

Разработка аналитического метода для выбора наиболее эффективного метода синтеза сбоеустойчивых комбинационных схем

Д.В. Тельпухов, Т.Д. Жукова, П.Д. Кретинина

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

Аннотация — На сегодняшний день проектирование сбоеустойчивых комбинационных устройств является крайне актуальной задачей. Наиболее перспективным направлением по повышению надёжности схем являются методы синтеза на основе избыточного кодирования. Внешённая такими методами структурная избыточность обеспечивает обнаружение и/или исправление ошибок, которые могут возникать в разных участках комбинационной схемы. К сожалению, выбор среди множества методов синтеза затруднён тем, что каждый из них позволяет проектировать устройство, обладающее разными характеристиками надёжности и структурной избыточности. Для решения данной проблемы предлагается использовать разработанный комплексный критерий, который позволяет выбрать наиболее подходящий метод синтеза для заданных проектировщиком условий. Кроме того, в данной работе были выведены оценочные функции основных характеристик сбоеустойчивых схем для вычисления аналитического значения данного критерия. Проведённые в рамках представленного исследования численные эксперименты позволили ускорить и упростить процесс определения наилучшего метода синтеза.

Ключевые слова — сбоеустойчивое кодирование, комбинационные схемы, характеристика надёжности, структурная избыточность, схемы функционального контроля.

I. ВВЕДЕНИЕ

При экстремальных условиях эксплуатации и воздействии различных дестабилизирующих факторов, требования к надёжности выходят на первый план. Основным фактором является воздействие одиночных заряженных частиц в бортовой космической электронике. На сегодняшний день исследовано и разработано множество разнообразных методов, позволяющих повысить характеристики сбоеустойчивости интегральных схем. В работе рассмотрена отдельная научная область в рамках этого направления, которая посвящена проектированию комбинационных схем повышенной надёжности на логическом уровне проектирования.

Существенный вклад в данную область внесли труды таких отечественных и зарубежных учёных как Ефанов Д.В., Матросова А.Ю., Сапожников В.В., Сапожников Вл.В., Согомонян Е.С., Гессель М., Nicolaidis M., Touba N.A., Mitra S., McCluskey E.J., Krishnaswamy S., Jha N.K., Wang S.-J. [1]-[7].

Исторически, методы обеспечения сбоеустойчивости начали развиваться с защиты

последовательностных схем и элементов памяти. Комбинационные участки на технологиях больше 180 нм. считались устойчивыми к воздействию одиночных заряженных частиц, а для защиты памяти использовали помехоустойчивое кодирования.

По мере снижения проектных норм комбинационные схемы становились все более подверженными для одиночных воздействий, и в настоящее время частота ошибок в комбинационных участках уже сопоставима с частотой ошибок в незащищённых элементах памяти [8]. Для построения сбоеустойчивых комбинационных схем также можно использовать помехоустойчивые коды, однако разнообразие данных методов, а также различие в характеристиках надёжности результирующих устройств привели к затруднению для проектировщиков при выборе подхода для конкретного комбинационного устройства. Таким образом возникает необходимость в разработке некоторого критерия, который позволил бы определить на сколько для заданных условий эксплуатации будет эффективен тот или иной метод синтеза сбоеустойчивых схем.

В данной статье авторами предлагается в качестве такого параметра использовать разработанную функцию комплексного критерия, который в зависимости от выбранного приоритета основных характеристик результирующего устройства будет определять для его реализации наилучший метод синтеза. Кроме того, в данной работе для ускорения и упрощения вычисления критерия предлагается использовать оценочные функции основных характеристик сбоеустойчивых схем.

Представленная статья имеет следующее содержание:

Раздел II посвящен краткому описанию рассматриваемых в данной работе методов синтеза сбоеустойчивых комбинационных устройств.

В разделе III приведено описание разработанной функции комплексного критерия.

Раздел IV содержит описание полученных оценочных функций основных характеристик сбоеустойчивых схем для используемых в данной статье методов синтеза.

Раздел V содержит результаты выполненных численных экспериментов для оценки эффективности

применения оценочных функций для вычисления комплексного критерия.

В разделе VI подведены итоги проведённого в данной статье исследования.

II. МЕТОДЫ СИНТЕЗА КОМБИНАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ ПОВЫШЕННОЙ СБОЕУСТОЙЧИВОСТИ

На сегодняшний день существует два основных подхода, используемых для повышения надёжности комбинационных устройств:

- методы аппаратного резервирования [9],
- методы на основе избыточного кодирования [10].

В действительности, это разделение довольно условно, т.к. методы резервирования являются вырожденными случаями реализации кодов повторения.

Методы кратного резервирования являются классическими методами повышения сбоеустойчивости комбинационных устройств. Их основная идея заключается в реализации определенного числа аппаратных копий защищаемого устройства. Такая реализация приводит к возникновению большой структурной избыточности.

На текущий момент наиболее перспективным подходом по повышению сбоеустойчивости комбинационных устройств являются методы на основе избыточного кодирования. Они реализуются за счет введения некоторой дополнительной структурной избыточности в информационные разряды синтезируемой схемы. При этом в качестве информационных разрядов рассматриваются выходы электронного устройства.

В рамках комбинационных устройств данный подход реализуется путем синтеза схем функционального контроля (СФК). В основную схему (ОС) вносится структурная избыточность в виде подсхем кодера и декодера, которые позволяют схеме выполнять исправление и/или обнаружение возникших в ней ошибок. В качестве ошибки рассматривается инверсия выхода логического элемента схемы. В зарубежных работах методы синтеза схем контроля получили название методы параллельного обнаружения/исправления ошибок (Concurrent Error Detection/Correction, CED/C).

Для синтеза схем контроля следует выбирать коды с наиболее простыми методами декодирования. Это позволяет упростить процесс проектирования устройства, а также в некоторых случаях снизить его итоговую структурную избыточность.

Каждый из рассмотренных в рамках данного исследования методов позволяет синтезировать устройства, отличающиеся по структурной избыточности и характеристикам надёжности. Выбор наилучшего метода для каждого конкретного значения коэффициента приоритета определяется за счет вычисления комплексного критерия на основе оценочных функций.

Далее будет представлено краткое описание каждого из этих методов.

A. Метод тройного модульного резервирования

Классический метод тройного модульного резервирования (Triple Modular Redundancy, TMR) является наиболее применяемым методом синтеза сбоеустойчивых комбинационных схем на практике. Основная идея данного метода заключается в организации трех аппаратных копий защищаемого устройства. При этом выходы данных копий объединяются мажоритарным элементом (схемой голосования). При этом стоит заметить, что схемы TMR корректно функционируют только при отсутствии ошибок на данном элементе. Схемы, полученные применением метода тройного модульного резервирования, могут выполнять исправление однократных ошибок, возникающих в одной из копий, но платой за это является большая структурная избыточность.

B. СФК на основе кодирования в трехбитном пространстве Хэмминга

Основная идея данного метода синтеза заключается в замене элементарных булевых функций комбинационного устройства на их сбоеустойчивые аналоги, реализованные в базисе трехбитного пространства Хэмминга (3bit Hamming Space, 3BHS) [11]-[12]. Такая реализация приводит к большим структурным затратам, но при этом позволяет обеспечить автоматическое восстановление функциональности схемы. При этом полученные схемы контроля отлично справляются с возникновением в них многократных ошибок. Это происходит благодаря тому, что каждый последующий элемент в СФК исправляет ошибки на элементах предыдущих уровней.

C. СФК на основе спектрального R-кода

Метод повышения сбоеустойчивости на основе синтеза схемы контроля с применением спектрального R-кода (Spectral R-code, SRC) позволяет создать комбинационное устройство, которое способно обнаруживать двукратные, а также исправлять однократные ошибки [13]-[14]. Спектральный код является систематическим кодом с проверкой на чётность, основанным на функции Радемахера. Для реализации СФК был использован метод синдромного декодирования. Стоит заметить, что для правильного функционирования данной схемы контроля необходимо обеспечить специальной технологической защитой некоторую часть кодера – так называемый «защищённый конус» элементов.

D. СФК на основе низкоплотного кода

Данный метод синтеза основан на использовании классического низкоплотного кода (Low-Density Parity Check Code, LDPC) [15]-[16]. Для построения схемы контроля на его основе используются сильно разреженные порождающая и проверочная матрицы. Их применение позволяет синтезировать СФК, которые обладают малой структурной избыточностью. При этом внесённая данным методом избыточность позволяет схеме выполнять исправление однократных ошибок, возникающих на информационных разрядах. Для лёгкости и простоты выполнения процесса декодирования при реализации схемы контроля был использован метод мажоритарного декодирования.

III. ФУНКЦИЯ КОМПЛЕКСНОГО КРИТЕРИЯ

Практически любой метод повышения сбоеустойчивости комбинационных схем сопряжен с внедрением некоторой избыточности. Для оценки обоснованности такого внедрения предлагается использовать комплексный критерий эффективности $Z(\lambda)$. В качестве основного параметра используется коэффициент приоритета λ , значения которого лежат в интервале $[0, 1]$. Данный коэффициент определяет, какая из основных характеристик результирующей сбоеустойчивой схемы будет находиться в приоритете. На текущий момент, в качестве таких характеристик рассматриваются:

- Структурная избыточность S (во сколько раз увеличилась избыточность схемы при выполнении её защиты);
- Вероятность пропуска ошибки схемой p .

Базисные функции для значений коэффициента λ , представленные в табл. 1, были подобраны на основании достижения комплексным критерием минимального значения – экстремума, в определенных идеальных ситуациях.

Таблица 1

Базисные функции комплексного критерия для разных значений коэффициента приоритета

Коэффициент приоритета, λ		Приоритет оценки эффективности метода	Базисные функции
λ_0	0	Малая структурная избыточность	$f_0 = \ln S, S \rightarrow 1$
λ_1	0,5	Баланс между малой избыточностью и высокой сбоеустойчивостью	$f_1 = \ln\left(\frac{S}{1-p}\right), S \rightarrow 1, p \rightarrow 0$
λ_2	1	Высокая сбоеустойчивость	$f_1 = \ln\left(\frac{1}{1-p}\right), p \rightarrow 0$

Для решения проблемы нахождения промежуточных точных значений функции критерия $Z(\lambda)$ был использован интерполяционный многочлен Лагранжа. В качестве интерполяционных узлов для него были использованы полученные базисные функции.

В результате функция комплексного критерия приняла следующий вид:

$$Z(\lambda) = 2\lambda^2 \ln\left(\frac{1-p}{S}\right) - \lambda \ln\left(\frac{(1-p)^3}{S}\right) + \ln S.$$

IV. ОЦЕНОЧНЫЕ ФУНКЦИИ РАССМАТРИВАЕМЫХ МЕТОДОВ СИНТЕЗА

В данном разделе представлены полученные в рамках проведённого исследования оценочные функции основных характеристик методов синтеза сбоеустойчивых комбинационных устройств, представленных в Разделе 2. В качестве таких характеристик были рассмотрены структурная избыточность итоговой сбоеустойчивой схемы, а также её характеристика надёжности [17]. Некоторые из данных функций были скорректированы по сравнению с функциями, представленными в предыдущих работах авторов [18]-[19].

Приведённый в данном разделе подход, может быть, в дальнейшем использован для получения оценочных функций для других методов синтеза сбоеустойчивых комбинационных устройств на основе избыточного кодирования.

A. Оценочные функции структурной избыточности

Для получения оценочных функций структурной избыточности был проведён анализ строения сбоеустойчивых схем, полученных с применением рассматриваемых ранее методов синтеза.

Схема тройного модульного резервирования состоит из основного устройства, двух его аппаратных копий и мажоритарного элемента (схемы голосования). Оценочная функция структурной избыточности для данного метода будет иметь следующий вид:

$$n_{TMR} = 3n_{OC} + 5k.$$

Для получения оценочной функции избыточности для метода синтеза с применением кодирования в трехбитном пространстве Хэмминга необходимо из-за специфики его реализации определить число одноходовых (n_1) и двухходовых (n_2) элементов в защищаемом устройстве. Это возникает по причине того, что число элементов в сбоеустойчивых аналогах ЛЭ различаются по количеству входов заменяемого элемента. Поэтому оценочная функция структурной избыточности для данного метода имеет следующий вид:

$$n_{3BHS} = h_1 n_1 + h_2 n_2 + 4k,$$

где h_1 и h_2 – избыточность сбоеустойчивого аналога одноходового и двухходового ЛЭ соответственно.

Анализ схемы контроля на основе спектрального кода показал, что оценочные функции для определения аналитического значения структурной избыточности зависят от порождающей матрицы G для данного кода и числа проверочных разрядов m .

Была получена следующая функция избыточности:

$$n_{SRC} = 2n_{OC} + 2 \sum_{i,j=0}^{m-1,k-1} g_{ij} + (m+2)(k+1),$$

где g_{ij} – элемент порождающей матрицы G ($i \in [0, m-1], j \in [0, k-1]$).

При исследовании структуры СФК на основе LDPC кода было определено, что размер подсхемы кодера и декодера в основном зависит от числа выходов k ОС. Была получена следующая формула:

$$n_{LDPC} = 2n_{OC} + 7k,$$

Представленные здесь функции позволяют получить точное аналитическое значение структурной избыточности для каждого из рассматриваемых в данной статье методов синтеза.

В. Оценочные функции характеристики надежности

В качестве характеристики надёжности устройства авторами рассматривалась вероятность пропуска сбоеустойчивой схемой ошибки, т.е. вероятность возникновения ситуации, при которой ошибка не была обнаружена и/или исправлена. Для получения её оценочных функций был выполнен анализ по определению ненадёжных участков сбоеустойчивой схемы, ошибка на которых могла привести к искажению выходного сигнала.

Как известно схема тройного модульного резервирования может исправлять только однократные ошибки ($i = 1$) и функционирует корректно только при условии, что в выходном мажоритарном элементе не возникнет сбоя. Оценочная функция вероятности пропуска для данного метода будет определяться следующим соотношением:

$$P_{TMR} = \sum_{i=1,2,\dots}^{rate_{max}} \beta p_i + \frac{3k}{n_{TMR}}, \quad \beta = \frac{n_{OC}}{n_{TMR}},$$

где $rate_{max}$ – максимальная кратность ошибки, которая может возникнуть в защищаемой схеме, β – вероятность возникновения ошибки в логическом элементе ОС, p_i – вероятность возникновения ошибки в ОС кратности i .

Коэффициент корреляции для полученной функции составил 0,89.

Как было сказано ранее, схемы, полученных с использованием кодирования в базисе пространства Хэмминга, хорошо справляются с многократными ошибками. Ненадёжной подсхемой для данной СФК является выходной преобразователь. Вероятность пропуска схемы контроля определяется соотношением:

$$P_{3BHS} = \frac{2k}{n_{3BHS}}.$$

Коэффициент корреляции – 0,94.

Исследование СФК на основе спектрального R-кода позволило определить, что самыми ненадёжными

участками данной схемы являются основная схема и выходная подсхема декодера, выполняющая исправление ошибки. В итоге оценочная функция для данной схемы будет выглядеть следующим образом:

$$P_{SRC} = \sum_{i=3,5,\dots}^{rate_{max}} \beta p_i + \sum_{i=4,6,\dots}^{rate_{max}} \beta p_i f_i + \frac{3(k+1)}{(n_{SRC} - n_K)},$$

где f_i – вероятность возникновения ситуации, при которой СФК не обнаружит возникшую в ней ошибку, n_K – число элементов входящих в защищённый конус элементов.

Коэффициент корреляции для данной функции составил 0,82.

На вероятность пропуска схемы контроля на основе LDPC кода влияет ошибка в копии основной схемы (подсхема кодера) и выходные мажоритарные элементы, реализующие метод мажоритарного декодирования. Поэтому оценочная функция будет иметь вид:

$$P_{LDPC} = \sum_{i=1,2,\dots}^{rate_{max}} \beta p_i + \frac{2k}{n_{LDPC}}.$$

Коэффициент корреляции составил – 0,60. Стоит заметить, что такое низкое значение коэффициента для данной СФК возникает из-за того, что в качестве значений вероятности p_i были взяты усреднённые значения. Как видно из функции вероятности пропуска для данной схемы контроля сильное влияние на значение оказывают вероятности p_1 и p_2 , которые для исследуемых комбинационных схем сильно отличаются.

V. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В рамках проведённого исследования был выполнен ряд численных экспериментов на схемах из тестового набора ISCAS'85 [20]. Для определения эффективности применения оценочных функций основных характеристик сбоеустойчивых устройств был проведён сравнительный анализ значений комплексного критерия $Z(\lambda)$ при разных значениях коэффициента приоритета λ для каждого из используемых в статье методов синтеза. Производилось сравнение теоретического значения, вычисленного с использованием разработанных в данной статье формул, с практическим, полученным в результате моделирования.

В табл. 2 представлены результаты выполненного сравнительного анализа значений комплексного критерия. Представленные результаты показывают, что полученные значения критерия для всех методов кроме СФК на основе низкоплотного кода, вычисленные с помощью оценочных функций, довольно близки к экспериментальным. Сильная разница в значениях для схемы контроля на основе LDPC кода объясняется низким коэффициентом корреляции функции характеристики надёжности, и, как было сказано ранее, это возникает из-за использования усреднённых значений вероятности p_i .

В дальнейшей работе планируется добавить функцию комплексного критерия совместно с полученными оценочными функциями основных характеристик в разработанную подсистему автоматизированного проектирования сбоеустойчивых комбинационных устройств CICADA (design Circuits with Correction And Detection Abilities) [21]-[22]. Основной задачей данной

подсистемы является выполнение анализа комбинационной схемы с целью определения наилучшего метода синтеза сбоеустойчивого устройства, которое соответствует заданному разработчиком приоритету. В базисе CICADA лежит использование методов на основе избыточного кодирования.

Таблица 2

Сравнение теоретического и практического значений основных характеристик, а также значение комплексного критерия при разных коэффициентах приоритета для сбоеустойчивых схем, полученных с применением избыточного кодирования

Benchmark	PI	POs	noc	n	P		S	Z(0,00)		Z(0,50)		Z(1,00)	
					практ.	теор.		теор.	практ.	теор.	практ.	теор.	практ.
Метод тройного модульного резервирования													
c1355	41	32	590	1930	0,0500	0,0497	3,3	1,185	1,185	1,236	1,236	0,051	0,051
c3540	50	22	1983	6059	0,0129	0,0109	3,1	1,117	1,117	1,13	1,128	0,013	0,011
c5315	178	123	2973	9534	0,0409	0,0387	3,2	1,165	1,165	1,207	1,205	0,042	0,039
c880	60	26	435	1435	0,0548	0,0544	3,3	1,194	1,194	1,250	1,250	0,056	0,056
Метод кодирования в трехбитном пространстве Хэмминга													
c1355	41	32	590	14978	0,0043	0,0043	25,4	3,234	3,234	3,238	3,238	0,004	0,004
c3540	50	22	1983	42934	0,0012	0,0010	21,7	3,075	3,075	3,076	3,076	0,001	0,001
c5315	178	123	2973	67353	0,0038	0,0037	22,7	3,12	3,12	3,124	3,124	0,004	0,004
c880	60	26	435	10514	0,0049	0,0050	24,2	3,185	3,185	3,19	3,190	0,005	0,005
СФК на основе спектрального кода													
c1355	41	32	590	1668	0,0838	0,1050	2,8	1,039	1,039	1,127	1,15	0,088	0,111
c3540	50	22	1983	4284	0,0691	0,0406	2,2	0,77	0,77	0,842	0,812	0,072	0,041
c5315	178	123	2973	8268	0,0754	0,0815	2,8	1,023	1,023	1,101	1,108	0,078	0,085
c880	60	26	435	1252	0,0897	0,1130	2,9	1,057	1,057	1,151	1,177	0,094	0,120
СФК на основе низкоплотностного кода													
c1355	41	32	590	1404	0,1880	0,1840	2,4	0,867	0,867	1,07	0,871	0,203	0,004
c3540	50	22	1983	4120	0,1200	0,1690	2,1	0,731	0,731	0,916	0,781	0,185	0,050
c5315	178	123	2973	6807	0,1650	0,1800	2,3	0,828	0,828	1,027	0,843	0,198	0,015
c880	60	26	435	1052	0,2300	0,1805	2,4	0,883	0,883	1,088	0,929	0,205	0,046

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методы синтеза комбинационных устройств повышенной сбоеустойчивости с использованием избыточного кодирования позволяют синтезировать схемы, обладающие различными характеристиками надёжности. При этом каждая из архитектур может обладать разной степенью эффективности при разных условиях эксплуатации. Применение разработанного в рамках данной статьи комплексного критерия позволяет решить данную проблему. По значению данного критерия можно определить какой из методов синтеза наиболее эффективен для выбранного комбинационного устройства. Приоритет задается с помощью дополнительного коэффициента.

Для упрощения и ускорения процесса вычисления комплексного критерия предлагается использовать оценочные функции аналитических значений основных характеристик сбоеустойчивых схем. Это позволит провести анализ по определению наилучшего метода без выполнения реального синтеза устройства и какого-либо предварительного моделирования.

Дальнейшее добавление разработанных функций в подсистему автоматизированного проектирования CICADA позволит ускорить и упростить процесс определения наилучшего метода синтеза для конкретного комбинационного устройства при определенных условиях эксплуатации.

ПОДДЕРЖКА

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента РФ в рамках научного проекта МД-1414.2021.4

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Слабаков Е.В., Согомоян Е.С. Самопроверяемые вычислительные устройства и системы (обзор) // Автоматика и телемеханика. 1981. № 11. С. 147-167.
- [2] Jha N.K., Wang S.J. Design and Synthesis of Self-Checking VLSI circuits // IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems. 1993. V. 12. № 6. P. 878-887. DOI: 10.1109/43.229762.
- [3] Nicolaidis M. Efficient Implementations of Self-Checking Adders and ALUs // FTCS-23 The Twenty-Third International Symposium on Fault-Tolerant Computing. 1993. P. 586-595. DOI: 10.1109/FTCS.1993.627361.

- [4] Gössel M., Ocheretny V., Sogomonyan E., Marienfeld D. *New Methods of Concurrent Checking: Edition 1*. Dordrecht: Springer Science+Business Media B.V. 2008. 184 p. DOI: 10.1007/978-1-4020-8420-1_1.
- [5] Матросова А.Ю., Провкин В.А., Андреева В.В. Маскирование неисправностей полюсов логических схем с использованием частичных функций // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Математика. Механика. Информатика. 2020. Т. 20. № 4. С. 517-526. DOI: 10.18500/1816-9791-2020-20-4-517-526.
- [6] Ефанов Д.В., Сапожников В.В., Сапожников Вл.В. Отказоустойчивые структуры цифровых устройств на основе логического дополнения // Автоматика и телемеханика. 2021. №. 8. С. 140-158. DOI: 10.31857/S0005231021080079.
- [7] Mitra S., McCluskey E.J. Which Concurrent Error Detection Scheme To Choose? // Proc. International Test Conference 2000. P. 985-994. DOI:10.1109/TEST.2000.894311.
- [8] Yaran T.T.G., Tosun S. Improving Combinational Circuit Resilience Against Soft Errors via Selective Resource Allocation // 2017 IEEE 20th International Symposium on Design and Diagnostics of Electronic Circuits & Systems (DDECS). P. 12-15. DOI: 10.1109/DDECS.2017.7934576.
- [9] 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.
- [10] Хетагуров Я.А., Руднев Ю.П. Повышение надёжности цифровых устройств методами избыточного кодирования. М.: Энергия, 1974. 270 с.
- [11] Alagoz B. Baykant. Boolean Logic with Fault Tolerant Coding // OncuBilim Algorithm and Systems Labs. 2009. V. 9. № 3. [https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/0903/0903.4046.pdf]
- [12] 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.
- [13] Гуров С. И. Спектральный R-код с проверками на чётность // Прикладная математика и информатика. Труды факультета Вычислительной математики и кибернетики МГУ имени М.В. Ломоносова. 2017. № 55. С. 91-96.
- [14] Тельпухов Д.В., Жукова Т.Д., Деменева А.И., Гуров С.И. Схема функционального контроля для комбинационных схем на основе R-кода // Проблемы разработки перспективных микро-и нанoeлектронных систем (МЭС). 2018. №. 4. С. 98-104. DOI: 10.31114/2078-7707-2018-4-98-104.
- [15] Gallager R.G. Low-Density Parity-Check Codes // IRE Transactions on Information Theory. 1962. V. 8. Issue. 1. P. 21-28. DOI: 10.1109/TIT.1962.1057683.
- [16] Стемпковский А.Л., Тельпухов Д.В., Гуров С.И., Жукова Т.Д., Щелоков А.Н., Новиков А.Д. Синтез СФК на основе LDPC кода с использованием мажоритарного декодирования // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2019. №. 4(206). С. 195-206. DOI: 10.23683/2311-3103-2019-4-195-206.
- [17] Стемпковский А. Л., Тельпухов Д. В., Деменева А. И., Жукова Т. Д. Маршрут проектирования схем функционального контроля комбинационных устройств // Вестник РГПУ. 2018. № 6. С. 92-98. DOI: 10.21667/1995-4565-2018-65-3-92-98.
- [18] Тельпухов Д.В., Жукова Т.Д., Щелоков А.Н. Оценка вероятности пропуска ошибки схемой функционального контроля на основе спектрального R-кода // Труды Международного конгресса по интеллектуальным системам и информационным технологиям – 2020, “IS&IT’20”. 2020. Т. 1. С. 109-116.
- [19] Тельпухов Д.В., Жукова Т.Д., Щелоков А.Н. Анализ характеристик СФК на основе методов избыточного кодирования // Известия ЮФУ. Технические науки. 2020. №. 4. С. 165-177. DOI: 10.18522/2311-3103-2020-4-165-177.
- [20] URL: <https://ddd.fit.cvut.cz/prj/Benchmarks/> (дата обращения: 24.08.2021).
- [21] Жукова Т.Д. Разработка системы автоматизированного проектирования СФК на основе методов избыточного кодирования // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭС). 2020. № 4. С. 51-57. DOI: 10.31114/2078-7707-2020-4-51-57.
- [22] Stempkovsky A.L., Zhukova T.D., Telpukhov D.V., Gurov S.I. CICADA: A New Tool to Design Circuits with Correction and Detection Abilities // Proc. IEEE International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON-2021). 2021. P. 1-5. DOI: 10.1109/SIBCON50419.2021.9438900.

Analytical Method for Choosing the Most Efficient Algorithm for Fault-Tolerant Combinational Circuits Synthesis

D.V. Telpuhov, T.D. Zhukova, P.D. Kretinina

Institute for Design Problems in Microelectronics of RAS, Moscow, zhukova_t@ippm.ru

Abstract — Today the design of fault-tolerant combinational devices is a most urgent task. Previously, designers placed major focus on memory elements protection against negative environmental conditions, since it was believed that combinational circuits are not prone to failure. However, improvement of basic characteristics of integrated circuits led to sharp increase in the number of failures in their combination sections. At the moment, the most promising direction for improving fault-tolerance characteristics of combinational devices are

synthesis methods based on redundant coding. Additional structural redundancy introduced by such methods provides combinational circuits with the skill of detecting and/or correcting failures. Unfortunately, the choice among the variety of synthesis methods is complicated by the fact that each of these methods builds a device with its own reliability characteristics. To solve this problem, we propose to use a complex criterion, which, depending on the priority coefficient chosen by the designer, allows us to select the most appropriate

method for synthesizing a device for the given environmental conditions. In this paper several synthesis methods were studied, which made it possible to assess efficiency of the developed complex criterion. For each of these methods, we got evaluation functions specifications, which allow calculating the major characteristics of the resulting circuits analytically. We proposed to use the obtained specifications for calculating analytical values of the complex criterion without preliminary modeling. Our research showed that the use of analytical functions can speed up and simplify the process of determining the best synthesis method for a specific device. In the future, we plan to introduce these specifications and the complex criterion into our custom subsystem for automated design of fault-tolerant combinational circuits based on redundant coding methods.

Keywords — combinational circuits, structure redundancy, fault-tolerant coding, concurrent error detection, reliability characteristic.

REFERENCES

- [1] Slabakov E.V., Sogomonyan E.S. Samoproveryaemye vychislitel'nye ustrojstva i sistemy (obzor) (Self-Check Computing Devices and Systems (survey)) // *Avtomatika i telemekhanika*. 1981. № 11. S. 147-167.
- [2] Jha N.K., Wang S.J. Design and Synthesis of Self-Checking VLSI circuits // *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*. 1993. V. 12. № 6. P. 878-887. DOI: 10.1109/43.229762.
- [3] Nicolaidis M. Efficient Implementations of Self-Checking Adders and ALUs // *FTCS-23 The Twenty-Third International Symposium on Fault-Tolerant Computing*. 1993. P. 586-595. DOI: 10.1109/FTCS.1993.627361.
- [4] Gössel M., Ocheretny V., Sogomonyan E., Marienfeld D. *New Methods of Concurrent Checking: Edition 1*. Dordrecht: Springer Science+Business Media B.V. 2008. 184 p. DOI: 10.1007/978-1-4020-8420-1_1.
- [5] Matrosova A.YU., Provkin V.A., Andreeva V.V. Maskirovanie neispravnostej polyusov logicheskikh skhem s ispol'zovaniem chastichnykh funktsiy (Masking of Internal Nodes Faults Based on Applying of Incompletely Specified Boolean Functions) // *Izv. Sarat. un-ta. Nov. ser. Ser. Matematika. Mekhanika. Informatika*. 2020. T. 20. № 4. S. 517-526. DOI: 10.18500/1816-9791-2020-20-4-517-526.
- [6] Efanov D.V., Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov V.I. Otkazoustojchivye struktury cifrovyykh ustrojstv na osnove logicheskogo dopolneniya (Fault-Tolerant Structures of Digital Devices Based on Logical Complement) // *Avtomatika i telemekhanika*. 2021. № 8. S. 140-158. DOI: 10.31857/S0005231021080079.
- [7] Mitra S., McCluskey E.J. Which Concurrent Error Detection Scheme To Choose? // *Proc. International Test Conference 2000*. P. 985-994. DOI:10.1109/TEST.2000.894311.
- [8] Yaran T.T.G., Tosun S. Improving Combinational Circuit Resilience Against Soft Errors via Selective Resource Allocation // *2017 IEEE 20th International Symposium on Design and Diagnostics of Electronic Circuits & Systems (DDECS)*. P. 12-15. DOI: 10.1109/DDECS.2017.7934576.
- [9] Stempkovskij A.L., Tel'puhov D.V., Solov'ev R.A., Myachikov M.V. Povyshenie otkazoustojchivosti logicheskikh skhem s ispol'zovaniem nestandartnykh mazhoritarnykh elementov (Improving the Fault Tolerance of Logic Circuits Using Unconventional Majority Voters) // *Informacionnye tekhnologii*. 2015. T. 21. № 10. S. 749-756.
- [10] Hetagurov YA.A., Rudnev YU.P. Povyshenie nadyozhnosti cifrovyykh ustrojstv metodami izbytochnogo kodirovaniya (Improving the Reliability of Digital Devices Methods of Redundant Coding). M.: Energiya, 1974. 270 s.
- [11] Alagoz B. Baykant. Boolean Logic with Fault Tolerant Coding // *OncuBilim Algorithm and Systems Labs*. 2009. V. 9. № 3. [https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/0903/0903.4046.pdf]
- [12] 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 (Synthesis Methods of Fault-Tolerant Combination CMOS Circuits, Providing Automatic Correction of Errors) // *Izvestiya VUZov. YUFU*. 2017. №7(192). S. 197-210.
- [13] Gurov S.I. Spektral'nyj R-kod s proverkami na chytynost' (Spectral R-Code with Parity Checks) // *Prikladnaya matematika i informatika. Trudy fakul'teta Vychislitel'noy matematiki i kibernetiki MGU imeni M.V. Lomonosova*. 2017. № 55. S. 91-96.
- [14] Telpukhov D.V., Zhukova T.D., Demeneva A.I., Gurov S.I. Circuit of the Functional Control for Combinational Circuits Based on R-code // *Problems of Perspective Micro- and Nanoelectronic Systems Development - 2018*. Issue 4. P. 98-104. doi:10.31114/2078-7707-2018-4-98-104
- [15] Gallager R.G. Low-Density Parity-Check Codes // *IRE Transactions on Information Theory*. 1962. V. 8. Issue. 1. P. 21-28. DOI: 10.1109/TIT.1962.1057683.
- [16] Stempkovskij A.L., Tel'puhov D.V., Gurov S.I., Zhukova T.D., SHChelokov A.N., Novikov A.D. Sintez SFK na osnove LDPC koda s ispol'zovaniem mazhoritarnogo dekodirovaniya (Synthesis Method of Fault-Tolerant Combination Circuits with CED Based on LDPC Code) // *Izvestiya YUzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2019. № 4 (206). S. 195-206. DOI: 10.23683/2311-3103-2019-4-195-206.
- [17] Stempkovskij A.L., Tel'puhov D.V., Demeneva A.I., Zhukova T.D. Marshrut proektirovaniya skhem funktsional'nogo kontrolya kombinatsionnykh ustrojstv (Design Flow of Concurrent Error Detection Schemes for Combinational Circuits) // *Vestnik RGRTU*. 2018. № 65. S. 92-98. DOI: 10.21667/1995-4565-2018-65-3-92-98.
- [18] Tel'puhov D.V., Zhukova T.D., SHChelokov A.N. Ocenka veroyatnosti propuska oshibki skhemoj funktsional'nogo kontrolya na osnove spektral'nogo R-koda (Estimation of Probability of Error Omission By Concurrent Error Detection Circuit Based on Spectral R-Code) // *Trudy Mezhdunarodnogo kongressa po intellektual'nykh sistemam i informatsionnykh tekhnologiyam – 2020, "IS&IT'20"*. 2020. T. 1. S. 109-116.
- [19] Tel'puhov D.V., Zhukova T.D., SHChelokov A.N. Analiz harakteristik SFK na osnove metodov izbytochnogo kodirovaniya (Analysis of Characteristic for CED Circuits Based on Redundant Encoding Methods) // *Izvestiya YUFU. Tekhnicheskie nauki*. 2020. № 4. S. 165-177. DOI: 10.18522/2311-3103-2020-4-165-177.
- [20] URL: <https://ddd.fit.cvut.cz/prj/Benchmarks/> (access date: 24.08.2021).
- [21] Zhukova T.D. Development of a computer-aided design system based on redundant coding methods // *Problems of Perspective Micro- and Nanoelectronic Systems Development - 2020*. Issue 4. P. 51-57. doi:10.31114/2078-7707-2020-4-51-57
- [22] Stempkovskiy A.L., Zhukova T.D., Telpukhov D.V., Gurov S.I. CICADA: A New Tool to Design Circuits with Correction and Detection Abilities // *Proc. IEEE International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON-2021)*. 2021. P. 1-5. DOI: 10.1109/SIBCON50419.2021.9438900.