $RS(m,k)$ -коды обнаруживают вдвое больше, чем $S(m,k)$ -коды, ошибок в информационных векторах. При этом количество необнаруживаемых симметричных ошибок уменьшено примерно вдвое по сравнению с кодами Бергера, а в классе необнаруживаемых присутствуют монотонные ошибки только с кратностью $d = M$ и асимметричные ошибки только с кратностью $d = M + 2j$, где $j=1, 2, \dots$ ($d \leq m$) [30]. Для каждого значения m возможно построить целое семейство $RS(m,k)$ -кодов, определяемое способом подсчета поправочного коэффициента.

Другой эффективной модификацией является обобщенная форма $RS(m,k)$ -кода — двухмодульный код с суммированием единичных информационных разрядов, или $TM(m,k)$ -код (*two-modular code*) [31]. Значения разрядов контрольных векторов $TM(m,k)$ -кодов находятся следующим образом. Множество информационных разрядов разбивается на два подмножества и образуются два подвектора информационных разрядов. Для каждого подвектора подсчитывается вес — определяются числа r_1 и r_2 . Затем определяются наименьшие неотрицательные вычеты чисел r_1 и r_2 по выбранным модулям M_1 и M_2 . Полученные числа представляются в двоичном виде и записываются соответственно в $k_1 = \lceil \log_2 M_1 \rceil$ младших и в $k_2 = \lceil \log_2 M_2 \rceil$ старших разрядах контрольного вектора.

Для каждого значения m может быть построено множество $TM(m,k)$ -кодов с различными особенностями обнаружения ошибок в информационных векторах. Например, в [32] исследованы свойства двухмодульных кодов для $M_1=M_2=4$. Данные коды при длине информационных векторов $m=8—15$ имеют такое же число контрольных разрядов, как и коды $S(m,k)$ и $RS(m,k)$, однако обнаруживают больше ошибок в информационных векторах. В качестве недостатка таких кодов можно выделить наличие в классе необнаруживаемых монотонных

ошибок с кратностью $d=4$. В [33] показано, что $RS(m,k)$ -коды при значениях модулей $M_1 = 2$ и $M_2 = 2^{\lceil \log_2(m+1) \rceil - 1}$ являются частными случаями $TM(m,k)$ -кодов, а также предложено расширение $RS(m,k)$ -кодов за счет определения веса информационного вектора по неполному (усеченному) информационному вектору (класс $RS_{EXP}(m,k)$ -кодов).

Еще одним способом построения кодов с суммированием единичных информационных разрядов является одновременное выделение трех подмножеств разрядов информационного вектора и их контроль в отдельных разрядах контрольного вектора. $TM(m,k)$ -коды можно считать подклассом таких кодов. Такие трехмодульные коды (обозначим их как $TMS(m,k)$ -коды, *triple-modular sum codes*) могут строиться на основе как непересекающихся, так и пересекающихся подмножеств информационных разрядов. Значение модуля определяет избыточность кода, а также непосредственно влияет на основные особенности обнаружения ошибок в информационных векторах.

Классификация кодов с суммированием единичных информационных разрядов представлена на рис. 1. Рассмотрим особенности одного из способов построения *модифицированных трехмодульных кодов Бергера*.

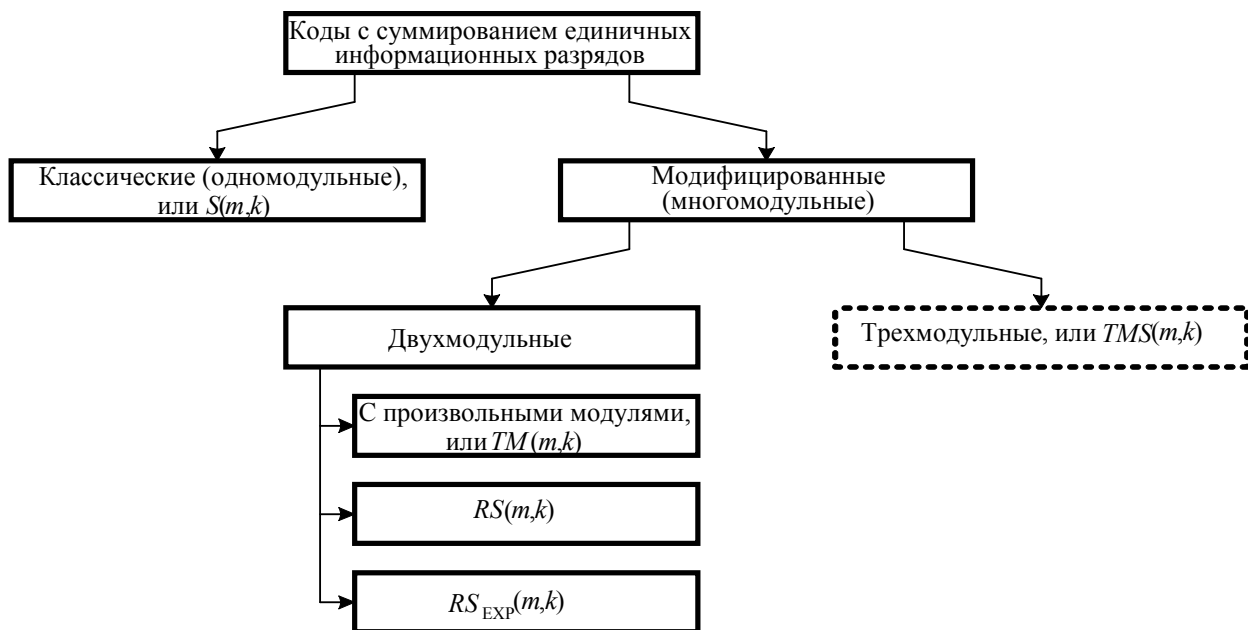


Рис. 1

Трехмодульные коды с суммированием. Явным преимуществом кодов $RS(m,k)$ и $TM(m,k)$ является то, что для каждой длины информационного вектора может быть построено большое разнообразие кодов с различными особенностями обнаружения ошибок в информационных векторах ($S(m,k)$ -код, например, может быть построен только один для конкретного значения m). Развивая теорию построения кодов с суммированием единичных информационных разрядов, можно предложить способ построения целого семейства модифицированных кодов с суммированием единичных информационных разрядов. Для этого воспользуемся следующим алгоритмом.

1. Определяется значение модуля:

$$M = 2^{k-2}, \quad (1)$$

где $k = \lceil \log_2(m+1) \rceil$.

2. Вычисляется вес информационного вектора — r .

3. Определяется наименьший неотрицательный вычет числа r по модулю M : $r \pmod{M}$.

4. Вычисляются значения поправочных коэффициентов α_1 и α_2 как сверток по модулю два разрядов из заранее выбранных неравных подмножеств D_1 и D_2 информационных разрядов.

5. Формируется значение модифицированного веса информационного вектора:

$$W = r(\text{mod } M) + \alpha_1 M + 2\alpha_2 M, \quad (2)$$

где первое слагаемое определяет значения $k-2$ младших разрядов контрольного вектора, значение второго записывается во втором по старшинству разряде, а третьего — в старшем разряде контрольного вектора.

6. Полученное число W представляется в двоичном виде и записывается в разряды контрольного вектора.

Разработанный способ построения кода дает код с избыточностью, равной избыточности классического кода Бергера.

Проиллюстрируем применение приведенного алгоритма, построив $TMS(10,4)$ -код, для которого поправочные коэффициенты вычисляются по формулам $\alpha_1 = f_{10} \oplus f_9 \oplus f_8 \oplus f_7 \oplus f_6$ и $\alpha_2 = f_8 \oplus f_7 \oplus f_6 \oplus f_5 \oplus f_4 \oplus f_3$ (рис. 2). Получим контрольный вектор для информационного вектора $\langle f_{10} f_9 \dots f_2 f_1 \rangle = \langle 0101010101 \rangle$. Согласно формуле (1), $M = 2^{\lceil \log_2(10+1) \rceil - 2} = 2^{4-2} = 4$. Вес информационного вектора $r=5$. Таким образом, наименьший неотрицательный вычет веса по модулю $M=4$ равен: $5(\text{mod } 4) = 1$. Значения поправочных коэффициентов: $\alpha_1 = 0 \oplus 1 \oplus 0 \oplus 1 \oplus 0 = 0$ и $\alpha_2 = 0 \oplus 1 \oplus 0 \oplus 1 \oplus 0 \oplus 1 = 1$. Воспользуемся формулой (2): $W = 5(\text{mod } 4) + 0 \cdot 4 + 2 \cdot 1 \cdot 4 = 9$. В контрольный вектор записывается двоичное число $\langle 1001 \rangle$, соответствующее полученному значению модифицированного веса.

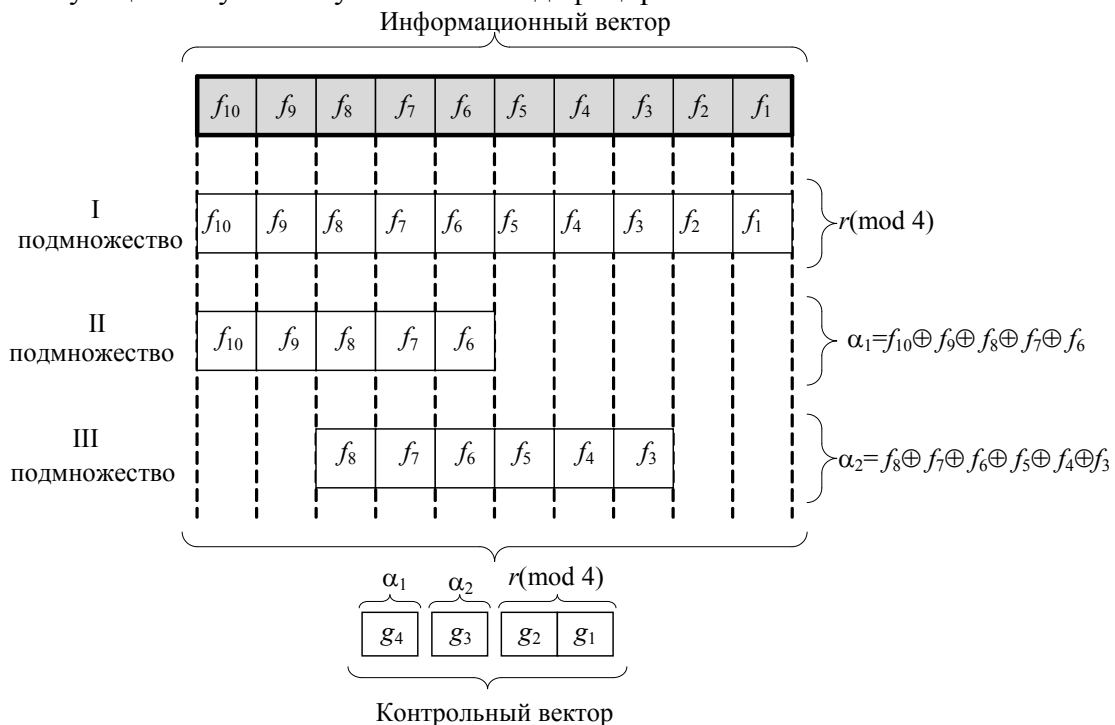


Рис. 2

Для получения разрядов контрольных векторов $TMS(m,k)$ -кодов используется простая процедура кодирования (рис. 3). Генератор трехмодульного кода состоит из трех типовых блоков: одного счетчика единиц по модулю M и двух устройств вычисления сверток по модулю два для формирования поправочных коэффициентов α_1 и α_2 . На счетчик единиц поступают значения всех разрядов информационного вектора, тогда как на входы устройств вычисления

сверток по модулю два — только заранее установленные разряды. Так как в качестве модуля выбрана степень числа два, то младший разряд контрольного вектора является сверткой по модулю два всех информационных разрядов. Указанное обстоятельство позволяет оптимизировать структуру генератора $TMS(m,k)$ -кода за счет интеграции элементов суммирования по модулю два для устройств вычисления поправочных коэффициентов α_1 и α_2 в структуру счетчика по модулю M .

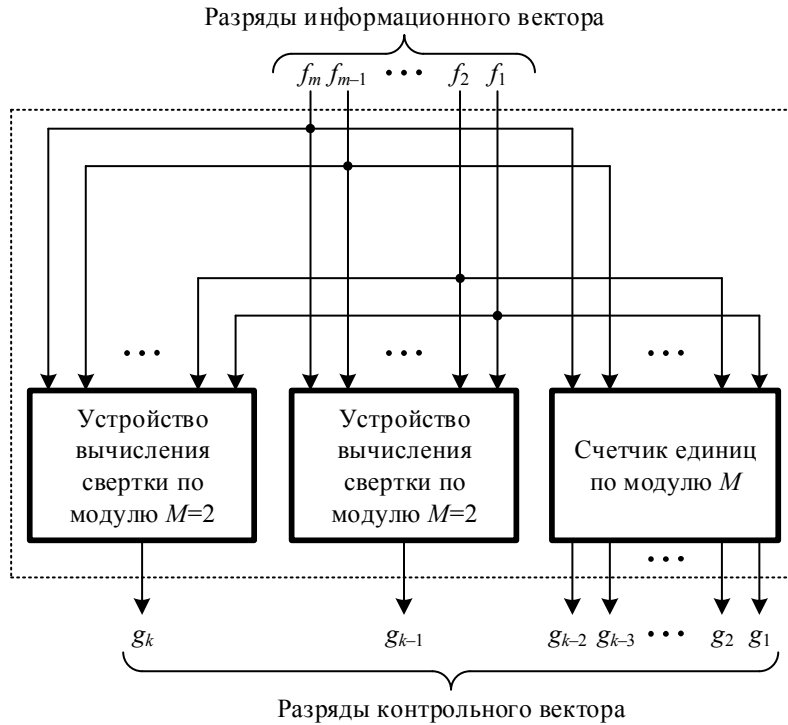


Рис. 3

На рис. 4 приведена оптимизированная структура генератора $TMS(10,4)$ -кода, для которого поправочные коэффициенты вычисляются по формулам $\alpha_1 = f_{10} \oplus f_9 \oplus f_8 \oplus f_7 \oplus f_6$ и $\alpha_2 = f_8 \oplus f_7 \oplus f_6 \oplus f_5 \oplus f_4 \oplus f_3$. Эта структура реализована с использованием сумматоров по модулю два, полусумматоров (НА) и полных сумматоров (ФА) [14].

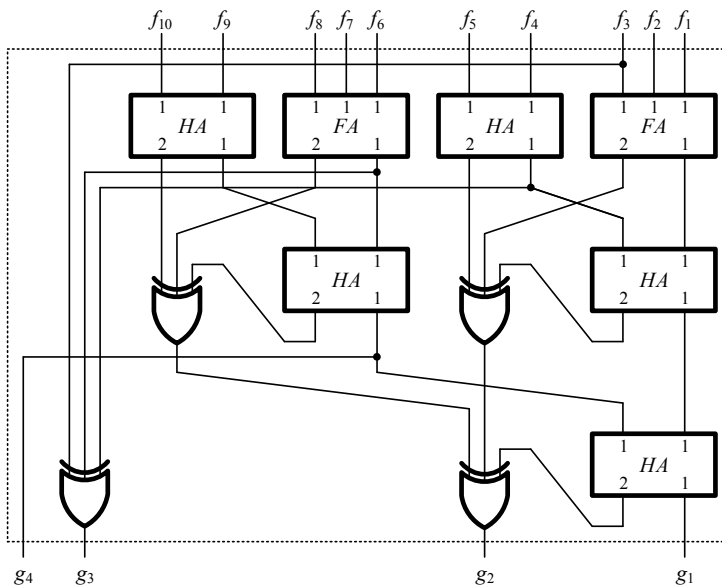


Рис. 4

При построении схем вычисления значений α_1 и α_2 учитывалось то, что на выходах суммирования каждого блока формируется значение свертки по модулю два информацион-

ных разрядов, подключенных к входам устройства. Для сравнения на рис. 5 изображены генераторы классического $S(10,4)$ -кода (а) и модифицированного $RS(10,4)$ -кода (б) с поправочным коэффициентом, вычисляемым по формуле $\alpha = f_5 \oplus f_4 \oplus f_3 \oplus f_2 \oplus f_1$. Для реализации генератора $S(10,4)$ -кода (рис. 5, а) потребовалось 6 полных сумматоров и 5 полусумматоров, а для реализации генератора $RS(10,4)$ -кода (рис. 5, б) — 5 полных сумматоров и 5 полусумматоров, а также один трехходовый элемент сложения по модулю два. Можно отметить, что схема генератора $TMS(10,4)$ -кода проще схемы генератора $S(10,4)$ -кода и генератора $RS(10,4)$ -кода. Можно оценить сложность по числу входов внутренних логических элементов устройства, например, для элементарных структурных элементов она равна: FA — 14, HA — 6, двухходовых XOR — 6, трехходовых XOR — 12 [34]. Сложность генераторов оценивается следующим образом: число входов элементов генератора $TMS(10,4)$ -кода равно 106, $S(10,4)$ -кода — 114 и $RS(10,4)$ -кода — 112. Другие показатели сложности технической реализации устройств, например число необходимых транзисторов, демонстрируют большой выигрыш в сложности для генераторов трехмодульных кодов по сравнению с известными классическими и модифицированными кодами Бергера.

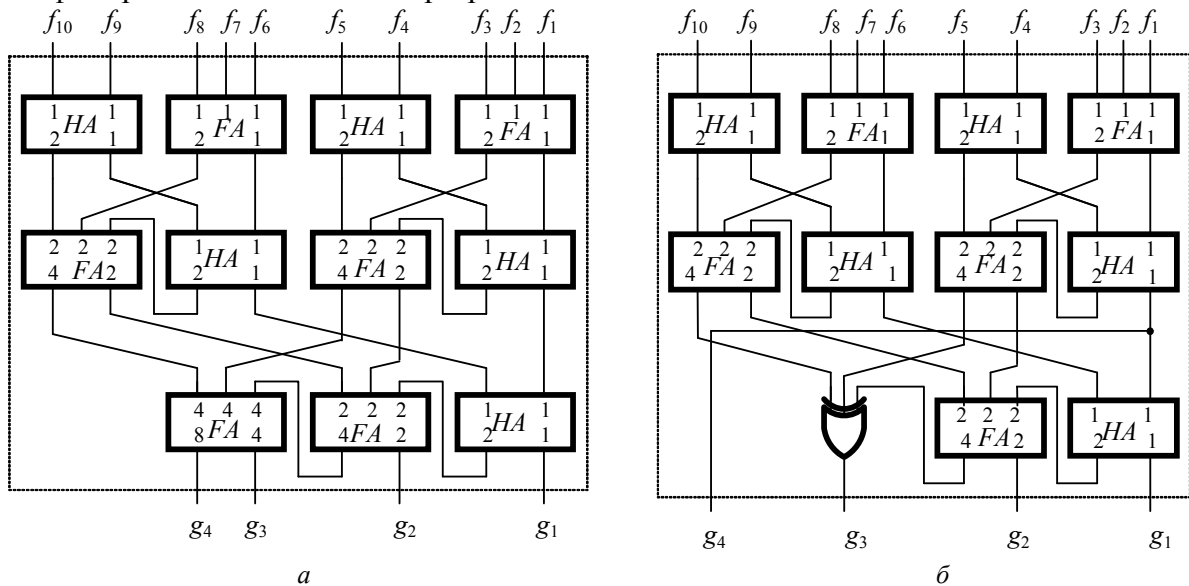


Рис. 5

Комбинируя способы подсчета поправочных коэффициентов α_1 и α_2 , можно построить большое количество $TMS(m,k)$ -кодов для каждого конкретного значения m . Каждый поправочный коэффициент может быть вычислен $\sum_{i=1}^{m-1} C_m^i = 2^m - 2$ способами, откуда следует, что

для каждого значения m можно построить $(2^m - 2)^2$ $TMS(m,k)$ -кодов. К примеру, для $m=10$

имеем $(2^{10} - 2)^2 = 1022^2 = 1044484$ $TMS(10,4)$ -кодов. Число кодов с различными характеристиками обнаружения ошибок, естественно, гораздо меньше (например, способы построения, подразумевающие использование одинаковых формул подсчета поправочных коэффициентов, не дадут эффективного кода, и их следует отбросить при рассмотрении). Также отметим, что при определении наименьшего неотрицательного вычета на первом этапе построения кода можно подсчитывать вес неполного информационного вектора.

Заключение. Предложенный в статье способ построения кодов с суммированием позволяет расширить многообразие кодов, которые можно эффективно применять при построении компонентов надежных и безопасных систем управления. Трехмодульные коды с суммированием характеризуются более сбалансированным распределением информационных век-

торов между всеми контрольными векторами за счет поправочных коэффициентов α_1 и α_2 , чем известные коды с суммированием единичных разрядов. Это позволяет уменьшить общее количество необнаруживаемых ошибок в информационных векторах.

Класс трехмодульных кодов может быть расширен путем уменьшения значения модуля M и выбора его из множества степеней числа два. Кроме того, множество информационных разрядов может быть разбито на три подмножества для формирования соответствующих разрядов контрольного вектора. Приписывая отдельным разрядам или переходам между разрядами, занимающими соседние позиции в информационных векторах [35—38], весовые коэффициенты из множества натуральных чисел, можно строить *взвешенные трехмодульные коды с суммированием*.

Дальнейшие исследования характеристик обнаружения ошибок трехмодульными кодами с суммированием позволят установить критерии их применимости при решении конкретных задач проектирования надежных и безопасных компонентов систем управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Христов Х. А., Гавзов Д. В. Методы построения безопасных микроэлектронных систем железнодорожной автоматики / Под ред. Вл. В. Сапожникова. М.: Транспорт, 1995. 272 с.
2. Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Гёссель М. Самодвойственные дискретные устройства. СПб: Энергоатомиздат, 2001. 331 с.
3. Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Валиев Р. Ш. Синтез самодвойственных дискретных систем. СПб: Элмор, 2006. 224 с.
4. 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.
5. Рабочее диагностирование безопасных информационно-управляющих систем / А. В. Дрозд, В. С. Харченко, С. Г. Антощук, Ю. В. Дрозд, М. А. Дрозд, Ю. Ю. Сулима; Под ред. А. В. Дрозда и В. С. Харченко. Харьков: Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского „ХАИ“, 2012. 614 с.
6. Ефанов Д. В. Функциональный контроль и мониторинг устройств железнодорожной автоматики и телемеханики. СПб: ПГУПС, 2016. 171 с.
7. Kharchenko V., Kondratenko Yu., Kasprzyk J. Green IT Engineering: Concepts, Models, Complex Systems Architectures // Studies in Systems, Decision and Control: Springer Book series. 2017. Vol. 74. 305 p. DOI: 10.1007/978-3-319-44162-7.
8. Lala P. K. Principles of Modern Digital Design. New Jersey: John Wiley & Sons, 2007. 419 p.
9. Navabi Z. Digital System Test and Testable Design: Using HDL Models and Architectures. Springer Science+Business Media, LLC, 2011. 435 p.
10. Hahanov V. Cyber Physical Computing for IoT-driven Services. Springer International Publishing AG, Cham, Switzerland, 2018. 279 p. DOI: 10.1007/978-3-319-54825-8.
11. Berger J. M. A Note on Error Detection Codes for Asymmetric Channels // Information and Control. 1961. Vol. 4, Is. 1. P. 68—73. DOI: 10.1016/S0019-9958(61)80037-5.
12. Efanov D., Sapozhnikov V., Sapozhnikov V. Generalized Algorithm of Building Summation Codes for the Tasks of Technical Diagnostics of Discrete Systems // Proc. of 15th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2017). Novi Sad, Serbia, 29 September—2 October, 2017. P. 365—371. DOI: 10.1109/EWDTS.2017.8110126.
13. Согомонян Е. С., Слабаков Е. В. Самопроверяемые устройства и отказоустойчивые системы. М.: Радио и связь, 1989. 208 с.
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. 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.
17. Гессель М., Согомонян Е. С. Построение самотестируемых и самопроверяемых комбинационных устройств со слабозависимыми выходами // Автоматика и телемеханика. 1992. № 8. С. 150—160.
18. Sogomonyan E. S., Gössel M. Design of Self-Testing and On-Line Fault Detection Combinational Circuits with Weakly Independent Outputs // J. of Electronic Testing: Theory and Applications. 1993. Vol. 4, is. 4. P. 267—281. DOI:10.1007/BF00971975.
19. Busaba F. Y., Lala P. K. Self-Checking Combinational Circuit Design for Single and Unidirectional Multibit Errors // J. of Electronic Testing: Theory and Applications. 1994. Is. 1. P. 19—28. DOI: 10.1007/BF00971960.
20. Nicolaidis M., Zorian Y. On-Line Testing for VLSI — A Compendium of Approaches // J. of Electronic Testing: Theory and Applications. 1998. № 12. P. 7—20. DOI: 10.1023/A:1008244815697.
21. Sapozhnikov V. V., Morosov A., Sapozhnikov Vl. V., Göessel M. A New Design Method for Self-Checking Unidirectional Combinational Circuits // J. of Electronic Testing: Theory and Applications. 1998. Vol. 12, is. 1—2. P. 41—53. DOI: 10.1023/A:1008257118423.
22. Matrosova A. Yu., Levin I., Ostanin S. A. Self-Checking Synchronous FSM Network Design with Low Overhead // VLSI Design. 2000. Vol. 11, is. 1. P. 47—58. DOI: 10.1155/2000/46578.
23. Ostanin S. Self-Checking Synchronous FSM Network Design for Path Delay Faults // Proc. of 15th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2017). Novi Sad, Serbia, 29 September —2 October 2017. P. 696—699. DOI: 10.1109/EWDTS.2017.8110129.
24. Sapozhnikov V., Sapozhnikov Vl., Efanov D. Search Algorithm for Fully Tested Elements in Combinational Circuits, Controlled on the Basis of Berger Codes // Proc. of 15th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2017). Novi Sad, Serbia, 29 September—2 October 2017. P. 99—108. DOI: 10.1109/EWDTS.2017.8110085.
25. 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.
26. Ефанов Д. В., Сапожников В. В., Сапожников Вл. В. О свойствах кода с суммированием в схемах функционального контроля // Автоматика и телемеханика. 2010. № 6. С. 155—162.
27. Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В. Контроль комбинационных схем на основе кодов с суммированием с одним взвешенным информационным разрядом // Автоматика на транспорте. 2016. Т. 2, № 4. С. 564—597.
28. Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В. Модульно-взвешенные коды с суммированием с наименьшим общим числом необнаруживаемых ошибок в информационных векторах // Электронное моделирование. 2017. Т. 39, № 4. С. 69—88.
29. 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.
30. Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В. Коды с суммированием единичных информационных разрядов с произвольными модулями счета // Автоматика на транспорте. 2018. Т. 4, № 1. С. 106—130.
31. Efanov D. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V. Two-Modulus Codes with Summation of One-Data Bits for Technical Diagnostics of Discrete Systems // Automatic Control and Computer Sciences. 2018. Vol. 52, is. 1. P. 1—12. DOI: 10.3103/S0146411618010029.
32. Efanov D., Sapozhnikov V., Sapozhnikov Vl., Schagina V. The Analysis of Two-Modulus Codes Detection Ability with Summation of Unit Data Bits Compared to Classical and Modified Berger Codes // Proc. of 15th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2017). Novi Sad, Serbia, 29 September—2 October 2017. P. 141—148. DOI: 10.1109/EWDTS.2017.8110134.

33. Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В. Эффективный способ модификации кодов с суммированием единичных информационных разрядов // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60, № 11. С. 1020—1032. DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-11-1020-1032.
34. Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В. Алгоритмы синтеза генераторов модульных кодов с суммированием взвешенных переходов с последовательностью весовых коэффициентов, образующих натуральный ряд чисел // Автоматика на транспорте. 2017. Т. 3, № 2. С. 280—301.
35. Das D., Touba 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. DOI: 10.1109/VTEST.1999.766691.
36. Das D., Touba N. A., Seuring M., Gossel M. Low Cost Concurrent Error Detection Based on Modulo Weight-Based Codes // Proc. of the IEEE 6th Intern. On-Line Testing Workshop (IOLTW). Spain, Palma de Mallorca, 3—5 July, 2000. P. 171—176. DOI: 10.1109/OLT.2000.856633.
37. Мехов В. Б., Сапожников В. В., Сапожников Вл. В. Контроль комбинационных схем на основе модифицированных кодов с суммированием // Автоматика и телемеханика. 2008. № 8. С. 153—165.
38. 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.

Сведения об авторе

Дмитрий Викторович Ефанов

— д-р техн. наук, доцент; ООО „ЛокоТех-Сигнал“; Российский университет транспорта (МИИТ), кафедра автоматика, телемеханики и связи на железнодорожном транспорте;
E-mail: TrES-4b@yandex.ru

Поступила в редакцию
06.06.18 г.

Ссылка для цитирования: Ефанов Д. В. Трехмодульные коды с суммированием для технической диагностики и синтеза контролепригодных дискретных систем // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 2. С. 106—116.

THREE-MODULAR CODES WITH SUMMING FOR TECHNICAL DIAGNOSTICS AND SYNTHESIS OF CONTROLLABLE DISCRETE SYSTEMS

D. V. Efanov

Russian University of Transport, 127994, Moscow, Russia
E-mail: TrES-4b@yandex.ru

A method for constructing a code with summation of single information bits is presented. When constructing a code with summation, it is proposed to calculate the modified weight of the information vector by determining the smallest nonnegative deduction of its true weight using a predetermined module, and then correct the resulting number using two correction factors. These coefficients are calculated as convolutions modulo two of some different subsets of bits of the information vector. The code thus obtained is a three-modular code with the summation of single information bits, it is comparable in its redundancy with the classical Berger code but allows better detection of errors in the information vectors. Three-modular codes with summation extend the class of known codes with low redundancy, the use of which allows reducing the structural redundancy of testable discrete devices and technical means of diagnosing their components.

Keywords: discrete system, controllable structure, testing, Berger code, code with summation, error detection, code generator

REFERENCES

1. Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov V.I., Khristov Kh.A., Gavzov D.V. *Metody postroyeniya bezopasnykh mikroelektronnykh sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki* (Methods of Construction of Safe Microelectronic Systems of Railway Automation), Moscow, 1995, 272 p. (in Russ.)
2. Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov V.I., Göessel M. *Samodvoystvennyye diskretnyye ustroystva* (Self-Dual Discrete Devices), St. Petersburg, 2001, 331 p. (in Russ.)
3. Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov V.I., Valiyev R.Sh. *Sintez samodvoystvennykh diskretnykh sistem* (Synthesis of Self-Dual Discrete Systems), St. Petersburg, 2006, 224 p. (in Russ.)
4. Ubar R., Raik J., Vierhaus H.-T. *Design and Test Technology for Dependable Systems-on-Chip* (Pre-

- mier Reference Source), Information Science Reference, Hershey–NY, IGI Global, 2011, 578 p.
5. Drozd A.V., Kharchenko V.S., Antoshchuk S.G., Drozd Yu.V., Drozd M.A., Sulima Yu.Yu. *Rabocheye diagnostirovaniye bezopasnykh informatsionno-upravlyayushchikh sistem* (Working Diagnostics of Safe Information and Control Systems), Khar'kov, 2012, 614 p. (in Russ.)
 6. Efanov D.V. *Funktsional'nyy kontrol' i monitoring ustroystv zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki* (Functional Control and Monitoring of Devices of Railway Automatic Equipment and Telemechanics), St. Petersburg, 2016, 171 p. (in Russ.)
 7. Kharchenko V., Kondratenko Yu., Kacprzyk J. *Springer Book series "Studies in Systems, Decision and Control"*, 2017, vol. 74, 305 p. DOI: 10.1007/978-3-319-44162-7.
 8. Lala P.K. *Principles of Modern Digital Design*, New Jersey, John Wiley & Sons, 2007, 419 p.
 9. Navabi Z. *Digital System Test and Testable Design: Using HDL Models and Architectures*, Springer Science+Business Media, LLC 2011, 435 p.
 10. Hahanov V. *Cyber Physical Computing for IoT-driven Services*, Springer International Publishing AG, Cham, Switzerland, 2018, 279 p. DOI: 10.1007/978-3-319-54825-8.
 11. Berger J.M. *Information and Control*, 1961, no. 1(4), pp. 68–73. DOI: 10.1016/S0019-9958(61)80037-5.
 12. Efanov D., Sapozhnikov V., Sapozhnikov VI. *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. 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.)
 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. 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.
 17. Gössel M., Sogomonyan E.S. *AUTOMATION AND REMOTE CONTROL*, 1992, no. 8, pp. 150–160. (in Russ.)
 18. Sogomonyan E.S., Gössel M. *Journal of Electronic Testing: Theory and Applications*, 1993, no. 4(4), pp. 267–281. DOI:10.1007/BF00971975.
 19. Busaba F.Y., Lala P.K. *Journal of Electronic Testing: Theory and Applications*, 1994, no. 1, pp. 19–28. DOI: 10.1007/BF00971960.
 20. Nicolaidis M., Zorian Y. *Journal of Electronic Testing: Theory and Applications*, 1998, no. 12, pp. 7–20. DOI: 10.1023/A:1008244815697.
 21. Sapozhnikov V.V., Morosov A., Sapozhnikov VI.V., Göessel M. *Journal of Electronic Testing: Theory and Applications*, 1998, no. 1-2(12), pp. 41–53. DOI: 10.1023/A:1008257118423.
 22. Matrosova A.Yu., Levin I., Ostanin S.A. *VLSI Design*, 2000, no. 1(11), pp. 47–58. DOI: 10.1155/2000/46578.
 23. 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.
 24. Sapozhnikov V., Sapozhnikov VI., Efanov D. *Proceedings of 15th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2017)*, Novi Sad, Serbia, September 29–October 2, 2017, pp. 99–108. DOI: 10.1109/EWDTS.2017.8110085.
 25. Efanov D.V., Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov VI.V. *AUTOMATION AND REMOTE CONTROL*, 2017, no. 5(78), pp. 891–901.
 26. Efanov D.V., Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov VI.V. *AUTOMATION AND REMOTE CONTROL*, 2010, no. 6, pp. 1117–1123.
 27. Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov VI.V., Efanov D.V. *Automation on transport*, 2016, no. 4(2), pp. 564–597. (in Russ.)
 28. Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov VI.V., Efanov D.V. *MODELLING AND SIMULATION IN ENGINEERING*, 2017, no. 4(39), pp. 69–88. (in Russ.)
 29. Blyudov A.A., Efanov D.V., Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov VI.V. *MODELLING AND SIMULATION IN ENGINEERING*, 2012, no. 6(34), pp. 17–29. (in Russ.)
 30. Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov VI.V., Efanov D.V. *Automation on transport*, 2018, no. 1(4), pp. 106–130. (in Russ.)
 31. Efanov D.V., Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov VI.V. *Automatic Control and Computer Sciences*, 2018, no. 1(52), pp. 1–12. DOI: 10.3103/S0146411618010029.
 32. Efanov D., Sapozhnikov V., Sapozhnikov VI., Schagina V. *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.
 33. Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov VI.V., Efanov D.V. *Journal of Instrument Engineering*, 2017, no. 11(60), pp. 1020–1032. DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-11-1020-1032.
 34. Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov VI.V., Efanov D.V. *Automation on transport*, 2017, no. 2(3), pp. 280–301. (in Russ.)
 35. Das D., Toubia N.A. *Proceedings of 17th IEEE Test Symposium*, California, USA, 1999, pp. 370–376. DOI: 10.1109/VTEST.1999.766691.
 36. Das D., Toubia N.A., Seuring M., Gossel M. *Proceedings of the IEEE 6th International On-Line Testing Workshop (IOLTW)*, Spain, Palma de Mallorca, July 3–5, 2000, pp. 171–176. DOI: 10.1109/OLT.2000.856633.

37. Mekhov V.B., Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov VI.V. *AUTOMATION AND REMOTE CONTROL*, 2008, no. 8, pp. 1411–1422. (in Russ.)
38. Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov VI.V., Efanov D.V. *MODELLING AND SIMULATION IN ENGINEERING*, 2014, no. 1(36), pp. 59–80. (in Russ.)

Data on author

Dmitry V. Efanov — Dr. Sci., Associate Professor; LocoTech-Signal Ltd.; Russian University of Transport, Department of Automation, Remote Control and Communication in Railway Transport; E-mail: TrES-4b@yandex.ru

For citation: Efanov D. V. Three-modular codes with summing for technical diagnostics and synthesis of controllable discrete systems. *Journal of Instrument Engineering*. 2019. Vol. 62, N 2. P. 106—116 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-2-106-116