

Разработка системы автоматизированного проектирования СФК на основе методов избыточного кодирования

Т. Д. Жукова

Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН, zhukova_t@ippm.ru

Аннотация — В настоящее время в связи с необходимостью обеспечения повышенных характеристик радиационной стойкости и сбоеустойчивости комбинационных схем, наибольшее развитие получают методы, основанные на синтезе средств функционального контроля. Данные методы позволяют за счет внесения дополнительной структурной избыточности выполнить обнаружение, а в некоторых случаях (при необходимости) исправление ошибок. Полученные схемы функционального контроля (СФК) обладают различными характеристиками надежности, которые различаются для разных комбинационных схем, что затрудняет выбор той или иной архитектуры. В связи с этим возникает необходимость разработки системы, позволяющей автоматизировать выбор наилучшего метода для синтеза СФК. В рамках данной статьи разработана система автоматизированного проектирования схем контроля на основе методов избыточного кодирования. Данная система позволяет по заданным ограничениям на структурную избыточность и характеристики надежности провести анализ по определению наилучшего метода для синтеза СФК. Был проведен ряд экспериментов по оценке эффективности работы системы, результаты которых помогли определить преимущества и недостатки каждого из методов в плане вносимой в комбинационную схему структурной избыточности. Была выведена формула для расчета характеристик надежности СФК по исходным параметрам комбинационной схемы. Эксперименты продемонстрировали высокую точность полученных аналитических выражений в сравнении с реальным моделированием.

Ключевые слова — сбоеустойчивость, комбинационные схемы, информационная избыточность, избыточное кодирование, спектральный R-код, низкоплотностный код, LDPC-код, трехбитное пространство Хэмминга.

I. ВВЕДЕНИЕ

Развитие микроэлектронной промышленности сопровождается повышением сложности, а также снижением энергопотребления и повышением скорости работы разрабатываемых устройств, что в свою очередь влечет за собой снижение надежности и сбоеустойчивости субмикронных интегральных схем. Данные факторы приводят к тому, что на сегодняшний момент в мире складывается ситуация, при которой сбоеустойчивость в микроэлектронике стала одним из основных и важнейших условий определения работоспособности проектируемой аппаратуры [1].

Ухудшение характеристик происходит за счет повышения вероятности возникновения в разрабатываемой аппаратуре кратковременных обратимых сбоев вследствие воздействия на нее различных дестабилизирующих эффектов таких, как температура, радиационное излучение и т.д., что приводит к изменению состояния элементов памяти или инвертированию сигналов в комбинационных блоках, входящих в состав аппаратуры.

Традиционно вопросам разработки методов повышения сбоеустойчивости комбинационных устройств уделяли меньше внимания по сравнению с последовательностными за счет наличия в комбинационной логике естественного барьера [2], позволяющего остановить распространение неисправности. Данная неотъемлемая защита основана на следующих механизмах маскирования [3]:

– логическое маскирование (Logical Masking), позволяющее реализовывать такие схемы, в которых ошибки на вентилях не приводят к появлению ошибок на результирующем выходе схемы благодаря маскирующим свойствам самих вентилях;

– электрическое маскирование (Electrical Masking), обеспечивающее защиту путем ослабления электрического импульса с помощью прохождения через различные электронные компоненты;

– временное маскирование (Latching Window Masking), основанное на том факте, что длительность дестабилизирующих эффектов обычно очень мала, и сбой может попросту не попасть в фазу записи информации на последовательные устройства.

Несмотря на тенденции бурного развития современных технологий, в качестве основного метода повышения надежности систем используются методы на основе кратного резервирования, позволяющие реализовать защиту всей схемы. К сожалению, за такую защиту приходится платить существенными структурными затратами. Например, применение метода тройного модульного резервирования (Triple Modular Redundancy, TMR) позволяет выполнить исправление однократной ошибки при увеличении размера схемы чуть более, чем в 3 раза. Все это объясняет необходимость разработки и поиска новых решений.

На сегодняшний день большое внимание и развитие стали получать методы, основанные на реализации

средств контроля [4]-[7]. Данные методы в зависимости от вида контроля можно разделить на две группы [8]:

- тестовый контроль (offline testing) – проводится вне штатной работы устройства;

- функциональный контроль (online testing) – проводится непрерывно в рабочем режиме.

В рамках комбинационных схем реализация функционального контроля производится с помощью добавления дополнительной подсхемы, способной сигнализировать о наличии ошибки, а также, в некоторых случаях, произвести её исправление.

Развитием разработанных методов и средств синтеза схем функционального контроля (СФК) на основе методов избыточного кодирования служит представленная в данной статье система автоматизированного проектирования для определения наилучшего метода синтеза схем контроля для конкретной комбинационной схемы.

Дальнейшее содержание работы включает следующие разделы. В разделе II содержится краткое описание кодов, используемых для реализации системы автоматизированного проектирования, а также представлен метод кластеризации выходов комбинационной схемы, позволяющий снизить вероятность возникновения многократных ошибок в СФК. В разделе III приведено описание основных характеристик, на которые опирается система автоматизированного проектирования при проектировании наилучшей СФК для заданной пользователем комбинационной схемы. Представлена формула для вычисления вероятности пропуска ошибки для заданной СФК. В разделе IV приведено краткое описание разработанной системы. В заключительном V разделе представлены результаты численных экспериментов и соответствующие выводы.

II. МЕТОДЫ АППАРАТНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ СХЕМ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ

Реализация схем функционального контроля – это эффективный способ повышения сбоеустойчивости комбинационных участков интегральных схем [9]. В настоящее время существуют различные способы реализации СФК, объединенные базовой идеей, которая заключается во внесении структурной избыточности, с помощью которой происходит обнаружение и/или исправление ошибок в основной схеме (ОС). Эффективность применения схем функционального контроля оценивается как отношение структурной избыточности схемы к вероятности обнаружения и/или исправления ошибок. Рассмотрим различные методы построения СФК.

A. Метод на основе трехбитного пространства Хэмминга

Данная схема контроля основана на реализации булевой алгебры в n битном пространстве Хэмминга [10], позволяющей выполнить исправление или обнаружение ошибок на расстоянии в один бит.

Основная идея данного метода заключается в замене логических элементов (ЛЭ) комбинационной схемы на их сбоеустойчивые аналоги, реализованные в базисе трехбитного пространства Хэмминга [11]. Такая реализация позволяет каждому сбоеустойчивому аналогу ЛЭ выполнить исправление ошибки, возникшей на предыдущем элементе.

На рис. 1 представлена структурная схема СФК на основе кодирования в трехбитном пространстве Хэмминга.

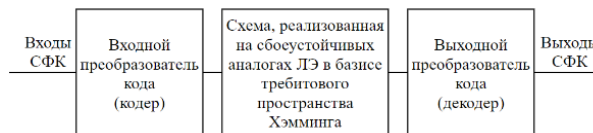


Рис. 1. Структура схемы функционального контроля на основе кодирования в трехбитном пространстве Хэмминга

В рассматриваемой СФК для преобразования из обычного пространства в трехбитовое и наоборот используются входной и выходной преобразователи (кодер и декодер).

B. Метод на основе спектрального R-кода

Число проверочных разрядов для кода составляет $m = \lceil \log k \rceil + 1$, что образует блочный систематический код с проверкой на четность. Порождающей матрицей данного кода является единичная матрица k -го порядка с присоединённой $G_{RM}(k, 1)$ кода Рида-Маллера первого порядка длины 2^k .

Значения порождающей матрицы можно получить линейным преобразованием аргумента и значений дискретных функций Радемахера. Как известно, система данных функций является ортогональной, ортонормированной и неполной и может быть использована для получения функций Уолша. В силу этого описанный код назван R спектральным [12].

На рис. 2 представлена структурная схема СФК, образованной на основе рассматриваемого кода.



Рис. 2. Структура схемы функционального контроля на основе спектрального R-кода

Данная СФК способна выполнить исправление однократной ошибки, а также обнаружение двукратной [13]. Для парирования возникающих в комбинационной схеме ошибок в схеме контроля используется синдромное декодирование.

С. Метод на основе низкоплотного (LDPC) кода

Низкоплотный код (LDPC, low-density parity check code) – частный случай блочного линейного (n, k) -кода с проверкой на четность, в котором проверочная матрица $H_{m \times n}$ является сильно разреженной (содержит большое число 0). Малое число единиц в данной проверочной матрице обеспечивает простоту проверки на четность. Схема контроля на основе данного кода позволяет выполнить исправление однократной ошибки.

Структурная схема СФК на основе LDPC-кода, изображена на рис. 3 [14].

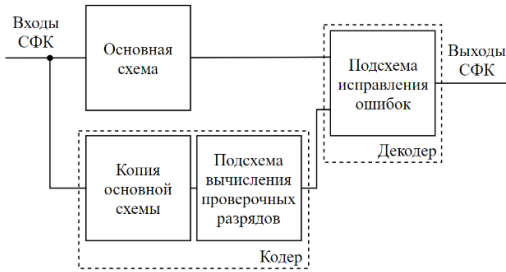


Рис. 3. Структура схемы функционального контроля на основе низкоплотного LDPC-кода

В качестве метода декодирования для рассматриваемой схемы контроля был выбран метод мажоритарного декодирования за счет легкости и простоты его выполнения. Основная идея данного метода заключается в составлении для каждого информационного разряда системы проверки, выполняющей сравнение полученных значений по методу большинства с помощью мажоритарных элементов. В качестве уравнений проверок используются линейные комбинации строк проверочной матрицы H .

Д. Кластеризация выходов комбинационной схемы

Для уменьшения вероятности возникновения многократных ошибок в системе автоматизированного проектирования используется алгоритм разбиения выходов основной комбинационной схемы с последующим синтезом СФК для каждой из полученных групп [15]. Использование данного подхода позволяет значительно повысить вероятность обнаружения/исправления ошибок кодами SEC/DED, но при этом приводит к дополнительным структурным затратам.

На рис. 4 представлена структурная схема разработанного алгоритма с последующим построением для каждой из групп выходов схемы контроля. В нем производится разбиение множества выходов схемы на две, необязательно равные группы. Алгоритм является детерминированным и жадным, и при необходимости может быть применен еще раз к одному из образовавшихся кластеров или к каждому из них. Блок-схема алгоритма кластеризации представлена на рис. 5.

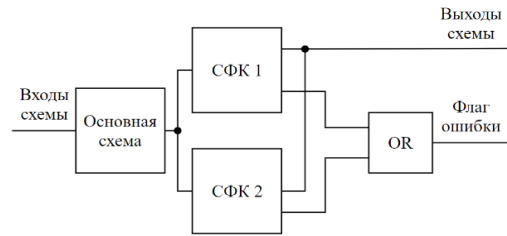


Рис. 4. Кластеризация выходов комбинационной схемы с последующим синтезом для каждой из полученных групп выходов СФК

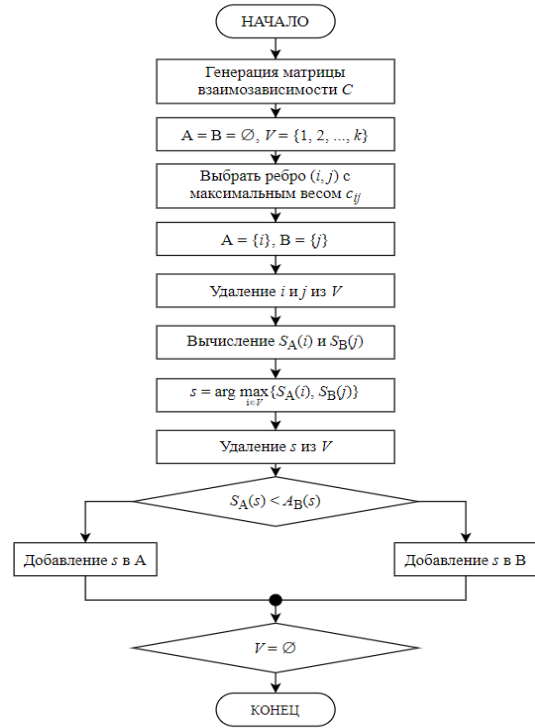


Рис. 5. Блок-схема алгоритма кластеризации выходов комбинационной схемы

Исходной информацией для данного алгоритма является квадратная симметрическая матрица взаимозависимости ошибок на выходах ОС. Данная матрица получается за счет подачи на входы схемы достаточно большой серии случайных входных наборов данных с выполнением инжектирования однократных ошибок на ее ЛЭ.

III. РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ СФК

В рамках данной статьи была разработана система автоматизированного проектирования, которая за счет вводимых пользователем ограничений (по структурной избыточности и характеристики надежности – вероятности возникновения пропуска ошибки [16]) проводит анализ для определения наилучшей для рассматриваемого логического устройства СФК на основе методов избыточного кодирования. В качестве пропуска рассматривается ситуация, при которой схема контроля не смогла обнаружить и выполнить исправление ошибки.

Для вычисления теоретического значения структурной избыточности для каждого из методов синтеза схем контроля (с учетом кластеризации выходов и без), входящих в состав разработанной системы, были выведены аналитические формулы, которые позволили получить предварительные значения структурной избыточности схемы без ее реального синтеза.

Для оценки вероятности пропуска ошибки была выведена формула, позволяющая выполнить предварительный расчет для метода синтеза СФК на основе спектрального R-кода. Для ее получения был проведен анализ основных блоков схемы контроля с целью определения подсхем, ошибка на которых может привести к пропуску.

Итоговая формула вычисления предполагаемой вероятности пропуска для схем контроля на основе спектрального R-кода имеет следующий вид:

$$P = \sum_{i=3,5,\dots}^{rate_{max}} \beta p_i + \sum_{i=4,6,\dots}^{rate_{max}} \beta p_i f_i + \frac{k}{M_{СФК} - M_K} + \left(1 - \frac{2^{2k+1} - 1}{2^{3k+1} - 1}\right) \left(\frac{3k + 1}{M_{СФК} - M_K}\right),$$

где $rate_{max}$ – максимальная кратность ошибки, которая может возникнуть в ОС, $\beta = \frac{M}{M_{СФК} - M_K}$ – вероятность того, что однократная ошибка попадет в ОС, входящую в СФК, p_i – вероятность возникновения в ОС ошибки i кратности, f_i – вероятность возникновения $flag = 0$ при возникновении четной ошибки, k – число информационных разрядов (выходов ОС), $M_{СФК}$ – число элементов в схеме контроля, M_K – число элементов, входящих в защитный конус.

Система помимо анализа по предполагаемой структурной избыточности также проводит моделирование для предварительного выявления коррелирующих выходов комбинационного устройства. Данный тип анализа позволяет определить необходимость выполнения разбиения выходов ОС на определенное число кластеров для снижения числа многократных ошибок, которые могут возникнуть в последствии в СФК. Кластеризация рассматривается системой только в случае, если это не превосходит ограничение по структурной избыточности введенное пользователем.

Стоит отметить, что методы аналитического расчета характеристик надежности в будущем можно распространить и на другие коды.

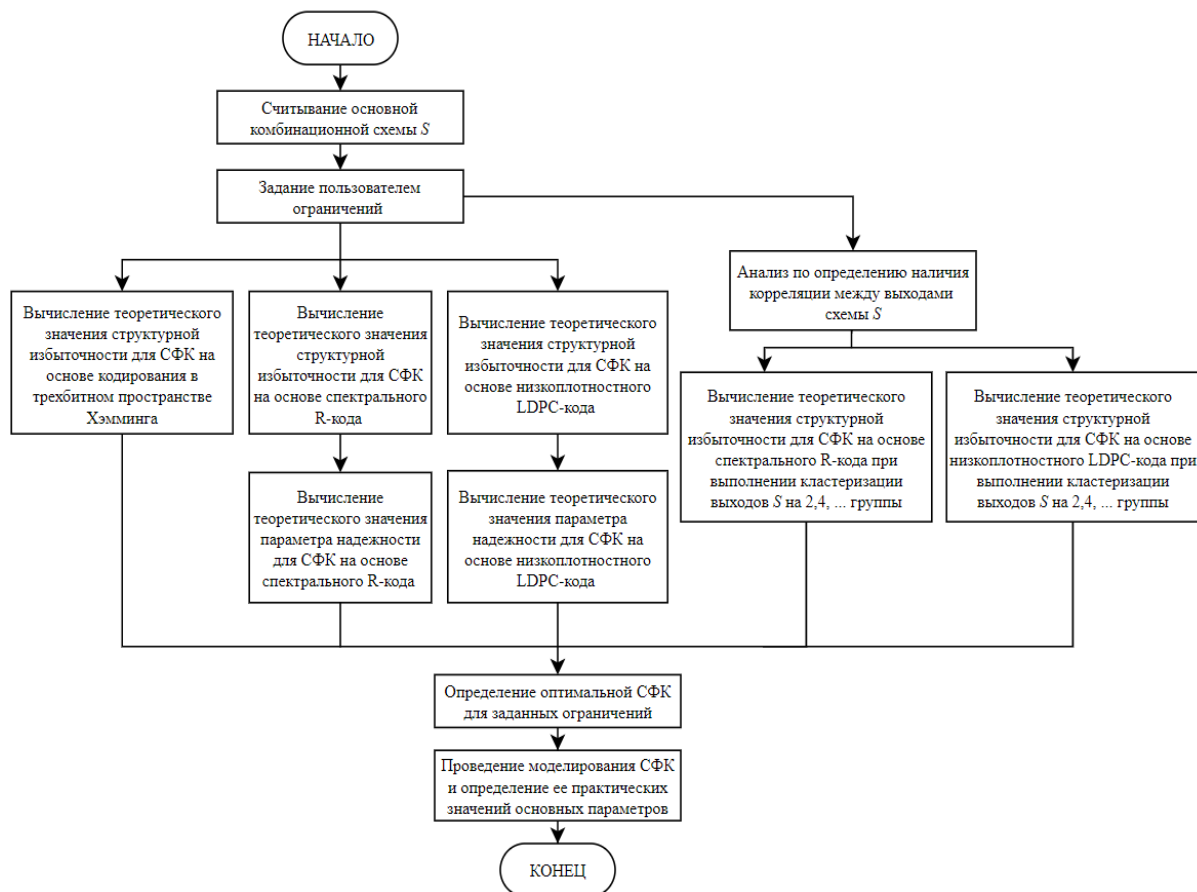


Рис. 6. Блок-схема разработанной системы автоматизированного проектирования СФК на основе методов избыточного кодирования

Блок-схема, представляющая структуру разработанной системы автоматизированного проектирования СФК на основе методов избыточного кодирования, представлена на рис. 6. Из нее видно, что система выполняет расчет структурной избыточности для каждого из разработанных методов синтеза СФК. Кроме того, система выполняет для каждого метода различные виды анализа для определения возможности повышения характеристик каждой из СФК с учетом пользовательского ограничения.

После определения наилучшей схемы контроля система выполняет ее синтез, а также производит ее моделирование для подтверждения соответствия характеристик полученной СФК введенным ограничениям.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для оценки эффективности разработанных методов, входящих в состав системы автоматизированного проектирования, был проведен ряд численных экспериментов с целью сравнения теоретического значения основных характеристик СФК с значениями, полученными на практике.

Был проведен сравнительный анализ по структурной избыточности для схем контроля на основе реализованных в системе методов избыточного кодирования. Анализ проводился для тестовых схем из набора LGSynth'89 [17]. Результаты экспериментов представлены на рис. 7.



Рис. 7. Результаты проведенного сравнительного анализа по структурной избыточности для схем из тестового набора LGSynth'89

Разработанная система автоматизированного проектирования благодаря полученным формулам

точно выполняет вычисление структурной избыточности СФК для комбинационных схем.

По данным, представленным на рисунке, было произведено сравнение значений структурной избыточности полученных СФК и традиционного метода повышения сбоеустойчивости комбинационных схем - тройного модульного резервирования. В результате было определено, что:

- Наибольшую структурную избыточность вносит метод синтеза СФК на основе кодирования в трехбитном пространстве Хэмминга. Полученные результаты структурной избыточности подтвердил тот факт, что применение данного метода на всю комбинационную схему не является рациональным решением.

- Наименьшей структурной избыточностью из рассматриваемых методов обладает СФК на основе низкоплотного LDPC кода.

- Проведение минимизации кодера и декодера в схеме контроля на основе спектрального R-кода с помощью программы Yosys [18] позволяет снизить структурную избыточность схем в среднем на 34%.

- СФК на основе спектрального кода с минимизацией и LDPC кодов позволяют получить сбоеустойчивые комбинационные схемы с меньшей структурной избыточностью, чем при использовании метода TMR.

Для оценки эффективности полученной формулы, позволяющей оценить значение вероятности пропуска ошибки схемы контроля на основе спектрального R-кода было проведено сравнение теоретического значения характеристики надежности со значением, полученным в результате моделирования. В табл. 1 представлены результаты проведенного сравнительного анализа полученной формулы расчета пропуска ошибки с экспериментальным значением для схем из тестовых наборов ISCAS'85 и LGSynth'89 [17].

Результаты данных экспериментов показали, что рассчитанные значения вероятности пропуска ошибки оказались близки к значениям, полученных экспериментальным путем. Разница между данными значениями для рассматриваемых комбинационных схем в среднем составляет 1,5%.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данной статьи была разработана система автоматизированного проектирования, позволяющая по вводимым пользователем ограничениям провести синтез наилучшей СФК для конкретной комбинационной схемы. В качестве ограничений рассматривались такие параметры как вносимая структурная избыточность и вероятность пропуска ошибки.

По мере необходимости система позволяет проводить предварительную кластеризацию выходов комбинационного устройства для снижения

вероятности возникновения многократных ошибок в схеме функционального контроля.

Таблица 1

Результаты сравнительного анализа полученной формулы расчета пропуска ошибки P , с экспериментальным значением пропуска СФК на основе спектрального R-кода $P_{эксперимент}$ для схем из тестовых наборов ISCAS'85 и LGSynth'89

Benchmark	k	M_{OC}	P	$P_{эксперимент}$
ISCAS'85				
c1355	32	590	13,46	11,17
c17	2	6	32,22	33,02
c1908	25	1057	8,76	8,05
c3540	22	1983	5,67	7,78
c432	7	216	6,63	7,05
c499	32	246	14,12	12,75
c880	26	435	9,28	8,75
LGSynth'89				
apex7_synth	37	227	15,15	13,53
b1_synth	4	13	25,88	23,83
bw	28	195	15,01	13,91
f51m_synth	8	111	11,43	12,15
misex2	18	134	14,88	14,86
vg2	8	215	7,27	6,92
rd53	3	64	14,17	12,81

Проведенные эксперименты по оценке эффективности разработанной системы показали, что каждый из методов синтеза СФК, входящий в основу разработанной системы, обладает своим рядом достоинств и недостатков. При этом система позволяет точно вычислить значение структурной избыточности получаемых схем, а также оценить вероятность пропуска ошибки.

Для оценки погрешности приближенного вычисления вероятности пропуска ошибки для СФК на основе спектрального R-кода был проведен ряд численных экспериментов, которые показали, что теоретическое значение отличается от моделирования не более чем на 1,5 процента. Погрешность теоретического значения можно объяснить тем, что в формуле использовались усредненные вероятности возникновения ошибки кратности i .

В дальнейшем разработанная система автоматизированного проектирования может быть расширена за счет внедрения новых подходов.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Гаврилов С. В., Иванова Г. А., Рыжова Д. И., Стемпковский А. Л. Методы повышения надежности комбинационных микросхемотехнических схем на основе мультиинтервального анализа быстродействия // Системы высокой доступности. 2015. Т. 11. № 4. С. 69-76.

[2] N. P. Rao and M. P. Desai, "A detailed characterization of errors in logic circuits due to single-event transients", Proc. EuroMicro Conf. Digit. Syst. Design, pp. 714-721, 2015.

[3] Гаврилов С. В., Иванова Г. А., Рыжова Д. И., Соловьев А. Н., Стемпковский А. Л. Методы синтеза

помехозащищенных комбинационных блоков // Информационные технологии. 2015. Т. 21. № 11. С. 821-826.

[4] Mitra, S., McCluskey E. J. Which Concurrent Error Detection Scheme To Choose? // Proc. International Test Conference 2000, pp. 985-994.

[5] Сапожников В. В., Сапожников В. В., Ефанов Д. В. Основы теории надежности и технической диагностики //СПб.: Издательство «Лань». 2019.

[6] Ефанов Д. В., Сапожников В. В., Сапожников В. В., Пивоваров Д. В. Обнаружение неисправностей в комбинационных схемах на основе самодвойственного дополнения до равновесных кодов //Труды Института системного программирования РАН. 2019. Т. 31. №. 1. С. 115-132.

[7] Ефанов Д. В., Сапожников В. В., Сапожников В. В. Коды с суммированием с фиксированными значениями кратностей обнаруживаемых монотонных и асимметричных ошибок для систем технического диагностирования //Автоматика и телемеханика. 2019. №. 6. С. 121-141.

[8] Garvie M., Husbands P. Automatic Synthesis of Totally Self-Checking Circuits //arXiv preprint arXiv:1901.07023. 2019.

[9] Huang H.-M., Wen H.-P.W. Fast-yet-accurate statistical soft-error-rate analysis considering full-spectrum charge collection, IEEE Design & Test, March/April 2013, pp. 77-86.

[10] Alagoz B.B. Boolean Logic with Fault Tolerant Coding // OncuBilim Algorithm and Systems Labs. 2009. Vol.09, Art.No:03.

[11] Стемпковский А. Л., Тельпухов Д. В., Жукова Т. Д., Гуров С. И., Соловьев Р.А. Методы синтеза сбоеустойчивых комбинационных КМОП схем, обеспечивающих автоматическое исправление ошибок. // Известия ВУЗов. ЮФУ. 2017. №7(192). С. 197-210.

[12] Гуров С. И. Спектральный R-код с проверками на четность // Прикладная математика и информатика. Труды факультета Вычислительной математики и кибернетики МГУ имени М.В. Ломоносова. 2017. № 55. С. 91-96.

[13] Stempkovskiy A. L., Telpukhov D. V., Gurov S. I., Zhukova T. D., Demeneva A. I. R-code for concurrent error detection and correction in the logic circuits // Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), 2018 IEEE Conference of Russian. IEEE, 2018. С. 1430-1433

[14] Тельпухов Д. В., Гуров С. И., Жукова Т. Д., Щелоков А. Н., Новиков А. Д. Метод синтеза сбоеустойчивых комбинационных схем с использованием СФК на основе LDPC кода // Труды Международного научно-технического конгресса Интеллектуальные системы и информационные технологии - 2019 (IS&IT'19). 2019. Т. 1. С. 94-101.

[15] Тельпухов Д. В., Жукова Т. Д., Деменева А. И., Надоленко В. В., Гуров С. И. Синтез схемы функционального контроля на основе спектрального R-кода с разбиением выходов на группы // Микроэлектроника. 2019. Т. 48. № 4. С. 284-294.

[16] Стемпковский А. Л., Тельпухов Д. В., Деменева А. И., Жукова Т. Д. Маршрут проектирования схем функционального контроля комбинационных устройств // Вестник РГРТУ. 2018. № 65. С. 92-98.

[17] URL: <https://ddd.fit.cvut.cz/prj/Benchmarks/> (дата обращения: 19.05.2020).

[18] URL: <http://www.clifford.at/yosys/> (дата обращения: 19.05.2020).

Functional Control Circuits CAD System Based on Redundant Coding Methods

T. D. Zhukova

Institute for design problems in microelectronics of RAS (IPPM RAS), zhukova_t@ipmm.ru

Abstract — Currently, due to the need for provide increased characteristics of radiation resistance and fault tolerance of combinational circuits, the most of the methods being developed are based on synthesis of functional control tools. These methods allow to detect and in some cases (if necessary) correct errors by adding structural redundancy. The resulting concurrent error detection (CED) circuits have different reliability characteristics that vary for different combination circuits, which makes it difficult to choose a particular architecture. In this context, there is a need to develop computer-aided design (CAD) system that allows you to automatically choose the best method for synthesis of CED circuit for combination device. For purposes of this article we developed functional control circuits CAD system based on redundant coding methods, traditionally used for data protection and transmission. The system allows to perform analysis and to determine the best method for CED circuit for specified restrictions on structural redundancy and reliability characteristics. In addition, the outputs of combination device can be divided into clusters to increase fault tolerance, if this does not lead to violation of restrictions on structural redundancy. A number of experiments was conducted to evaluate efficiency of the CAD system, the results of which allowed to determine the advantages and disadvantages of each of the method in terms of structural redundancy introduced into the combination circuit. A formula was derived for calculating reliability characteristics of CED circuit based on circuit's initial parameters. The experiments demonstrated high accuracy of the analytical expressions obtained in comparison with real simulation results.

Keywords — fault-tolerance, combinational circuits, information redundancy, redundancy coding, spectral R-code, LDPC code, three-bit Hamming space.

REFERENCES

- [1] Gavrilov S. V., Ivanova G. A., Ryzhova D. I., Stempkovskij A. L. Metody povysheniya nadezhnosti kombinatsionnykh mikroelektronnykh skhem na osnove mul'tiinterval'nogo analiza bystrodejstviya (Methods for improving the reliability of combinational microelectronic circuits based on multiinterval analysis of performance) // Sistemy vysokoj dostupnosti. 2015. T. 11. № 4. S. 69-76.
- [2] N. P. Rao and M. P. Desai, "A detailed characterization of errors in logic circuits due to single-event transients", Proc. Euromicro Conf. Digit. Syst. Design, pp. 714-721, 2015.
- [3] Gavrilov S. V., Ivanova G. A., Ryzhova D. I., Solov'ev A. N., Stempkovskij A. L. Metody sinteza pomekhozashchishchennykh kombinatsionnykh blokov (Methods for synthesizing noise-protected combination blocks) // Informatsionnye tekhnologii. 2015. T. 21. № 11. S. 821-826.
- [4] Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V., Efanov D. V. Osnovy teorii nadezhnosti i tekhnicheskoy diagnostiki (Fundamentals of reliability theory and technical diagnostics) // SPb.: Izdatel'stvo «Lan». 2019.
- [5] Efanov D. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V., Pivovarov D. V. Obnaruzhenie neispravnostej v kombinatsionnykh skhemah na osnove samodvoystvennogo dopolneniya do ravnovesnykh kodov (Detection of faults in combinational circuits based on self-dual complement to equilibrium codes) // Trudy Instituta sistemnogo programmirovaniya RAN. 2019. T. 31. №. 1. S. 115-132.
- [6] Efanov D. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V. Kody s summirovaniem s fiksirovannymi znacheniyami kratnostej obnaruzhivaemykh monotonykh i asimmetrichnykh oshibok dlya sistem tekhnicheskogo diagnostirovaniya (Sum codes with fixed multiplicities of detected monotone and asymmetric errors for technical diagnostics systems) // Avtomatika i telemekhanika. 2019. №. 6. S. 121-141.
- [7] Garvie M., Husbands P. Automatic Synthesis of Totally Self-Checking Circuits // arXiv preprint arXiv:1901.07023, 2019.
- [8] Huang H.-M., Wen H.-P.W. Fast-yet-accurate statistical soft-error-rate analysis considering full-spectrum charge collection, IEEE Design & Test, March/April 2013, pp. 77-86.
- [9] Mitra, S., McCluskey E. J. Which Concurrent Error Detection Scheme To Choose? // Proc. International Test Conference 2000, pp. 985-994.
- [10] Alagoz B.B. Boolean Logic with Fault Tolerant Coding // OncuBilim Algorithm and Systems Labs. 2009. Vol.09, Art.No:03.
- [11] Stempkovskij A. L., Tel'puhov D. V., Zhukova T. D., Gurov S. I., Solov'ev R.A. Metody sinteza sboeustojchivykh kombinatsionnykh KMOP skhem, obespechivayushchih avtomaticheskoe ispravlenie oshibok (Methods of synthesis of fault-tolerant CMOS combination circuits that provide automatic error correction) // Izvestiya VUZov. YUFU. 2017. №7(192). S. 197-210.
- [12] Gurov S. I. Spektral'nyj R-kod s proverkami na chyotnost' (Spectral R-code with parity checks) // Prikladnaya matematika i informatika. Trudy fakul'teta Vychislitel'noj matematiki i kibernetiki MGU imeni M.V. Lomonosova. 2017. № 55. S. 91-96.
- [13] Stempkovskij A. L., Telpukhov D. V., Gurov S. I., Zhukova T. D., Demeneva A. I. R-code for concurrent error detection and correction in the logic circuits // Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), 2018 IEEE Conference of Russian. IEEE, 2018. C. 1430-1433
- [14] Tel'puhov D. V., Gurov S. I., Zhukova T. D., Shchelokov A. N., Novikov A. D. Metod sinteza sboeustojchivykh kombinatsionnykh skhem s ispol'zovaniem SFK na osnove LDPC koda (Method of synthesis of fault-tolerant combinational circuits using CED based on LDPC code) // Trudy Mezhdunarodnogo nauchno-tekhnicheskogo kongressa Intellektual'nye sistemy i informatsionnye tekhnologii - 2019 (IS&IT'19). 2019. T. 1. S. 94-101.
- [15] Tel'puhov D. V., Zhukova T. D., Demeneva A. I., Nadolenko V. V., Gurov S. I. Sintez skhemy funkcional'nogo kontrolya na osnove spektral'nogo R-koda s razbieniem vyhodov na gruppy (Synthesis of functional control circuit based on spectral R-code with splitting of outputs into groups) // Mikroelektronika. 2019. T. 48. № 4. S. 284-294.
- [16] Stempkovskij A. L., Tel'puhov D. V., Demeneva A. I., Zhukova T. D. Marshrut proektirovaniya skhem funkcional'nogo kontrolya kombinatsionnykh ustrojstv (Route of designing circuits for functional control of combinational devices) // Vestnik RGRTU. 2018. № 65. S. 92-98.
- [17] URL: <https://ddd.fit.cvut.cz/prj/Benchmarks/> (access date: 19.05.2020).
- [18] URL: <http://www.clifford.at/yosys/> (access date: 19.05.2020).