

## Список литературы

- 1 Behjat, V. A new statistical approach to interpret power transformer frequency response analysis: Nonparametric statistical methods / V. Behjat, M. Mahvi, E. Rahimpour // 30th International Power System Conference (PSC), Tehran, Iran. – 2015. – P. 142–148. – DOI: 10.1109/IPSC.2015.7827740.
- 2 Evaluation of numerical indices for the assessment of transformer frequency response. IET Generation, Transmission & Distribution / M. H. Samimi, S. Tenbohlen, A. A. S. Akmal, H. Mohseni. – 2017. – Vol. 11, № 1. – P. 218–227. – DOI: 10.1049/iet-gtd.2016.0879.
- 3 Громыко, И. Л. Метод неразрушающего контроля состояния однофазных и трёхфазных трансформаторов на основе частотных характеристик / И. Л. Громыко, В. Н. Галушко // Приборы и методы измерений. – 2025. – Т. 16, № 2. – С. 58–167. – DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-2-158-167.

УДК 004.052.32+681.518.5

## К ОРГАНИЗАЦИИ КОНТРОЛЯ САМОДВОЙСТВЕННОСТИ БУЛЕВЫХ ФУНКЦИЙ НА ВЫХОДАХ ДИСКРЕТНЫХ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ ЛОГИЧЕСКОЙ КОРРЕКЦИИ СИГНАЛОВ И РАВНОВЕСНЫХ КОДОВ

Д. В. ЕФАНОВ

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Российская Федерация

Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва

Ташкентский государственный транспортный университет, Республика Узбекистан

В ряде работ [1–3] показано, что одним из эффективных подходов к организации схем встроенного контроля (СВК) для дискретных устройств автоматики и вычислительной техники является использование сразу же нескольких диагностических признаков. При незначительном усложнении контрольного оборудования удается значительно повысить наблюдаемость ошибок на контрольных выходах СВК по сравнению с традиционными методами контроля по одному диагностическому признаку. В зависимости от элементной базы объекта диагностирования, конфигурации элементов и связей между ними, сложности реализуемых булевых функций на его выходах, видов неисправностей удается повысить показатели наблюдаемости в среднем на 25–40 %. Такой эффект объясняется импульсным режимом работы при подаче сигналов логического 0 и логической 1 в виде последовательностей импульсов 0101...01 и 1010...10 соответственно и дополнительным кодовым контролем вычислений. Естественно, это требует временной избыточности и специальной настройки работы устройств [4–6].

В [7, 8] обсуждаются вопросы применения равновесных кодов при организации СВК на основе ЛКС с дополнительным контролем вычислений по признаку самодвойственности булевых функций, описывающих контролируемые выходы. Предлагается для организации контроля вычислений таким образом использовать равновесные коды «*r* из *2r*» (*r/2r*-коды), где *r* – вес кодового слова, а *2r* = *n* – длина кодового слова (количество разрядов в нем). Среди равновесных кодов только такие коды можно использовать для организации контроля вычислений сразу же по двум диагностическим признакам. Это объясняется тем фактом, что множество кодовых слов *r/2r*-кодов содержит пары ортогональных по всем разрядам кодовых слов. Именно поэтому данные коды и можно применить при организации СВК по двум диагностическим признакам.

Среди равновесных кодов вида *r/2r* можно выделить коды 2/4, 3/6, 4/8, 5/10 и т. д. Мощности *N* множеств кодовых слов данных кодов образуют такую последовательность: 6, 20, 70, 252, ... . Это последовательность центральных биномиальных коэффициентов (A000984 в последовательности Слоана [9]). С ростом *n* существенно растет мощность множества кодовых слов равновесного кода, что приводит и к росту сложности тестера. Кроме того, в общем случае при синтезе СВК по двум диагностическим признакам требуется учитывать ограничение  $2^t \geq C_{2r}^r$ , где  $t \in \mathbb{N}$  – число входов объекта диагностирования. Это равносильно условию  $t \geq \log_2 C_{2r}^r$ . В противном случае не удастся сгенерировать полное множество кодовых слов кода *r/2r*. Здесь возникает ограничение числа входов *t<sub>min</sub>* объекта диагностирования для применения контроля вычислений по нескольким диагностическим признакам (таблица 1).

Таблица 1 – Параметры кодов  $r/2r$  и объектов диагностирования для организации СВК

$r$	$2r$	$N$	$\log_2 C_{2r}^r$	$t_{\min}$	$r$	$2r$	$N$	$\log_2 C_{2r}^r$	$t_{\min}$
2	4	6	2,585	3	7	14	3432	11,745	12
3	6	20	4,322	5	8	16	12870	13,652	14
4	8	70	6,129	7	9	18	48620	15,569	16
5	10	252	7,977	8	10	20	184756	17,495	18
6	12	924	9,852	10					

Следует отметить, что напрямую коды  $r/2r$  подходят для организации СВК по двум диагностическим признакам для тех объектов диагностирования, которые имеют число выходов  $m = 2r$ . Для объектов диагностирования с числом выходов  $m \neq 2r$  (с нечетным их числом) можно предложить два подхода к организации СВК по двум диагностическим признакам. Первый подход тривиален и состоит в выделении групп выходов с мощностью, равной  $2r$ . Например, для  $m = 11$  можно предложить выделение трех групп выходов по четыре выхода в каждой (один из выходов будет входить сразу же в две группы) и контроль вычислений по 2/4-коду или же выделение двух групп по шесть выходов в каждой (один из выходов будет присутствовать в обеих группах) с контролем вычислений по 3/6-коду и т. д. СВК в этом случае синтезируются по аналогии со структурой из [7, 8]. Выходы отдельных подсхем контроля объединяются на выходах самопроверяемого компаратора, синтезируемого на основе элементарных модулей сжатия парафазных сигналов [10]. Второй подход ранее не обсуждался в литературе и связан с тем, что контроль вычислений на нечетном числе выходов можно организовывать с использованием кода  $r/2r$  с параметром  $2r = m + 1$ . В этом случае дополнительный выход с блока вычисления контрольных сигналов будет напрямую, без какой-либо коррекции, формировать требуемый разряд кодового слова. К примеру, для того же случая  $m = 11$  получаем  $2r = m + 1 = 11 + 1 = 12$ ,  $r = 6$ . Выделяем одну группу выходов и контролируем ее на основе 6/12-кода. Естественно, с учетом ограничений, приведенных в таблице 1. Если же число входов меньше обозначенного, то требуется использовать контроль вычислений по коду с меньшим значением  $r$ .

При синтезе СВК по двум диагностическим признакам требуется производить оценку показателей структурной избыточности по сравнению с традиционными методами, а также оценку показателей обнаруживающей способности. При этом может быть разработан метод, позволяющий за счет модификации структуры объекта диагностирования в некоторую контролепригодную структуру покрывать полное множество ошибок, вызываемых неисправностями из заданной модели. Один из таких методов уже известен и описан в [11]. Но этот метод не учитывает возможности контроля вычислений по двум диагностическим признакам и может быть усовершенствован. К настоящему моменту времени вопрос его модификации остается без ответа.

Существует колоссальное количество способов организации СВК по двум диагностическим признакам с использованием равновесных кодов  $r/2r$ . При этом разработчик систем диагностирования может синтезировать большое число вариантов СВК даже при выборе одного из вариантов контроля (за счет различных способов доопределения сигналов на каждом наборе значений аргументов [12]). Подход к организации СВК по двум диагностическим признакам интересен во многих приложениях, например, при построении систем критического применения с обнаружением неисправностей при условии редко меняющихся входных данных [13, 14].

#### Список литературы

- 1 Ефанов, Д. В. Исследование свойств самодвойственных комбинационных устройств с контролем вычислений на основе кодов Хэмминга / Д. В. Ефанов, Т. С. Погодина // Информатика и автоматизация. – 2023. – Т. 22, № 2. – С. 349–392. – DOI: 10.15622/ia.22.2.5.
- 2 Ефанов, Д. В. Самодвойственные цифровые устройства с контролем вычислений по кодам Сяо / Д. В. Ефанов, Т. С. Погодина // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2023. – № 63. – С. 118–136. – DOI: 10.17223/19988605/63/14.
- 3 Combinational Circuits Testing Based on Hsiao Codes with Self-Dual Check Functions / D. V. Efanov, T. S. Pogodina, N. M. Aripov [et al.] // Computation. – 2025. – Vol. 13, is. 1. – 15. – DOI: 10.3390/computation13010015.
- 4 Аксёнова, Г. П. Восстановление в дублированных устройствах методом инвертирования данных / Г. П. Аксёнова // Автоматика и телемеханика. – 1987. – № 10. – С. 144–153.

5 Обнаружение неисправностей в самопроверяемых комбинационных схемах с использованием свойств самодвойственных функций / М. Гессель, В. И. Мошанин, В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. – 1997. – № 12. – С. 193–200.

6 Ефанов, Д. В. Тестеры самодвойственных и «бллизких» к ним сигналов / Д. В. Ефанов, Д. В. Пивоваров // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2024. – Т. 67, № 1. – С. 5–19. – DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-1-5-19.

7 Self-Dual Complement Method up to Constant-Weight Codes for Arrangement of Combinational Logical Circuits Concurrent Error-Detection Systems / D. Efanov, V. Sapozhnikov, VI. Sapozhnikov [et al.] // Proceedings of 17th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTs'2019), Batumi, Georgia, September 13–16, 2019. – Р. 136–143. – DOI: 10.1109/EWDTs.2019.8884398.

8 Обнаружение неисправностей в комбинационных схемах на основе самодвойственного дополнения до равновесных кодов / Д. В. Ефанов, В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Пивоваров // Труды Института системного программирования РАН. – 2019. – Т. 31, № 1. – С. 115–132. – DOI: 10.15514/ISPRAS-2019-31(1)-8.

9 The On-Line Encyclopedia of Integer Sequences (OEIS). – URL: <https://oeis.org/> (дата обращения: 20.01.2025).

10 Lala, P. K. Self-Checking and Fault-Tolerant Digital Design / P. K. Lala. – San Francisco : Morgan Kaufmann Publishers, 2001. – 216 р.

11 Построение самопроверяемых комбинационных схем на основе свойств самодвойственных функций / М. Гессель, А. А. Морозов, В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. – 2000. – № 2. – С. 151–163.

12 Efanov, D. V. Investigation of Ways of Synthesizing Concurrent Error-Detection Circuits Based on Boolean Signal Correction Using Uniform Separable Codes / D. V. Efanov, Y. I. Yelina // Russian Microelectronics. – 2024. – Vol. 53, № 5. – Р. 471–482. – DOI: 10.1134/S1063739724600456.

13 Checkability of the Digital Components in Safety-Critical Systems: Problems and Solutions / A. Drozd, V. Kharchenko, S. Antoshchuk [et al.] // Proceedings of 9th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTs'2011), Sevastopol, 2011. – Р. 411–416. – DOI: 10.1109/EWDTs.2011.6116606.

14 Сапожников, Вл. В. Синтез систем управления движением поездов на железнодорожных станциях с исключением опасных отказов / Вл. В. Сапожников. – М. : Наука, 2021. – 229 с.

УДК 004.052.32+681.518.5

## МЕТОДИКА СИНТЕЗА САМОКВАЗИДВОЙСТВЕННЫХ ДИСКРЕТНЫХ УСТРОЙСТВ С КОНТРОЛЕМ ВЫЧИСЛЕНИЙ ПО ДВУМ ДИАГНОСТИЧЕСКИМ ПРИЗНАКАМ

Д. В. ЕФАНОВ

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Российская Федерация

Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва

Ташкентский государственный транспортный университет, Республика Узбекистан

Развитие технологий синтеза дискретных устройств и систем управления ответственными технологическими процессами, несомненно, связано и с параллельным совершенствованием области технической диагностики. Особую значимость теоретические исследования принимают при создании новой элементной базы или развитии малоизученных компонентов. Например, так дело обстоит в исследовании особенностей квантовых вычислений [1, 2]. Поэтому важно не только разрабатывать новые методы построения и реализации дискретных устройств с высокими показателями надежности и безопасности, но и продумывать и исследовать методы наделения их структур свойствами контролепригодности, самопроверяемости и отказоустойчивости. Центральным вопросом здесь оказывается возможность создания устройства с оперативным обнаружением неисправностей [3, 4].

Исследования автора показали, что при синтезе дискретных устройств с обнаружением неисправностей можно использовать сразу же два и более диагностических признака для контроля вычислений [5]. При этом структурная избыточность схемы встроенного контроля увеличивается незначительно за счет довольно простых контрольных устройств, а наблюдаемость ошибок на контрольных выходах возрастает на 25–40 % в зависимости от структуры объекта диагностирования и условий трансляции ошибок, вызываемых неисправностями, на его выходы [6].

При синтезе дискретных устройств с обнаружением неисправностей по двум и более диагностическим признакам оказывается эффективным использование логической коррекции сигналов (ЛКС), впервые описанной в [7] под названием «логическое дополнение». Особое место здесь имеют равновесные коды « $r$  из  $n$ » ( $r/n$ -коды), где  $r$  и  $n$  – вес кодового слова и его длина. Довольно легко синтезируется схема встроенного контроля (СВК) по кодам вида  $r/2r$ , например 2/4, 3/6 и т. д. В [8] предложено использовать такие коды при синтезе СВК с контролем вычислений по признакам при-