

**СОЗДАНИЕ СБОЕУСТОЙЧИВЫХ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ
К ВОЗДЕЙСТВИЮ ТЯЖЕЛЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ
КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА**

В.К. Зольников¹, И.И. Струков¹, К.А. Чубур¹, Ю.А. Чевычелов¹, А.И. Яньков²

¹ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический
университет имени Г.Ф. Морозова»

²АО «Научно-исследовательский институт электронной техники»

В данной статье рассматривается разработка эффективных методов и средств для оценки сбоеустойчивости логических схем, механизм логического маскирования, разработка маршрута ресинтеза комбинационных схем, методы повышения сбоеустойчивости. Предлагается метод итерационного изменения схемы, за счет увеличения уровня логического маскирования схемы.

Ключевые слова: тяжелые заряженные частицы, микроэлектроника, сбоеустойчивость логических схем, логическое маскирование, методы оценки сбоеустойчивости.

**DEVELOPMENT OF FAIL-SAFE CONTROL SYSTEMS AGAINST HEAVY
CHARGED PARTICLES OF OUTER SPACE**

V.K. Zolnikov¹, I.I. Strukov¹, K.A. Chubur¹, Yu.A. Chevychelov¹, A.I. Yankov²

¹Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov

²Scientific research institute electronic engineering

This article discusses the development of effective methods and tools for assessing the fault tolerance of logical circuits, the mechanism of logical masking, the development of the route of re-synthesis of combinational circuits, methods for increasing fault tolerance. A method of iterative circuit modification is proposed, due to an increase in the level of logical masking of the circuit.

Keywords: heavy charged particles, microelectronics, fault tolerance of logic circuits, logical masking, methods for assessing fault tolerance.

Задача создания сбоеустойчивых микроссхем сложная задача. Ей уделено внимание в работах [1-12].

Процесс проектирования ИС можно разделить на четыре основных этапа: проектирование элементов ИС, проектирование принципиальной электрической схемы, функционально-логическое проектирование и топологическое проектирование.

Системы проектирования ИС, реализованные в настоящее время, включают комплексы программ для ЭВМ, обеспечивающие замкнутый цикл проектирования.

На каждом из перечисленных этапов решаются свои задачи:

- на этапе проектирования элементов ИС решаются задачи расчета технологических параметров, их оптимизация, параметры выбранных моделей элементов ИС, которые неразрывно связаны с технологическим процессом создания элементов;

- на этапе проектирования принципиальной электрической схемы обеспечивается полный расчет всех основных электрических характеристик и проводится моделирование поведения ИС в различных режимах эксплуатации;

- на этапе функционально-логического проектирования осуществляется синтез ИС в некотором, заранее выбранном базисе (на уровне блоков).

- на этапе топологического проектирования осуществляется автоматизация размещения элементов с автоматической трассировкой межэлементных соединений по заданной электрической схеме с обеспечением минимального числа пересечений при минимальной длине межсоединений.

Заключительным этапом является верификация топологии, где проверяются технологические нормы, соответствие электрической схеме и т.п.

Для прогнозирования поведения ИС в условиях ИИ используется САПР в которых учтены радиационные эффекты. Учет радиационных эффектов осуществляется на каждом из этапов.

Однако известные промышленные САПР обладают рядом недостатков, которые или не позволяют получить поведение ИС в условиях ИИ, или прогнозируют ее не полностью [8-12].

Например, программные комплексы АРИПС-ПК, ДИСП, АСОНИКА, ПА-4,6 ПАУМ, МОДЕЛЬ, КАПР, МАРС, АПРОС, ПАЭС, САМРИС, АРНС, СПРОС, СПРАС и др не позволяют прогнозировать поведение ИС в условиях ИИ. А в таких программных комплексах как SL2000, ASCT, P-CAD, промыш-

ленная интегрированная система GDT-Disigner практически нет проблемно-ориентированных подсистем обеспечения радиационной стойкости [4, 5].

Кроме того, уточнение и конкретизация спектрально-энергетических и амплитудно-временных характеристик ИИ, которая произошла в последнее время, потребовала пересмотра некоторых физических аспектов протекания радиационных процессов в элементах ИС. Это, в свою очередь, поставило задачу создания проблемно-ориентированной подсистемы для учета радиационных эффектов, которая включала бы последние требования по характеристикам ИИ.

Особо требуется отметить отсутствие в существующих системах возможности моделирования поведения ИС от комплекса факторов как радиационных, которые могут состоять из нескольких видов ИИ, разнесенных во времени.

Все вышеперечисленное поставило задачу разработки проблемно ориентированной подсистемы прогнозирования поведения ИС в условиях ИИ, которая обеспечивает комплексный подход и учитывает уточненные требования в части характеристик воздействия ИИ. Эта подсистема должна прогнозировать показатели радиационной стойкости в различных режимах эксплуатации и проводить анализ работоспособности ИС.

Один из главных вопросов при прогнозировании поведения ИС в условиях ИИ – это методология прогнозирования показателей радиационной стойкости.

Эта методология заключается в следующем:

1. Единый физический механизм рассмотрения энерговыделения при воздействии на ИС радиации.

Все многообразие процессов, происходящих в КМОП ИС, зависит от различных характеристик ИИ. Однако, если эти процессы рассматривать в зависимости от механизма энерговыделения, который определяется параметрами источника излучения и свойствами материала, то можно получить физически связанный единый механизм. В качестве параметров ИИ необходимо выбрать поглощенную дозу и мощность поглощенной дозы. В зависимости от вида излучения они будут рассчитываться по определенным соотношениям, которые учитывают спектральный состав, временные характеристики и т.п. Это позволит все многообразие видов ИИ свести к ограниченному набору входных характеристик - доза и мощность дозы, соответствующие определенному виду излучения, спектрально-энергетические и амплитудно-временные характеристики.

2. Комплексный характер моделирования процессов деградации ИС под действием радиации.

Комплексный характер моделирования заключается в моделировании всех процессов, которые происходят в ИС при воздействии радиации, температуры окружающей среды и электрического режима работы, так все эти процессы взаимосвязаны.

Радиационное воздействие также может носить комплексный характер и состоять из нескольких видов воздействия, разнесенных во времени. Для оценки радиационного воздействия от комплекса видов ИИ предусмотрено определение функции дозы или мощности дозы, зависящей от времени и учитывающей все амплитудно-временные и спектрально-энергетические характеристики ИИ.

3. Выработка поэтапного подхода к проектированию радиационно-стойких ИС.

Принципы поэтапного подхода к проектированию ИС:

На первом этапе анализируются особенности изготовления и условия эксплуатации ИС. В результате чего ИС разбивается на библиотечные компоненты и обуславливаются связи между ними.

На втором этапе проводится оценка факторов внешней дестабилизирующей обстановки для каждого элемента ИС (при этом учитываются условия неоднородности полей ИИ) и строятся функции воздействующих факторов.

На третьем этапе определяется выбор разброса технологических параметров на основании статистических испытаний серии компонентов. Выбор параметров осуществляется для наилучшего, наихудшего и наиболее вероятного сочетания значений параметров элементов по критерию радиационной стойкости.

На четвертом этапе производится моделирование поведения ИС в условиях ИИ и определяются показатели радиационной стойкости. Полученные результаты являются прогнозируемыми значениями радиационной стойкости и могут быть использованы как окончательные результаты, либо как исходные данные для обоснования дальнейшего поиска других радиационно-стойких ИС или использования схмотехнических, конструктивных методов повышения радиационной стойкости устройств.

4. Создание нового конструктивно-технологического базиса для разработки радиационно-стойких КМОП ИС.

На основе анализа экспериментальных и расчетных данных по реакции ИС к ИИ были разработаны основные технологические, конструктивные и схе-

мотехнические методы для разработки радиационно-стойких ИС, которые вошли составной частью в отраслевой РМ по проектированию радиационно-стойких ИС.

Для создания радиационно-стойких КМОП ИС должны быть решены следующие задачи:

- формирование методологии системного подхода при прогнозировании работоспособности КМОП ИС в условиях ИИ;

- разработка модели деградации электропараметров ИС при воздействии статических видов ИИ с учетом мощности дозы, температуры среды и режима работы ИС;

- разработка моделей активных компонентов КМОП ИС, которые зависят от конструктивно-технологических особенностей исполнения, режимов работы ИС, спектрально-энергетических и амплитудно-временных характеристики импульсных гамма-, рентгеновского и нейтронного излучений с учетом уточненных требований к параметрам воздействующей радиации;

- разработка алгоритмов и программного обеспечения для моделирования реакции ИС на к ИИ;

- создание тестовых структур для определения всех необходимых электропараметров;

- разработка методики и программы испытаний;

- обработка экспериментальных данных и получение всех необходимых параметров моделирования;

- проектирование различных вариантов создания ИС в целом, расчет их стойкости и выбор оптимального варианта создания ИС;

- создание ИС в целом.

Первостепенной задачей, возникающей в рамках обозначенного направления, является разработка эффективных методов и средств для оценки сбоеустойчивости логических схем [2, 3].

Пусть Ω будет обозначать набор всех вентилях в схеме, p – вероятность сбоя вентиля, N – число входов схемы, M – число элементов в схеме, \bar{X} и \bar{e} – входной вектор и вектор ошибки соответственно. Тогда надежность логической схемы характеризуется выражением, представляющим собой вероятность возникновения наблюдаемой ошибки на выходе схемы:

$$F(p) = \frac{1}{2^N} \sum_{\bar{X}, \bar{e}} E(\bar{X}, \bar{e}) p^{|\bar{e}|} (1-p)^{M-|\bar{e}|}, \quad (1)$$

где $E(\bar{X}, \bar{e})$ - характеристическая функция, принимающая значение единицы если набор (\bar{X}, \bar{e}) приводит к ошибке, и ноль в остальных случаях.

Для оценки сбоеустойчивости логических схем предлагается использовать некоторый обобщенный коэффициент логической чувствительности схемы (2):

$$\alpha = \frac{1}{2^N} \sum_{\bar{X}, \bar{e}, |\bar{e}|=1} E(\bar{X}, \bar{e}), \quad (2)$$

где $|\bar{e}|=1$ говорит о том, что суммирование идет только по векторам ошибки с весом равным единице.

$$F(p)_{avr} = \sum_{i \in \Omega} o_i \cdot p(1-p)^{N-1} + \frac{1}{2} (1 - (1-p)^N - Np(1-p)^{N-1}) \quad (3)$$

Общая схему процесса ресинтеза представлена на рисунке 1.

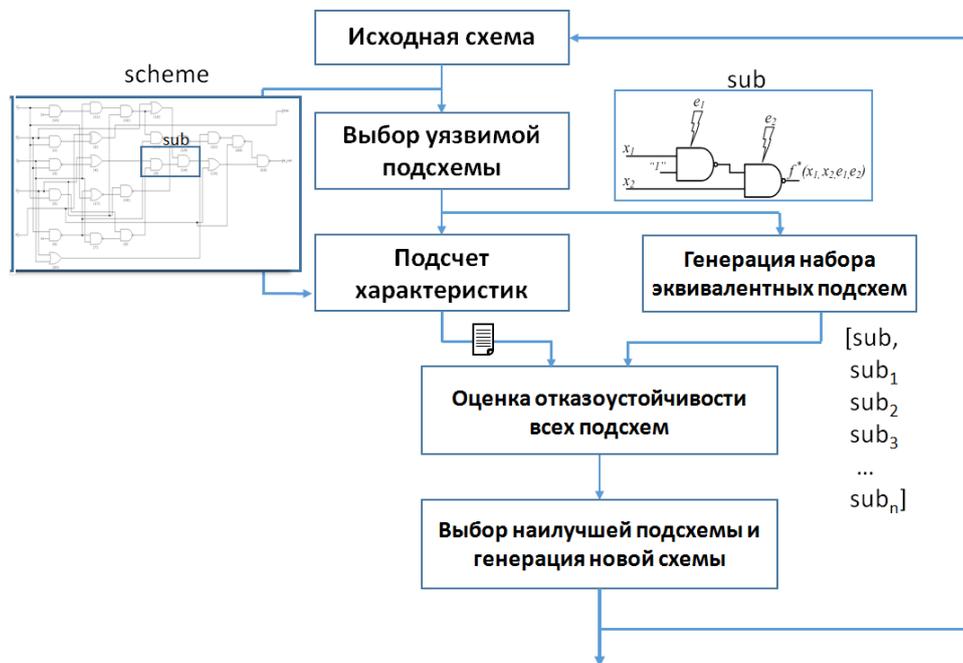


Рисунок 1 – Процесс ресинтеза участков логических схем

Как видно из рисунка 1, в контексте задачи ресинтеза можно выделить три больших подзадачи:

- 1) Выбор уязвимой подсхемы
- 2) Подсчет характеристик
- 3) Генерация набора эквивалентных подсхем

Применение комплексной системы повышения сбоеустойчивости с использованием методов повышения логической устойчивости схем, позволит расширить диапазон допустимых внешних воздействий и увеличить срок службы ответственной аппаратуры, включая и изделия космического назначения.

Результаты будут востребованы для решения широкого класса задач проектирования микроэлектронных устройств с различной степенью интеграции, начиная от библиотечных элементов и IP-блоков и заканчивая радиационно-стойкими устройствами и «системами на кристалле». Кроме того, продолжение исследований в данной области может привести к созданию отечественных специализированных САПР для решения новых актуальных задач в тесной интеграции с уже существующими средствами САПР компаний Synopsys, Cadence, Mentor Graphics и др. Эти результаты являются особенно актуальными в условиях повышенного запроса на импортозамещение в области микроэлектронной промышленности.

Список литературы

1. Ионизирующие излучения космического пространства и их воздействие на бортовую аппаратуру космических аппаратов / под науч. ред. д-ра техн. наук проф. Г.Г. Райкунова. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2013. – 256 с.
2. Thin-Film GaAs Epitaxial Lift-Off Solar Cells for Space Application / J.J. Schermer, P. Mulder, G.J. Bauhuis [et al.] // Progress in Photovoltaics: Research and Application. – 2005. – Vol. 13. – Pp. 587–596.
3. Разработка материалов и радиационно-стойкой ЭКБ на основе КНС/КНИ структур / И.И. Струков, С.В. Гречаный, А.С. Ягодкин, А.Н. Черников // Моделирование систем и процессов. – 2020. – Т. 13, № 2. – С. 72-76.
4. Особенности технологического процесса изготовления микросхем космического назначения по технологии КМОП КНС / В.К. Зольников, С.А. Евдокимова, И.В. Журавлева, Е.А. Маклакова, А.А. Илунина // Моделирование систем и процессов. – 2020. – Т. 13, № 3. – С. 53-58.
5. Разработка тестового кристалла при проектировании микросхем технологии КМОП / В.К. Зольников, О.В. Оксюта, К.А. Чубур, О.Н. Квасов // Моделирование систем и процессов. – 2020. – Т. 13, № 3. – С. 58-65.
6. Особенности проектирования базовых элементов микросхем космического назначения / В.К. Зольников, Т.В. Скворцова, И.И. Струков, А.А. Илунина, Е.А. Маклакова // Моделирование систем и процессов. – 2020. – Т. 13, № 3. – С. 66-70.
7. Координация проектных работ в области СнК и сложно-функциональных блоков / К.В. Зольников, В.И. Анциферова, С.А. Евдокимова, С.В. Гречаный // Моделирование систем и процессов. – 2020. – Т. 13, № 3. – С. 71-76.

8. Зольников, В.К. Обзор программ для САПР субмикронных СБИС и учет электрофизических эффектов глубоко субмикронного уровня / В.К. Зольников, А.Л. Савченко, А.Ю. Кулай // Моделирование систем и процессов. – 2019. – Т. 12, № 1. – С. 40-47.

9. Модификация метода поиска информации в сети интернет на основе использования методов индуктивного рассуждения / В.В. Лавлинский, А.Л. Савченко, И.А. Земцов, О.Г. Иванова // Моделирование систем и процессов. – 2019. – Т. 12, № 1. – С. 61-67.

10. Савченко, А.Л. Анализ существующих моделей и алгоритмов для проектирования сложных функциональных блоков, стойких к воздействию тяжелых заряженных частиц / А.Л. Савченко // Моделирование систем и процессов. – 2019. – Т. 12, № 1. – С. 79-86.

11. Защита микропроцессоров от одиночных сбоя / В.А. Смерек, В.М. Антимиров, А.Ю. Кулай, А.Л. Савченко // Моделирование систем и процессов. – 2018. – Т. 11, № 2. – С.71-77.

12. Уткин, Д.М. Оценка надежности программно-технических комплексов специального назначения / Д.М. Уткин, В.К. Зольников // Моделирование систем и процессов. – 2018. – Т. 11, № 2. – С.78-84.