Схема функционального контроля для комбинационных схем на основе R-кода

Д.В. Тельпухов¹, Т.Д. Жукова¹, А.И. Деменева¹, С.И. Гуров²

¹Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН (ИППМ РАН), nofrost@inbox.ru

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова (МГУ), sgur@cs.msu.su

Аннотация — В настоящее время особую актуальность приобретают вопросы, связанные с синтезом комбинационных схем, устойчивых к одиночным эффектам. Этому способствуют как совокупность различных факторов развития микроэлектронной промышленности, так и современное состояние в области разработки средств автоматизации проектирования. Такие факторы, как переход к нанометровым нормам проектирования, увеличение тактовых частот, понижение напряжения питания в совокупности приводят к тому, что наиболее уязвимой частью интегральных схем становятся именно комбинационные участки. Часто для решения проблемы обеспечения сбоеустойчивости привлекают методы избыточного кодирования, которое традиционно используется в системах хранения и передачи данных. Однако стандартные помехоустойчивые коды обычно малоэффективны из-за специфики конструкции и функционирования комбинационных схем. В рамках данной работы был предложен новый подход к построению сбоеустойчивых комбинационных схем с использованием избыточного кодирования на основе спектрального R-кода. Применение методов технологической защиты для части кодера позволяет данному коду помимо всего прочего исправлять любую однократную ошибку в комбинационной схеме, а также обнаруживать в ней двукратную ошибку. В результате полученная схема обладает меньшей структурной избыточностью по сравнению с тройным модульным резервированием. В статье представлены результаты серии численных экспериментов, демонстрирующих высокую эффективность предлагаемого подхода.

Ключевые слова — сбоеустойчивость комбинационных схем, информационная избыточность, избыточное кодирование, R-код.

I. ВВЕДЕНИЕ

Прогресс в области микроэлектронной промышленности помимо увеличения степени интеграции и улучшения параметров интегральных схем (ИС) приводит также к возникновению серьезных проблем, ведущих к уменьшению надежности функционирования схем [2]-[3]. В свою очередь для некоторых практических приложений это может привести к существенно ослаблению преимуществ, полученных от увеличения степени интеграции. Более того, такие факторы, как увеличение тактовых частот и уменьшение напряжений питания также повышают уязвимость инте-

гральных схем (ИС), работающих в условиях дестабилизирующих воздействий [4].

При проектировании комбинационных схем одной из основных задач является задача обеспечения устойчивости схемы к кратковременным обратимым нарушениям работы ИС – сбоям. Данные временные нарушения возникают без какого-либо повреждения схемы, и работоспособность схемы восстанавливается в течение короткого промежутка времени.

Существует множество разнообразных методов борьбы с последствиями сбоев, не зависящих от причины и природы их возникновения. Одними из них являются традиционные подходы, связанные с использованием методов кратного резервирования [5]-[6]. Данные методы реализуются с помощью N-кратного копирования основной схемы с последующим объединением полученных копий схем и проверки правильности функционирования результирующего выхода с помощью схемы голосования. Обычно используют метод тройного модульного резервирования (TMR, Triple Modular Redundancy), позволяющий в случае возникновения не более чем одиночной ошибки в одном из экземпляров резервируемого модуля и безошибочной работы схемы мажоритария исправить эту ошибку. Недостатком данного метода является большая структурная избыточность.

Также необходимо отметить, что все основные подходы по борьбе со случайными сбоями основываются на различных механизмах маскирования, таких как [7,8]:

- *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.

В настоящее время одним из основных методов повышения сбоеустойчивости комбинационных схем является подход, связанный с генерацией средств контроля. Как известно, эти средства делятся на следующие группы в зависимости от вида контроля [9]:

- *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. В этом случае эффективность применения схем функционального контроля оценивается как отношение структурной избыточности схемы к вероятности обнаружения и/или исправления ошибок.

Заметим, что на практике редко применяются схемы, способные исправлять ошибки. Это происходит по причине того, что помимо большой структурной избыточности существует высокий риск возникновения сбоя в участках схемы, отвечающих именно за исправление.

Развитием данного направления служит предлагаемый подход на основе спектрального R-кода, способного исправлять одиночные ошибки выхода комбинационной схемы [1].

Дальнейшее содержание работы включает следующие разделы.

В разделе II содержится краткое описание линейных кодов и методов их декодирования, которые необходимы для понимания предлагаемого метода.

В разделе III приведено описание спектрального R-кода на основе функции Радемахера.

В разделе IV рассмотрен пример построения схемы функционального контроля на основе описанного R-кода.

В заключительном V разделе представлены результаты численных экспериментов и соответствующие выводы.

II. ЛИНЕЙНЫЕ КОДЫ

На практике для повышения сбоеустойчивости используют линейные коды, исправляющие однократную и обнаруживающие двукратную ошибку (SEC/DED, Single error correction/Double error detection) [10]. Это связано с тем что использование нелинейных кодов связано с трудоемкими исследованиями свойств конкретного синтезируемого устройства, а применение циклических кодов нецелесообразно, поскольку построение декодеров в комбинационном исполнении требует слишком больших аппаратных затрат.

A. Систематический код с проверкой на четность

При систематическом блоковом кодировании кодовые слова (n, k) -кода имеют длину $n = k + m$, где k – число *информационных разрядов*, повторяющих кодируемое слово, а m – число *проверочных разрядов*, которые являются суммой по модулю 2 различных подмножеств значений информационных разрядов. Минимальное расстояние кода d – минимум по числу несовпадающих координат среди всех пар кодовых слов.

Формально систематическим кодом с проверкой на четность является двоичный блоковый код, в котором сообщению $u = (u_1, \dots, u_k)^T$ сопоставлено кодовое слово $v = (v_1, \dots, v_n)^T$, $k \leq n$, определяемое соотношениями

$$v_i = \begin{cases} u_i, & 1 \leq i \leq k, \\ \sum_{j=1}^k u_j \cdot g_{i-k-1, j}, & k+1 \leq i \leq n, \end{cases}$$

где множество двоичных символов $\{g_{ij}\}$, $0 \leq i \leq m-1$, $1 \leq j \leq k$ фиксировано [9]. Таким образом предполагается размещение символов сообщения в первых позициях кодового слова. Кодирование в данном коде осуществляется умножением вектора сообщения на определяемую вышеприведенными соотношениями *порождающую матрицу* G : $v = Gu$. Искажение в результате сбоя описывается вектором $w = v + e$, где e – вектор ошибок (все векторы понимаются как вектор-столбцы).

B. Методы декодирования линейных кодов

Существует множество методов декодирования линейных кодов [11]-[13], но наиболее удобными для решения проблемы сбоеустойчивости комбинационных схем являются синдромное и мажоритарное декодирование.

Синдромное декодирование основано на вычислении вектора s *синдромов по проверочной матрице* H : $s = Hw$, где w – выходной вектор, искаженный сбоями. Если ошибок нет, то $s \equiv 0$, иначе по заранее определенным наиболее вероятным позициям ошибки $e(s)$, соответствующей данному синдрому, вычисляется вектор $v = w + e(s)$, по которому производится восстановление сообщения u . Декодер при данном методе декодирования состоит из схемы обнаружения ошибки, включая подсхему вычисления синдрома, и схемы определения вектора ошибки с последующим ее исправлением.

Мажоритарное декодирование базируется на системе проверочных равенств для каждого информационного бита, в качестве которых используются линейные комбинации строк проверочной матрицы H . Данное декодирование допускает большое число кодов. При этом декодирующие устройства, построенные по мажоритарному принципу, часто оказываются наиболее простыми.

III. СПЕКТРАЛЬНЫЙ R-КОД НА ОСНОВЕ ФУНКЦИИ РАДЕМАХЕРА

В данной работе исследуется новый систематический код с проверкой на четность. Опишем его [14]–[15].

Положим $g_{0,j} \equiv 1$, а значения $g_{i,j}$ для $i = \overline{1, q}$, $q = \lceil \log k \rceil$ (где знак $\lceil x \rceil$ – обозначает округление в большую сторону), $j = \overline{1, k}$ такими, чтобы вектор $(g_{1,j}, \dots, g_{q,j})$ был двоичным кодом числа $(j - 1)$. Таким образом получены $m = q + 1$ проверочных разрядов и образован блочный систематический код с проверкой на четность. Порождающей матрицей данного кода является единичная матрица k -го порядка с присоединённой транспонированной порождающей матрицей (k, l) кода Рида-Маллера первого порядка длины 2^k .

Значения $g_{i,j}$ можно получить линейным преобразованием аргумента и значений дискретных функций Радемахера. Как известно, система функций Радемахера ортогональна, ортонормирована, но не полна и используется для построения функций Уолша, по которым, как по базису, осуществляют спектральное разложение кусочно-постоянных булевых функций [16]. В силу этого описанный код назван *R-спектральным*.

Построенный код способен исправлять единичную ошибку инвертирования некоторого информационного разряда. Для её парирования будем использовать синдромное декодирование.

При вычислении синдромов (предполагается суммирование по $\text{mod } 2$)

$$s_i = \sum_{j=1}^k w_j \cdot g_{i,j}, 0 \leq i \leq q,$$

если $s_0 = 0$, то ошибки не произошло. В противном случае двоичный номер искажённого разряда есть число $s_1 \dots s_q$ и вектор ошибки e (веса 1) может быть получен его дешифрированием.

IV. СИНТЕЗ СХЕМЫ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ НА ОСНОВЕ СПЕКТРАЛЬНОГО R-КОДА

Схема функционального контроля (СФК) R-кода состоит из кодера, состоящего из копии основной схемы и элементов «исключающее ИЛИ», декодера и корректирующей схемы (КС). Данная схема позволяет обнаружить однократные и двукратные ошибки, а также исправить однократные ошибки. Структура схемы функционального контроля для спектрального кода представлена на рис. 1.

Рис. 1. Структура схемы функционального контроля

Кодер в данной схеме вычисляет m проверочных бит. Среди них обычно есть бит четности всего выходного вектора. При использовании кодов с проверкой на четность остальные проверочные биты – биты четности некоторых подмножеств информационных бит выходного вектора основной схемы.

В предлагаемом в данной статье R-коде для декодирования используется метод синдромного декодирования. При использовании данного метода декодер состоит из схемы обнаружения ошибки, включающей в себя подсхему вычисления синдрома, и схемы определения вектора ошибки с последующим её исправлением. Декодер определяет, произошла ли ошибка и в таком случае вычисляет некоторый вектор (синдром), по которому дешифратор вычисляет позицию (позиции) ошибок.

При возникновении сбоя выход комбинационной схемы характеризуется одним из возможных состояний.

- *Сбой маскирован* – означает, что сбой не повлиял ни на реализуемые комбинационной схемой значения, ни на флаг ошибки; это может произойти благодаря механизму логического маскирования.
- *Ошибка исправлена* – корректирующая схема обнаружила и исправила однократную ошибку.
- *Ложная тревога* – корректирующая схема сигнализировала об обнаружении ошибки, но ошибки на выходе нет.
- *Обнаружена двукратная ошибка* – корректирующая схема сигнализировала об обнаружении двукратной ошибки.
- *Ошибка пропущена* – ошибка не была ни обнаружена, ни исправлена.

Рассмотрим в качестве примера схему функционального контроля для схемы `fg1_synth` из набора тестовых схем `LGSynth89` [17], представленная на рис. 2.

Данная схема обладает входами $x_1, \dots, x_{28}$ и выходами y_1, y_2, y_3 . Значения проверочных разрядов v_4, v_5 и v_6 для $u = (y_1, y_2, y_3)^T$ определяются следующими соотношениями

$$\begin{aligned} v_4 &= y_1 + y_2 + y_3; \\ v_5 &= y_3; \\ v_6 &= y_2. \end{aligned}$$

Рис. 2. Схема функционального контроля для схемы frg1_synth из тестового набора LGSynth89

Допустим, что на выходе схемы при подаче сигнала на вход и отсутствии ошибки были получены значения $v_4 = v_5 = v_6 = 0$. Тогда, если ошибка произойдет, например, в 3-м разряде, то $v_4 = v_5 = 1$, $v_6 = 0$, при ошибке в 1-м разряде – $v_4 = 1$, $v_5 = v_6 = 0$ и т.д.

Стоит отметить, что для повышения вероятности исправления ошибки возможно использование разбиения выходов исходной схемы по группам с последующим синтезом схемы функционального контроля для каждой из групп. Структура данного подхода изображена на рис. 3.

Рис. 3. Структура схемы с разбиением выходов по группам и последующим синтезом СФК для каждой из групп

Использование данного подхода позволяет значительно повысить вероятность исправления ошибки, но при этом приводит к дополнительным структурным затратам.

V. РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для оценки эффективности применения R-кода в целях повышения сбоеустойчивости комбинационных схем был проведен ряд вычислительных экспериментов на схемах из тестовых наборов ISCAS'85[18] и LGSynth89. При этом определялись структурная избыточность схем и вероятность обнаружения и исправления ошибок. В качестве сбоя рассматривалась инверсия сигнала на выходе вентиля.

Необходимо заметить, что корректное парирование сбоев схем с использованием спектрального R-кода будет происходить при выполнении следующих условий.

Во-первых, считаем, что может быть искажен только один разряд как выходного вектора основной схемы – $\tilde{y} = (\tilde{y}_1, \dots, \tilde{y}_k)^T = y + e$, так и вектора проверочных бит z , однако всех ошибок не должно быть более двух.

Таблица 1

Оценка числа элементов схемы функционального контроля для R-кода до и после оптимизации для схем из тестовых наборов ISCAS'85 и LGSynth89

Benchmark	Число элементов исходной схемы	Конус	СФК до оптимизации	СФК после оптимизации	Соотношение числа элементов исходной схемы с СФК без оптимизации	Соотношение числа элементов исходной схемы с СФК с оптимизацией
ISCAS						
c1355	590	314	1668	1165	2,8	2,0
c17	6	14	30	27	5,0	4,5
c1908	1057	368	2480	1607	2,3	1,5
c3540	1983	643	4284	2803	2,2	1,4
c432	216	214	512	471	2,4	2,2
c499	246	315	980	826	4,0	3,4
c5315	2973	1694	8268	5899	2,8	2,0
c880	435	396	1252	1021	2,9	2,3
LGSynth89						
apex2	423	299	876	741	2,1	1,8
apex3	2201	1975	5227	4646	2,4	2,1
c8_synth	152	184	562	463	3,7	3,0
cm162a_synth	67	51	190	146	2,8	2,2
frg1_synth	218	150	466	386	2,1	1,8
misex3	1509	1288	3201	2886	2,1	1,9
seq	2176	1990	4916	4479	2,3	2,1
vg2	215	182	524	445	2,4	2,1

Во-вторых, значение z_0 (бит четности неискаженного вектора y) кодером должно всегда вычисляться верно. Для этого необходимо обеспечить специальной технологической защитой соответствующие части кодера. При этом подсхемы вычисления остальных проверочных бит $z_1, \dots, z_q$ могут оставаться незащищенными.

В табл. 1 представлены результаты проведенной оценки структурных затрат для схем функционального контроля, при этом в столбце «Конус» представлено число элементов кодера, которые предстоит защитить специальными технологическими методами.

Было проведено сравнение исходной схемы со схемой функционального контроля без и с применением оптимизации программой Yosys [19] (оптимизация кодера и декодера проводилась отдельно). В результате было получено, что благодаря оптимизации схема функционального контроля для представленных схем в среднем была уменьшена на 18,7%.

Таблица 2

Результаты инжектирования однократных ошибок в схемы их наборов ISCAS'85 и LGSynth89 для схемы функционального контроля спектрального R-кода

Benchmark	Маскирование, %	Исправление, %	Ложная тревога, %	Пропущена ошибка, %	Обнаружена двукратная ошибка, %
ISCAS					
c1355	56,754	20,817	17,924	1,031	3,475
c17	30,048	31,731	15,385	6,250	16,587
c1908	61,373	23,721	6,883	4,918	3,105
c3540	74,965	7,684	3,701	7,790	5,860
c432	66,899	13,616	7,142	6,364	5,979
c499	51,099	19,169	22,527	1,173	6,032
c5315	59,752	15,586	17,083	3,513	4,066
c880	54,678	27,876	12,601	1,301	3,545
LGSynth89					
apex2	93,384	3,858	1,754	0,150	0,853
apex3	79,084	9,262	9,355	0,314	1,985
c8_synth	40,208	31,796	20,734	1,792	5,470
cm162a_synth	55,693	26,542	8,904	2,978	5,882
frg1_synth	76,497	20,927	1,296	0,172	1,109
misex3	86,508	9,412	2,695	0,239	1,147
seq	88,322	3,918	6,434	0,105	1,221
vg2	70,268	13,819	7,865	3,403	4,645

Также были проведены эксперименты, связанные с инжектированием однократных ошибок в полученные схемы функционального контроля. По результатам, представленным в табл. 2, можно приблизительно оценить доли возможных исходов результатов сбоя:

- 65,3% сбоев маскируются с нулевым флагом ошибки;

- 17,5% сбоев исправляются схемой функционального контроля;
- 4,4% сбоев были пропущены;
- в 10,1% случаев получен сигнал о ошибке без ее наличия;
- в 2,6% случаев получен сигнал о наличии двукратной ошибки (однократная ошибка в каком-либо элементе схемы может привести к множественной ошибке на выходе [20]).

Заметим, что приведённые результаты говорят о том, что использование R-кода обеспечивает в среднем исправление или обнаружение приблизительно 85,42% реальных ошибок на выходе схем без использования разбиений выходов на группы.

В табл. 3 представлены результаты сравнения структурных затрат схем функционального контроля на основе спектрального R-кода и схем, полученных с помощью тройного модульного резервирования [21].

Таблица 3

Оценка числа элементов схемы функционального контроля для спектрального R-кода и тройного модульного резервирования для схем из наборов ISCAS'85 и LGSynth89

Benchmark	Число элементов исходной схемы	TMR	Спектральный R-код	Соотношение числа элементов исходной схемы и TMR	Соотношение числа элементов исходной схемы и R-кода
ISCAS					
c1355	590	1898	1167	3,2	2,0
c17	6	26	27	4,3	4,5
c1908	1057	3271	1596	3,1	1,5
c3540	1983	6037	2805	3,0	1,4
c432	216	676	475	3,1	2,2
c499	246	866	817	3,5	3,3
c5315	2973	9411	5856	3,2	2,0
c880	435	1409	1025	3,2	2,4
LGSynth89					
apex2	423	1281	746	3,0	1,8
apex3	2201	6803	4646	3,1	2,1
c8_synth	152	528	459	3,5	3,0
cm162a_synth	67	221	149	3,3	2,2
frg1_synth	218	666	387	3,1	1,8
misex3	1509	4583	2883	3,0	1,9
seq	2176	6668	4462	3,1	2,1
vg2	215	677	452	3,1	2,1

По данным таб. 3 легко определить, что для рассмотренных схем при использовании TMR число элементов схемы увеличивалось в среднем в 3,2 раза, а при использовании схемы функционального контроля на основе спектрального R-кода – в среднем в 2,2 раза.

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье описан спектральный R-код с проверкой на четность с произвольным числом информа-

ционных символов. Код относится к классу SEC/SED, хотя и имеет кодовое расстояние равное 2, что является следствием безошибочности вычисления бита четности выходного вектора основной схемы. Важным свойством R-кода является возможность не обеспечивать технологической защитой всю корректирующую схему.

По результатам проведенных численных экспериментов было получено, что схема функционального контроля спектрального R-кода обладает меньшей структурной избыточностью, чем схема тройного модульного резервирования для схем из тестовых наборов ISCAS'85 и LGSynth89 в среднем на 32,7%.

Проведённые эксперименты по инъектированию однократных ошибок в СФК на основе R-кода позволили прийти к выводу об эффективности применения данного подхода для обнаружения двукратных и исправления однократных ошибок в комбинационных схемах.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Гуров С. И. Спектральный R-код с проверками на чётность // Прикладная математика и информатика: Труды факультета Вычислительной математики и кибер-нетики. – М.: МАКС Пресс, 2017, № 55. – С. 91-96.
- [2] Shivakumar P., Kistler M., Keckler S. W., Burger D., Alvisi L. Modeling the effect of technology trends on the soft error rate of combinational logic // Proceedings of international conference on dependable systems and networks, 2002 (DSN 2002), June 2002. p. 389-398.
- [3] Narayanan V., Xie Y. Reliability concerns in embedded system designs // Computer 2006; 39(1): 118-120.
- [4] Стемпковский А. Л., Тельпухов Д. В., Соловьев Р. А., Тельпухова Н. В. Исследование вероятностных методов оценки логической уязвимости комбинационных схем. Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). 2016. № 4. С. 121-126.
- [5] Стемпковский А. Л., Тельпухов Д. В., Соловьев Р. А., Мячиков М. В. Повышение отказоустойчивости логических схем с использованием нестандартных мажоритарных элементов // Информационные технологии. – 2015. – Т. 21. – №. 10. – С. 749-756.
- [6] El-Maleha A. H., Oughalia F. C. Microelectronics Reliability, vol. 54, №1, 2014, 316-326 pp.
- [7] Исследование вероятностных методов оценки логической уязвимости комбинационных схем / А. Л. Стемпковский [и др.] // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем / под общ. ред. Академика РАН А. Л. Стемпковского. – М.: ИППМ РАН, 2016. Часть IV. – С. 121 - 126.
- [8] Accurate reliability analysis of concurrent checking circuits employing an efficient analytical method / T. An [and others] // Microelectronics Reliability. – 2015. – V. 55. – P. 696 -703.
- [9] Ефанов, Д.В. Три теоремы о кодах Бергера в схемах встроенного контроля / Д.В. Ефанов // Информатика и системы управления. – 2013. - №1(35). – С. 77 – 86.
- [10] Poolakkaparambil M., Mathew J. BCH code based multiple bit error correction in finite field multiplier circuits // ISQED. – 2011. – P. 1-6.
- [11] Галлагер Р. Теория информации и надежная связь. – М.: Сов. Радио, 1974.
- [12] Савченко Ю. Г. Цифровые устройства нечувствительные к неисправностям элементов. – М.: Советское радио, 1977.
- [13] Мак-Вильямс Дж. Перестановочное декодирование системных кодов / Кибернетический сборник, №1, (новая серия). – М.: Мир, 1965. – С. 35-57.
- [14] Щербakov Н. С. Самокорректирующиеся дискретные устройства. – М.: Машиностроение, 1975.
- [15] 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.
- [16] Карповский М. Г., Москалев Э. С. Спектральные методы анализа и синтеза дискретных устройств. - Л.: Энергия, 1973.
- [17] URL: <https://people.engr.ncsu.edu/brglez/CBL/benchmarks/LGSynth89/> (дата обращения: 04.05.2018)
- [18] URL: http://icdm.ippm.ru/w/Схемы_ISCAS85/ (дата обращения: 04.05.2018)
- [19] URL: <http://www.clifford.at/yosys/> (дата обращения: 04.05.2018)
- [20] Gavrilo V. S., Gurov S. I., Zhukova T. D., Rukhlov V. S., Ryzhova D. I., Telpukhov D. V. Methods to Increase Fault Tolerance of Combinational Integrated Microcircuits by Redundancy Coding. Computational Mathematics and Modeling. 2017. 28(3), 400-406.
- [21] 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.

Circuit of Functional Control for Combinational Circuits Based on R-code

D.V. Telpuhov¹, T.D. Zhukova¹, A.I. Demeneva¹, S.I. Gurov²

¹Institute for design problems in microelectronics of RAS (IPPM RAS), nofrost@inbox.ru

²Lomonosov Moscow State University (MSU), sgur@cs.msu.su

Abstract — At present, issues related to synthesis of fault-tolerant combinational circuits acquire special urgency. This is facilitated by various factors in the development of microelectronic industry, including the transition to nanometric design standards and development of modern methods and means of automation. These factors, among other things, lead to the fact that combinational circuits become the most vulnerable area in chip. Often, redundant encoding methods, which are traditionally used in data storage and transmission systems, are used to solve the problem of fault tolerance of logic circuits. However, standard fault-tolerant codes are usually ineffective due to specific design and operation of combinational circuits. In this paper, a new approach to the construction of fault-tolerant combinational circuits using redundant coding based on the spectral R code is proposed. The application of technological protection methods for a part of the encoder allows this code, above all, to correct any single error in the combinational circuit, and also to detect a double error in it. Concurrent decoding is used in this method to parry a single error. In this article a number of experiments are described that demonstrate high effectiveness of the proposed approach. In one of the experiments, functional control circuitry, based on the proposed approach, was compared to the circuits, obtained by the use of Triple Modular Redundancy (TMR), which is the traditional method for protecting combinational circuits from faults. As a result, the proposed circuits have lower structural redundancy compared to triple modular redundancy circuits.

Keywords — fault tolerance of combinational circuits, information redundancy, redundancy coding, R-code.

REFERENCES

- [1] S. I. Gurov. A parity-check spectral R-code // Computational Mathematics and Modeling, Vol. 29, No. 2, April 2018. – pp. 128-132. doi:10.1007/s10598-018-9403-8
- [2] Shivakumar P., Kistler M., Keckler S.W., Burger D., Alvisi L. Modeling the effect of technology trends on the soft error rate of combinational logic // Proceedings of international conference on dependable systems and networks, 2002 (DSN 2002), June 2002. p. 389-398.
- [3] Narayanan V., Xie Y. Reliability concerns in embedded system designs // Computer 2006; 39(1): 118-120.
- [4] Stempkovskiy A.L., Telpuhov D.V., Solov'ev R.A., Telpuhova N.V. Issledovanie veroyatnostnykh metodov ocenki logicheskoy uязvimosti kombinatsionnykh shem (Investigation of probabilistic methods for assessing the logical vulnerability of combinational circuits). Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanojelektronnykh sistem (MJeS). 2016. № 4. S. 121-126.
- [5] Stempkovskiy A.L., Telpuhov D.V., Soloviev R.A., Myachikov M.V. Povyshenie otkazoustojchivosti logicheskikh shem s ispol'zovaniem nestandartnykh mazhoritarnykh jelementov (Improving the fault tolerance of logic circuits using non-standard majority elements) // Informatsionnye tehnologii. 2015. Vol. 21. № 10. pp. 749-756.
- [6] El-Maleha A. H., Oughalia F. C. Microelectronics Reliability, vol. 54, №1, 2014, 316-326 pp.
- [7] Issledovanie veroyatnostnykh metodov ocenki logicheskoy uязvimosti kombinatsionnykh shem (Probabilistic methods for estimating the logical vulnerability of combinational schemes) / A.L. Stempkovskiy [i dr.] // Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanojelektronnykh sistem / pod obshh. red. Akademika RAN A.L. Stempkovskogo. - M: IPPM RAN, 2016. Vol. IV. – P. 121-126.
- [8] Accurate reliability analysis of concurrent checking circuits employing an efficient analytical method / T. An [and others] // Microelectronics Reliability. – 2015. – V. 55. – P. 696-703.
- [9] Efanov, D.V. Tri teoremy o kodakh Bergera v shemah vstroennogo kontrol'ja (Three theorems of Berger codes in embedded control schemes) / D.V. Efanov // Informatika i sistemy upravleniya. – 2013. – No.1(35). – P. 77–86. (in Russian).
- [10] Poolakkaparambil M., Mathew J. BCH code based multiple bit error correction in finite field multiplier circuits // ISQED. – 2011. – P. 1-6.
- [11] Gallager R. Teoriya informatsii i nadezhnaya svyaz' (Information Theory and Reliable Communication). M.: Sov. Radio, 1974.
- [12] Savchenko Ju.G. Cifrovye ustrojstva nechuvstvitel'nye k neispravnostjam jelementov (Digital devices are insensitive to malfunctions of elements). – M.: Sovetskoe radio, 1977.
- [13] Mak-Vil'jams Dzh. Perestanochnoe dekodirovanie sistemnykh kodov (Permutation Decoding of Systematic Codes) / Kiberneticheskij sbornik, №1, (novaya seriya). M.: Mir, 1965. S. 35-57.
- [14] Shherbakov N.S. Samokorrektsionnyye diskretnye ustrojstva (Self-correcting discrete devices). – M.: Mashinostroyeniye, 1975.
- [15] Stempkovskiy A.L., Telpuhov 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.
- [16] Karpovskiy M.G., Moskalev Ye.S. Spektral'nye metody analiza i sinteza diskretnykh ustroystv (Spectral methods of analysis and synthesis of discrete devices). L.: Jenergiya, 1973.
- [17] URL: <https://people.engr.ncsu.edu/brglez/CBL/benchmarks/LGSynth89/> (access date: 04.05.2018)
- [18] URL: http://icdm.ippm.ru/w/Cxemy_ISCAS85/ (access date: 04.05.2018)
- [19] URL: <http://www.clifford.at/yosys/> (access date: 04.05.2018)
- [20] S. V. Gavrilov, S. I. Gurov, T. D. Zhukova et al. Methods to Increase Fault Tolerance of Combinational Integrated Microcircuits by Redundancy Coding // Comput. Math. Model. 28 (2017), no. 3, 400-406. Consultants Bureau, MR3669186. doi:10.1007/s10598-017-9372-3
- [21] Stempkovskiy A.L., Telpuhov D.V., Zhukova T.D., Gurov S.I., Solov'ev R.A. Metody sinteza sboustojchivykh kombinatsionnykh KMOP shem, obespechivajushhih avtomaticheskoe ispravlenie oshibok (Methods for the synthesis of fault-tolerant CMOS combinational circuits that provide automatic error correction). Izvestiya VUZov. JuFU. 2017. №7(192). S. 197-210.