

КРИНИЦКИЙ АЛЕКСАНДР ВАСИЛЬЕВИЧ

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ
СБОЕУСТОЙЧИВОСТИ АНАЛОГОВЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ
МИКРОСХЕМ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ОТДЕЛЬНЫХ ЯДЕРНЫХ ЧАСТИЦ**

05.13.05 - Элементы и устройства вычислительной техники
и систем управления

Автореферат диссертации

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Автор:



Москва – 2012 г.

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ» (НИЯУ МИФИ)

Научный руководитель Доктор технических наук, профессор
Чумаков Александр Иннокентьевич

Официальные оппоненты: Доктор технических наук, профессор
Синкевич Владимир Федорович
Кандидат технических наук
Безбородов Валерий Никифорович

Ведущая организация: ОАО «Корпорация космических систем
специального назначения «Комета»

Защита состоится «17» декабря 2012 г. в 16 час. 00 мин.

На заседании диссертационного совета Д212.130.02

в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ»

по адресу: 115409 Москва, Каширское шоссе, 31, тел. 324-84-98, 323-91-76

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МИФИ

Автореферат разослан «__» ноября 2012 г.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в одном экземпляре, заверенный печатью организации.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук,
профессор



П.К. Скоробогатов

Общая характеристика работы

Диссертация направлена на решение важной научно-технической задачи по определению методов моделирования, оценки и прогнозирования стойкости аналоговых интегральных микросхем (ИС) к сбоям, связанных с возникновением кратковременных импульсов, вызываемых воздействием отдельных ядерных частиц (ОЯЧ) искусственного и естественного происхождения, что имеет существенное значение для построения высоконадежных элементов и устройств вычислительной техники и систем управления для космических аппаратов (КА) военного, двойного и народнохозяйственного назначения, улучшения их функциональных и эксплуатационных характеристик, а также эффективности их применения в специальных условиях.

Актуальность темы диссертации обусловлена, с одной стороны, необходимостью создания высоконадежной и сбое- и отказоустойчивой бортовой аппаратуры (БА) КА с длительными 7-10 лет (в перспективе 10-15 лет и более) сроками активного функционирования в автономном режиме, а, с другой стороны, широким применением в БА КА высокоинтегрированных изделий микроэлектроники, в том числе аналоговых, обладающих повышенной чувствительностью к воздействию ОЯЧ, и, как следствие, необходимостью обеспечения к воздействию ОЯЧ стойкости элементов и устройств вычислительной техники и систем управления, использующих такие изделия.

Известно, что технические и эксплуатационные характеристики БА КА, включая стойкость к воздействию ОЯЧ космического пространства (КП), во многом определяются характеристиками входящих в ее состав ИС. Анализ номенклатуры изделий электронной техники, применяемых в БА современных КА, показывает, что более 50% из них составляют ИС различной степени интеграции. При этом из-за отставания развития российской микроэлектронной промышленности отечественные ИС не позволяют в полной мере реализовать требования технических заданий на разработку БА КА. Это вынуждает разработчиков применять ИС иностранного производства (ИП), и, прежде всего, функционально сложные схемы, доля которых сейчас составляет порядка 60%.

Поэтому в настоящее время при разработке БА КА все больше внимания уделяется ее стойкости к воздействию ОЯЧ искусственного и естественного происхождения (высокоэнергетичные протоны (ВЭП) и тяжелые заряженные частицы (ТЗЧ) КП, естественная альфа-активность материалов и т.п.), т.к. во многих случаях вызываемые ими сбои и отказы БА КА обусловлены локальными радиационными эффектами, возникающими в результате попадания ОЯЧ в чувствительные элементы ИС. Например, в 2008 г. был потерян космический аппарат 14Ф137 военного назначения.

По результатам анализа данных телеметрического контроля комиссия по определению причин отказа космического аппарата 14Ф137 сделала вывод, что отказ был вызван выходом из строя (катастрофическим отказом) схемы памяти в бортовом вычислительном комплексе из-за воздействия ОЯЧ.

Из совокупности возможных локальных радиационных эффектов, наблюдаемых в ИС при воздействии ОЯЧ, но не в полной мере изученным, является эффект, связанный с появлением кратковременных импульсов («иголок») ионизационной реакции (ИР) на выходах аналоговых ИС таких как операционные усилители, аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи (АЦП, ЦАП) и т.п. Эти импульсы могут возникать в результате ИР отдельных полупроводниковых структур ИС при генерации в их чувствительных объемах локального заряда, обусловленного ионизацией при взаимодействии ОЯЧ с веществом. При этом по имеющимся экспериментальным данным в цифро-аналоговых преобразователях и других аналоговых ИС амплитуда таких импульсов может составлять единицы вольт, вследствие чего могут иметь место нарушения функционирования БА КА.

Предъявляемые к БА КА требования по сбое- и отказоустойчивости обуславливают необходимость оценки стойкости ИС, в том числе и аналоговых, к одиночным эффектам, вызываемыми ОЯЧ. Однако, до настоящего времени номенклатура ИС как отечественного, так и иностранного производства, применяемых в БА КА, в основном либо не квалифицирована на стойкость к ОЯЧ, либо требования стойкости ИС к воздействию ОЯЧ документацией на поставку не регламентируются. При этом методы оценки и прогнозирования стойкости аналоговых ИС к сбоям, проявляющимся в возникновении кратковременных импульсов («иголок»), вызываемых ОЯЧ на выходах ИС, практически отсутствуют. Поэтому в качестве **предмета исследования** выбраны аналоговые ИС, применяемые в БА КА. **Объектом исследования** являются методы и методики оценки и прогнозирования стойкости аналоговых ИС к сбоям, связанным с возникновением кратковременных импульсов («иголок»), вызываемых ОЯЧ искусственного и естественного происхождений.

Состояние исследований по проблеме. Эффекты воздействия ОЯЧ в КМОП ИС подробно описаны в работах Тверского М.Г., Кузнецова Н.В., Чумакова А.И., Яненко А.В., в работах зарубежных авторов, таких как Messenger G.C., Dressendorfer P.V., Petersen E.L., Turflinger T.L., Savage M.W., публикуемых Национальным управлением США по аэронавтике и исследованию космического пространства (NASA) и Европейским космическим агентством (ESA). Методы численного моделирования дозовых и локальных радиационных эффектов в КМОП и КНИ КМОП структурах развиты в работах Петросянца К.О., Харитоновой И.А.,

Сыцько Ю.И. Результаты экспериментальных исследований представлены в работах Анашина В.С., Васильева А.Л., Емельянова В.В., Калашникова О.А., Митина Е.В. и других авторов.

Практически во всех этих работах авторы исследовали либо эффекты одиночных сбоев, либо отказы, обусловленные как тиристорными эффектами, так и эффектами пробоя подзатворного окисла, вторичного пробоя и т.п. Расчетно-экспериментальная оценка показателей стойкости определяется на основе параметров чувствительности, к которым относятся пороговая энергия (пороговые значения линейных потерь энергии (ЛПЭ)) и сечение насыщения. Такие испытания могут проводиться как на моделирующих, так и на имитирующих установках.

В настоящее время, как в отечественной, так и зарубежной практике существуют методы (методики) испытаний и оценки стойкости больших и сверхбольших интегральных схем к одиночным сбоям от воздействия ОЯЧ космического пространства, основные из которых приведены в РД В 319.03.24, JESD89-2, MIL-STD-883F и ряд других. Основной целью данных методов (методик) является определение частоты одиночных сбоев в ИС, вызванных воздействием на них ОЯЧ. Однако, эти методы (методики) не позволяют оценить стойкость ИС к сбоям, связанным с возникновением кратковременных импульсов, вызванных воздействием ОЯЧ.

Таким образом, к началу диссертационной работы методы и методики, а также технические средства для оценки и прогнозирования стойкости ИС к сбоям, связанным с возникновением кратковременных импульсов, вызываемых ОЯЧ, отсутствовали или были проработаны не достаточно. Имеющиеся на момент начала работы исследования этих эффектов носили разрозненный характер и не позволяли проводить практические оценки стойкости к ним ИС.

Цель и задачи диссертации

Целью диссертации является развитие и совершенствование методов и технических средств оценки и прогнозирования стойкости аналоговых ИС к сбоям, проявляющимся в возникновении на их выходах кратковременных импульсов, вызываемых ОЯЧ КП.

Указанная цель достигается решением в работе следующих задач:

- анализа существующих методических и технических средств исследований кратковременных импульсов ИР в аналоговых ИС;
- разработки методов расчетного моделирования кратковременных импульсов, вызываемых воздействием ОЯЧ, в структурах и элементах ИС;

- разработки методов экспериментальных исследований по определению стойкости аналоговых ИС к сбоям, связанных с возникновением кратковременных импульсов от ОЯЧ;

- разработки расчетно-экспериментальных методик оценки и прогнозирования стойкости аналоговых ИС к сбоям, связанных с возникновением кратковременных импульсов;

- разработки предложений по составу характеристик требований стойкости аналоговых ИС к сбоям, связанным с возникновением кратковременных импульсов («иголок») на их выходах при воздействии ОЯЧ;

- получения и систематизации экспериментальных данных.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- разработаны физико-топологические модели (р-п перехода и биполярного транзисторов для цифровых и аналоговых ИС) формирования кратковременных импульсов напряжения при локальном энерговыделении в чувствительном микрообъеме элементов ИС и проведено моделирование реакции отдельных элементов (р-п переходов, транзисторов) при попадании в их активные области ОЯЧ с использованием программы численного моделирования DIODE-2С;

- разработана модель схемотехнического расчетного моделирования кратковременных импульсов напряжения в аналоговых ИС, позволяющая оценить их амплитудно-временные характеристики и проведено моделирование реакции аналоговой ИС при попадании в ее активные области ОЯЧ с использованием программы численного моделирования Cadance;

- разработаны расчетно-экспериментальные методы и методики оценки и прогнозирования стойкости ИС к сбоям, связанным с возникновением кратковременных импульсов с использованием ускорителей протонов и ионов, а также лазерных имитаторов;

- обоснованы состав и оптимальные характеристики технических средств экспериментального исследования кратковременных импульсов напряжения, вызываемых в ИС воздействием ОЯЧ;

- разработаны предложения по составу характеристик требований стойкости аналоговых ИС с учетом возможности возникновения кратковременных импульсов ИР при воздействии на них ОЯЧ и критериев для определения параметров чувствительности их к эффектам «иголок».

Практическая значимость работы:

1. Разработаны методики экспериментальной оценки параметров чувствительности аналоговых ИС к сбоям, связанным с возникновением кратковременных импульсов при воздействии ОЯЧ, на ускорителях ионов и протонов и лазерном имитаторе.

2. Получены оригинальные результаты экспериментальных исследований характеристик «иголок» в ИС различного функционального назначения, используемых в БА КА.

3. Разработаны предложения по составу характеристик требований стойкости аналоговых ИС к сбоям, связанным с возникновением кратковременных импульсов («иголок») на их выходах при воздействии ОЯЧ.

Полученные в диссертации результаты использованы в ОСТ 11 073.013-2008 «Микросхемы интегральные. Методы испытаний» (часть 10), в проекте нормативного документа по стандартизации РКТ «Аппаратура радиоэлектронная бортовая космических аппаратов. Методы испытаний аналоговых и аналого-цифровых интегральных микросхем к воздействию одиночных высокоэнергетических протонов и тяжелых заряженных частиц космического пространства на ускорителях заряженных частиц» и в основу организационно-методического аппарата проведения испытаний электронной компонентной базы (ЭКБ) отечественного и иностранного производства по определению стойкости бортовой аппаратуры изделий разработки ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс», ФГУП «ЦНИИ «Комета», ОАО РКК «Энергия им. С.П.Королева» к воздействию тяжелых заряженных частиц и высокоэнергетичных протонов космического пространства.

Результаты диссертации вошли в отчетные материалы по НИР и составным частям ОКР «Облепиха-2», «Кругозор-2007», «Кругозор-2008» и др., выполняемых в интересах Минобороны России, Роскосмоса и предприятий оборонного комплекса.

Результаты, выносимые на защиту:

- физико-топологические модели и результаты моделирования формирования кратковременных импульсов напряжения в полупроводниковых структурах (р-п переходе и биполярных транзисторах ИС) при локальном энерговыделении в чувствительном микрообъеме элемента ИС, позволяющие учесть реальные амплитудно-временные характеристики происходящих процессов;

- модель и результаты схемотехнического расчетного моделирования кратковременных импульсов напряжения в аналоговых ИС, вызываемых воздействием ОЯЧ, на основе которых возможно проводить прогнозные оценки характеристик кратковременных импульсов выходного напряжения аналоговых ИС;

- расчетно-экспериментальные методы и методики оценки и прогнозирования стойкости ИС к сбоям, связанных с возникновением кратковременных импульсов, с использованием ускорителей протонов и ионов, а также лазерных имитаторов, позволяющие прогнозировать сбоеустойчивость электронной аппаратуры космических аппаратов;

- требования к составу и характеристикам технических средств экспериментальных исследования кратковременных импульсов напряжения, вызываемых в ИС воздействием ОЯЧ, при проведении испытаний на ускорителях ионов и протонов и лазерных установках;

- состав характеристик требований стойкости и критериев для определения параметров чувствительности аналоговых ИС к эффектам «иголок» при воздействии на них ОЯЧ;

- оригинальные экспериментальные данные, ИР аналоговых ИС при воздействии на них ОЯЧ.

Апробация работы

Основные результаты диссертации докладывались на российских научных конференциях «Радиационная стойкость электронных систем» (Лыткарино, 2005-2010 гг.); на научных конференциях «Электроника, микро- и наноэлектроника» (2005 г.); на научно-техническом семинаре «Пути решения задач обеспечения современной радиоэлектронной аппаратуры надежной электронной компонентной базой» (2008 г.); на Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем» (2008 г.); на межотраслевой конференции по радиационной стойкости (2010 г.); на конференциях молодых ученых и специалистов ФГУ «22 ЦНИИИ Минобороны России» (2010 и 2011 гг.); на конференции по электронной компонентной базе в Институте инженерной физики (2012 г.).

Публикации: Основные результаты диссертации опубликованы в 17 работах (в период с 2005 по 2012 гг.), в том числе 5 – в реферируемых изданиях, рекомендованных ВАК и 3 – без соавторов.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы; содержит 126 страниц, в том числе 66 рисунков, 8 таблиц, список литературы из 102 наименований.

Содержание диссертации

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель и задачи исследований, научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе проведен обзор научных работ, посвященных определению основных внешних воздействующих факторов КП, влияющих на БА КА, рассмотрению основных локальных радиационных эффектов в ИС и особенностей возникновения в ИС кратковременных импульсов, вызываемых ОЯЧ. Проведен анализ номенклатуры ЭКБ, применяемой в БА КА.

Вторая глава содержит результаты исследований по разработке модели формирования кратковременных импульсов напряжения в полупроводниковых структурах при локальном энерговыделении в чувствительных микрообъемах элементов ИС и результаты расчетного моделирования возникновения в аналоговых ИС кратковременных импульсов, вызванных ОЯЧ, на уровне полупроводниковой структуры, простейших каскадов и на уровне современных ИС. Проведенные расчеты подтвердили существование двух основных компонент ионизационного тока – дрейфового и диффузионного. Анализ результатов расчетного моделирования позволил выявить ряд основных закономерностей и механизмов формирования ИР для ИС.

Третья глава посвящена обоснованию основных требований к техническим средствам проведения исследований по оценке стойкости ИС к сбоям, связанных с возникновением кратковременных импульсов, вызываемых ОЯЧ. Обосновываются состав аппаратно-программных средств, позволяющий при проведении испытаний обеспечивать задание режимов функционирования ИС, контроль параметров ИС в процессе испытаний (с их регистрацией), дозиметрическое сопровождение испытаний и т.д. Приведены результаты экспериментальных исследований ИС на стойкость к воздействию ионов, высокоэнергетических протонов и нейтронов, а также результаты полученные с использованием лазерных имитаторов, показавших сходимость полученных результатов с результатами расчетного моделирования.

В четвертой главе представлен анализ существующих методов оценки стойкости ИС при воздействии ОЯЧ, а также задания требований по их стойкости. Рассмотрены общие методические подходы экспериментальных исследований, учитывающих особенности формирования ИР в аналоговых ИС для оценки уровней их стойкости по эффектам «иголок» и предложены расчетно-экспериментальные методы и методики оценки и прогнозирования стойкости аналоговых ИС к эффектам «иголок».

Анализ основных радиационных факторов влияющих на БА КА и определение основных локальных радиационных эффектов в ИС при воздействии на них ОЯЧ

Радиационные эффекты от ОЯЧ (локальные радиационные эффекты) возникают в ИС вследствие больших локальных потерь энергии первичных или вторичных ОЯЧ в чувствительных объемах элементов ИС в процессах ионизации или структурных повреждениях. Подобные эффекты могут приводить к сбоям или отказам БА КА в условиях воздействия ОЯЧ естественного и искусственного происхождения высоких энергий и, в первую очередь, от высокоэнергетических частиц КП. Анализ существующих механизмов возникновения локальных радиационных эффектов показывает, что они

имеют место, если, локальное энерговыделение в чувствительном микрообъеме размерами в несколько мкм превышает величины более 0.1...1 МэВ. Исходя из ядерно-физического анализа к таким частицам могут быть отнесены:

- ионы со значениями линейных потерь энергии более 0.1 МэВ·см²/мг;
- протоны с энергиями выше 15 МэВ;
- нейтроны с энергиями более 1 МэВ;
- альфа-частицы с энергиями более 100 МэВ;
- электроны и гамма-кванты с энергиями более 30 МэВ.

Последний случай редко реализуется на практике, поэтому его можно исключить из анализа. Анализ существующих источников ионизирующих излучений показывает на наличие подобных ядерных частиц в КП, в атмосфере и при ядерных реакциях деления и синтеза.

Развитие современных электронных систем КА ставит задачу использования стойкой номенклатуры электронных компонентов. В БА современных КА все большее применение находят ИС большой степени интеграции. Доля применяемых типов (типоминалов) ИС в БА КА по отношению к другим классам электронной компонентной базы (ЭКБ) составляет порядка 47,2% для изделий отечественного производства и производства государств-участников СНГ и стран Балтии (из них порядка 18% составляют аналоговые ИС) и 54,1% – для изделий иностранного производства (из них порядка 15% – аналоговые ИС). Однако, анализ, применяемой в БА КА номенклатуры ИС, показывает, что в настоящее время она не квалифицирована на соответствие требованиям эксплуатационной модели применения в части стойкости к ОЯЧ. Это касается, как ИС отечественного производства, так и ИС иностранного производства «индустриального» или «коммерческого» вида исполнения. Закупка ИС иностранного производства повышенного уровня качества практически невозможна, т.к. поставка таких изделий ограничена контрольными списками стран-экспортеров. При этом задача создания стойкой БА усложняется практически полным отсутствием информации о стойкости ИС иностранного производства к радиационным факторам.

В современных ИС высокой степени интеграции экспериментально наблюдаются сбои и отказы, происходящие под действием высокоэнергетичных ОЯЧ. При выделении одной частицей значительной энергии в активном микрообъеме элемента ИС могут проявляться следующие основные эффекты:

- ложные срабатывания (одиночные сбои – ОС) триггеров, регистров и ячеек памяти;

- многократные сбои из-за образования ОС в нескольких соседних ячейках памяти;
- кратковременные импульсные сигналы («иголки») на выходах аналоговых и цифровых ИС;
- тиристорный эффект (ТЭ) в четырехслойной паразитной структуре («защелкивание»), в основном, в КМОП ИС;
- вторичный пробой p-n переходов, в особенности для приборов, работающих в предпробойной области;
- долговременные проводящие каналы за счет тепловых эффектов в изолирующих структурах («проколы»), в частности, локальное разрушение области в подзатворном диэлектрике;
- шунтирование многослойных структур (проводящий канал эмиттер-коллектор в биполярных структурах) и ряд других.

Чувствительность ИС к локальным радиационным эффектам характеризуется следующими основными параметрами:

- сечением эффекта σ (см²) – отношение общего количество проявлений эффекта (одиночных сбоев, защелкиваний и т.п.) в ИС к потоку ядерных частиц:

$$\sigma = N/\Phi, \quad (1)$$

где N – общее количество наблюдаемых эффектов, Φ – суммарный поток ядерных частиц;

- пороговой линейной потерей энергии (ЛПЭ) ионов LET_0 (МэВ·см²/мг) или пороговой энергии протонов E_{PO} (МэВ), начиная с которых наблюдается появление локальных радиационных эффектов.

Из совокупности возможных локальных радиационных эффектов часто наблюдаемым и не в полной мере изученным является эффект, связанный с появлением кратковременных импульсов напряжения – ионизационной реакции (ИР) на выходах ИС.

Расчетное моделирование кратковременных импульсов в элементах и узлах ИС

Разработка моделей формирования кратковременной ИР на выходах аналоговых и цифровых ИС возможно при четком понимании причин возникновения паразитных

сигналов и факторов влияющих на ее амплитудно-временные характеристики. В общем случае задача разбивается на два этапа:

- определение характеристик реакции отдельных элементов (p-n переходов, транзисторов и т.п.) при попадании в их активные области отдельных ядерных частиц;

- моделирование ИР на выходе ИС.

Первый этап может быть реализован различными программами численного моделирования типа PICSES, TCAD, DIODE-2C и им подобными, направленными на решение задач физико-топологического моделирования ИС.

Второй этап реализуется путем использования программ P-Spice/Cadance, позволяющих моделировать и тестировать схемотехнические разработки, содержащие как аналоговые, так и цифровые компоненты, не прибегая к изготовлению реальных схем, а также определять реакцию ИС на входные воздействия, ее поведение на различных частотах, шумовые и другие характеристики ИС.

Кратковременные импульсы возникают в результате ИР полупроводниковой структуры, при генерации в ее чувствительном объеме локального ионизационного заряда при взаимодействии ОЯЧ с веществом. За счет собирания p-n переходом избыточного заряда на выводах элемента возникает ионизационный ток, приводящий к ионизационной реакции элемента ИС.

Особенности формирования ИР отдельными полупроводниковыми структурами исследовались в системе двумерного численного моделирования в цилиндрической системе координат «DIODE-2C». Результаты, полученные автором при моделировании кратковременной ИР для отдельного p-n перехода подтвердили существование двух основных компонент ионизационного тока – дрейфовой и диффузионной. При этом дрейфовая компонента существует в очень короткий промежуток времени за времена менее 1 нс (рисунок 1).

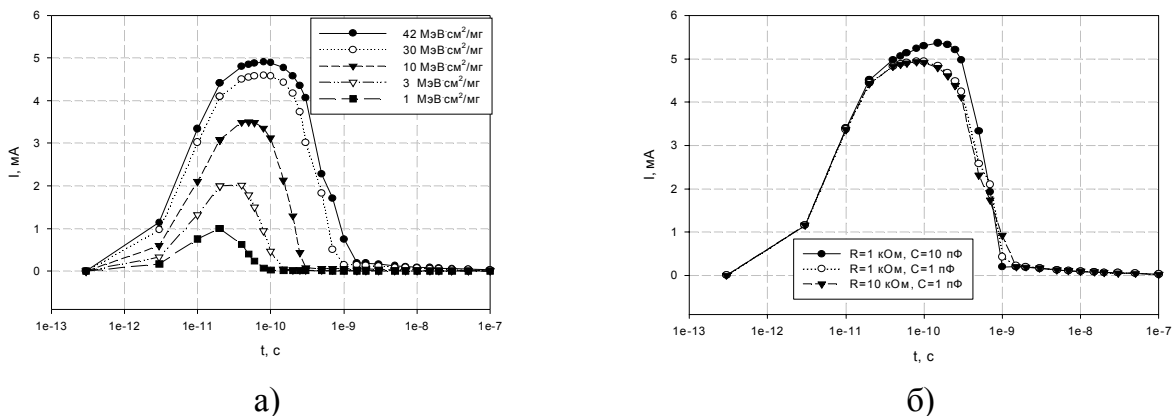


Рисунок 1 – Ионизационный ток при попадании ядерной частицы в центр p-n перехода от времени при различных значениях ЛПЭ (а) и при различных значениях внешней нагрузки (R и C) и ЛПЭ равном 42 МэВ·см²/мг (б)

При этом длительность дрейфовой компоненты в сильной степени зависит от ЛПЭ ядерной частицы (рисунок 1а). По мере ее увеличения длительность импульса тока возрастает, и она практически не зависит от условий нагружения p-n перехода

(рисунок 1б). С целью определения выходной ИР анализируемой структуры проведены расчеты при разных режимах нагружения вследствие попадания ОЯЧ с разными значениями ЛПЭ (рисунок 2).

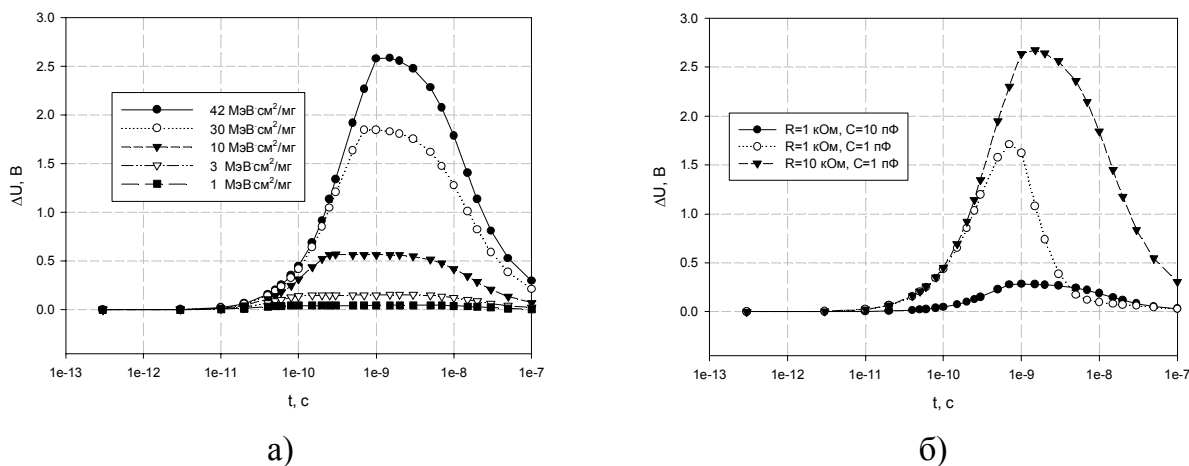


Рисунок 2 – Ионизационная реакция при попадании ядерной частицы в центр в центр р-п перехода от времени при различных значениях ЛПЭ (а) и при различных значениях внешней нагрузки (R и C) и ЛПЭ равном 42 МэВ·см²/мг (б)

Результаты, представленные на рисунке 2а показали, что при средних уровнях значений ЛПЭ происходит опережающий рост амплитуды ИР по мере роста ЛПЭ. Данное обстоятельство, обусловлено двумя основными причинами. Во-первых, по мере роста ЛПЭ происходит увеличение эффективной длины проникновения электрического поля в трек ядерной частицы. Во-вторых, при увеличении концентрации носителей заряда происходит увеличение времени существования трека ядерной частицы.

Однако при дальнейшем росте ЛПЭ возникают ограничения в амплитуде ИР. Они также обусловлены двумя основными причинами. Во-первых, начинают оказывать влияние конечные размеры трека (при расчетах он был равен 40 мкм), поэтому из-за ограниченности общего суммарного генерированного заряда происходит ограничение амплитуды ИР. Во-вторых, все большая доля напряжения падает в объеме базы по мере увеличения ионизационного тока. Это приводит к уменьшению напряжения приложенного к треку ядерной частицы.

На характеристики ИР оказывают влияние внешние и внутренние инерционности, которые в работе учитывались подключением выходов р-п перехода внешних R и C элементов. Из представленных результатов (рисунок 2б) следует, что уменьшение емкости на порядок не приводит к увеличению амплитуды ИР на порядок при той же величине постоянной времени. В случае больших постоянных времени изме-

нения ИР могут быть определены численными методами и с помощью зарядовой модели. Результаты численного моделирования дают практически идентичные результаты до времени чуть менее RC . Оценки показывают, что с приемлемой для практики точностью в качестве критериального значения можно брать значение:

$$t \approx 0.7RC \quad (2)$$

Моделирование ИР для активных структур ИС проводилось для типовых активных структур (биполярных транзисторов). В результате проведенных расчетов было выявлено, что ИР биполярного транзистора может составлять несколько вольт (рисунок 3). Такие большие перепады длительностью до 10 нс могут приводить к сбоям в работе БА БА. Принимая во внимание, что внутренние емкости ИС могут на порядок и больше быть меньше 1 пФ, получим, что «иголки» могут возникать в ИС даже при воздействии ОЯЧ с ЛПЭ около 1 МэВ·см²/мг.

Полученные автором характерные амплитудно-временные характеристики импульсов тока могут в дальнейшем использоваться при схемотехническом моделировании ИР ИС. Параметры выходных импульсов характеризуются значениями амплитуды и длительности, которые определяются как процессами собирания носителей заряда с трека ядерной частицы, так и переключательной характеристикой ИС. В первом приближении, ИР $\Delta U(t)$ отдельного элемента зависит от величины собранного заряда ΔQ , внутренней емкости элемента C и времени τ_3 , характеризующим быстрдействие отдельного элемента.

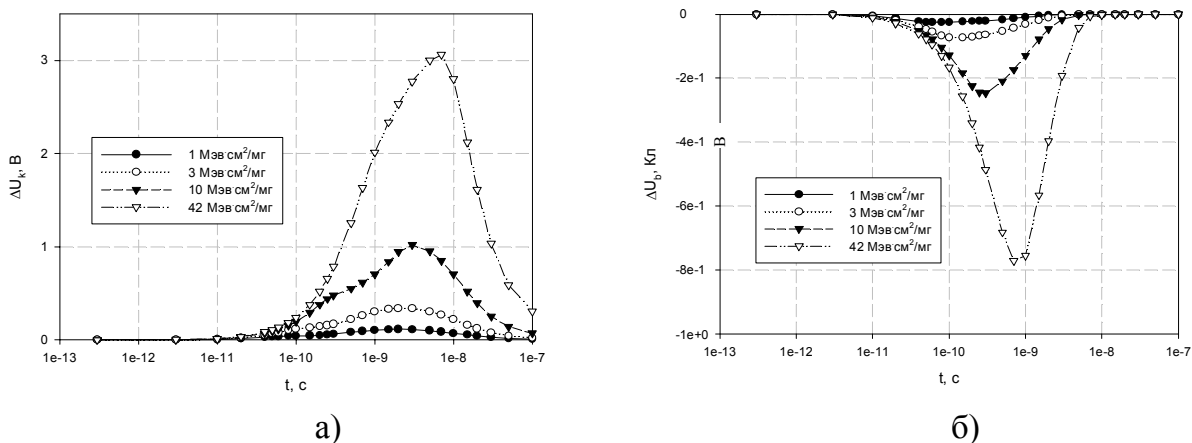


Рисунок 3 – Изменение напряжения коллектора (а) и базы (б) в моделируемой биполярной структуре при различных значениях ЛПЭ

В общем случае существует корреляция между величинами ΔQ и τ_3 . Если элемент ИС относительно быстродействующий, то величина собранного заряда определяется только дрейфовыми процессами. Подобная ситуация имеет место для большинства цифровых ИС за исключением динамических элементов или элементов, на-

ходящихся в третьем состоянии. Для относительно инерционных элементов (большинство элементов аналоговых ИС) имеет место практически полное собирание заряда с трека ядерной частицы за счет диффузионно-дрейфовых процессов.

Таким образом, для большинства элементов цифровых ИС выходная ИР при воздействии ОЯЧ, в первом приближении, может быть записана в виде:

$$\Delta U(t) \approx k_L \cdot q \cdot LET L_e / C \exp(-t/t_{3d_p}), \quad (3)$$

где LET - ЛПЭ ОЯЧ; q - заряд электрона; L_e - эффективная длина собирания заряда с трека ядерной частицы; k_L - коэффициент пропорциональности ($k_L=6.4 \cdot 10^8$ мг/(МэВ·см²) для кремния); t_{3d_p} - среднее время задержки распространения сигнала.

Эффективная длина собирания заряда с трека ядерной частицы в общем случае зависит от технологических параметров, режима работы и параметров налетающей частицы. В первом приближении, можно воспользоваться следующей оценкой:

$$L_e \approx \min(W/\cos \theta, R_o, L_f), \quad (4)$$

где W – толщина активного слоя элемента ИС (для эпитаксиальных или КНИ ИС); θ - угол падения ядерной частицы; R_o - пробег ядерной частицы; L_f - эффективная длина собирания заряда с трека ядерной частицы. Для дрейфовых процессов, типовое значение L_f равно около 5 мкм.

Аналогичные оценки могут быть проведены и для аналоговых ИС. При этом надо иметь в виду, что величина собранного заряда за счет процессов диффузии оказывается пропорциональной линейным размерам элемента. Поэтому при размерах элементов меньших L_e заметная разница в величинах собранного заряда для аналоговых и цифровых объемных ИС отсутствует. Различия будут иметь место только для тонкопленочных ИС при размерах элементов в 2...5 раз, превышающих толщину активных слоев элементов ИС. Таким образом, анализ показывает, что при нормах проектирования меньших 0.3 мкм следует ожидать заметного увеличения чувствительности ИС к эффектам от ОЯЧ.

Полученные результаты численного моделирования отдельных структур легли в основу расчетного моделирования кратковременной ИР в ИС. Как показывает анализ, формирование ИР при воздействии ОЯЧ происходит случайным образом (в пространстве и во времени), поэтому в системах схемотехнического моделирования достаточно подключать генераторы ионизационного тока в различные узлы ИС с целью выявления возможности появления «иголок» на выходах ИС. При этом типовые ха-

рактические характеристики генераторов токов определяются результатами, полученными в ходе моделирования отдельных полупроводниковых структур.

В качестве типовой структуры для моделирования был выбран малошумящий операционный усилитель (ОУ) 1484УД1У, разработанный ЗАО ПКК «Миландр» и часто применяемый в РЭА изделий РКТ в высокоскоростных усилительных и фильтрующих каскадах радиочастотного диапазона, аппаратных средствах аналоговой обработки сигналов.

Моделирование ИР в ИС 1484УД1У проводилось с помощью программы Cadance (симулятора типа Virtuoso: simulator: Spectre). Схема включения ИС при моделировании представлена на рисунке 4 (аналогичная схема включения использовалась при испытаниях ИС на чувствительность к локальным радиационным эффектам).

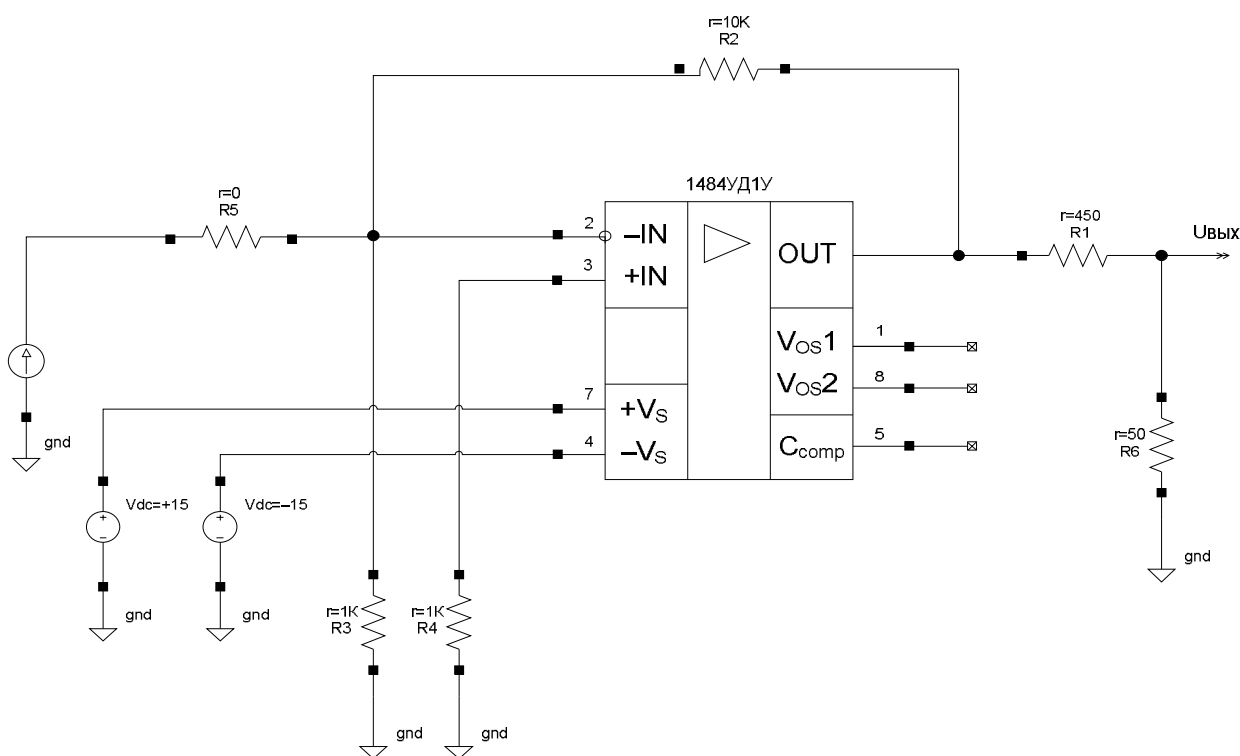


Рисунок 4 – Схема включения ОУ 1484УД1У при моделировании

Результаты схемотехнического моделирования ОУ 1484УД1У (характерные амплитудно-временные характеристики выходных импульсов напряжения, определяемые процессами сбора носителей заряда с трека ОЯЧ) представлены на рисунке 5.

Анализ полученных результатов моделирования воздействия ОЯЧ КП на ИС позволяет заметить, что амплитуда выходных импульсов составляет величины от 10 мВ до 500 мВ с длительностью до 100 нс, которые могут приводить к функциональным сбоям БА КА.

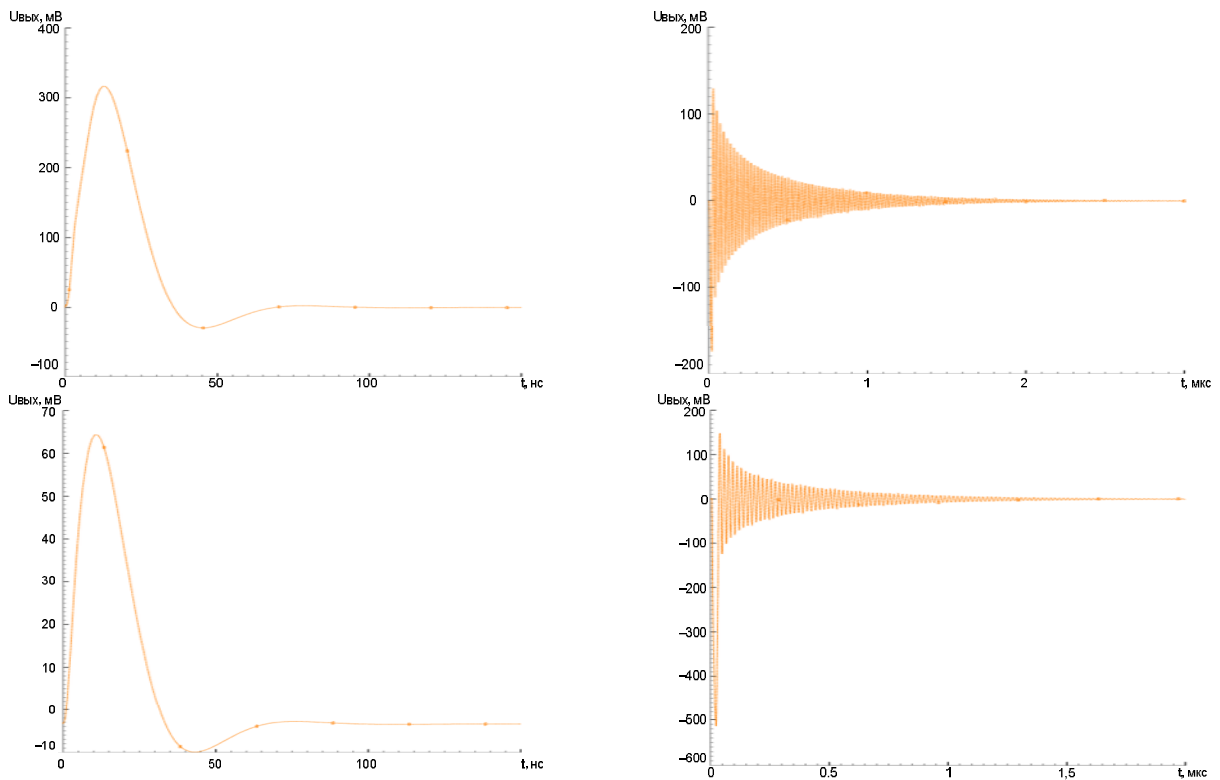


Рисунок 5 – Характерные выходные реакции ОУ 1484УД1У по результатам моделирования

Методы и средства экспериментальных исследований по оценке стойкости ИС к кратковременным импульсам напряжения при воздействии ОЯЧ

Экспериментальные исследования аналоговых ИС к эффектам «иголок» проводятся на моделирующих установках, способных создавать потоки высокоэнергетических протонов и ионов, а также с использованием лазерных имитаторов, физической основой которых является создание концентрации неравновесных электронно-дырочных пар сфокусированным оптическим излучением в узком пучке, эквивалентной концентрации, которая возникает в треке заряженной частицы. При этом состав аппаратно-программных средств должен при проведении испытаний обеспечивать задание режимом функционирования ИС, контроль параметров ИС в процессе испытаний (с их регистрацией), дозиметрическое сопровождение испытаний и т.д.

В качестве базовых установок были выбраны: протонный ускоритель на базе ПИЯФ г. Гатчина с энергией протонов равной 1 ГэВ и ускоритель ионов на базе ОИЯИ, г. Дубна со значениями ЛПЭ до 80 МэВ·см²/мг. Также при оценке сбоеустойчивости ИС при воздействии ОЯЧ КП в работе использовались лазерные имитационные методы и исследования на генераторе 14 МэВ нейтронов.

В качестве объектов исследований были выбраны типовые ИС, в которых наиболее характерно проявление «иголок»: операционные усилители типа 1484УД1,

140УД6, 140УД20, а также другие типы аналоговых ИС. Выбор этих ИС в качестве объекта объясняется относительно простой их топологией, которая позволяет относительно просто идентифицировать наиболее чувствительные области ИС при воздействии ОЯЧ.

В ходе экспериментальных исследований ОУ 1484УД1У были обнаружены все те эффекты, которые прогнозировались по результатам численного моделирования, а именно: выходные импульсы отрицательной и положительной полярности при попадании ОЯЧ во входные каскады (рисунок 6). Аналогичные результаты формирования импульсов кратковременной генерации при попадании ОЯЧ получены при экспериментальных исследованиях ИС 140УД6, 140УД20 (рисунок 7). Количественные характеристики этих эффектов для ОУ 1484УД1У представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты экспериментальных исследований ОУ 1484УД1У на ускорителе протонов на чувствительность к эффектам «иголок»

Образец	Поток, протон/см ²	Кол-во «иголок»	Сечение ОС, см ²	Примечание
№006	8,2E+11	0	<1,2E-12	$U_{cc+} = 12$ В, $U_{cc-} = 12$ В, $I_{cc+} = 30$ мА, $I_{cc-} = 30$ мА, «уровень триггера» 250 мВ
№012	1,17E+11	0	<8,6E-12	$U_{cc+} = 12$ В, $U_{cc-} = 12$ В, $I_{cc+} = 30$ мА, $I_{cc-} = 30$ мА, «уровень триггера» 250 мВ
№019	1,15E+11	0	<8,7E-12	$U_{cc+} = 12$ В, $U_{cc-} = 12$ В, $I_{cc+} = 30$ мА, $I_{cc-} = 30$ мА, «уровень триггера» 250 мВ
№023	5,87E+10	39	6,6E-10	$U_{cc+} = 12$ В, $U_{cc-} = 12$ В, $I_{cc+} = 30$ мА, $I_{cc-} = 30$ мА, «уровень триггера» 50 мВ
№016	5,78E+10	78	1,4E-09	$U_{cc+} = 12$ В, $U_{cc-} = 12$ В, $I_{cc+} = 30$ мА, $I_{cc-} = 30$ мА, «уровень триггера» 40 мВ
№011	5,80E+10	68	1,2E-09	$U_{cc+} = 12$ В, $U_{cc-} = 12$ В, $I_{cc+} = 30$ мА, $I_{cc-} = 30$ мА, «уровень триггера» 40 мВ

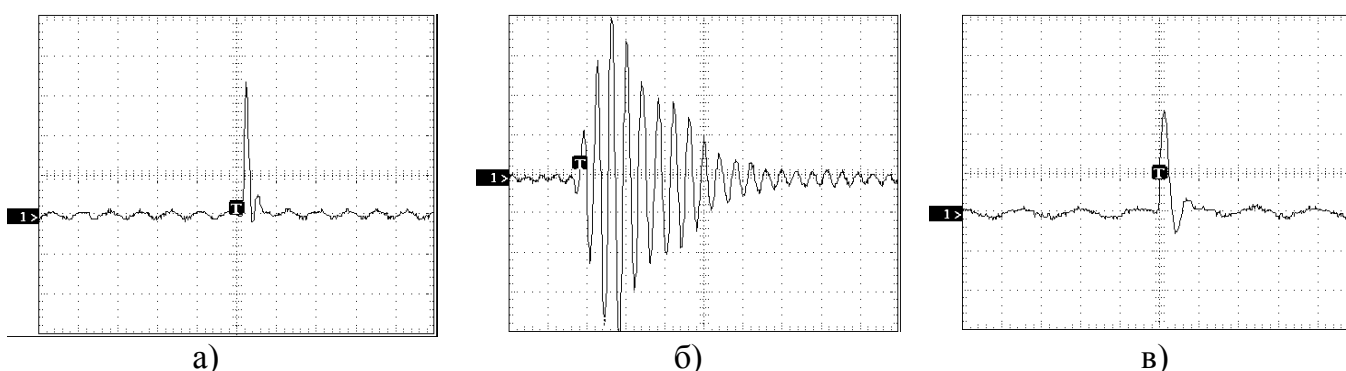


Рисунок 6 – Типовые выходные реакции ОУ 1484УД1У при воздействии отдельных 1 ГэВ протонов: коэффициент усиления $A_u=10$: а) 50 мВ/дел., 100 нс/дел.; б) 50 мВ/дел., 10 мкс/дел.; в) 50 мВ/дел., 50 нс/дел.

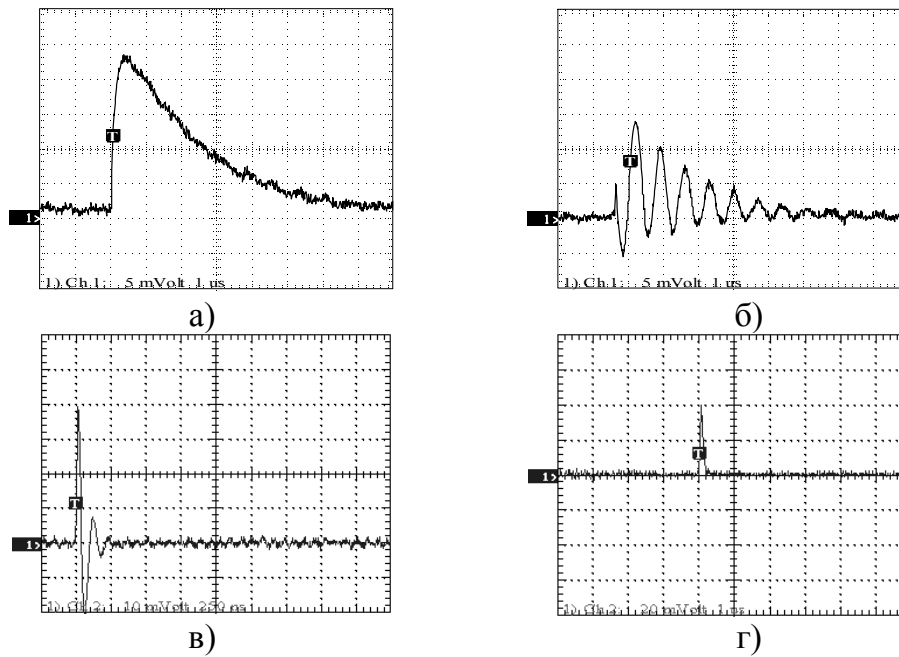


Рисунок 7 – Типовые осциллограммы при стационарном воздействии протонами с энергией равной 1 ГэВ: а), б) на выходах ОУ 140УД6, в) г) на выходах ОУ 140УД20

Оценки величин значений эквивалентных ЛПЭ производились на основе анализа физических процессов генерации заряда в полупроводниковых структурах лазерным излучением и имеющихся результатов сравнительных экспериментальных исследований по пересечению сфокусированного лазерного излучения и воздействия ОЯЧ.

На рисунке 8 представлены типовые зависимости изменения амплитуды выходного сигнала в ОУ в функции эквивалентных значений ЛПЭ для наиболее чувствительных областей (точка 1 - относятся к цепям выходного каскада; точка 3 - соответствует транзистору дифференциального входа ОУ). Обращает на себя внимание, что при генерации локального заряда во входных каскадах относительно быстро происходит насыщение зависимости – при эквивалентных значениях ЛПЭ более 80 МэВ·см²/мг. Таким образом, при воздействии ОЯЧ со значениями ЛПЭ не более 40 МэВ·см²/мг даже с учетом угловых зависимостей насыщения наблюдаться не будет.

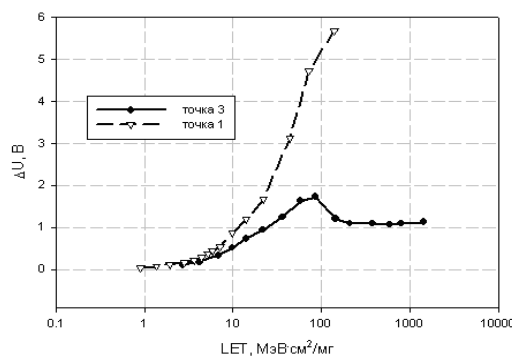


Рисунок 8 – Зависимости импульсной реакции напряжения на выходе ОУ от эквивалентных значений ЛПЭ для точек 1 и 3

В области «средних» значений ЛПЭ (порядка $5 \text{ МэВ}\cdot\text{см}^2/\text{мг}$) при воздействии ОЯЧ космического пространства максимальная амплитуда выходных импульсов составляет величины 200...400 мВ с длительностью порядка 20 нс. Полученные результаты коррелируют с экспериментальными данными, полученными при исследованиях на ускорителе протонов и ионов. Аналогичные экспериментальные результаты были получены и для других типов ОУ 140УД6, 140УД20.

Также в ходе экспериментальных исследований проведена оценка чувствительности к ОЯЧ ЭРИ ИП. Так, например, исследования на лазерном имитаторе проведены для маломощного ОУ типа LMC7101BIM5. Сканирование кристалла производилось при диаметре пятна лазерного излучения 5 мкм и шаге 10 мкм. Результаты исследований (таблица 2, рисунки 9 и 10) данного ОУ выявили его чувствительность к ОЯЧ КП (максимальная амплитуда выходных импульсов составляет величины до нескольких вольт с длительностью порядка нескольких мс).

Таблица 2 – Результат сканирования кристалла ОУ LMC7101BIM5 при различных пороговых уровнях по амплитуде

E, нДж	Количество событий для данных пороговых уровней по амплитуде					
	+1 В	-1 В	+2 В	-2 В	+3 В	-3 В
6	335	305	239	275	165	289
12.5	529	489	456	497	332	472
25	669	694	662	726	522	677

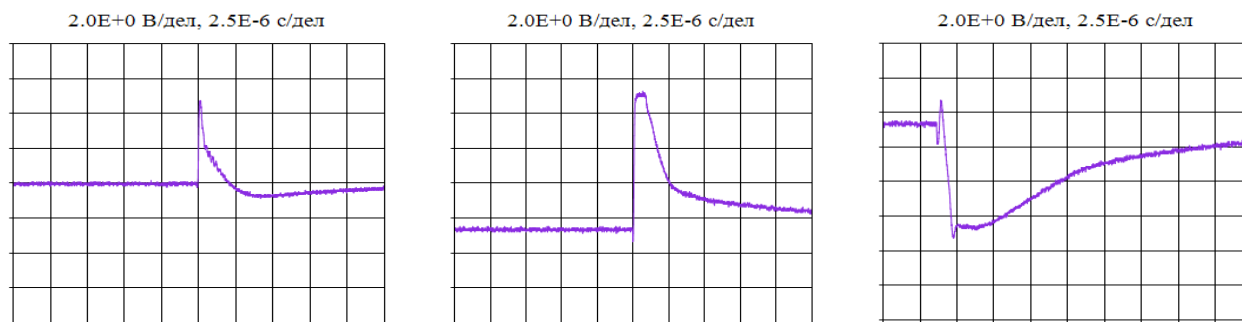


Рисунок 9 – Типовые осциллограммы на выходе ОУ LMC7101BIM5 при энергии падающего импульса лазерного излучения с энергией 800 нДж с диаметром пятна 30 мкм

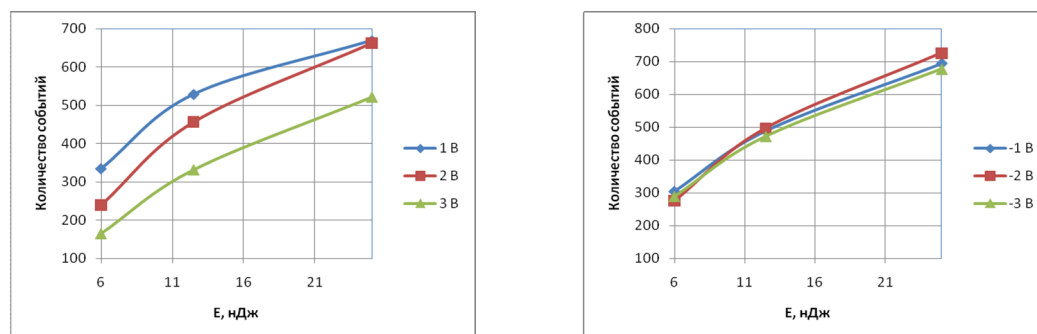


Рисунок 10 – Зависимость количества событий от энергии лазерного излучения и уровня запуска осциллографа (диаметр пятна 5 мкм)

Таким образом, результаты сравнения экспериментальных и расчетных исследований чувствительности ИС к ОЯЧ КП, связанных с возникновением «иголок», показывают коррелируемость полученных данных.

Методическое обеспечение оценки стойкости ИС к одиночным кратковременным импульсам, вызванных воздействием ОЯЧ

В настоящее время в нормативных документах требования по стойкости изделий микроэлектроники при воздействии ОЯЧ характеризуются значениями частот (вероятности) сбоев или отказов. При этом следует отметить, что в силу физико-технических особенностей реализации современных изделий микроэлектроники, изготовленных по субмикронной технологии, практически невозможно разработать ИС, в которых отсутствуют эффекты сбоев. Поэтому для количественной оценки стойкости ИС к воздействию ОЯЧ используется один из важнейших параметров чувствительности ИС – пороговые значения ЛПЭ ТЗЧ и энергии протонов, при которых возникают эффекты сбоев (в том, числе «иголок»), с дальнейшим расчетом сечения сбоя от ЛПЭ (энергии протонов) и определением частоты сбоев.

Существующие расчетные методики оценки и прогнозирования стойкости ИС к воздействию ионов и протонов предполагают проведение больших объемов вычислений, связанных с расчетом функции, определяющей связь сечения насыщения с пороговой энергией возникновения эффекта и геометрическими характеристиками чувствительной области ИС. Так, при описании интегральной функции зависимости сечения возникновения «иголок» от ЛПЭ для большинства практических случаев применима аппроксимация функцией Вейбулла:

$$\sigma(L) = \sigma_{нас} \left(1 - \exp \left[- \left(\frac{LET - LET_o}{W} \right)^S \right] \right) \quad \text{при } LET > LET_o, \quad (5)$$

где $\sigma_{нас}$ – сечение насыщения локального радиационного эффекта; W , S - параметры аппроксимации.

Аналогичная зависимость используется и для протонов при замене величины ЛПЭ на энергию протонов, либо используют функцию Бендела:

$$\sigma_p(E_p) = \sigma_{ps} \cdot [1 - \exp(-0,18 \cdot \sqrt{(18/A_p)(E_p - A_p)})]^4, \quad (6)$$

где σ_{ps} – сечение насыщения эффекта «иголки» в изделии при воздействии протонов, см²; A_p – пороговая энергия протонов, при которой в изделии возникает эффект, МэВ.

При этом эти зависимости обладают большой погрешностью. Корректные прогнозные значения сечения сбоев и пороговые энергии ОЯЧ можно получить при наличии экспериментальных данных сечения насыщения ионов и протонов, а также с

помощью лазерных имитаторов сфокусированного излучения пикосекундной длительности.

Предлагаемый метод экспериментальных исследований оценки и прогнозирования чувствительности ИС к эффектам «иголок» заключается в следующем:

- определение условий воздействия;
- установление условий измерения амплитудно-временных характеристик ИС (т.е. «уровня триггера»);
- подготовка и проведение испытаний ИС, с измерением амплитудно-временных характеристик и регистрацией форм, возникающих импульсов напряжения на выходе ИС;
- анализ полученных результатов;
- определение сечения сбоя для различных условий воздействия.

Основным при оценке чувствительности аналоговых ИС к эффектам «иголок» являются установление условий измерения амплитудно-временных характеристик ИС (т.е. введение критериев по амплитуде и длительности импульсов напряжения – «уровень триггера»), которые в свою очередь определяются параметрами настройки измерительного оборудования, используемого при испытаниях. Основной сложностью при контроле кратковременных импульсов на выходе ИС является фиксация выходной реакции (амплитуды и длительности). Связано это с тем, что при воздействии ОЯЧ на выходе ИС могут быть получены «иголки» с большим разнообразием видов форм импульса (т.е. длительность и амплитуда их варьируется в относительно больших пределах, при этом импульсы могут быть как биполярные, так и положительной и отрицательной полярности (рисунки 6, 7, 9), которые зависят от места попадания ОЯЧ в ИС, ЛПЭ или энергией протонов, воздействующих на ИС, схемы включения ИС и параметров нагрузки). В связи с этим, контроль выходной реакции ИС должен обеспечивать определение всех «иголок» с разными амплитудно-временными характеристиками. Поэтому при экспериментальных исследованиях ИС должны быть установлены критерии по длительности, обеспечивающие обнаружение выходных импульсов ИР, имеющих наибольшую длительность, и критериев по амплитуде, имеющих наименьшую амплитуду. Однако установление критериев по амплитудно-временным характеристикам «иголок» на выходе аналоговых ИС приводит к тому, что оценка стойкости ИС к воздействию ОЯЧ при большом количестве возможных условий воздействия ОЯЧ, а также режимов использования ИС в БА КА, становится очень трудоемкой, требующей больших материальных и временных затрат и практически нереализуемой задачей.

В связи с этим предлагается устанавливать критерии по амплитуде и длительности выходных импульсов ИР аналоговых ИС, исходя из функционального назна-

чения БА и того, что в ней средства обработки информации основаны на применении цифровых алгоритмов. Другими словами, аналоговые сигналы являются входными для систем цифровой обработки – цифровых ИС, основные параметры которых определяются характеристиками логических элементов ИС. В первом приближении, выходные импульсы ИР аналоговых ИС можно рассматривать, как импульсы влияния внешних помех на входные логические элементы цифровых ИС, приводящие к изменению их логического состояния и сбою функционирования цифровой ИС в целом. Для применяемых в БА КА современных цифровых КМОП ИС основной характеристикой влияния внешних помех является их помехоустойчивость (статическая и динамическая). Анализ современных цифровых КМОП ИС позволяет выбрать в качестве критерия выходных импульсов ИР аналоговых ИС по амплитуде значение равное 0.8 В (т.е. минимальное значение напряжения, при котором цифровая ИС не изменяет своего логического состояния), а по длительности – равное или большее времени задержки переключения входного каскада цифровой ИС. В данном случае в ходе испытаний определяются зависимости сечения всех «иголок» с критериальными амплитудами и длительностями.

Другой предлагаемый метод проведения испытаний может быть привязан к частным особенностям БА. В этом случае оценка и прогнозирование ИС к эффектам «иголок» предполагает: установление критериев по амплитуде и длительности для конкретных условий и схем включения аналоговых ИС в конкретной БА КА, контроль количества «иголок» на выходе ИС и оценку их параметров чувствительности к ОЯЧ.

Методики экспериментальных исследований в ходе работы над диссертацией разрабатывались отдельно для моделирующих установок и имитаторов. В качестве объектов исследований были выбраны операционные усилители и компараторы напряжений. Выбор этих ИС в качестве объектов объясняется с одной стороны относительно простой их топологией, которая позволяет относительно просто идентифицировать наиболее чувствительные области ИС при воздействии ОЯЧ. С другой стороны, эти ИС имеют внутренние усилители, которые формируют выходной сигнал, влияющий на формирование выходной ИР. Разработанные методики были апробированы в ходе проведения испытаний ряда ИС отечественного и иностранного производств.

Заключение

Основной результат диссертации заключается в развитие методов оценки и прогнозирования стойкости аналоговых ИС к сбоям, связанным с возникновением кратковременных импульсов напряжения из-за действия ОЯЧ, которые позволили

обосновать и выработать критерии по радиационной стойкости для этого класса изделий.

Основные научные результаты диссертационной работы:

1. Разработаны модели и проведено расчетное моделирование ионизационных токов в полупроводниковых структурах при локальном энерговыделении в микрообъеме элемента ИС, которые позволили обоснованно выбрать характеристики генераторов ионизационных токов для систем схемотехнического моделирования.

2. Модифицирован и обоснован метод расчетного схемотехнического моделирования кратковременных импульсов выходного напряжения в аналоговых ИС, который базируется на включении одиночного генератора ионизационного тока в наиболее чувствительные узлы, параметры которого определяются из результатов моделирования полупроводниковых структур.

3. Разработаны расчетно-экспериментальные методы и методики оценки и прогнозирования стойкости ИС к одиночным сбоям, связанных с возникновением кратковременных импульсов, которые базируются на экспериментальном определении параметров чувствительности на испытательных установках с последующей оценкой показателей стойкости для реальных условий эксплуатации.

4. Предложены и обоснованы оптимальные характеристики технических средств экспериментального исследования кратковременных импульсов напряжения, вызванных воздействием ОЯЧ, оптимальный состав которых включают в себя как испытания на ускорителе ионов при одном-двух значениях ЛПЭ, так и последующие эксперименты на лазерном имитаторе с целью локализации наиболее чувствительных областей, определения предельных амплитуд и длительностей «иголок» и т.п.

Основные практические результаты диссертационной работы и их внедрение:

1. Разработаны методики экспериментальной оценки стойкости ИС к одиночным сбоям, связанных с возникновением кратковременных импульсов, на ускорителях ионов и протонов и на базе лазерного имитатора, позволяющие оценить чувствительность ИС к воздействию ОЯЧ. Разработанные методики позволяют определить чувствительные области возникновения сбоя в ИС, а также обеспечить наиболее критичный режим для исследований эффектов «иголок» при воздействии разных заряженных частиц (ВЭП, ТЗЧ и др.) КП. Разработанные методики легли в основу организационно-методического аппарата проведения испытаний электронной компонентной базы (ЭКБ) отечественного и иностранного производства по определению стойкости бортовой аппаратуры изделий разработки ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс», ФГУП «ЦНИИ «Комета», ОАО РКК «Энергия им. С.П.Королева»

к воздействию тяжелых заряженных частиц и высокоэнергетичных протонов космического пространства.

2. Получены и систематизированы оригинальные экспериментальные данные ИР для 15 типов аналоговых ИС отечественного и иностранного производства при воздействии на них ОЯЧ, необходимые разработчикам БА КА для оценки частоты возникновения «иголок» в реальных условиях.

3. Разработаны предложения по составу характеристик требований стойкости аналоговых ИС к одиночным эффектам, связанным с возникновением «иголок» на их выходах при воздействии ОЯЧ, которые дополняют и конкретизируют существующие требования по стойкости изделий микроэлектроники при воздействии ОЯЧ.

4. Результаты использованы в ОСТ 11 073.013-2008 «Микросхемы интегральные. Методы испытаний» (часть 10) и в проекте нормативного документа по стандартизации РКТ «Аппаратура радиоэлектронная бортовая космических аппаратов. Методы испытаний аналоговых и аналого-цифровых интегральных микросхем к воздействию одиночных высокоэнергетических протонов и тяжёлых заряженных частиц космического пространства на ускорителях заряженных частиц».

5. Результаты диссертации вошли в отчетные материалы по НИР и составным частям ОКР «Облепиха-2», «Кругозор-2007», «Кругозор-2008» и др., выполняемых в интересах Минобороны России, Роскосмоса и предприятий оборонного комплекса.

Таким образом, в ходе работы над диссертацией достигнута ее основная цель, а именно – разработаны методы и определены основные требования к техническим средствам моделирования и оценки показателей стойкости аналоговых ИС к эффектам воздействия ОЯЧ, связанным с возникновением кратковременной ИР в них, что позволит обеспечить комплектование устройств БА КА различного назначения ИС с требуемой стойкости.

Список основных работ, опубликованных по теме диссертации

1. Чумаков А.И., Печенкин А.А., Егоров А.Н., Маврицкий О.Б., Баранов С.В., Васильев А.Л., Криницкий А.В. Оценка параметров чувствительности СБИС к радиационным эффектам с помощью методики локального лазерного облучения. // IV Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем» – 2008. Сборник научных трудов. – М.: ИПИМ РАН. – 2008. – С.256-259.

2. Криницкий А.В., Дедуль А.И. Статья на специальную тему. // Научно-технический сборник «Военная электроника и электротехника» – Мытищи: ФГУ «22 ЦНИИ Минобороны России», выпуск 62. – 2010 (с). – С. 195-205.

3. Криницкий А.В., Шакуров А.В., Поздеев А.П. Статья на специальную тему. // Научно-технический сборник «Военная электроника и электротехника» – Мытищи: ФГУ «22 ЦНИИИ Минобороны России», выпуск 62. – 2010 (с). – С. 205-212.

4. Чумаков А.И., Васильев А.Л., Козлов А.А., Кольцов Д.О., Криницкий А.В., Печенкин А.А., Тарараксин А.С., Яненко А.В. Прогнозирование локальных радиационных эффектов в ИС при воздействии факторов космического пространства. // Микроэлектроника. – 2010. – Т. 39. – №2. – С. 85-90.

5. Криницкий А.В. Статья на специальную тему. // Научно-технический сборник «Военная электроника и электротехника» – Мытищи: ФГУ «22 ЦНИИИ Минобороны России», выпуск 63, часть 2. – 2011 (с). – С. 87-99.

6. Криницкий А.В. Моделирование импульсной ионизационной реакции аналоговых интегральных схем при воздействии отдельных ядерных частиц. // Научно-технический сборник «Радиационная стойкость электронных систем – Стойкость 2006». – М.: МИФИ. – 2006. – С. 49-50.

7. Криницкий А.В., Чумаков А.И. Ионизационная реакция от отдельных ядерных частиц в комбинированных и аналоговых интегральных схемах // Электроника, микро- и наноэлектроника. Сборник научных трудов. – М.: МИФИ. – 2005. – С. 206-209.

8. Криницкий А.В., Васильев А.Л., Чумаков К.А. Исследование ионизационной реакции операционного усилителя при воздействии отдельных ядерных частиц. // Научно-технический сборник «Радиационная стойкость электронных систем – Стойкость 2007». – М.: МИФИ. – 2007. – С. 49-50.

9. Чумаков А.И., Печенкин А.А., Егоров А.Н., Маврицкий О.Б., Яненко А.В., Кольцов Д.О., Баранов С.В., Васильев А.Л., Криницкий А.В. Лазерные имитационные методы оценки параметров чувствительности ИС к локальным радиационным эффектам. // Научно-техническая конференция «Элементная база космических систем». Сборник докладов. – Сочи. – 2008 г.

10. Чумаков А.И., Криницкий А.В. Особенности задания требований по стойкости ИС при воздействии тяжелых заряженных частиц. // Научно-технический сборник «Радиационная стойкость электронных систем – Стойкость 2010». – М.: МИФИ. – 2010. – С. 9-10.

11. Чумаков А.И., Афонин А.В., Гонтарь В.В., Васильев А.Л., Герасимов В.Ф., Криницкий А.В., Пасхалов А.А., Савченков Д.В., Тарараксин А.С., Яненко А.В. Сбои и отказы в ИС при воздействии отдельных высокоэнергетичных нейтронов. // IX Межотраслевая конференция по радиационной стойкости. Сборник докладов (г. Снежинск, 12-15 октября 2010 г.). – Снежинск: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академика Е.И. Забабахина». – 2010. – С. 32-37.