

На правах рукописи

Жукова Татьяна Дмитриевна

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СХЕМ
ФУНКЦИОНАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ
КОМБИНАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ
МЕТОДОВ ИЗБЫТОЧНОГО КОДИРОВАНИЯ**

Специальность: 05.13.12 – Системы автоматизации проектирования
(технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва – 2021

Работа выполнена в ФГБУН Институт проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук (ИППМ РАН)

Научный руководитель: Гаврилов Сергей Витальевич,
доктор технических наук, профессор

Научный консультант: Тельпухов Дмитрий Владимирович,
доктор технических наук

Официальные оппоненты:

Ефанов Дмитрий Викторович, доктор технических наук,
доцент, ООО «НТЦ «Комплексные системы
мониторинга», заместитель генерального директора по
научной работе

Зольников Константин Владимирович, кандидат
технических наук, АО «НИИЭТ», ведущий инженер-
конструктор дизайн-центра проектирования интегральных
микросхем

Ведущая организация: ПАО «ИНЭУМ им. И.С. Брука»

Защита состоится 24 июня 2021 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета Д.002.078.01, созданного на базе ФГБУН Института проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук» (ИППМ РАН) по адресу: 124365, РФ, г. Москва, Зеленоград, ул. Советская, д. 3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИППМ РАН и на сайте: <http://www.ippm.ru/data/dissrt/Zhukova/text.pdf>

Отзыв на автореферат в 2 экз., заверенный гербовой печатью организации и оформленный согласно «Положению о порядке присуждения ученых степеней» (п. 28), просим направлять в ИППМ РАН по адресу: 124365, г. Москва, Зеленоград, ул. Советская, д. 3.

Автореферат разослан ___ мая 2021 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 002.078.01,
кандидат технических наук, доцент

М.М. Жаров

Актуальность темы

Интегральные схемы для ответственных применений имеют повышенные требования к надежности функционирования, и должны сохранять работоспособность даже в условиях воздействия различных дестабилизирующих факторов, включая радиационное излучение.

Наиболее распространённым результатом воздействия таких факторов являются одиночные сбои в запоминающих элементах (SEU, Single Event Upset), приводящие к переключению триггеров и элементов памяти, что влечет за собой возникновение сбоев (soft error), которые могут сильно ограничить надежность функционирования аппаратуры, а именно привести к нарушению без какого-либо физического повреждения. Данный тип ошибок получил название обратимых вследствие их временного характера, так как работоспособность устройства восстанавливается в течении короткого промежутка времени.

Традиционно обратимые сбои находились в фокусе внимания разработчиков элементов памяти из-за высокой плотности информации, которая может быть подвергнута искажению. Но на сегодняшний день развитие микроэлектроники – уменьшение технологических норм, увеличение рабочих частот и снижение напряжения питания, приводят к росту числа сбоев в комбинационных схемах (SET, Single Event Transient). Исследования данной тенденции показали, что в ближайшее время частота сбоев в комбинационных схемах будет сопоставима с частотой ошибок в незащищенных элементах памяти¹.

Для решения обозначенной проблемы были разработаны методы, позволяющие снизить последствия от возникновения SET.

Одним из таких решений было исследование и развитие методов, основанных на механизмах маскирования, позволяющих снизить чувствительность схем к сбоям. Из существующих типов маскирования (логическое, электрическое и временное) логическое вносит наибольший вклад в интенсивность возникновения сбоев, а также в меньшей степени зависит от технологии проектирования. Это позволяет применять методы на основе логического маскирования уже на ранних стадиях проектирования сверхбольших интегральных схем (СБИС).

¹ Mahatme N. N., Gaspard N.J., Assis T., et al. Impact of Technology Scaling on the Combinational Logic Soft Error Rate // 2014 IEEE international reliability physics symposium, 2014. Pp. 5F. 2.1-5F. 2.6.
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), 2017. Pp. 12-15.

Классическим подходом к повышению сбоеустойчивости является использование n -кратного резервирования, основная идея которого заключается в аппаратной реализации нескольких копий схемы. Выходы защищаемого устройства и его копий объединяются схемой голосования. Обычно для исправления однократных ошибок, возникающих в одной из копий, используется метод тройного модульного резервирования (TMR, Triple Modular Redundancy). К сожалению, методы на основе резервирования обладают серьезным недостатком – их применение приводит к существенным аппаратным затратам. Однако, применение других, более эффективных методов, оказывается затруднительным ввиду недостаточного развития методологической базы, а также отсутствия доступных средств автоматизации проектирования схем повышенной надежности.

Кроме методов резервирования довольно часто для повышения сбоеустойчивости используются методы на основе средств контроля (тестовый (offline) и функциональный контроль (online testing)). Схемы функционального контроля (СФК) реализуются путем добавления дополнительной подсхемы, позволяющей сигнализировать о наличии в устройстве ошибки, а также при необходимости выполнить ее исправление.

Применение схем контроля позволяет решить проблему возникновения больших аппаратных затрат при синтезе комбинационных устройств повышенной сбоеустойчивости. Однако сложность в их освоении, высокие требования к квалификации разработчиков и компетенциям в области теории помехоустойчивого кодирования, а также отсутствие специализированных средств автоматизированного проектирования, препятствуют широкому применению данных методов на практике.

Существенный вклад в область разработки методов диагностирования и контроля дискретных устройств был внесен отечественными учеными Ефановым Д. В., Сапожниковым В. В. и Сапожниковым Вл. В. В своих работах авторы исследовали различные варианты построения систем диагностирования, включающие в себя схемы на основе нелинейных кодов (коды Хэмминга, Бергера и коды с суммированием). Среди зарубежных специалистов в области исследования и разработки методов и средств построения сбоеустойчивых устройств следует отметить работы таких авторов, как N.A. Touba, R. Ramanarayanan, S. Mitra, E.J. McCluskey, S. Krishnaswamy, N.K. Jha и S.-J. Wang.

Каждый из методов реализации схемы контроля в зависимости от исходных параметров и внутреннего строения комбинационных устройств позволяет синтезировать схемы, обладающие различными характеристиками надежности, что затрудняет выбор той или иной архитектуры. В связи с этим задача разработки подсистемы автоматизированного проектирования, позволяющей автоматизировать генерацию схем функционального контроля, является крайне актуальной.

Цель диссертационной работы и задачи исследования

Цель данной диссертационной работы состоит в разработке комплекса методов, алгоритмов и средств автоматизированного проектирования схем функционального контроля для комбинационных устройств.

Для достижения этой цели в рамках диссертационной работы поставлены следующие основные задачи:

1. Разработка метода синтеза схем функционального контроля на основе кодирования в трехбитном пространстве Хэмминга с возможностью исправления однократных ошибок.

2. Разработка метода синтеза схем функционального контроля на основе спектрального R-кода с возможностью исправления однократных и обнаружения двукратных ошибок.

3. Разработка метода синтеза схем функционального контроля на основе низкоплотностного кода с возможностью исправления однократных ошибок.

4. Разработка алгоритма кластеризации выходов логического устройства по группам для снижения частоты многократных ошибок, возникающих в схеме функционального контроля.

5. Разработка алгоритма расчета комплексного критерия на основе полученных спецификаций оценочных функций характеристики надежности и структурной избыточности для определения наилучшего метода синтеза СФК без проведения предварительного моделирования.

Объект исследования

Система автоматизации проектирования (САПР) комбинационных схем повышенной надежности.

Предмет исследования

Методы автоматизированного синтеза схем функционального контроля, основанные на использовании методов избыточного кодирования.

Методы исследования

Для решения поставленных задач применялись методы исследования на базе математического аппарата комбинаторики, теории вероятностей, имитационного моделирования и теории помехоустойчивого кодирования. Для практической реализации применялись методы компьютерного моделирования с использованием программного комплекса на языке Python, разработанного в ИППМ РАН, программные средства LogicFriday и Yosys, для минимизации булевых функций и оптимизации числа логических элементов комбинационных схем.

Личный вклад автора

Все основные положения и результаты были получены автором лично.

Основной вклад автора в представленных работах состоит в следующем:

[1, 4, 5, 10, 17, 18] – проведение анализа методов повышения сбоеустойчивости комбинационных схем, обработка результатов.

[2, 3, 8, 9, 12, 16] – реализация метода синтеза СФК на основе спектрального кода и алгоритма кластеризации выходов комбинационных схем, проведение моделирования и анализ результатов.

[13, 14, 20] – реализация подсистемы автоматизированного проектирования СФК для анализа по определению наилучшего метода синтеза схемы контроля, разработка спецификаций оценочных функций основных характеристик схемы контроля, проведение моделирования и анализ результатов.

[6, 19] – реализация метода синтеза СФК на основе кодирования в трехбитном пространстве Хэмминга, проведение моделирования и анализ результатов.

[15, 21] – анализ низкоплотностного кода и реализация на его основе метода синтеза СФК, проведение моделирования и анализ результатов.

[7, 11] – реализация алгоритма моделирования с целью инжектирования ошибок в СФК и схему дублирования, проведение моделирования и анализ результатов.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработан метод синтеза схем функционального контроля на основе спектрального R-кода, отличающийся улучшением корректирующих свойств комбинационного устройства благодаря обеспечению технологической защитой входного конуса элементов, влияющего на общий бит четности.

2. Разработан алгоритм раздельной генерации схем функционального контроля на основе кластеризации, обеспечивающий снижение частоты возникновения многократных ошибок в схеме.

3. Разработан метод синтеза схем функционального контроля на основе низкоплотностного кода, отличающийся малой структурной избыточностью благодаря разработке алгоритма генерации разреженных порождающей и проверочной матриц специального вида.

4. Разработана функция комплексного критерия, отличающаяся применением спецификаций оценочных функций для определения наилучшего метода синтеза схем функционального контроля без проведения предварительного моделирования.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Метод синтеза схем функционального контроля на основе кодирования в трехбитном пространстве Хэмминга, позволяющий выполнить исправление однократной ошибки и существенно снизить вероятность пропуска ошибки по сравнению с методом TMR.

2. Метод синтеза схем функционального контроля на основе спектрального R-кода, позволяющий выполнить исправление однократных и обнаружение двукратных ошибок, а также повысить вероятность исправления/обнаружения благодаря защите части кодера специальными технологическими средствами.

3. Метод синтеза схем функционального контроля на основе низкоплотностного кода, позволяющий выполнять исправление однократных ошибок и получить схемы, обладающие малой структурной избыточностью по сравнению с методом TMR.

4. Алгоритм кластеризации выходов комбинационного устройства, позволяющий повысить коррекционные свойства схемы, а также снизить частоту возникновения в ней многократных ошибок.

5. Комплексный критерий выбора наилучшего метода синтеза схемы контроля в зависимости от основного приоритета без проведения синтеза реальной схемы, а также ее предварительного моделирования.

Практическая значимость работы заключается в возможности использования разработанной подсистемы автоматизированного проектирования СФК на основе методов избыточного кодирования для проведения анализа с целью выбора наилучшего метода синтеза для конкретной комбинационной схемы и последующей генерацией с его помощью устройства повышенной сбоеустойчивости. Применение данной подсистемы на практике не требует высокой квалификации и

компетенций в области теории кодирования, что позволяет облегчить разработчикам проектирование устойчивых к возникновению сбоев комбинационных устройств с использованием эффективных методов на основе средств контроля.

Внедрение результатов работы

Основные научно-технические результаты работы, основанные на исследованиях автора, внедрены в АО НПЦ «ЭЛВИС» и АО «ПКК Миландр». Внедрение предложенных методов и программных средств позволило повысить характеристики надежности микросхем при эксплуатации в жестких условиях воздействия дестабилизирующих факторов, что подтверждается актами о внедрении. Разработанная подсистема автоматизированного проектирования СФК может быть внедрена в существующие в коммерческих САПР маршруты проектирования, а также может быть интегрирована в процессы разработки интегральных схем повышенной сбоеустойчивости на предприятиях соответствующего профиля.

Достоверность результатов исследования

Обеспечивается обоснованным и корректным применением положений и методов математического аппарата алгебры и комбинаторики, теории помехоустойчивого кодирования, а также подтверждается совпадением теоретических выводов с результатами имитационного моделирования.

Апробация результатов работы

Основные положения диссертационной работы докладывались на международных и российских научно-технических конференциях:

- Конференция «Микроэлектроника и Информатика-2016»;
- Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем-2016»;
- Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем-2018»;
- Международная конференция IEEE Conference of Russian 2018;
- Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем-2020».

Публикации

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 21 научных работах, среди которых 3 статьи изданы в изданиях, входящих в международные базы цитирования Web of Science, Scopus, 13 – в

ведущих рецензируемых научных журналах и сборниках, входящих в Перечень ВАК РФ.

Объём и структура работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и двух приложений. Объем диссертации составляет 191 страница текста (с учетом приложений) и иллюстрируется 73 рисунками и 29 таблицами. Список литературы включает 128 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность выбранной темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследования, описаны научная новизна и практическая значимость работы.

Первая глава посвящена краткому анализу дестабилизирующих эффектов и их влиянию на работу электронной аппаратуры. Кроме того, проведен обзор основных методов борьбы с последствиями возникновения одиночных сбоев в комбинационных схемах таких как:

- Методы на основе механизмов маскирования;
- Методы n-кратного резервирования;
- Методы на основе средств контроля.

Для исследуемых методов были описаны принципы реализации, сформулированы их недостатки и особенности применения. Представлено краткое описание метрик для оценки характеристик надежности комбинационного устройства. Проведено сравнение существующих методов синтеза схем контроля.

Вторая глава посвящена исследованию и разработке методов синтеза схем функционального контроля на основе методов избыточного кодирования, входящих в состав разработанной подсистемы автоматизированного проектирования:

- метод синтеза СФК на основе кодирования в трехбитном пространстве Хэмминга;
- метод синтеза СФК на основе спектрального R-кода;
- метод синтеза СФК на основе низкоплотностного кода.

Метод синтеза на основе кодирования в трехбитном пространстве Хэмминга заключается в замене элементарных булевых функций на их сбоеустойчивые аналоги, обеспечивающие автоматическое восстановление функциональности цифровой подсистемы без необходимости разработки механизмов дополнительной отказоустойчивости. Это происходит за счет того, что каждый

последующий элемент в схеме исправляет ошибки, возникшие на элементах предыдущих уровней.

В диссертационной работе были получены сбоеустойчивые аналоги логических элементов (ЛЭ) в базисе трехбитового пространства Хэмминга. В качестве кодера и декодера для данной СФК были реализованы входной и выходной преобразователи для перевода из традиционной логики в пространство Хэмминга и обратно.

На Рис. 1 представлен процесс получения СФК на основе разработанного метода синтеза для схемы c17 из тестового набора ISCAS'85.

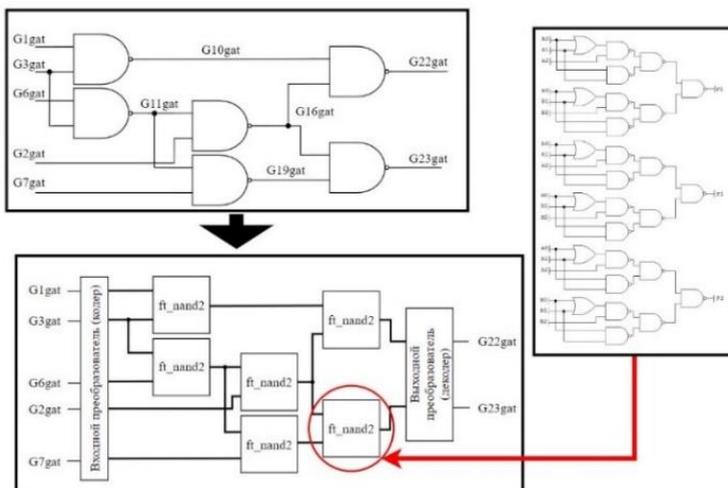


Рис. 1. Процесс получения СФК на основе кодирования в трехбитном пространстве Хэмминга

Был разработан метод синтеза СФК на основе спектрального R-кода, способный обнаружить двукратные, а также исправить однократные ошибки инвертирования информационных разрядов. Схема контроля состоит из основной схемы (ОС) и корректирующей схемы, состоящей в свою очередь из кодера и декодера (Рис. 2).

Кодер для описанной СФК состоит из копии ОС и подсхемы, выполняющей вычисление ее проверочных разрядов. Декодер для синдромного метода декодирования состоит из подсхемы обнаружения ошибки, включающей в себя подсхему вычисления синдрома, и подсхемы определения вектора ошибки.

Была проведена оптимизация кодера полученной схемы функционального контроля с помощью программы Yosys. Оптимизация

всей схемы сразу не проводилась по причине того, что в состав СФК входит основная схема и ее копия и это привело бы к нарушению корректирующих свойств схемы контроля.

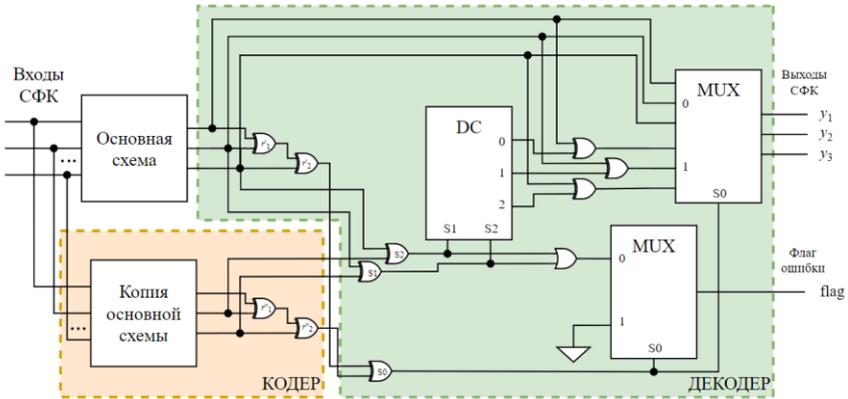


Рис. 2. Структурная схема СФК на основе спектрального R-кода на примере схемы frg1_synth из тестового набора LGSynth'89

Был разработан метод синтеза СФК на основе низкоплотного кода (LDPC, Low-Density Parity Check Code), являющегося частным случаем блочного линейного (n, k) -кода с проверкой на четность, в котором проверочная матрица $H_{m \times n}$ является сильно разреженной. В качестве метода декодирования за счет легкости и простоты выполнения был выбран метод мажоритарного декодирования.

Структурно СФК на основе низкоплотного кода состоит из основной схемы и корректирующей схемы, в состав которой входят подсхема кодера, состоящего из копии основной схемы, а также блока вычисления проверочных разрядов, и подсхема декодера, выполняющая исправление однократной ошибки (Рис. 3).

Для снижения частоты возникновения многократных ошибок был разработан алгоритм кластеризации выходов основной схемы. Использование данного подхода позволяет значительно повысить вероятность обнаружения/исправления ошибок кодами SEC/DED, но при этом приводит к дополнительным структурным затратам.

Разработанный алгоритм производит разбиение множества выходов комбинационной 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. Исходной информацией для данного алгоритма является

квадратная симметричная матрица взаимозависимости ошибок на выходах ОС.

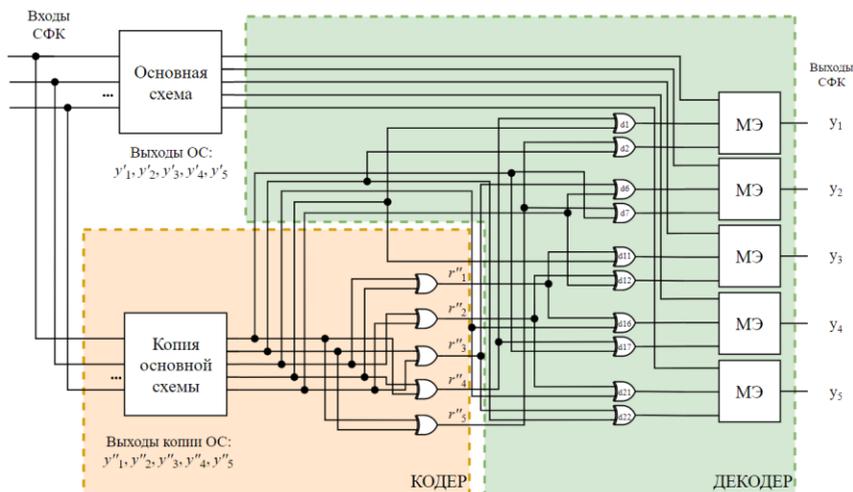


Рис. 3. Структурная схема СФК на основе низкоплотного кода на примере комбинационной схемы с 5 выходами

Третья глава диссертационной работы посвящена разработке подсистемы автоматизированного проектирования СФК (Рис. 4) на основе, представленных в Главе 2, методов и алгоритмов. Основная ее задача заключается в проведении анализа вводимой пользователем комбинационной схемы для определения наилучшего метода синтеза СФК с последующей генерацией схемы контроля на основе выбранного метода. Анализ проводится с учетом вносимого пользователем коэффициента, определяющего какая из основных характеристик (структурная избыточность или характеристика надежности), будет являться приоритетной при выборе метода синтеза СФК.

Для вычисления теоретического значения избыточности для каждого из методов синтеза схем контроля были выведены оценочные функции, которые позволили получить аналитические значения основных характеристик устройства без его реального синтеза. Для их получения был проведен ряд исследований с целью анализа структуры подсхем, входящих в состав схем контроля.

Для СФК на основе кодирования в трехбитном пространстве Хэмминга была получена оценочная формула, зависящая от числа ЛЭ в одноходовых и двухходовых сбоеустойчивых аналогах (a и b), числа одноходовых ($n_{\text{однохв.}}$) и двухходовых ($n_{\text{двуххв.}}$) ЛЭ ОС, числа элементов

в подсхеме выходного преобразователя ($n_{\text{вых.преобр.}}$), а также выходов основной схемы (k):

$$n_{\text{СФК}} = a \cdot n_{\text{однох.}} + b \cdot n_{\text{двухх.}} + n_{\text{вых.преобр.}} \cdot k.$$

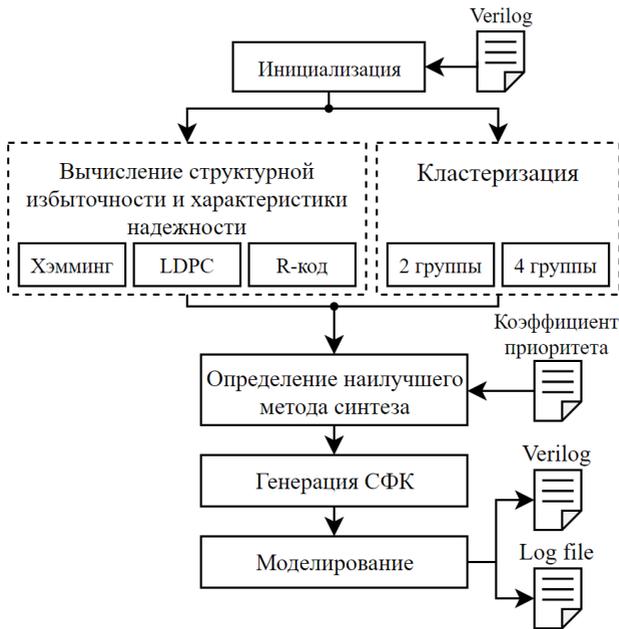


Рис. 4. Структура разработанной подсистемы автоматизированного проектирования схем функционального контроля на основе методов избыточного кодирования

При получении формулы для СФК на основе спектрального кода было определено, что для вычисления аналитического значения структурной избыточности необходимо учитывать избыточность ОС ($n_{\text{ОС}}$), число ЛЭ XOR2 ($n_{\text{гх}}$), используемых для вычисления проверочных разрядов копии ОС, а также число проверочных разрядов m .

В результате проведённого анализа была получена следующая формула:

$$n_{\text{СФК}} = 2 \cdot n_{\text{ОС}} + 2 \cdot n_{\text{гх}} + 3 \cdot m + m \cdot k + 2 \cdot k + 2.$$

Исследование СФК на основе низкоплотностного кода показало, что в основном значение ее структурной избыточности сильно зависит от числа выходов основной схемы:

$$n_{\text{СФК}} = 2 \cdot n_{\text{ОС}} + 7 \cdot k.$$

Для оценки характеристики надежности (вероятности пропуска ошибки) СФК в диссертационной работе также была проведена

разработка спецификаций оценочных функций. В качестве пропуска рассматривалась ситуация, при которой схема контроля не смогла обнаружить и выполнить исправление ошибки. Для их получения был проведен анализ основных блоков схемы контроля с целью определения подсхем, ошибка на которых может привести к возникновению пропуска на выходе.

Для схем контроля на основе кодирования в трехбитном пространстве Хэмминга было определено, что пропуск может возникнуть только при попадании ошибки в подсхему выходного преобразователя.

Аналитически была получена следующая оценочная функция вероятности пропуска:

$$p = \frac{2k}{n_{\text{СФК}}},$$

где $n_{\text{СФК}}$ – число ЛЭ в схеме контроля на основе трехбитного пространства Хэмминга.

По результатам проведенных исследований для СФК на основе спектрального кода было определено, что подсхемами, ошибка на которых может привести к возникновению пропуска, являются:

- Основная схема (если кратность ошибки в информационных разрядах схемы больше 2, т.к. схема контроля рассчитана на работу с однократными и двукратными ошибками));
- Подсхема, отвечающая за вычисление общего синдрома S_0 ;
- Подсхема, отвечающая за вычисление общего бита четности ОС;
- Подсхема, определяющая режим работы схемы контроля.

Для получения итоговой формулы расчета характеристики надежности необходимо было определить вероятность пропуска ошибки для каждой из ненадежных подсхем:

$$p = P_{\text{ОС}} + P_{\text{ГР}} + P_{\text{С}} + P_{\text{РР}},$$

где $P_{\text{ОС}}$ – вероятность пропуска при возникновении ошибки в ОС, $P_{\text{ГР}}$ – вероятность пропуска при возникновении ошибки в блоке, выполняющего вычисление общего бита четности ОС, $P_{\text{С}}$ – возникновение пропуска в блоке вычисления общего синдрома S_0 , $P_{\text{РР}}$ – вероятность пропуска ошибки в блоке определения режима работы схемы контроля.

Был проведен ряд аналитических и практических исследований, с помощью которых были получены формулы для вычисления вероятности пропуска каждой из ненадежных подсхем:

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

где $rate_{max}$ – максимальная кратность ошибки, которая может возникнуть в основной схеме, $\beta = \frac{n_{OC}}{n_{СФК} - n_K}$ – вероятность того, что однократная

ошибка попадет в ОС, p_i – вероятность возникновения в ОС ошибки кратности i , f_i – вероятность возникновения $flag = 0$ при возникновении четной ошибки, n_K – число элементов, входящих в защитный конус.

Исследование по определению ненадежных блоков для СФК на основе низкоплотного кода показало, что ненадежными являются следующие подсхемы:

- Копия основной схемы (КОС);
- Подсхемы мажоритарных элементов (МЭ).

Общая формула вероятности пропуска ошибки, рассматриваемой СФК, будет иметь следующий вид:

$$p = P_{КОС} + P_{МЭ}.$$

Итоговая формула для вычисления аналитического значения вероятности пропуска ошибки схемой контроля на основе низкоплотного кода:

$$p = \sum_{i=1,2,3,\dots}^{rate_{max}} \beta p_i + \frac{2k}{n_{СФК}}.$$

В рамках данной диссертационной работы была получена функция комплексного критерия $Z(\lambda)$, позволяющая произвести выбор наилучшего метода синтеза СФК для конкретной комбинационной схемы. В качестве критерия предлагается использовать коэффициент λ в интервале $[0, 1]$, определяющий какая из основных характеристик СФК при выборе метода синтеза будет в приоритете:

- Структурная избыточность:

$$S = \frac{n_{СФК}}{n_{OC}},$$

- Характеристика надежности p .

Выбор базисных функций для значений коэффициента λ (Табл. 1), основан на достижении комплексного критерия минимального значения – экстремума, который достигается в следующих идеальных ситуациях:

- Малая структурная избыточность СФК - f_0 : $S = 1$.
- Баланс между малой избыточностью и высокой сбоеустойчивостью СФК - f_1 : $S = 1$ и $p = 0$.

– Высокая сбоеустойчивость СФК - $f_2: p = 0$.

Таблица 1. Базисные функции комплексного критерия в зависимости от коэффициента приоритета λ

Коэффициент, λ		Приоритет оценки	Базисные функции
λ_0	0	Малая структурная избыточность	$f_0 = \ln(S)$
λ_1	0.5	Баланс между малой избыточностью и высокой сбоеустойчивостью	$f_1 = \ln\left(\frac{S}{1-p}\right)$
λ_2	1	Высокая сбоеустойчивость	$f_2 = \ln\left(\frac{1}{1-p}\right)$

Для решения проблемы нахождения промежуточных точных значений функции критерия $Z(\lambda)$ предлагается использовать интерполяционный многочлен Лагранжа:

$$P_n(x) = y_0 \frac{(x-x_1)(x-x_2)\dots(x-x_n)}{(x_0-x_1)(x_0-x_2)\dots(x_0-x_n)} +$$

$$+ y_1 \frac{(x-x_1)(x-x_2)\dots(x-x_n)}{(x_1-x_0)(x_1-x_2)\dots(x_1-x_n)} + \dots +$$

$$y_n \frac{(x-x_0)(x-x_1)\dots(x-x_{n-1})}{(x_n-x_0)(x_n-x_1)\dots(x_n-x_{n-1})}.$$

Формула комплексного критерия с применением многочлена Лагранжа:

$$Z(\lambda) = f_0 \frac{(\lambda-\lambda_1)(\lambda-\lambda_2)}{(\lambda_0-\lambda_1)(\lambda_0-\lambda_2)} + f_1 \frac{(\lambda-\lambda_1)(\lambda-\lambda_2)}{(\lambda_1-\lambda_0)(\lambda_1-\lambda_2)} + f_2 \frac{(\lambda-\lambda_0)(\lambda-\lambda_1)}{(\lambda_2-\lambda_1)(\lambda_2-\lambda_2)} =$$

$$= f_0(2\lambda^2 - 3\lambda + 1) - 4f_1(\lambda^2 - \lambda) + f_2(2\lambda^2 - \lambda).$$

После подстановки базисных функций формула приобретает следующий вид:

$$Z(\lambda) = \ln(S)(2\lambda^2 - 3\lambda + 1) - 4\ln\left(\frac{S}{1-p}\right)(\lambda^2 - \lambda) + \ln\left(\frac{1}{1-p}\right)(2\lambda^2 - \lambda).$$

Итоговая функция комплексного критерия в зависимости от коэффициента приоритета λ :

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

За счет использования оценочных функций основных характеристик схемы контроля, может быть получено аналитическое значение комплексного критерия, позволяющее выбрать наилучший метод синтеза СФК без проведения моделирования.

В конце главы приведено описание основных разработанных программных модулей подсистемы автоматизированного проектирования, а также методов и алгоритмов, входящих в ее состав.

В четвертой главе представлены результаты проведенных численных экспериментов для оценки эффективности разработанной подсистемы автоматизации проектирования СФК на комбинационных схемах из тестовых наборов ISCAS'85 и LGSynth'89.

Стоит отметить, что, исходя из базовых соображений о плотности потока ошибок, а также текущих размеров интегральных схем, считается, что в СФК может произойти одновременно не более одной ошибки. На практике это справедливо для технологий выше 28 нм. Поэтому в данной диссертационной работе для экспериментальной проверки корректирующей или обнаруживающей способности схем контроля проводилось инъектирование только однократных ошибок.

Метод синтеза СФК на основе трехбитового пространства Хэмминга. В процессе исследования был проведен сравнительный анализ по значению структурной избыточности S и характеристики надежности p СФК и схем, полученными в результате применения метода TMR (Табл. 2).

Таблица 2. Результаты сравнительного анализа по основным характеристикам СФК на основе кодирования в трехбитном пространстве Хэмминга и схем TMR для набора тестовых схем ISCAS'85 и LGSynth'89

Benchmark	Число логических элементов, n			Избыточность, S		Вероятность пропуска, p		
	ОС	TMR	СФК	TMR	СФК	ОС	TMR	СФК
<i>c432</i>	216	683	5260	3,2	24,4	27,97	2,35	0,22
<i>c499</i>	246	898	6170	3,7	25,1	37,00	10,63	1,04
<i>c1355</i>	590	1930	14978	3,3	25,4	32,59	4,96	0,43
<i>5xp1</i>	135	455	3475	3,4	25,7	40,60	6,97	0,60
<i>pcl_synth</i>	83	294	1947	3,5	23,5	51,33	11,92	1,13
<i>rot_synth</i>	786	2893	19280	3,7	24,5	52,53	12,29	1,20

Применение данного метода синтеза приводит к тому, что число вентилях в СФК по сравнению с TMR возрастает на порядок – в среднем в 7,0 раз. При сравнении с исходной схемой увеличение структурной избыточности составило около 24,4 раза. Для представленных тестовых схем характеристика надежности схем контроля ниже в среднем в 68,8

раза по сравнению с ОС и в 10,7 раза - с методом резервирования. Из этого следует, что применение данного метода синтеза рационально только для кодирования ненадежных участков схемы, в которых высока вероятность возникновения сбоя, приводящего к ошибке на выходе.

Метод синтеза СФК на основе спектрального R-кода. Проведен сравнительный анализ по значению структурной избыточности S и характеристики надежности p СФК и схем TMR (Табл. 3 и 4).

Таблица 3. Результаты сравнительного анализа по структурной избыточности S СФК на основе спектрального R-кода и схем TMR для набора тестовых схем ISCAS'85 и LGSynth'89

Benchmark	Число логических элементов, n			Избыточность, S	
	ОС	СФК	TMR	СФК	TMR
<i>c432</i>	216	489	683	2,3	3,2
<i>c499</i>	246	896	898	3,6	3,7
<i>c1355</i>	590	1242	1930	2,1	3,3
<i>5xp1</i>	135	356	455	2,6	3,4
<i>pclе_synth</i>	83	247	294	3,0	3,5
<i>rot_synth</i>	786	3242	2893	4,1	3,7

Таблица 4. Результаты сравнительного анализа по характеристике надежности p СФК на основе спектрального R-кода и схем TMR для набора тестовых схем ISCAS'85 и LGSynth'89

Benchmark	Вероятность пропуска, p		
	ОС	TMR	СФК
<i>c432</i>	29,33	2,35	9,59
<i>c499</i>	40,12	10,63	13,14
<i>c1355</i>	34,15	4,96	8,52
<i>5xp1</i>	40,76	6,97	11,41
<i>pclе_synth</i>	58,24	11,92	14,85
<i>rot_synth</i>	52,53	12,29	12,11

По результатам было получено, что благодаря оптимизации подсхемы кодера, схема функционального контроля на основе спектрального R-кода для представленных схем в среднем была уменьшена на 12,6%. Кроме того, полученные СФК обладают меньшей структурной избыточностью, чем TMR, в среднем в 1,2 раза.

Как видно из результатов проведенного анализа (Табл. 4), вероятность пропуска ошибки у метода тройного модульного резервирования меньше, чем у схемы контроля, в среднем в 1,7 раза.

Метод синтеза СФК на основе низкоплотностного кода. Для оценки эффективности применения метода синтеза был проведен

сравнительный анализ по основным характеристикам СФК на основе низкоплотного кода и схемы TMR (Табл. 5 и 6).

Таблица 5. Результаты сравнительного анализа по структурной избыточности S СФК на основе низкоплотного кода и схем TMR для набора тестовых схем ISCAS'85 и LGSynth'89

Benchmark	Число логических элементов, n			Избыточность, S	
	ОС	TMR	СФК	TMR	СФК
<i>c432</i>	216	683	481	3,2	2,2
<i>c499</i>	246	898	716	3,7	2,9
<i>c1355</i>	590	1930	1404	3,3	2,4
<i>5xp1</i>	135	455	340	3,4	2,5
<i>pcl_synth</i>	83	294	229	3,5	2,8
<i>rot_synth</i>	786	2893	2321	3,7	3,0

Таблица 6. Результаты сравнительного анализа по характеристике надежности p СФК на основе низкоплотного кода и схем TMR для набора тестовых схем ISCAS'85 и LGSynth'89

Benchmark	Вероятность пропуска, p		
	ОС	TMR	СФК
<i>c432</i>	29,33	2,35	15,66
<i>c499</i>	40,12	10,63	22,68
<i>c1355</i>	34,15	4,96	18,88
<i>5xp1</i>	40,76	6,97	22,26
<i>pcl_synth</i>	58,24	11,92	30,64
<i>rot_synth</i>	52,53	12,29	27,78

По результатам было выявлено, что схема контроля обладает структурной избыточностью в среднем в 1,3 раза меньшей по сравнению с методом TMR. Так же стоит обратить внимание на то, что при среднем увеличении размера устройства в 3,5 раза при использовании метода тройного модульного резервирования, увеличение СФК составило 2,7 раза.

Из представленных результатов (Табл. 6) также видно, что СФК на основе низкоплотного кода обладает значением вероятности пропуска в среднем в 3,6 раза более высоким, чем у метода тройного модульного резервирования.

Алгоритм кластеризации. Для оценки эффективности применения алгоритма кластеризации был проведен ряд вычислительных экспериментов, при котором рассматривалось разбиение выходов основной схемы на 2 и 4 группы. Для тестовых схем была проведена кластеризация выходов, после чего для каждой из полученных групп была синтезирована СФК на основе LDPC кода.

Для результирующих схем контроля с применением алгоритма кластеризации и без было проведено имитационное моделирование по инъектированию однократных ошибок (Рис. 5). Полученные результаты показали, что применение кластеризации приводит к увеличению вероятности маскирования/исправления ошибки, а также к существенному снижению частоты возникновения двукратных ошибок.

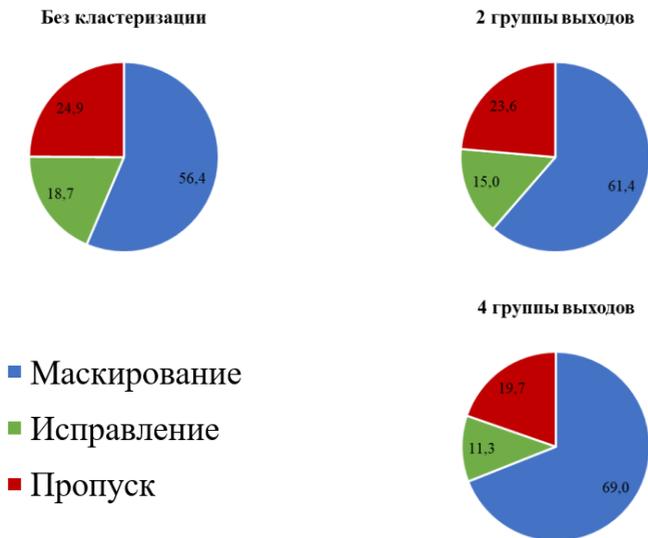


Рис. 5. Сравнение результатов инъектирования однократных ошибок в СФК на основе низкоплотного кода без и с применением алгоритма кластеризации

В целом применение алгоритма кластеризации с последующим синтезом схемы функционального контроля на основе LDPC кода обеспечивает в среднем исправление/обнаружение приблизительно:

- 75,1% реальных ошибок на выходе схем без кластеризации,
- 76,4% ошибок – при кластеризации на 2 кластера,
- 80,3% ошибок – при кластеризации на 4 кластера.

Подсистема автоматизированного проектирования СФК. Для экспериментальной проверки разработанных спецификаций оценочных функций характеристики надежности был проведен корреляционный анализ зависимости данных, рассчитанных с помощью аналитических формул, с полученными в результате моделирования. Анализ показал, что аналитические значения, хорошо коррелируют с практическими. Это

подтверждают вычисленные коэффициенты корреляции, которые составили:

- для СФК на основе кодирования в трехбитном пространстве Хэмминга - 0.99,
- для СФК на основе спектрального кода - 0.87,
- для СФК на основе низкоплотного кода - 0.84.

Кроме того, был проведен ряд численных экспериментов с целью определения эффективности методов синтеза схем контроля при разных значения коэффициента приоритета (Рис.6).

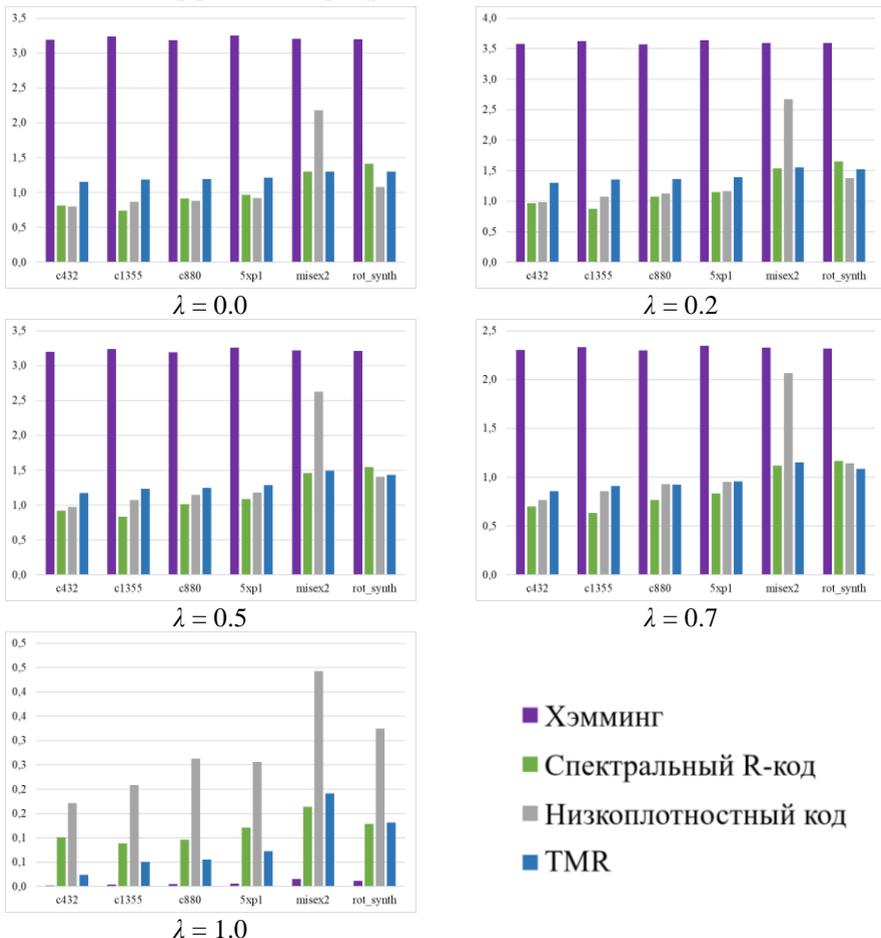


Рис. 6. Значения комплексного критерия $Z(\lambda)$ для тестовых схем из наборов ISCAS'85 и LGSynth'89 при разных значения коэффициента приоритета λ

В **Заключении** сформулированы основные научные и практические результаты выполненной диссертационной работы.

В **Приложении 1** представлено, не попавшее в Главу 2, описание разработанных сбоеустойчивых аналогов ЛЭ в базисе трехбитового пространства Хэмминга. Представлены структурные схемы, таблицы истинности и программный код функции, позволяющей сгенерировать данный сбоеустойчивый аналог.

В **Приложении 2** представлена методика пошагового преобразования комбинационного устройства в схему повышенной сбоеустойчивости за счет использования разработанной подсистемы автоматизированного проектирования.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработан метод синтеза схемы функционального контроля на основе кодирования в трехбитном пространстве Хэмминга, который позволил достичь понижения вероятности пропуска ошибки в 10,7 раза по сравнению с методом тройного модульного резервирования. Разработанный метод из-за привносимой существенной структурной избыточности примерно в 24,4 раза большей, чем у ОС, приобретает наибольшую эффективность при применении на части логического устройства неустойчивой к возникновению случайных сбоев.

2. Разработан метод синтеза схемы функционального контроля на основе спектрального R-кода, который позволил достичь повышения характеристик исправления/обнаружения благодаря защите специальными технологическими средствами части кодера, т.е. за счет введения защищенного конуса. Полученные СФК отличаются в 1,2 раза меньшей структурной избыточностью по сравнению с методом тройного модульного резервирования.

3. Разработан метод синтеза схем функционального контроля на основе низкоплотностного кода, который позволяет получить схемы, обладающие в 1,3 раза меньшей структурной избыточностью по сравнению с методом тройного модульного резервирования. Полученные СФК обладают в 3,6 раза большим значением характеристики надежности, чем у TMR.

4. Разработан алгоритм кластеризации, который позволил усилить корректирующие свойства СФК за счет снижения частоты возникновения в ней многократных ошибок.

5. Разработан комплексный критерий, который позволяет выбрать наилучший метод синтеза схемы контроля в зависимости от

приоритетной основной характеристики. За счет использования для его вычисления разработанных оценочных функций выбор для конкретной комбинационной схемы осуществляется без проведения предварительного моделирования.

б. Разработана подсистема автоматизированного проектирования схем функционального контроля на основе методов избыточного кодирования в программном виде с использованием языка Python и средств программного комплекса, разработанного в ИППМ РАН.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, включенных в международные базы цитирования Web of Science, Scopus.

1. Gavrilov S.V., Gurov S.I., Zhukova T.D., Rukhlov V.S., Ryzhova D.I., Tel'pukhov D.V. Methods to Increase Fault Tolerance of Combinational Integrated Microcircuits by Redundancy Coding // Computational Mathematics and Modeling. 2017. Vol. 28. № 3. Pp. 400-406. DOI: 10.1007/s10598-017-9372-3.
2. 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 // 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering. 2018. Pp. 1430-1433. DOI: 10.1109/EIConRus.2018.8317365.
3. Stempkovskii A.L., Tel'pukhov D.V., Zhukova T.D., Demeneva A.I., Nadolenko V.V., Gurov S.I. Synthesis of a Functional Control Circuit Based on the Spectral R-Code with the Partitioning of Outputs into Groups // Russian Microelectronics. 2019. Vol. 48. № 4. Pp. 240-249. DOI: 10.1134/S1063739719040097.

Публикации в изданиях, включенных в Перечень ВАК РФ.

4. Гаврилов С.В., Гуров С.И., Жукова Т.Д., Рыжова Д.И. Применение теории кодирования для повышения помехозащищенности комбинационных схем // Информационные технологии. – 2016. – Т. 22. – №12. – С. 931-937.
5. Гаврилов С.В., Жукова Т.Д., Рыжова Д.И. Методы оптимизации схем кодирования на основе диаграмм двоичных решений для синтеза отказоустойчивых микро- и нанoeлектронных схем // VII Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем –

- 2016»: сб. научн. тр. / под общей ред. А.Л. Стемпковского. – Ч. IV. – С. 158-165.
6. Стемпковский А.Л., Тельпухов Д.В., Гуров С.И., Жукова Т.Д., Соловьев Р.А. Методы синтеза сбоеустойчивых комбинационных КМОП схем, обеспечивающих автоматическое исправление ошибок // Известия ВУЗов. ЮФУ. – 2017. – №7(192). – С. 197-210. DOI: 10.23683/2311-3103-2017-7-197-210.
 7. Тельпухов Д.В., Деменева А.И., Жукова Т.Д., Хрущев Н.С. Исследование и разработка систем автоматизированного проектирования схем функционального контроля комбинационных логических устройств // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника. – 2018. – №1(169). – С. 15-22.
 8. Тельпухов Д.В., Деменева А.И., Жукова Т.Д., 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.
 9. Гаврилов С.В., Гуров С.И., Тельпухов Д.В., Жукова Т.Д. Использование информационной избыточности при построении сбоеустойчивых комбинационных схем // Таврический вестник информатики и математики. – 2018. – Т. 2. – № 39. – С. 29-44.
 10. Gavrillov S.V., Zhukova T.D., Ryzhova D.I. Optimization Methods of Coding Circuits Based on the Binary Decision Diagrams for Synthesis of Fault-Tolerant Micro- and Nanoelectronic Circuits // Problems of Advanced Micro- and Nanoelectronic Systems Development (MES). Proceedings of VII All-Russia Science & Technology Conference MES-2016. 2017. Part IV. Pp. 55-61.
 11. Стемпковский А.Л., Тельпухов Д.В., Деменева А.И., Жукова Т.Д. Маршрут проектирования схем функционального контроля комбинационных устройств // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2018. – № 65. – С. 92-98. DOI: 10.21667/1995-4565-2018-65-3-92-98.
 12. 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. DOI: 10.1134/S0544126919040094.
 13. Жукова Т.Д. Разработка системы автоматизированного проектирования СФК на основе методов избыточного

- кодирования // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). – 2020. – № 4. – С. 51-57. DOI: 10.31114/2078-7707-2020-4-51-57.
14. 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.
15. Стемпковский А.Л., Тельпухов Д.В., Гуров С.И., Щелоков А.Н., Новиков А.Д. Синтез СФК на основе LDPC кода с использованием мажоритарного декодирования // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2019. – № 4 (206). – С. 195-206. DOI: 10.23683/2311-3103-2019-4-195-206.
16. Telpuhov D.V., Demeneva A.I., Gurov S.I., Zhukova T.D. Automatic Synthesis of Fault-Tolerant CED Circuits Based on R-Code // VIII All-Russia Science & Technology Conference «Problems of Advanced Micro- and Nanoelectronic Systems Development -2019». 2018. Part III. Pp. 54-59. DOI: 10.31114/2078-7707-2019-3-54-59.

Прочие публикации.

17. Гаврилов С.В., Гуров С.И., Рухлов В.С., Рыжова Д.И., Жукова Т.Д., Тельпухов Д.В. Методы повышения сбоеустойчивости комбинационных ИМС на основе избыточного кодирования // Прикладная математика и информатика. – М.: Изд-во факультета ВМК МГУ, 2016. – № 53. – С. 96-105.
18. Жукова Т.Д., Иванова Г.А., Северцев В.Н., Щелоков А.Н. Методы оптимизации схем кодирования на основе диаграмм двоичных решений для синтеза помехозащищенных комбинационных схем // Труды Международного конгресса по интеллектуальным системам и информационным технологиям – 2016, “IS&IT’16”. – 2016. – Т. 1. – С. 76-81.
19. Гуров С.И., Жукова Т.Д., Тельпухов Д.В., Щелоков А.Н. Построение сбоеустойчивых комбинационных схем на основе битовых пространств Хемминга // Труды Международного конгресса по интеллектуальным системам и информационным технологиям – 2017, “IS&IT’17”. – 2017. – Т. 2. – С. 179-186.
20. 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.

21. 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 конгресса по интеллектуальным системам и информационным технологиям – 2019, “IS&IT’19”. - 2019. - Т. 1. - С. 94-101.