

На правах рукописи

АХМЕТОВ АЛЕКСЕЙ ОЛЕГОВИЧ

**РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА СТОЙКОСТИ
ЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЕЙ К ВОЗДЕЙСТВИЮ РАДИАЦИОННЫХ
ФАКТОРОВ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА**

05.13.05 - Элементы и устройства вычислительной техники
и систем управления

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Автор:



Москва – 2014 г.

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ».

Научный руководитель Кандидат технических наук, доцент

Калашников Олег Арсеньевич

Официальные оппоненты: Доктор технических наук,
начальник лаборатории ОАО «НПП «Пульсар»
Енишерлова Кира Львовна

Кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник –
начальник сектора ФГУП ЦНИИмаш
Ужегов Вячеслав Михайлович

Ведущая организация: ЗАО НТЦ «Модуль»

Защита состоится « 16 » марта 2015 г. в 14 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 НИЯУ МИФИ и на сайтах:
www.ods.mephi.ru и www.vak.ed.gov.ru

Автореферат разослан « ____ » _____ 2015 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

Введение. Общая характеристика работы.

Диссертация направлена на решение актуальной научно-технической задачи по развитию расчетно-экспериментальных методов оценки радиационной стойкости электронных модулей (ЭМ) к воздействию ионизирующего излучения (ИИ) космического пространства (КП), что позволяет решать важную практическую задачу по увеличению сроков активного существования космических аппаратов (КА).

Актуальность темы диссертации

При создании современной бортовой электронной аппаратуры (БА) и систем управления КА с целью улучшения тактико-технических характеристик, уменьшения сроков разработки и создания высокопроизводительных систем широко применяются ЭМ – многокристальные модули и системы в виде модуля (System on Module).

Эксплуатация ЭМ в составе БА КА связана с воздействием ионизирующего излучения (ИИ) космического пространства (КП). Увеличение срока активного существования КА приводит к росту радиационных отказов и сбоев ЭМ, входящих в её состав, вызванных дозовыми и одиночными радиационными эффектами. Поэтому оценка радиационной стойкости ЭМ, которая во многих случаях определяют радиационную стойкость БА КА, при воздействии ИИ КП является актуальной задачей.

Уровень радиационного отказа ЭМ во многих случаях не определяется радиационной стойкостью интегральных схем (ИС), входящих в его состав. Во-первых, это связано с тем, что критериальные параметры, определяющие стойкость ИС, во многих случаях не оказывают существенного влияния на стойкость ЭМ в целом (например, статический ток потребления ИС, токи утечки ИС и т.д.). Во-вторых, функциональные и электрические режимы работы ИС в составе ЭМ отличаются от критических режимов, определяющих стойкость ИС. Как правило, стойкость ЭМ оказывается выше, чем стойкость входящих в их состав ИС.

Таким образом, для достоверной оценки радиационной стойкости ЭМ необходимо разработать научно-методический аппарат по оценке их радиационной стойкости. При этом использование типовых методик и технических средств, ориентированных на радиационные испытания ИС, неприменимы для испытаний ЭМ. Это связано со значительными геометрическими размерами ЭМ, неоднородностью полей

излучения испытательных установок, а также невозможностью проведения полного или выборочного функционального контроля каждой ИС в составе ЭМ. Поэтому актуальной задачей является разработка методик и технических средств испытаний ЭМ на стойкость к воздействию ИИ КП по одиночным и дозовым эффектам.

Следствием протяженных геометрических размеров и сложной конструкции ЭМ, содержащих ИС и другие электронные компоненты в различных корпусах (пластиковые, металлокерамические, специализированные и др.), радиаторы, ребра жесткости и т.д. является существенная неоднородность локальных дозовых нагрузок (ЛДН) ИС в составе ЭМ. Для достоверной оценки дозовой стойкости ЭМ необходимо решить задачу определения ЛДН, которые могут быть рассчитаны методом секторного анализа и/или методами Монте-Карло (прямым и обратным). Метод секторного анализа позволяет проводить расчеты ЛДН за короткое время, но не учитывает физико-химические характеристики материалов, поэтому результаты расчетов имеют значительную погрешность при наличии в составе ЭМ материалов с большим или малым (относительно алюминия) зарядовым числом Z . Прямой метод Монте-Карло (ПМК) учитывает химический состав материалов и является наиболее точным, но требует значительных затрат машинного времени и, для сложных современных конструкций КА, практически неприменим. Обратный метод Монте-Карло (ОМК) позволяет учитывать реальные физико-химические характеристики материалов и проводить расчеты быстрее, но требует обоснования применимости для расчетов ЛДН ЭМ.

Актуальной задачей является анализ методов численного моделирования ЛДН ЭМ и выбор оптимального по точности и быстродействию метода.

Состояние исследований по проблеме

В России и за рубежом мало работ, посвященных исследованиям радиационной стойкости ЭМ к воздействию ИИ КП. Есть большое количество работ, посвященных оценке стойкости отдельных ИС (микропроцессоры, ПЛИС, ОЗУ, Flash память и т.д.) и приближенным методам расчётов локальных дозовых нагрузок. За рубежом исследования представлены в работах авторов L. Desorgher, F. Lei, G. Santin, J.-C. Thomas, R. Ecoffet, C. Chatry и других, в России – в работах В.М. Ужегова,

А. И. Чумакова, О. А. Калашникова, П. В. Некрасова, Д. В. Бобровского, В. Ф. Зинченко, В. М. Антимирова. В зарубежных и отечественных работах методы и подходы оценки радиационной стойкости ЭКБ существенно различаются, так же как и расчёты локальных дозовых нагрузок, что в основном связано с разными экспериментальными установками для проведения исследований, режимами работы ИС и методикой облучения.

На момент начала работы отсутствовали методики проведения испытаний ЭМ на стойкость к воздействию ИИ КП, что снижало достоверность исследований и увеличивало время их проведения. При проведении исследований ЭКБ на стойкость к воздействию протонов КП в основном применялись ускорители протонов с постоянной энергией и определение пороговых энергий протонов возникновения одиночных эффектов были затруднительным. Кроме того не был решен ряд методических и технических задач, которые кратко сводятся к следующим:

- выбор оптимального режима облучения ЭМ на ускорителях протонов и ионов, а также применение лазерных методов для испытаний ЭМ;
- экспериментальное определение зависимости сечения одиночных эффектов в ЭМ при воздействии ОЯЧ КП;
- выбор оптимального метода численного моделирования ЛДН в ЭМ и оценка ослабления ЛДН специализированными защитными корпусами ИС в ЭМ;
- оценка влияния режима функционирования на стойкость ЭМ к воздействию ИИ КП.

Решению этих задач посвящена диссертация.

Цель диссертации: развитие методов и средств расчетно-экспериментальной оценки стойкости электронных модулей к воздействию ионизирующего излучения космического пространства, обеспечивающих повышение производительности испытаний и достоверности их результатов путем выбора оптимального режима облучения, автоматизации испытаний и уточнения уровней локальной дозовой нагрузки.

Основными **задачами** диссертации являются:

1. Разработка и развитие научно-методических средств испытаний ЭМ на стойкость к воздействию ИИ КП, с целью повышения достоверности испытаний и уменьшения трудозатрат.
2. Разработка аппаратно-программных средств испытаний ЭМ на стойкость к воздействию ИИ КП, для обеспечения автоматизации испытаний и классификации одиночных эффектов.
3. Апробация разработанных научно-методических и аппаратно-программных средств при приведении испытаний ЭМ.
4. Получение и анализ экспериментальных данных по стойкости ЭМ к воздействию ИИ КП.
5. Анализ методов численного моделирования ЛДН ЭМ и выбор оптимальных методов расчета ЛДН ЭМ в составе КА, проведение расчетных оценок ЛДН для типовых условий эксплуатации и оценка разброса ЛДН ЭМ.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Разработана методика оценки стойкости ЭМ к воздействию ИИ КП по одиночным радиационным эффектам, основанная на продольном облучении ЭМ в двух направлениях на ускорителях протонов для поиска наиболее чувствительных ИС, с последующим локальным облучением чувствительных ИС, позволяющая уменьшить трудозатраты и повысить достоверность результатов.
2. Разработана методика выявления отдельных видов одиночных эффектов (тиристорный эффект, функциональный сбой), основанная на последовательном сбросе (переконфигурации) ЭМ, отключении измерительной оснастки от ЭМ до парирования резкого возрастания тока в цепи питания при проведении испытаний ЭМ на стойкость к воздействию ОЯЧ КП.
3. Определены границы применимости (воздействие электронного и тормозного излучений) ОММК при оценках ЛДН для отдельных элементов ЭМ и КА.
4. Разработана методика оценки ЛДН ЭМ, основанная на учете ослабления ИИ КП корпусом КА, локальной защитой и специализированными корпусами ИС,

отдельном вкладе протонов и электронов в формирование ЛДН, учете орбиты КА и моделировании ослабления ИИ КП методами Монте-Карло.

Практическая значимость работы:

1. Разработаны аппаратно-программные средства, предназначенные для автоматизации испытаний ЭМ к воздействию ОЯЧ КП, которые внедрены в АО «ЭНПО СПЭЛС».
2. Проведены испытания более 20 типов современных ЭМ – отечественных и зарубежных, широкого функционального назначения. Определены типовые показатели стойкости ЭМ основных функциональных и конструктивных классов.
3. Проведены оценки ЛДН для ряда ЭМ в составе РЭА КА.
4. Результаты диссертации вошли в отчетные материалы по НИР и составным частям ОКР (ММК-РВ, АСН-РМ-ИИКП, СРВ906-ТЗЧ, Двина-1621, Джип-57, Связь, Плата-Т, БИС-МВ-СВВ, Зеркало-2-СВВ, Интерфейс-6-СВВ, Модуляция-ЗР), выполняемых в интересах Минобороны РФ, Росатома и предприятий оборонного комплекса (АО ЦНИИ «Циклон», ЗАО «ПКК Миландр», ЗАО НТЦ «Модуль», НПП «ОПТЭКС», АО «РИРВ», ООО «ИРЗ ТЕСТ», ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс», ФГУП ВО «Радиоэкспорт»).
5. Разработанные научно-методическое обеспечение и аппаратно-программные средства внедрены в АО «ЭНПО СПЭЛС» и ИЭПЭ НИЯУ МИФИ.
6. Результаты диссертации внедрены в АО «ЭНПО СПЭЛС» при проведении радиационных испытаний отечественных и зарубежных ЭМ, комплектующих бортовую аппаратуру, на стойкость к факторам космического пространства в аппаратуре изделий 14В120, 14Ф142, 14Р18, 14Ф137, 14Ф148, 14К035, 14Ф31, Луч-5В, 47КС.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика испытаний ЭМ на стойкость к воздействию ИИ КП.
2. Научное обоснование возможности применения метода обратного Монте-Карло для расчётов ЛДН ЭМ и результаты расчетов ЛДН ЭМ, в том числе использующих компоненты в специализированных корпусах.

3. Аппаратно-программные средства для проведения испытаний и экспериментальных исследований ЭМ на радиационную стойкость.
4. Оригинальные результаты экспериментальных исследований более 20 типов ЭМ, подтверждающие обоснованность предложенных методик и средств для расчетно-экспериментальной оценки.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались на:

- российских научных конференциях «Радиационная стойкость электронных систем» (Лыткарино, 2011-2014 гг.);
- международной конференции по радиационным эффектам в компонентах и системах (The Conference on Radiation Effects on Components and Systems – RADECS) (Оксфорд, 2013 г.);
- 13 ежегодный научно-практический семинар «Проблемы создания специализированных радиационно-стойких СБИС на основе гетероструктур» (Нижний Новгород, 2013);
- научных сессиях НИЯУ МИФИ (Москва, 2011-2014 гг.);
- международном семинаре по европейской космической информационной системе (SPENVIS User's Workshop) (Брюссель, 2013);
- международной конференции по микроэлектронике, устройствам и материалам (50th International Conference on Microelectronics, Devices and Materials «MIDEM 2014») (Любляна 2014 г.);
- 7-й Курчатовской молодежной научной школе «Молодежь и наука», Москва 2009.

Основные результаты диссертации опубликованы в 17 работах (в период с 2009 по 2014 гг.), в том числе в 2 журналах из перечня ВАК.

Объем и структура диссертации. Диссертация содержит 119 страниц, в том числе 47 рисунков, 9 таблиц, список литературы из 74 наименований и состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы.

Содержание диссертации

Введение обосновывает актуальность работы, обобщает краткие результаты ранее выполненных научных работ по тематике диссертации.

Первая глава посвящена классификации ЭМ; обзору радиационных эффектов в ЭМ при воздействии ИИ КП; методикам проведения функционального контроля; влиянию режима работы ЭМ на уровень стойкости. Вследствие разнородности функционального состава и назначения ЭМ необходимо определить оптимальные режимы проведения функционального контроля ЭМ.

ЭМ по функциональному назначению можно разделить на:

- Одноплатные компьютеры;
- DSP-платформы;
- Модули вторичного электропитания;
- Видео контроллеры;
- Модули аналогового, цифрового или цифроаналогового ввода/вывода;
- Интерфейсные модули и т.д.

Конструктивно ЭМ представляют собой микросборки, выполненные на единой подложке в корпусе (обычно металлокерамический) или набор ИС, объединенных на печатной плате и выполняющих определенную функцию. Широкое распространение получили ЭМ в формате PC-104, microPC, VME, CompactPCI и др.

Радиационные эффекты в ЭМ при воздействии ИИ КП делятся на две группы: дозовые эффекты и одиночные эффекты при воздействии тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) и высокоэнергетичных протонов (ВЭП) КП [1-3]. Дозовая деградация ЭМ в КП в основном связана с потоками электронов и протонов и характеризуется низкой интенсивностью накопления дозы. Одиночные и дозовые эффекты, которые могут проявляться в ЭМ, аналогичны эффектам в ИС (тиристорный эффект (ТЭ), одиночный сбой (ОС), функциональный сбой (ФС), катастрофический отказ (КО) и т.д.), но их регистрация в ЭМ может быть затруднена. Во-первых, это связано с тем, что токи потребления большинства ЭМ в динамическом режиме работы близки к значениям порядка 1 А и регистрация ТЭ с токами менее 100 мА затруднена, во-

вторых, функциональный контроль ЭМ может не обеспечивать выявления одиночных эффектов в ЭМ вследствие особенностей режима работы ИС в составе ЭМ. На рисунке 1.1 показан график зависимости тока потребления ЭМ от флюенса частиц при облучении протонами с энергией 1 ГэВ [10].

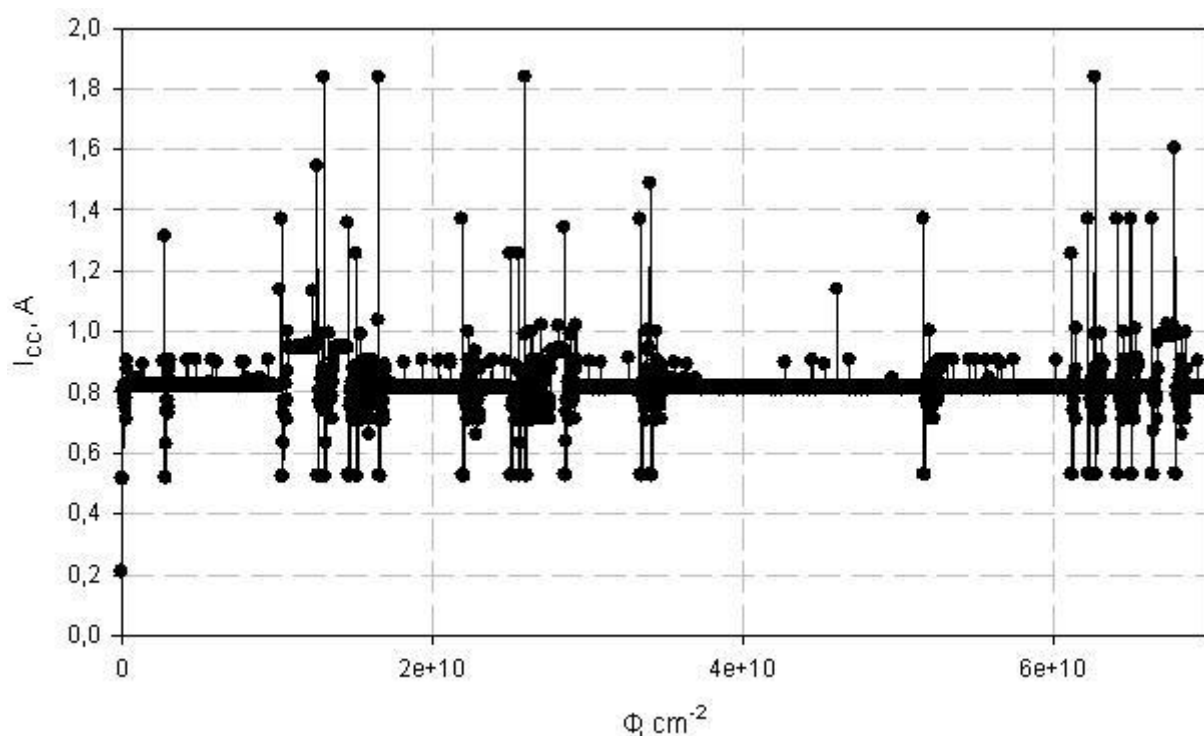


Рисунок 1.1 – Зависимость тока потребления ЭМ СМЕ136686LX от флюенса частиц при локальном облучении протонами с энергией 1 ГэВ

Видно, что средний уровень тока потребления ЭМ составляет порядка 0,8 А; броски тока, вызванные ТЭ, составляют от 50 мА до 1 А; также наблюдается кратковременное уменьшение тока потребления, вызванное функциональными сбоями с последующей перезагрузкой ЭМ. Неоднозначное проявление одиночных эффектов в ЭМ, наличие разнородных по своему функционалу ИС, требует разработки методики классификации эффектов для повышения достоверности результатов испытаний [4].

Следствием протяженных геометрических размеров ЭМ при определении их стойкости к воздействию ИИ КП является:

- необходимость декапсуляции ИС в составе ЭМ и последующее облучение на ускорителях ионов и/или лазерных источниках. Проведение испытаний на ускорителях ионов с большими пробегами в воздухе и материалах корпуса ИС и ЭМ не требует декапсуляции, однако таких установок, сертифицированных для испытаний ЭКБ, не существует;
- необходимость проведения большого количества сеансов (до нескольких десятков) на ускорителях протонов для локального облучения всех активных ИС. Также необходимо учитывать дозовую деградацию ЭМ при воздействии протонов, для предотвращения дозового отказа ЭМ до набора требуемой статистики по одиночным эффектам;
- Необходимость учета неоднородности поля излучения установок, при проведении испытаний ЭМ на стойкость к ИИ КП по дозовым эффектам.

При испытаниях ЭМ необходимо учитывать не только их протяженные геометрические размеры. При проведении функционального контроля (ФК) ЭМ возникает задача выбора метода ФК и его полноты. Для испытаний ИС широко применяются следующие методы ФК [5-7]: *метод полного ФК, метод выборочного ФК, функциональный контроль в режиме работы реальной БА КА, тестирование ИС по интерфейсу JTAG, ФК с помощью тестовых векторов.*

Метод полного ФК позволяет выявить все ошибки функционирования и отказы ЭМ, но занимает продолжительное время (от нескольких минут до часов). При радиационном воздействии проведение полного ФК может приводить к отжигу радиационных дефектов и затруднению детектирования одиночных эффектов. *Метод выборочного ФК* применим к ИС, но в ЭМ программный доступ к части ИС невозможен. *Тестирование ИС в составе ЭМ по интерфейсу JTAG* возможно, если все ИС объединены в цепь JTAG, но, как показано для ИС [2, 7], этот метод не всегда достоверен и может приводить к завышению радиационной стойкости ЭМ. *ФК с помощью тестовых векторов* можно применять для ограниченного набора ЭМ и создание таких тестовых векторов является нетривиальной задачей, не всегда выполнимой в рамках ограниченного времени подготовки к испытаниям. Тестирование ЭМ в

реальном режиме работы в БА КА применимо для радиационных испытаний, однако не всегда позволяет выявить одиночные эффекты при воздействии ТЗЧ и ВЭП.

Поэтому для ЭМ необходимо выработать методику испытаний на стойкость к воздействию ИИ КП, учитывающую как протяженные размеры ЭМ, так и особенности проведения функционального контроля, чему посвящена глава 2.

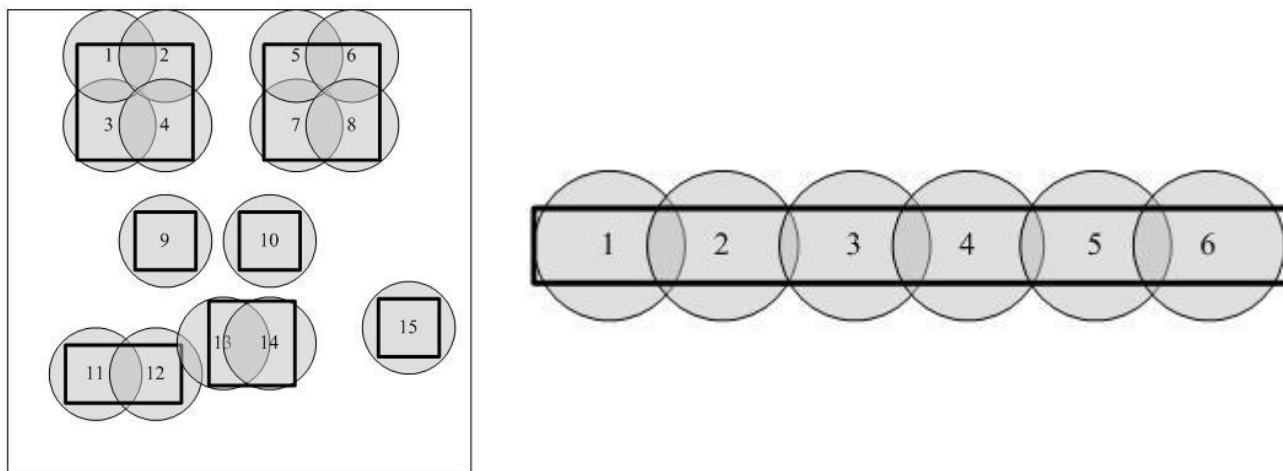
Во второй главе рассматриваются предложенные автором методики, позволяющие решить задачу по развитию научно-методических средств испытаний ЭМ на стойкость к воздействию ИИ КП, с целью повышения достоверности испытаний и уменьшения трудозатрат:

- методика испытаний ЭМ на стойкость к воздействию ИИ КП по одиночным эффектам;
- методика выявления отдельных видов одиночных эффектов (ТЭ, ОС, ФС, КО) при воздействии ТЗЧ и ВЭП;
- методика проведения функционального контроля ЭМ при испытаниях на дозовые и одиночные эффекты.

Методика испытаний ЭМ на стойкость к воздействию ТЗЧ и ВЭП.

Алгоритм методики состоит из следующих основных шагов:

1. Анализ состава ЭМ. На данном этапе проводится выбор критичных активных ИС, входящих в состав ЭМ, потенциально чувствительных к воздействию ТЗЧ и ВЭП по одиночным эффектам. Затем, исходя из диаметра пучка протонов или сканирующей системы ускорителя протонов, определяется число сеансов для локального облучения **всех активных критичных ИС** в составе ЭМ, а также число сеансов для продольного облучения всех активных ИС на ускорителе протонов с энергией 1 ГэВ. На рисунке 2.1 представлен выбор областей для локального и продольного облучения ЭМ. Как правило, число областей (или сеансов) для продольного облучения существенно меньше.



(a)

(б)

Рисунок 2.1 – Локальное (а) и продольное (б) облучение ЭМ на ускорителе протонов с энергией 1 ГэВ

2. На втором этапе проводится продольное облучение вдоль двух взаимно перпендикулярных сторон ЭМ. Это позволяет выявить критичные области ЭМ, чувствительные к воздействию ВЭП.
3. На третьем этапе проводится облучение наиболее критичных ИС, выявленных на втором этапе, и определение сечения насыщения при воздействии ВЭП.
4. На четвертом этапе проводится облучение критичных ИС на ускорителе протонов с перестраиваемой энергией. Это позволяет определить пороговую энергию протонов для возникновения одиночного эффекта. На рисунке 2.2 представлена зависимость сечения ТЭ от энергии протонов для ЭМ СРВ906 [13].
5. Проводится декапсуляция критичных ИС, не чувствительных к воздействию ВЭП или ИС чувствительных к ВЭП, для которых требуется определение пороговых ЛПЭ возникновения одиночного эффекта.
6. На последнем этапе проводится локальное облучение декапсулированных ИС на ускорителях ионов и/или лазерных установках для определения параметров чувствительности при воздействии ТЗЧ. На рисунке 2.3 представлены фотографии ЭМ с декапсулированными ИС: (а) – лазерная декапсуляция,

проводилась для определения размеров кристаллов ИС, без сохранения работоспособности ЭМ; (б) – химическое травление пластика над кристаллом пяти ИС, полное сохранение работоспособности ЭМ.

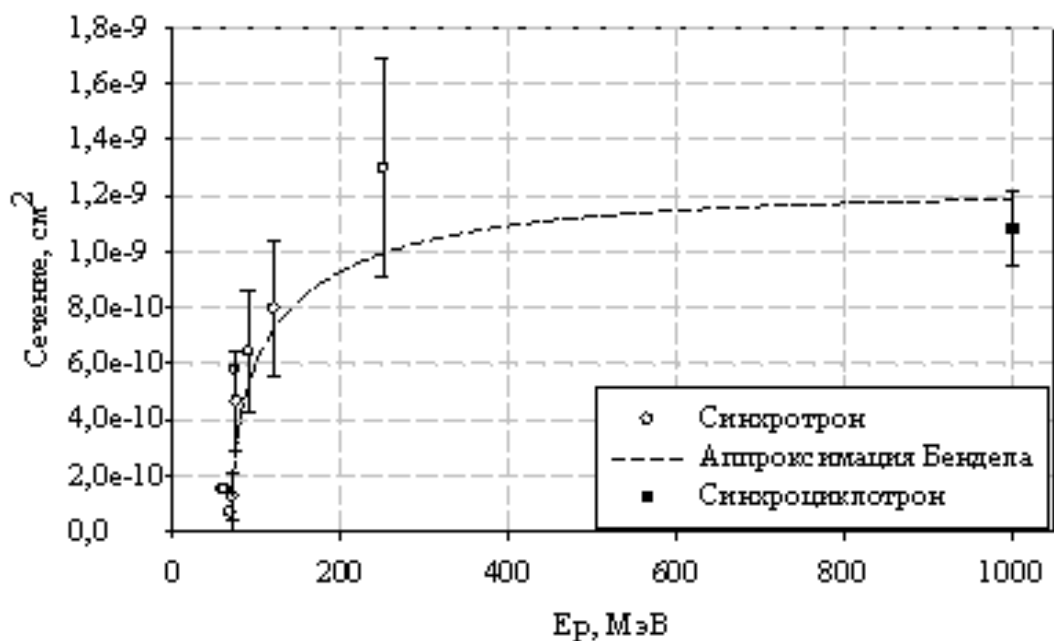
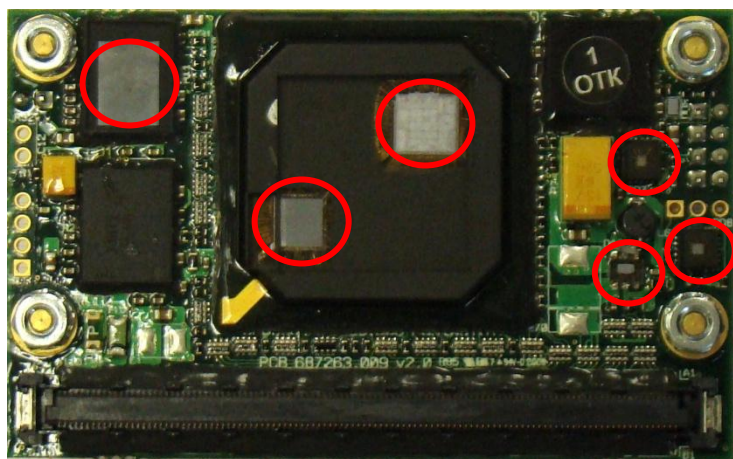
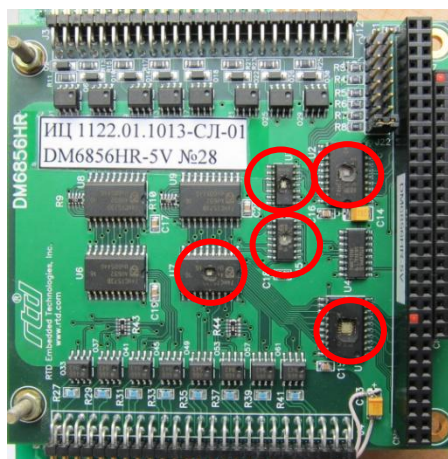


Рисунок 2.2 – Зависимость сечения ТЭ от энергии протонов в ИС контроллера флэш-памяти ЭМ СРВ906: белые маркеры – ускоритель протонов с перестраиваемой энергией; черный маркер – ускоритель протонов с энергией 1 ГэВ



(а)



(б)

Рисунок 2.3 – Декапсуляция ЭМ при проведении испытаний на ускорителях ионов, лазерных установках и анализе конструктивных особенностей ИС

Методика испытаний ЭМ на стойкость к воздействию ТЗЧ и ВЭП повышает достоверность испытаний и снижает трудозатраты. При проведении контрольных

испытаний ЭМ и при наличии эффектов отказов (ТЭ, КО) на первом этапе облучения (протоны 1 ГэВ) трудозатраты могут быть снижены в 2-3 раза – отсутствие испытаний на ускорителях ионов в широком диапазоне линейных потерь энергии (ЛПЭ) ионов.

Для повышения достоверности проведения испытаний ЭМ на стойкость к воздействию ИИ КП по одиночным эффектам разработана:

Методика выявления отдельных видов одиночных эффектов (ТЭ, ОС, ФС, КО) при воздействии ТЗЧ и ВЭП

В современных цифровых ИС, входящих в состав ЭМ, возникновение ОС или ФС может приводить к скачкообразному изменению тока потребления ЭМ (увеличению или уменьшению). Скачкообразный рост тока потребления ЭМ также может быть вызван ТЭ, при этом рост тока составляет от десятков мА до нескольких А. Для достоверного определения одиночных эффектов в ЭМ при проведении испытаний разработан алгоритм методики выявления отдельных видов одиночных эффектов (ТЭ, ОС, ФС, КО), кратко сводящийся к последовательности действий:

1. **Анализ состава ЭМ**, измерение тока потребления в различных режимах работы, определение порога регистрации ТЭ и тока ограничения источника питания ЭМ.
2. **Регистрация одиночного эффекта** – рост тока потребления выше порога регистрации ТЭ.
3. **Анализ одиночного эффекта**. Если ток ЭМ равен току ограничения источника питания ЭМ, то одиночный эффект классифицируется как ТЭ и выполняется парирование ТЭ. Если ток потребления ЭМ лежит в пределах от порога регистрации ТЭ до уровня ограничения тока источником питания ЭМ, то выполняется попытка сброса (переконфигурирования) ЭМ в исходное состояние. Далее, в зависимости от значения тока ЭМ после сброса выполняется парирование ТЭ, если ток потребления не вернулся в исходное значение, либо одиночный эффект классифицируется как ОС или ФС, если ток потребления вернулся в исходное состояние. Одиночный эффект класси-

цируется как ОС, если наблюдались ошибки в памяти (инверсия логического состояния) и как ФС, если нарушалось функционирование ЭМ.

4. **Парирование ТЭ.** Для сброса тока потребления ЭМ в исходное состояние выполняется кратковременное выключение питания и отключение оснастки (высокоимпедансное состояние) для функционального контроля от ЭМ. Если после подачи питания ток не восстанавливается, то выполняется повторное выключение питания на увеличенное время. Если последовательное увеличение времени выключения питания ЭМ не приводит к восстановлению тока или ток потребления отличается от изначального значения до испытаний, то одиночный эффект классифицируется как КО. Допускается проводить дальнейшее испытание ЭМ для набора статистики по ТЭ, ОС и ФС, при восстановлении функционирования.

Методика проведения функционального контроля ЭМ при испытаниях на дозовые и одиночные эффекты

Алгоритм методики формулируется следующим образом:

1. **Анализ состава ЭМ** и выделение ИС, отвечающих за функциональное назначение ЭМ. В многокристальных ЭМ, работающих по стандарту MIL-STD-1553, содержится несколько кристаллов (типовое значение от 3 до 5) и все они участвуют в функционировании ЭМ, т.е. выделить отдельные кристаллы, требующие более полного ФК нельзя. С другой стороны, процессорные и периферийные ЭМ, выполненные в формате РС/104, содержат большое количество ИС, напрямую не участвующих в функционировании ЭМ. Например, источники вторичного электропитания, ИС, используемые для прошивки ПЛИС по цепи JTAG и т.д. Проведение ФК этих ИС затруднено, а во многих случаях – невозможно, поэтому они исключаются из алгоритма проведения ФК.
2. **Выбор способа программирования** (получения доступа к внутренним ресурсам) и обмена информацией между ЭМ и оснасткой для проведения ФК. При этом для процессорных ЭМ выделяют следующие случаи:

2.1. ЭМ имеет встроенную видеоподсистему (применительно к процессорным ЭМ). В этом случае программирование ЭМ осуществляется напрямую, т.е. выполняется подключение периферийных устройств (монитора, клавиатуры, USB/CD-ROM), установка операционной системы (ОС), среды программирования и создание тестовой программы для ФК. В случае ограниченного объема ПЗУ ЭМ и отсутствия возможности напрямую разрабатывать тестовую программу, она создается на внешнем ПК и загружается в ЭМ.

2.2. Видеоподсистема отсутствует. В этом случае создание программы для тестирования осуществляется на внешнем ПК и загружается в ЭМ с помощью загрузочных средств по интерфейсам COM, Ethernet или другим.

Для остальных ЭМ можно выделить два случая:

2.3. ЭМ, предназначен для работы только в связке с процессорным ЭМ. В этом случае необходимо подключить исследуемый ЭМ к процессорному модулю. Все операции для доступа к ресурсам исследуемого ЭМ осуществляются через процессорный модуль. Для удобства программирования и отладки рекомендуется использовать процессорный модуль с видеоподсистемой, объемом ПЗУ и ОЗУ, достаточными для установки ОС (например, Linux, DOS или Windows) и среды разработки (например, BorlandC, TurboC, VisualStudio) тестирующей программы.

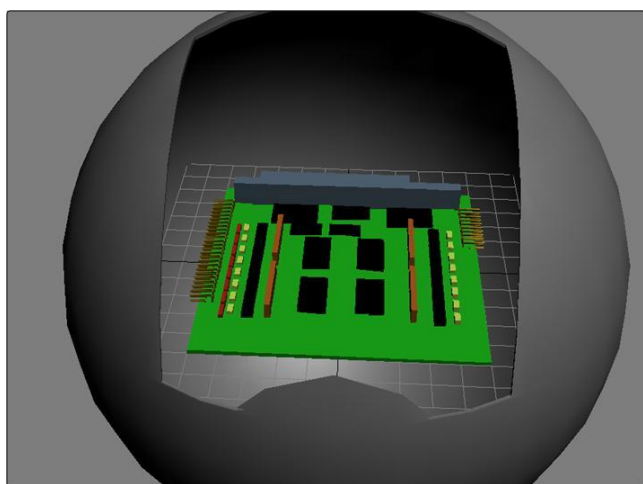
2.4. ЭМ выполнен в виде микросборки. В этом случае программирование и проведение ФК может быть реализовано с помощью аппаратно-программного комплекса, реализующего цифровой и/или аналоговый обмен информацией с ЭМ.

3. Создание программы для проведения ФК. Программа может быть реализована как запись тестирующего кода в память ЭМ или в виде исполняемого файла. Необходимо учитывать, что программа для ФК должна задействовать все ИС/кристаллы, отвечающие за функционирование ЭМ, определенные на первом этапе алгоритма. Если в состав ЭМ входят несколько однотипных ИС/кристаллов, то возможно проводить тестирование только одной

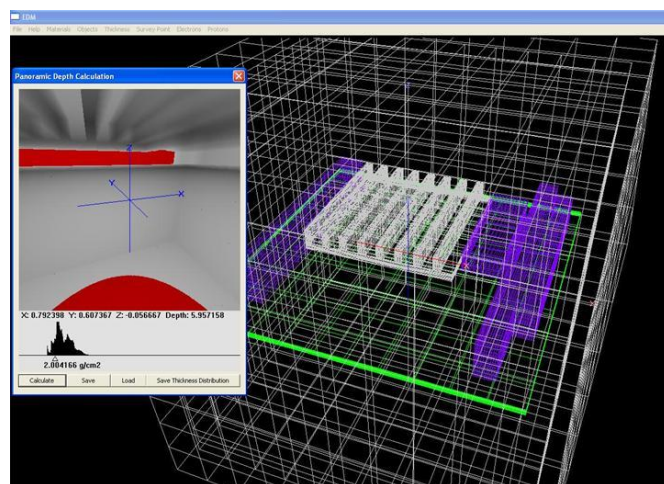
ИС/кристалла. Для обеспечения полноты и достоверности ФК необходимо обеспечить тестирование доступной памяти (ОЗУ, ПЗУ), выявляющее возможные одиночные и дозовые эффекты в памяти.

Глава три посвящена методам моделирования ЛДН, моделированию распределения ЛДН в ЭМ и определению ослабления электронного и протонного излучения специализированными корпусами ИС, входящими в состав ЭМ.

Для моделирования ЛДН в ЭМ, не содержащих специализированных защитных экранов и корпусов ИС (RAD-ПАК, Wallpack и т.д.), возможно применение метода секторного анализа и методов Монте-Карло (прямой и обратный). На рисунке 3.1 представлены упрощенные модели ЭМ при моделировании ЛДН секторным анализом в ПО 3D_Space (АО «ЭНПО СПЭЛС»). Секторный анализ позволяет оценить наименее защищенные направления для выбранной точки, в которой проводится расчет ЛДН ЭМ.



(а)



(б)

Рисунок 3.1 – 3D модель ЭМ (а) и поиск «слабых мест» в защите (б) в ПО 3D_Space

На рисунках 3.2 и 3.3 представлены распределения ЛДН для ЭМ при воздействии электронов и протонов, соответственно. Разница в ЛДН от электронов составляет до 6 раз, при воздействии протонов до 1,5 раз. При увеличении внешней защиты, распределение ЛДН в ЭМ от протонов становится практически однородным, но

распределение ЛДН от электронов может достигать нескольких раз, в зависимости от орбиты КА и структуры защиты.

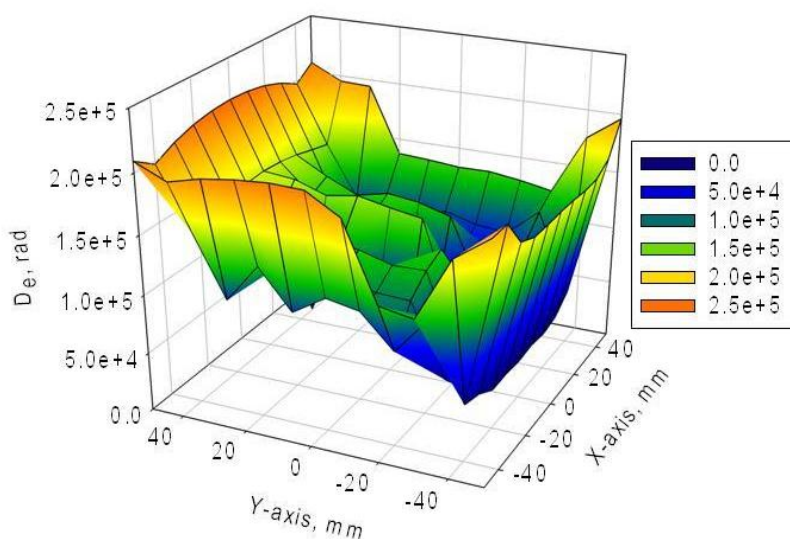


Рисунок 3.2 – Распределение ЛДН в ЭМ при воздействии электронов КП

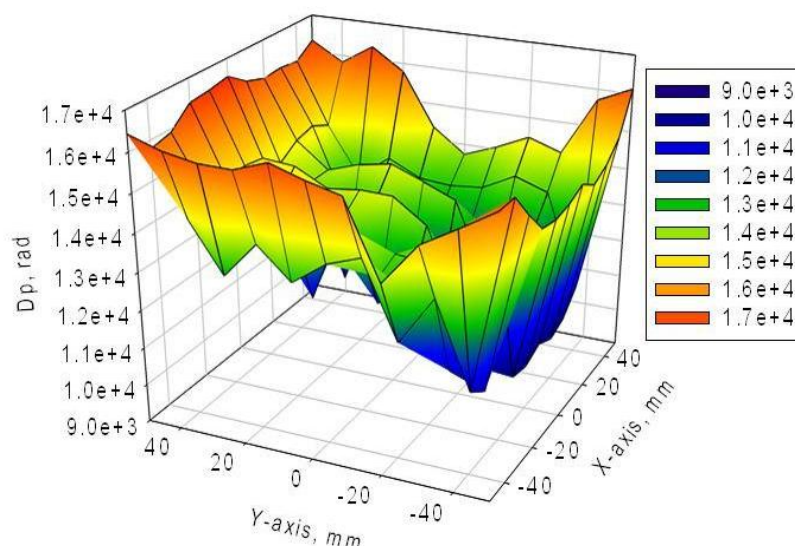


Рисунок 3.3 – Распределение ЛДН в ЭМ при воздействии протонов КП

Расчет ЛДН для ИС в специализированных корпусах, входящих в состав ЭМ, методом секторного анализа может приводить к большой погрешности расчетов (до нескольких раз), поэтому необходимо использовать либо прямой метод Монте-Карло (ПМК), либо обратный метод Монте-Карло (ОМК). Физические модели, заложенные в ПМК, наиболее полно описывают взаимодействие излучения (электроны, протоны, тормозное излучение) с веществом, но, в зависимости от выбранной

физической модели, результаты расчетов ЛДН могут отличаться. ПМК требует значительных затрат машинного времени, поэтому его можно применять для (а) упрощенных моделей ЭМ и моделей внешней защиты КА в виде сферы или параллелепипеда и (б) при проведении моделирования на суперкомпьютерах с учетом подробной трехмерной модели защиты КА и внутренней БА.

Для определения защитных свойств специализированных корпусов ИС в качестве типового выбран защитный экран (ЗЭ), состоящий из сплава вольфрама (85%) и меди (15%) толщиной 1.2 мм. Вольфрам широко применяется для ослабления ЛДН в КА, он входит в состав зарубежных и отечественных защитных корпусов и в состав отечественных эмалевых композиций. Выбранный сплав вольфрама и толщина защиты соответствуют типовым зарубежным корпусам RAD-ПАК™ и отечественным специализированным корпусам. На рисунке 3.4а представлена зависимость коэффициента ослабления ЛДН в зависимости от энергии электронов для ЗЭ. Коэффициент ослабления рассчитан ОМК в ПО Fastrad. В модели учтена внешняя алюминиевая защита $0,1 \text{ г/см}^2$. На рисунке 3.4б представлена зависимость коэффициента ослабления ЛДН в зависимости от энергии протонов для ЗЭ. Коэффициент ослабления рассчитан ПМК с помощью модуля MULASSIS (GEANT4).

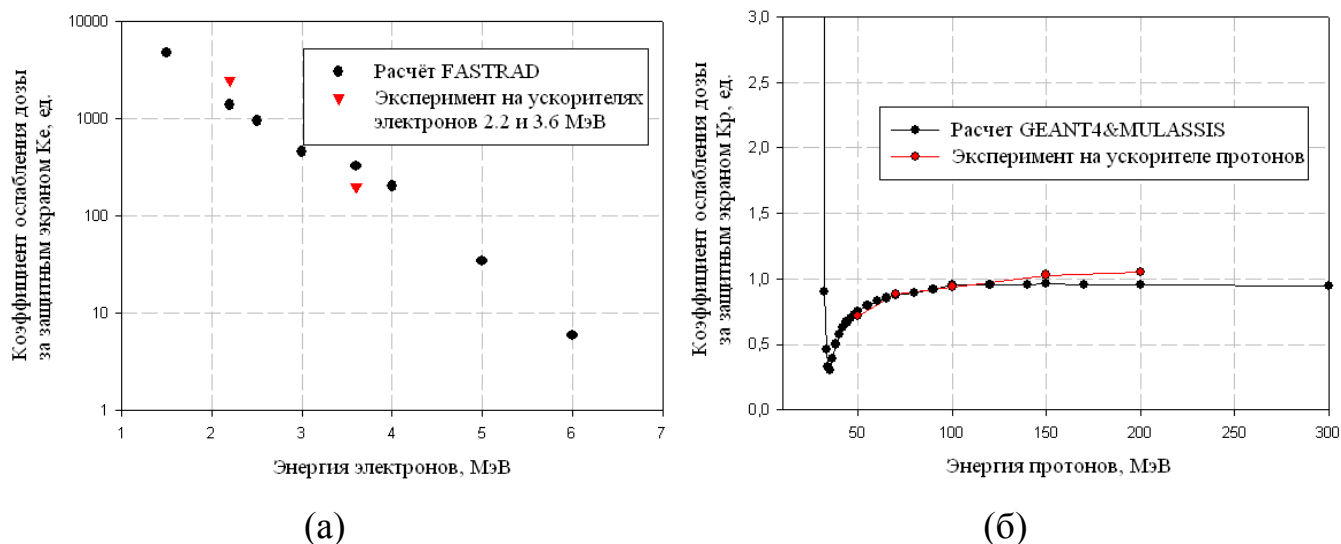


Рисунок 3.4 – Зависимость коэффициента ослабления дозы специализированным корпусом в зависимости от энергии частиц: (а) – электроны, расчет методом ОМК и эксперимент на ускорителях электронов 2.2 МэВ и 3.6 МэВ, (б) – протоны, расчет методом ПМК и эксперимент на ускорителе протонов 50-200 МэВ.

Литературные данные по сравнению расчетов ПМК и ОМК в ПО GRAS GEANT4, NOVICE и Fastrad, а также расчеты, проведенные автором, показывают, что данные, полученные ОМК и ПМК, совпадают в пределах погрешности расчетов ($\approx 30\%$). Использование ОМК и ПМК требует предварительных расчетов методом секторного анализа для исключения погрешности расчета, полученной вследствие плохой сходимости метода для данной трехмерной модели, условий эксплуатации КА или недостаточного набора статистики при моделировании ЛДН. При проведении расчетов ЛДН ОМК рекомендуется использовать такое число частиц для моделирования, чтобы погрешность расчета не превышала 5 %.

ОМК можно применять для расчетов ЛДН в ЭМ и КА за защитой для изотропного потока электронов. Сравнение расчетов ЛДН от протонов, полученных ПМК и методом секторного анализа, показывает равенство результатов в пределах погрешности, т.е. методы Монте-Карло для расчета ЛДН при воздействии протонов можно не применять.

В главе четыре приведено описание разработанного автором аппаратно-программного комплекса для автоматизации испытаний ЭМ на радиационную стойкость к воздействию ИИ КП и апробации предложенных подходов и методик. Приведены результаты анализа испытаний более 20 ЭМ.

Заключение. Основным результатом работы явилось развитие методов и средств расчетно-экспериментальной оценки стойкости электронных модулей к воздействию ИИ КП, обеспечивающие повышение производительности испытаний (до 2-3 раз) и достоверности их результатов путем выбора оптимального режима облучения и автоматизации испытаний. Проведено моделирование уровней ЛДН в ЭМ и показано, что разница в поглощенной дозе для разных ИС в ЭМ, может достигать нескольких раз. Разработанные методики и аппаратно-программные средства апробированы при испытаниях более 20 ЭМ.

Поставленная в работе цель по развитию методов и средств расчетно-экспериментальной оценки стойкости ЭМ к воздействию ИИ КП полностью достигнута.

Основные научные результаты работы:

1. Предложена методика оценки стойкости ЭМ к воздействию ИИ КП по одиночным радиационным эффектам, основанная на продольном облучении ЭМ в двух направлениях на ускорителях протонов для поиска наиболее чувствительных ИС, с последующим локальным облучением чувствительных ИС, позволяющая уменьшить трудозатраты и повысить достоверность результатов.
2. Разработана методика выявления отдельных видов одиночных эффектов (тиристорный эффект, функциональный сбой), основанная на последовательном сбросе (переконфигурации) ЭМ, отключении измерительной оснастки от ЭМ до парирования резкого возрастания тока в цепи питания при проведении испытаний ЭМ на стойкость к воздействию ОЯЧ КП.
3. Разработана методика оценки ЛДН ЭМ с ИС в специализированных корпусах, основанная на учете ослабления ИИ КП корпусом КА, отдельном вкладе протонов и электронов в формирование ЛДН, учете орбиты КА и моделировании ослабления ИИ КП методами Монте-Карло.

Основные практические результаты работы:

1. Разработаны аппаратно-программные средства, автоматизирующие проведение испытаний ЭМ к воздействию ИИ КП.
2. Проведены испытания более 20 типов современных ЭМ – отечественных и зарубежных, широкого функционального назначения.
3. Результаты диссертации вошли в отчетные материалы по составным частям ОКР (ММК-РВ, АСН-РМ-ИИКП, СРВ906-ТЗЧ, Двина-1621, Джип-57, Связь, Плата-Т, БИС-МВ-СВВ, Зеркало-2-СВВ, Интерфейс-6-СВВ, Модуляция-3Р), выполняемых в интересах Минобороны РФ, Росатома, Минпромторга и предприятий оборонного комплекса (ОАО ЦНИИ «Циклон», ЗАО «ПКК Миландр», ЗАО НТЦ «Модуль», НПП «ОПТЭКС», ОАО «РИРВ», ООО «ИРЗ ТЕСТ», ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс», ФГУП ВО «Радиоэкспорт»).
4. Разработанные научно-методическое обеспечение и аппаратно-программные средства внедрены в АО «ЭНПО СПЭЛС».

5. Результаты диссертации внедрены в АО «ЭНПО СПЭЛС» при радиационных испытаниях отечественных и зарубежных ИС, комплектующих бортовую аппаратуру, на стойкость к факторам космического пространства в аппаратуре изделий 14В120, 14Ф142, 14Р18, 14Ф137, 14Ф148, 14К035, 14Ф31, Луч-5В, 47КС.

Список основных работ, опубликованных по теме диссертации

1. Ахметов А.О., Малахов А.П., Рахимьянов А.С. Радиационные исследования высокоскоростных систем передачи данных // Радиационная стойкость электронных систем – Стойкость-2010. Научно-технический сборник. – М.: НИЯУ МИФИ, 2010. – С. 15, 16.
2. Ахметов А.О., Бобровский Д.В., Калашников О.А., Некрасов П.В. Оценка радиационной стойкости ПЛИС EPF10K50 ф. Altera с использованием методики независимого функционального контроля // Радиационная стойкость электронных систем – Стойкость-2010. Научно-технический сборник. – М.: НИЯУ МИФИ, 2010. – С. 31, 32.
3. Ахметов А.О., Бобровский Д.В., Калашников О.А., Некрасов П.В. Оценка радиационной стойкости микроконвертера ADUC841 ф. Analog Devices // Радиационная стойкость электронных систем – Стойкость-2010. Научно-технический сборник. – М.: НИЯУ МИФИ, 2010. – С. 39, 40.
4. Ахметов А.О., Бобровский Д.В., Калашников О.А., Некрасов П.В. Оценка надежности методов функционального контроля микропроцессорных СБИС // Радиационная стойкость электронных систем – Стойкость-2010. Научно-технический сборник. – М.: НИЯУ МИФИ, 2010. – С. 161, 162.
5. Ахметов А.О., Бобровский Д.В., Калашников О.А., Некрасов П.В. Метод выборочного функционального контроля микропроцессоров при проведении радиационных исследований // Радиационная стойкость электронных систем – Стойкость-2010. Научно-технический сборник. – М.: НИЯУ МИФИ, 2010. – С. 163, 164.
6. Ахметов А.О., Некрасов П.В., Каракозов А.Б., Смиренный А.А. Разработка модуля тестирования интерфейса внешней памяти МК при проведении радиационных исследований // Радиационная стойкость электронных систем – Стойкость-2010. Научно-технический сборник. – М.: НИЯУ МИФИ, 2010. – С. 239 – 241.
7. Ахметов А.О., Бобровский Д.В., Некрасов П.В. Система контроля работоспособности функционально сложных интегральных микросхем при проведении

- радиационных исследований // VII Курчатовская молодежная научная школа. Сборник аннотаций. – М.: РНЦ «Курчатовский институт», 2009. – С. 137.
8. Ахметов А.О. Анализ радиационной стойкости контроллеров мультиплексного канала связи по ГОСТ Р 52070-2003 (MIL-STD-1553A/B) отечественного и зарубежного производства // IX Межотраслевая конференция по радиационной стойкости. ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ» им. академ. Е.И. Забабахина, г. Снежинск, 2010.
 9. Ахметов А.О., Бобровский Д.В., Калашников О.А., Некрасов П.В.. Исследование одноплатных компьютеров на стойкость к воздействию ВЭП // Радиационная стойкость электронных систем – Стойкость-2011. Научно-технический сборник. – М.: НИЯУ МИФИ, 2011. – С. 34-36.
 10. **Ахметов А.О. Особенности исследования стойкости одноплатных компьютеров к воздействию отдельных ядерных частиц // Журнал «Спецтехника и связь» (входит в перечень ВАК), № 4-5. М.: 2011. – С. 21-25.**
 11. Ахметов А.О., Бобровский Д.В., Савченков Д.В.. Исследование катастрофических отказов ПЛИС семейства XC95000 при воздействии ТЗЧ // НАУЧНАЯ СЕССИЯ НИЯУ МИФИ-2012. Аннотации докладов. в 3 томах. Т.1. М.: НИЯУ МИФИ, 2012. – С. 102.
 12. **Ахметов А.О, Бобровский Д.В., Калашников О.А. и др. Методика испытаний цифровых интегральных схем на стойкость к воздействию отдельных ядерных частиц. // Известия Вузов. Электроника. (входит в перечень ВАК), № 5. М.: 2012. – С. 85-90.**
 13. А.О. Ахметов. Анализ стойкости процессорного модуля СРВ906 к воздействию высокоэнергетичных протонов // НАУЧНАЯ СЕССИЯ НИЯУ МИФИ-2013. Аннотации докладов. М.: НИЯУ МИФИ, 2013.
 14. A.O. Akhmetov, D.V. Boychenko, D.V. Bobrovsky, A.I. Chumakov, O.A. Kalashnikov, L.N. Kessarinskiy, A.Y. Nikiforov. The FASTRAD forward Monte Carlo module verification using extrapolated range of electrons. // The Proceedings of the MIDEM 2014 Conference. pp. 189-190.

15. D.V. Bobrovsky, G.S. Sorokoumov, A.A. Pechenkin, A.O. Akhmetov, P.V. Nekrasov. The method of SEL and SEFI separation in complex ICs. // The Proceedings of the MIDEM 2014 Conference, 2014, pp. 101-104.
16. **A.O. Akhmetov, D.V. Boychenko, D.V. Bobrovskiy, A.I. Chumakov, O.A. Kalashnikov, A.Y. Nikiforov, P.V. Nekrasov. System on module total ionizing dose distribution modeling // Proceedings of the International Conference on Microelectronics, ICM, art. no. 6842156, 2014, pp. 329-331. (входит в базу данных Scopus).**
17. A.O. Akhmetov, A.V. Yanenko, A.I. Bazhan, Proton accelerator with adjustable energy for ICs radiation test // Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS), 2013 14th European Conference, vol.1, no.3, pp. 23-27 Sept. 2013.