

Министерство образования и науки Российской
Федерации
Воронежской государственной технической
университет

Барabanов В.Ф., Пашковский М.Е., Подвальный С.Л.

**ОПЕРАТИВНАЯ ОЦЕНКА СТОЙКОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ
ИЗДЕЛИЙ К ЛОКАЛЬНЫМ РАДИАЦИОННЫМ ЭФФЕКТАМ**

Монография

Воронеж
«Научная книга»
2012

УДК
ББК

Рецензенты:

Зольников В.К., д-р. техн. наук, профессор (Воронежская государственная лесотехническая академия)

Бурковский В.Л., д-р. техн. наук, профессор (Воронежский государственный технический университет)

П 44 Барабанов, В.Ф. Оперативная оценка стойкости полупроводниковых изделий к локальным радиационным эффектам: Монография / **В.Ф. Барабанов, М. Е. Пашковский, С.Л. Подвальный** - Воронеж: «Научная книга», 2012. 137 с.

ISBN

В данной работе рассмотрены современные подходы к оперативной оценке характеристик сложных объектов на основе интегрированных баз данных. Представлено специальное программное обеспечение, позволяющее проводить оценку стойкости полупроводниковых изделий комплектующих бортовую аппаратуру к локальным радиационным эффектам при воздействии отдельных заряженных частиц космического пространства.

Предложена модульная структура программного обеспечения оценки локальных радиационных эффектов полупроводниковых изделий. Описана методика проведения расчёта стойкости полупроводниковых изделий от воздействующих заряженных частиц космического пространства, на примере виртуальной конфигурации блока бортовой аппаратуры. Приведён пример апробации расчётных значений стойкости полупроводниковых изделий от воздействующих заряженных частиц космического пространства по ряду отечественных и зарубежных изделий.

Издание предназначено для специалистов, научных работников и аспирантов в области разработки программных средств для моделирования и проектирования радиоэлектронных систем.

УДК
ББК

ISBN

© **В.Ф. Барабанов, М. Е. Пашковский, С.Л. Подвальный 2012**

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	6
Глава 1. Анализ построения современных систем для исследования сложных объектов с использованием интерактивных средств и интегрированных баз данных	8
1.1. Использование интерактивных средств и баз данных в интегрированных системах	8
1.2. Классификационные характеристики программных систем моделирования сложных объектов.....	9
1.2.1. Общие характеристики программных систем моделирования сложных объектов.....	10
1.2.2. Программные характеристики систем моделирования сложных объектов	11
1.2.3. Технические характеристики программных систем	13
1.2.4. Эргономические характеристики программных систем.....	13
1.3. Принципы проектирования интегрированной программной системы.....	13
1.4. Вопросы автоматизации процесса оценки стойкости бортовой аппаратуры к локальным радиационным эффектам от воздействующих заряженных частиц космического пространства.....	15
1.5. Локальные радиационные эффекты в изделиях полупроводниковой электроники от воздействия заряженных частиц космического пространства.....	18
1.6. Концепции моделирования локальных радиационных эффектов.....	27
1.7. Методы повышения радиационной стойкости изделий полупроводниковой электроники.....	29
Глава 2. Разработка математического обеспечения оперативной оценки характеристик сложного объекта.....	34
2.1. Разработка комплексной модели сложной радиоэлектронной системы в рамках интегрированных компьютерных технологий.....	34
2.2. Моделирование локальных радиационных эффектов в полупроводниковых изделиях	41
2.3. Математическое обеспечение оценки стойкости полупроводниковых изделий к локальным радиационным эффектам	44
2.3.1. Типовая модель оценки характеристик стойкости полупроводниковых изделий к воздействию заряженных частиц космического пространства.....	44
2.3.2. Разработка специализированной математической модели оценки стойкости полупроводниковых изделий к воздействию тяжёлых заряженных частиц космического пространства	45

2.3.3. Разработка специализированной математической модели оценки стойкости полупроводниковых изделий к воздействию высокоэнергетичных протонов космического пространства.....	50
Глава 3. Разработка интерактивной программной системы исследования сложных объектов.....	58
3.1. Разработка универсальной программной системы, настраиваемой на исследование различных объектов	58
3.2. Разработка программного обеспечения оценки характеристик сложного объекта	59
3.3. Синтез структуры интегрированной базы данных изделий	62
3.4. Инвариантная часть программного обеспечения оценки сложных объектов	66
3.4.1. Конвертация различных форматов файлов для интеграции систем.....	66
3.4.2. Разработка блок-схемы функционирования подсистемы «Интеграция проектов»	69
3.4.3. Разработка блок-схемы функционирования подсистемы «Справочная система»	72
3.4.4. Разработка подсистемы «Теоретическая справка».....	75
3.4.5. Разработка алгоритмов оптимизации выбора изделий и режима функционирования подсистемы «Оптимизация выбора изделий»	79
3.5. Специализированная часть программного обеспечения оценки сложных объектов.....	86
3.5.1. Разработка подсистемы «Оценка стойкости комплектующих полупроводниковых изделий к локальным радиационным эффектам при воздействии тяжёлых заряженных частиц»	86
3.5.2. Разработка подсистемы «Оценка стойкости комплектующих полупроводниковых изделий к локальным радиационным эффектам при воздействии высокоэнергетичных протонов»	90
3.5.3. Разработка блок-схемы работы подсистемы «Проверка на соответствие требованиям стойкости»	94
Глава 4. Программная реализация интерактивной системы оперативной оценки стойкости полупроводниковых изделий к локальным радиационным эффектам.....	97
4.1. Разработка графического интерфейса программного обеспечения на основе функциональной схемы взаимодействия подсистем	97
4.2. Графический интерфейс программного обеспечения оперативной оценки стойкости полупроводниковых изделий к локальным радиационным эффектам.....	101

4.2.1. Графический интерфейс «Главная графическая форма».....	101
4.2.2. Графический интерфейс «Справочная система»	102
4.2.3. Графический интерфейс подсистемы «Интеграция проектов».....	106
4.2.4. Графический интерфейс формы «Оценка стойкости полупроводниковых изделий при воздействии ТЗЧ»	108
4.2.5. Графический интерфейс формы «Оценка стойкости полупроводниковых изделий при воздействии ВЭП»	112
4.2.6. Графический интерфейс формы «Проверка на соответствие требованиям стойкости»	115
4.2.7. Графический интерфейс подсистемы «Теоретическая справка».....	120
4.2.8. Графический интерфейс подсистемы «Оптимизация выбора изделий».....	121
4.3. Методика проведения расчёта стойкости изделий полупроводниковой электроники от воздействующих заряженных частиц космического пространства.....	124
4.4. Аprobация расчётных значений стойкости изделий полупроводниковой электроники от воздействующих заряженных частиц космического пространства.....	127
Заключение	131
Список сокращений	132
Библиографический список.....	133

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Современный уровень информационных, программных и технических средств вычислительной техники позволяет разрабатывать системы различного назначения (для моделирования, проектирования, оперативной оценки параметров систем и т.д.), основанные на единых принципах организации систем, имеющих единое информационное пространство.

Наиболее эффективными для автоматизации различных видов деятельности являются постоянно развивающиеся интерактивные средства, обеспечивающие процессы моделирования, проектирования и анализа объектов в режиме диалога «человек-компьютер». В сложной системе, содержащей большое число разнообразных процедур обработки различных видов информации, база данных является её центральным узлом. Интегрированная база данных в современных системах, предназначенных для исследования сложных объектов, представляет собой совокупность различных видов данных, в том числе графических, и принципов их организации.

Зачастую при разработке сложных объектов возникает острая необходимость в оперативном определении характеристик объекта и оценки его наиболее критичных параметров. Ситуация усложняется отсутствием данных натурных испытаний и экспериментальных замеров характеристик объектов в связи с необходимостью непосредственного доступа к объекту.

Сложность комплексного математического моделирования и оценки различных характеристик сложных объектов заключается, как правило, в отсутствии единой программной среды моделирования и проектирования. Востребованные в настоящее время программные системы, осуществляющие, например, моделирование локальных радиационных эффектов и позволяющие проводить расчёты по оценке стойкости полупроводниковых изделий, комплектующих бортовую аппаратуру космических аппаратов, мало распространены и практически недоступны.

Таким образом, актуальность темы исследования обусловлена необходимостью разработки математических и программных средств интегрированных систем, позволяющих получать оперативные данные о характеристиках сложных объектов.

Содержание работы. Первая глава посвящена вопросам использования интерактивных средств и интегрированных баз данных в информационных технологиях. Представлены требования к разработке автоматизированных информационных систем, рассмотрены варианты использования интерактивных средств и интегрированных баз данных в системах моделирования, проектирования и анализа сложных объектов.

Во второй главе рассмотрены вопросы построения математического обеспечения оперативной оценки сложных объектов, которое определяется конкретной предметной областью. В рассматриваемой предметной области для систем расчёта стойкости полупроводниковых изделий к локальным радиационным эффектам разработана специализированная математическая модель, которая опирается на экспериментальные данные о стойкости изделий с различной технологией изготовления и данные о характеристиках потока заряженных частиц. В то же время математическое обеспечение в системе может меняться в зависимости от решаемой задачи.

В третьей главе приведена структурная модель универсальной программной системы исследования сложных объектов, настраиваемой на исследование и оценку различных объектов, отличающаяся наличием в составе инвариантной части и позволяющей проводить интеграцию внешних проектов и специализированной части, учитывающей специфику предметной области. В соответствии с моделью универсальной программной системы исследования сложных объектов, разработана структура программного обеспечения оценки характеристик сложного объекта. Дана обобщённая структура интегрированной базы данных. Рассмотрены вопросы конвертации форматов различных видов данных на основе разработанного алгоритма. Для разрабатываемого программного обеспечения в монографии определены состав, требования и решаемые задачи.

В четвёртой главе рассмотрена программная реализация интерактивного программного комплекса оперативной оценки стойкости полупроводниковых изделий к локальным радиационным эффектам. В данной главе затронуты основные вопросы технической реализации проекта и работы с ним. Приведена методика оперативного расчёта характеристик стойкости полупроводниковых изделий к локальным радиационным эффектам при воздействии отдельных заряженных частиц космического пространства на основе виртуального блока аппаратуры, включающего чувствительные полупроводниковые изделия.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ПОСТРОЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНТЕРАКТИВНЫХ СРЕДСТВ И ИНТЕГРИРОВАННЫХ ДАННЫХ

1.1. Использование интерактивных средств и баз данных в интегрированных системах

Современный уровень программных, информационных и технических средств вычислительной техники позволяет разрабатывать системы различного назначения и сложности для задач моделирования, проектирования, оперативной оценки параметров систем и т.д. При оценке характеристик сложных объектов важное значение имеет задача автоматизации процесса подготовки, сбора, хранения, систематизации, передачи и обработки больших объемов информации, основанная на единых принципах организации систем, имеющих единое информационное пространство.

Наиболее эффективными для автоматизации различных видов деятельности являются постоянно развивающиеся интерактивные средства, обеспечивающие процессы моделирования, проектирования и анализа объектов в режиме диалога «человек-компьютер». В сложной системе с большим числом разнообразных процедур хранения и обработки информации, база данных является её центральным узлом. Интегрированная база данных в современных системах, предназначенных для исследования сложных объектов, представляет собой совокупность различных видов данных и принципов их организации.

Современные автоматизированные информационные системы с использованием интерактивного режима работы и графических баз данных могут иметь различное назначение (для моделирования, проектирования, управления технологическими процессами и т. д.) [7 - 11].

При этом различные системы могут быть представлены в виде набора технических средств (современного ПК), программных средств (графический редактор, справочно – информационная система, система обмена данными и др.) и информационных средств (справочная информация, нормативная информация, графические базы данных и др.).

Варианты возможного построения интерактивных систем с использованием графических баз данных представлены на рис. 1.1.

В зависимости от назначения, использования интерактивных средств и баз данных, интерактивные системы с использованием БД могут быть представлены в виде:

- автоматизированной информационной системы оценки характеристик объекта;
- автоматизированной информационной системы подготовки

информации;

- интерактивной системы моделирования сложных процессов;
- системы интерактивного графического моделирования;
- интерактивной информационно – управляющей системы;
- интерактивной системы контроля объекта и др.

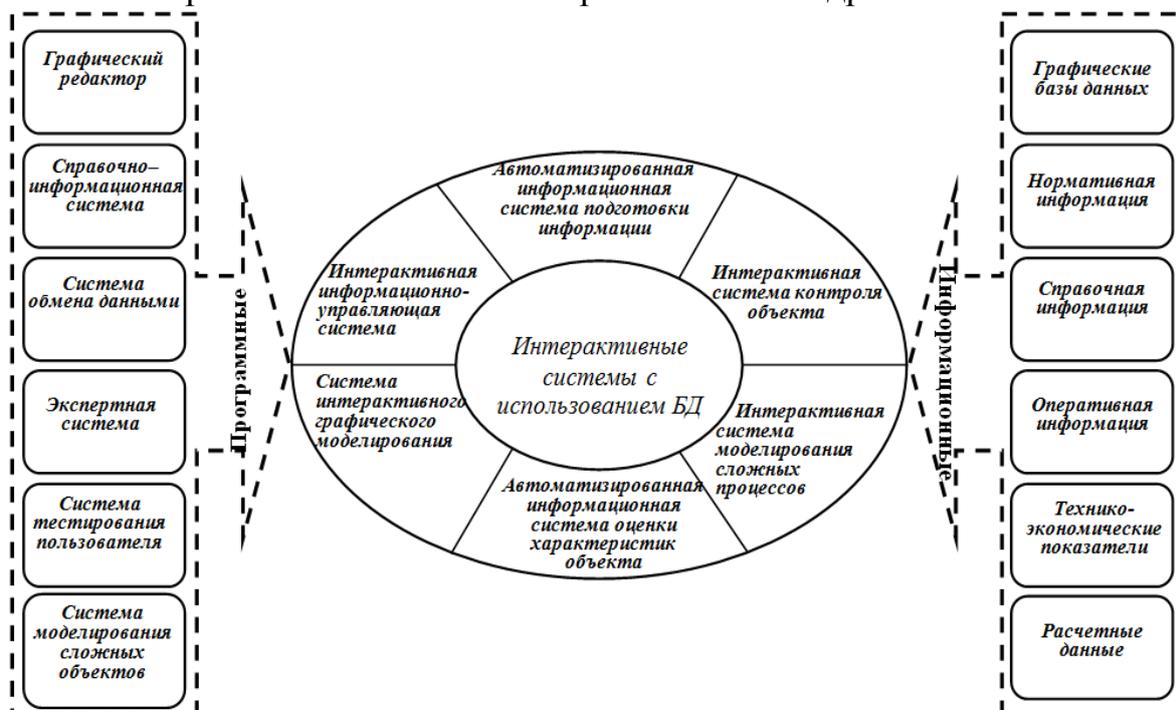


Рис.1.1. Варианты возможного построения интерактивных систем с использованием базы данных

1.2. Классификационные характеристики программных систем моделирования сложных объектов

Для проведения классификации программных систем моделирования сложных объектов необходимо рассматривать их как неразрывную связку «пользователи – технические средства – ПО проектирования» [27, 36, 37]. Классификационные характеристики систем можно разбить на следующие группы рис. 1.2:

1. Общие характеристики, определяющие взаимодействие программных систем как единого целого.

2. Программные характеристики - разделяют системы по отдельным особенностям программных решений.

3. Технические характеристики, определяющие особенности используемых средств вычислительной техники и периферийного оборудования.

4. Эргономические характеристики, оценивающие эффективность взаимодействия пользователя с программно-техническими средствами.



Рис. 1.2. Характеристики программных систем моделирования сложных объектов

1.2.1. Общие характеристики программных систем моделирования сложных объектов

Общие характеристики различаются по способу организации информационных потоков:

- индивидуальные автоматизированные рабочие места - системы подобного класса создаются на базе отдельных рабочих станций или ПК.

- распределенная многоуровневая система - системы, объединенные в локальную сеть с несколькими рабочими станциями или ПК.

- интегрированная многоуровневая система - системы, предназначенные для моделирования и оценки характеристик сложных объектов и изделий. Современные программные системы моделирования имеют все средства для организации параллельно-агрегатного инжиниринга, позволяющего управлять работой как отдельных исполнителей, работающих в рамках одного проекта, так и работой целых отделов, решающих совершенно разные задачи.

- интегрированная система управления предприятием - системы, управляющие всем комплексом задач функционирования предприятия как единого целого. Программные системы моделирования и оценки характеристик сложных объектов в этом случае входят как отдельные структурные элементы автоматизированной системы управления предприятием.

1.2.2. Программные характеристики систем моделирования сложных объектов

Программные характеристики систем различаются по специализации программных средств:

- узкоспециализированные утилиты - предназначены, например, для быстрого просмотра файлов моделей и чертежей или для преобразования файлов из одного формата в другой;

- специализированные системы - позволяют автоматизировать комплекс задач, связанных с достаточно узкой областью решаемых задач;

- универсальные системы – обеспечивают реализацию процессов широкого профиля;

- комплексные системы - предназначены для решения проблем моделирования и оценки сложных объектов;

По способу организации внутренней структуры программные системы делятся на следующие.

Нерасширяемые системы - используют стандартный набор взаимосвязанных модулей, реализующий все основные функции системы; изменение функциональных возможностей системы требует, как правило, модификации исходного программного кода и перекомпиляции системы.

Масштабируемые модульные системы включают:

- формируемые вокруг базового ядра. Ядро таких систем включает все требуемые базовые средства построения двухмерной и трехмерной графики, средства диалога с пользователем, базу данных графической информации и позволяют компоновать специализированные системы на базе свободно подключаемых модулей, учитывающих специфику работ пользователя. Большинство современных систем построено именно по этому принципу;

- горизонтально расширяемые системы. Интегрирующим ядром таких систем является диспетчер пользовательской среды, организующий доступ к внешним приложениям и обмен данными с внешними системами; объектно-ориентированная структура данных и стандартизованный их обмен между приложениями позволяет максимально децентрализовать процесс проектирования и упростить подключение специализированных модулей. Такой подход в настоящее время считается одним из наиболее перспективных.

По возможности функционального расширения системы пользователем:

- закрытые системы - не имеют средств индивидуальной настройки и возможности расширения системы пользователем;

- системы с настраиваемой системой интерфейса пользователем - обладают возможностью подстройки системы меню, создания диалоговых окон для создания среды, удобной пользователю;

- системы с пакетной обработкой команд - имеют возможность выполнения последовательности команд системы, сформированных в текстовом пакетном файле, созданном внешней программой; примером могут служить script-файлы системы AutoCAD фирмы AutoDesk, позволяющие задавать последовательность команд построения графических примитивов с соответствующими им числовыми параметрами;

- системы со встроенным макроязыком и библиотекой функций - обладают средствами для записи макрокоманд или создания новых функций пользователя, позволяющих автоматизировать специфические конструкторские операции; система AutoCAD, например, имеет встроенный язык VisualLISP;

- системы с возможностью подключения внешних модулей - позволяют подключать модули пользователя, написанные на языках высокого уровня, что значительно увеличивает потенциальные возможности расширения системы;

- инструменты разработчика программных систем - дают возможность, используя набор стандартных библиотек функций, создавать свои собственные приложения; инструменты могут включать как отдельные библиотеки функций для работы с графическими объектами, так и целые интегрированные объектно-ориентированные инструментальные системы.

Современные программные системы моделирования сложных объектов в том или ином виде включают практически весь набор (за исключением инструментов разработчика) средств индивидуальной настройки и возможности расширения систем пользователем.

По возможности обмена информацией подразделяются на:

- замкнутые системы - сохраняют данные в своем собственном внутреннем формате и не позволяют обмениваться информацией с другими системами;

- системы с текстовыми файлами обмена информацией - сохраняют и считывают информацию об отдельных геометрических примитивах в виде массивов цифр, разделенных пробелами или запятыми;

- системы со стандартными средствами обмена информацией - позволяют сохранять и считывать полную информацию о созданных моделях объектов в специальном текстовом или двоичном формате, описывающем все объекты модели в специальных терминах описания графических примитивов с соответствующими им числовыми значениями; в качестве примера можно привести файл обмена информацией (Data Exchange Format) DXF системы AutoCAD, ставший стандартом de facto для ПК; наиболее распространенными другими стандартами являются STEP, IGES, CADL, AME и некоторые другие.

По методам моделирования и оценки рассматриваемых объектов:

- без специальных методов - в этом случае основные параметры рассматриваемых конструкций определяются вне системы традиционными методами;

- проверочные расчеты с использованием специализированных методов;

- специализированные подсистемы моделирования - дают возможность анализировать поведение весьма специфических процессов.

1.2.3. Технические характеристики программных систем

По используемым средствам вычислительной техники:

- персональные компьютеры на базе процессоров Intel и AMD;

- рабочие станции на базе разнообразных архитектур (RISC, SPARC, MIPS, PowerPC, и т.д.) различных производителей (SUN, Silicon Graphics, Digital, Hewlett-Packard, IBM и др.);

- миниЭВМ (DEC, VAX, CM);

По способу объединения технических средств:

- автономные рабочие станции;

- многотерминальные ЭВМ;

- одноранговая локальная сеть;

- локальная сеть с выделенным сервером;

- гетерогенная сеть со сложной структурой.

1.2.4. Эргономические характеристики программных систем

По способу организации диалога системы с пользователем:

- с помощью командной строки;

- с помощью системы иерархических меню и диалоговых окон;

- с помощью объектно-ориентированного интерфейса и мультимедийной системы помощи.

По удобству диалога системы с пользователем:

- с интуитивно простым и удобным пользовательским интерфейсом;

- со сложным и неудобным пользовательским интерфейсом.

По поддержке трехмерного моделирования:

- двумерные системы;

- трехмерные системы.

1.3. Принципы проектирования интегрированной программной системы

С научно-технической точки зрения проблема создания интегрированной программной системы сводится к решению следующих четырех задач: разработка методики моделирования и оценки сложного

объекта; разработка прикладного математического обеспечения; выбор технических средств проектирования; создание организационно-технического обеспечения.

Опыт разработки систем позволяет сформулировать требования к современным программным системам с человеко-машинным интерфейсом:

- производительность;
- инвариантность структуры к изменению средств, методов моделирования и оценки сложных объектов;
- совместимость ручного, автоматизированного и автоматического моделирования;
- разнообразие режимов взаимодействия пользователя с программной средой (интерактивный, мультипрограммный);
- адаптивность, т. е. возможность быстрой перестройки прикладного программного обеспечения на новый объект моделирования;
- независимость ввода в действие и эксплуатацию отдельных подсистем;
- информационная согласованность подсистем для различных этапов моделирования процесса;
- разнообразие форм представления выходной документации;
- высокая надежность и приемлемая стоимость.

Перечисленные требования могут быть удовлетворены, если при создании программной системы учтены следующие характеристики.

Комплексность, т.е. возможность решения задач по одному циклу проектирования технологического процесса (от составления ТЗ до получения информации на машинных носителях).

Совместимость автоматического, автоматизированного и традиционного моделирования поведения сложных объектов (в общем цикле оценки характеристик сложных объектов имеются формализуемые, плохо формализуемые и неформализуемые задачи).

Наличие единых баз данных.

Модульность, которая позволяет реализовывать отдельные подсистемы в виде функционально самостоятельных модулей с последующей их заменой другими модулями по мере развития и совершенствования технических средств программного и информационного обеспечения и вариаций решаемых программным обеспечением задач.

Открытость, т.е. система должна быть построена таким образом, что добавление новых подсистем, отдельных программ сводится к локальной модификации отдельных блоков и не приводит к необходимости изменять способы организации управления, описания и обработки информации.

При моделировании поведения и оценке характеристик сложных объектов используется, прежде всего, принцип декомпозиции — разбиение сложной задачи на более простые. Математическое применение принципа

декомпозиции позволяет свести одну задачу большой размерности (по числу уравнений в системе, числу переменных и т.д.) к нескольким задачам меньшей размерности, благодаря чему решить задачу можно имеющимися техническими средствами и в разумные сроки. Декомпозиция оцениваемого объекта приводит к иерархическому принципу проектирования по этапам. Чем сложнее проектируемый объект, тем больше уровней иерархии.

Унификация задач и составляющих частей объектов моделирования позволяет упростить сам процесс и представить информацию, хранящуюся в базе данных более компактно. Моделируемые объекты должны быть максимально унифицированы (иметь минимально возможную номенклатуру). Основная цель унификации — уменьшение количества вновь разрабатываемых элементов и подсистем программного обеспечения.

Результатом работы интерактивной программной системы моделирования и оценки характеристик сложных объектов может быть подготовка документации, включающей:

- графические описания сложного объекта, модели поведения объекта, принципиальные схемы функциональных блоков, характеристики функциональных блоков и компонентов, таблицы параметров компонентов;

- графические документы (планы, разрезы, эскизы);

- текстовые и графические документы на машинных носителях.

1.4. Вопросы автоматизации процесса оценки стойкости бортовой аппаратуры к локальным радиационным эффектам от воздействующих заряженных частиц космического пространства

В ходе проводимого анализа проблем моделирования локальных радиационных эффектов от заряженных частиц космического пространства и проблем автоматизации процесса оценки стойкости бортовой аппаратуры к единичным эффектам от воздействующих заряженных частиц космического пространства был определен перечень вопросов подлежащих рассмотрению:

- определение специфики построения специализированного программного обеспечения;

- проблемы и задачи при проведении оперативной оценки стойкости полупроводниковых изделий при воздействии ЗЧ КП;

- определение основных математических методов и подходов при определении характеристик стойкости полупроводниковых изделий к локальным радиационным эффектам при воздействии отдельных ЗЧ КП;

- поиск программных средств по оценке стойкости бортовой аппаратуры к локальным радиационным эффектам от воздействующих заряженных частиц космического пространства;

- сравнение найденного программного обеспечения и описание его функциональных возможностей;

Комплексный анализ вопросов автоматизации процесса оценки характеристик стойкости бортовой аппаратуры космических аппаратов при воздействии отдельных тяжёлых заряженных частиц и высокоэнергетичных протонов космического пространства, показал недостаточную освещённость и отсутствие информации по готовым программным решениям в области оценки стойкости ИПЭ к воздействующим отдельным ЗЧ КП у разработчика аппаратуры специального назначения. Чуть лучше обстоят дела при использовании программных систем для анализа и прогнозирования радиационной стойкости изделий микроэлектроники на основе комплексного развития методов и средств расчетно-экспериментального моделирования.

Одним из примеров программных многофункциональных комплексов с возможностью оценки характеристик стойкости отдельных ИПЭ является программное обеспечение для обработки результатов испытаний «ОСОТ» (одиночные сбои и отказы), разработанное ОАО «Научно-исследовательский институт космического приборостроения» [58]. Программное обеспечение предназначено для расчёта норм испытаний ЭКБ на стойкость к ИИ КП, расчёта проявлений ОЭ (одиночных эффектов) под воздействием ВЭП и ТЗЧ ЕРПЗ, ГКЛ и СКЛ и моделирования полей ИИ КП на произвольной орбите. Для оценки сечения сбоя $\sigma(L)$ используется формула Вейбулла согласно рекомендации РД134-0174. Целью обработки результатов испытаний является извлечение по дискретным экспериментальным данным $\sigma(L)$ параметров: сечения насыщения, пороговое ЛПЭ и коэффициентов аппроксимации функции Вейбулла.

ОСОТ позволяет определить спектры ЛПЭ и энергетические спектры ВЭП для 4-х различных орбит за защитой 0,5; 1; 3; 10 г/см²:

1. геостационарной (ГСО) $H \approx 40000$ км;
2. МКС $H \approx 450$ км;
3. ГЛОНАСС;
4. «Молния»;

К основным преимуществам ПО ОСОТ можно отнести:

- носит универсальный характер, по принципу - всё в одном;

- имеет развитый инструментарий обработки экспериментальных данных;

- даёт возможность оценки влияния интегральных (дозовых) эффектов.

К основным недостаткам ПО относятся:

- недоступность ПО для разработчика специальной аппаратуры (работа с комплексом осуществляется «на стороне» правообладателя);
- слабая приспособленность для нужд разработчика специальной аппаратуры;
- отсутствие в ПО предпосылок автоматизации процесса разработки специальной аппаратуры и интеграции со средствами автоматизированного проектирования;
- в комплекс не включен модуль, содержащий справочную информацию по ИПЭ;
- плохая приспособленность к проведению оперативного расчёта;
- невозможность оценки стойкости конфигурации блока в целом;
- неясен используемый математический аппарат.

Программный пакет COSRAD имеет Web интерфейс и ориентирован, в основном, на иностранного пользователя, не приспособлен к специфике российских ГОСТ и требований.

Таким образом, можно говорить о недостаточной освещённости вопроса проведения оперативной оценки локальных радиационных эффектов и актуальности проблемы создания программных средств автоматизации оценки стойкости изделий полупроводниковой электроники к воздействию отдельных заряженных частиц космического пространства. Решением задачи является разработка программного комплекса по оценке стойкости бортовой аппаратуры на основе математической модели, реализованной в составе программных алгоритмов. Используемая модель должна учитывать информацию о технологии производства ИПЭ, топологических размерах чувствительных элементов, критических электрических параметрах изделий полупроводниковой электроники.

В результате этого наметился ряд задач для исследования:

- рассмотрение существующих концепций моделирования локальных радиационных эффектов и возможности применения существующих подходов при разработке программного комплекса;
- рассмотреть возможность оптимизации математических методов и модели проведения расчётов по оценке стойкости изделий полупроводниковой электроники, оценка эффективности приведённых допущений на соответствие заданным критериям точности;
- при невозможности применения существующего математического аппарата необходима разработка математической модели и методов проведения расчётов по оценке стойкости изделий полупроводниковой электроники к воздействию отдельных заряженных частиц космического пространства;
- разработка структуры и алгоритма программного комплекса по оценке характеристик стойкости полупроводниковых изделий и бортовой аппаратуры космических аппаратов при воздействии отдельных тяжёлых заряженных частиц и высокоэнергетичных протонов космического

пространства; определение состава функциональных подсистем и решаемых ими задач;

- реализация программного комплекса определения характеристик стойкости полупроводниковых изделий, комплектующих аппаратуру к локальным радиационным эффектам при воздействии отдельных заряженных частиц космического пространства. Рассмотрение вопросов обеспечения работы с разработанным программным обеспечением.

В итоге, разрабатываемый программный комплекс призван восполнить существующий пробел в программных средствах автоматизации оценки стойкости аппаратуры специального назначения и проверки конфигурации блока на соответствие заданным требованиям стойкости, к локальным радиационным эффектам при воздействии ЗЧ КП.

1.5. Локальные радиационные эффекты в изделиях полупроводниковой электроники от воздействия заряженных частиц космического пространства

При решении задач разработки бортовой аппаратуры космических аппаратов, предназначенных для активного функционирования в условиях воздействия ионизирующих излучений космического пространства (ИИ КП) в течении длительного времени (до десятков лет) [1, 3, 18, 30], приходится учитывать не только эффекты радиационной деградации параметров изделий электронной техники в процессе накопления поглощенной дозы, но и случайные эффекты от воздействия отдельных заряженных частиц, обладающих высокой энергией [44].

Под радиационным эффектом понимают явление, состоящее в изменении параметров, характеристик и свойств объекта в результате воздействия ионизирующего излучения (ИИ).

Локальные радиационные эффекты от отдельных высокоэнергетичных протонов (ВЭП) и тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) космического пространства обусловлены попаданием отдельных заряженных частиц в кристалл сложных изделий полупроводниковой электроники (микропроцессоров, микроконтроллеров, ПЛИС, ОЗУ, ФЛЭШ) [18] и возникают вследствие больших локальных потерь энергии в чувствительных объемах полупроводниковых структур от первичных или вторичных отдельных ядерных частиц (ОЯЧ). На характер реакции изделий полупроводниковой электроники оказывают влияние линейные потери энергии (ЛПЭ) ядерной частицы, флуктуации энерговыделения от отдельной ЗЧ, геометрические параметры (траектория трека частицы внутри микрообъема) и т.п.

При изучении локальных радиационных эффектов, возникающих при воздействии отдельных заряженных частиц космического пространства на бортовую аппаратуру космических аппаратов и,

соответственно, комплектующие её изделия полупроводниковой электроники (ИПЭ), под заряженными частицами космического пространства принято понимать [3, 39]:

- тяжёлые заряженные частицы (ТЗЧ) галактических и солнечных лучей (ГКЛ и СКЛ), представляющие собой ионы химических элементов с атомными номерами $Z \geq 2$;

- высокоэнергетичные протоны (ВЭП) естественных радиационных поясов земли (ЕРПЗ) и протоны ГКЛ, СКЛ.

При воздействии ТЗЧ избыточный заряд образуется вследствие генерации электронно-дырочных пар вдоль трека частицы и возникает так называемая первичная ионизация.

При воздействии ВЭП избыточный заряд образуется за счёт генерации электронно-дырочных пар вторичными ядрами, которые образуются в результате рассеяния протонов на ядрах материалов полупроводниковой структуры кремния (Si). Рассеяние происходит путём ядерных реакций и упругого взаимодействия.

Различают следующие виды ионизирующих излучений (ИИ) КП [1, 14]:

- галактическое космическое излучение (ГКЛ), возникающее за пределами нашей солнечной системы, это относительно устойчивые потоки частиц, обладающие высокими значениями энергий, которые могут воздействовать на космические аппараты (КА) в межзвездном и околоземном пространствах. Отличительная особенность ГКЛ - очень высокая энергия частиц, поток частиц ГКЛ относительно стабилен, небольшие его колебания возникают вследствие вариаций межпланетного магнитного поля;

- солнечное космическое излучение (СКЛ) – потоки протонов, α -частиц и более тяжёлых ядер вплоть до ядер железа (Fe) с меньшими по сравнению с галактическим излучением энергиями, но со значительно большей плотностью потока. Потоки СКЛ наблюдаются только в период солнечной активности и могут продолжаться до 4 суток;

- излучения естественных радиационных поясов (ЕРПЗ) существуют в области околоземного космического пространства и представляют интенсивные потоки элементарных частиц — электронов и протонов, обладающих высокой кинетической энергией. Своим существованием эти пояса обязаны наличию у Земли магнитного поля.

Характеристики ВЭП и ТЗЧ космического пространства в нормативных документах на разработку бортовой аппаратуры космических аппаратов и обеспечения её сбое- и отказоустойчивости для заданной орбиты, в зависимости от защищённости ИПЭ в составе космического аппарата, даются в виде:

- дифференциальных и интегральных энергетических спектров плотности потока ВЭП ЕРПЗ, ГКЛ, СКЛ;

- дифференциальных и интегральных спектров линейной потери энергии (ЛПЭ) потока ТЗЧ ГКЛ и СКИ;

Спектры ВЭП и ТЗЧ рассматривают по моделям принятым в ОСТ 134-1044-2007.

Локальные радиационные эффекты обусловлены большим выделением энергии в микрообъёме чувствительной полупроводниковой структуры ИПЭ при попадании в него отдельной ЗЧ. Анализ локальных радиационных эффектов основан на зарядовой (энергетической) модели. Возникновение эффекта от отдельной заряженной частицы возможно, если генерированный ею избыточный заряд в чувствительном объёме $V_{\text{сб}}$ элемента ИПЭ превышает некоторую критическую величину $Q_{\text{кр}}$.

Различают два механизма генерации избыточного заряда:

- за счёт первичных ионизационных потерь заряженных частиц;
- за счёт ионизационных потерь энергии вторичными ядерными частицами, в роли которых могут выступать продукты ядерных реакций или первично-смещённые ядра.

При воздействии ТЗЧ заряд Q образуется за счёт процесса ионизации вдоль трека частицы – первичная ионизация рис. 1.3.а. В этом случае можно считать, что суммарный генерируемый заряд есть произведение ЛПЭ на отрезок траектории ТЗЧ внутри чувствительного объёма. Вследствие разных длин отрезков путей, даже при однонаправленном потоке ТЗЧ с одинаковыми значениями энергии ЛПЭ генерируемого заряда будет непостоянно. При условии, что $E_{\text{п}}$ - пороговая энергия, выделенная в чувствительном объёме и соответствующая заряду $Q_{\text{кр}}$, граничным условием возможного эффекта является выполнение неравенств:

$$(dE/dx)_i X_{ak} \geq E_{\text{п}}, \text{ \AA} \quad ; \quad (1.1)$$

$$E \geq E_{\text{п}} = 22,5Q_{\text{кр}}, \text{ \AA} \quad ;$$

$$(dE/dx)_i X_{ak} = 22,5Q_{\text{кр}}, \text{ \AA} \quad . \quad (1.2)$$

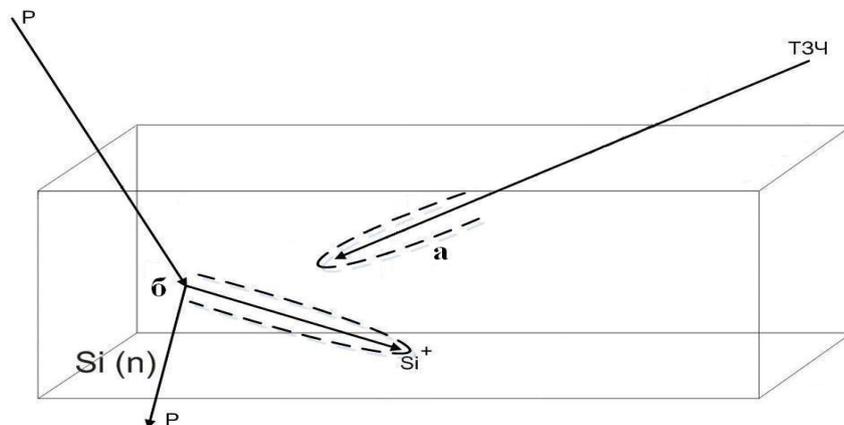


Рис. 1.3. Изображение первичных потерь и потерь от вторичных частиц

На рис. 1.3.б схематично показана генерация локального заряда, вызванная взаимодействием ВЭП с атомом полупроводникового кристалла и последующим возникновением продуктов рассеяния протонов на атомах кремния за счёт ядерных реакций внутри или рядом с чувствительным объёмом кремния. При воздействии ВЭП генерация заряда осуществляется, в основном, вторичными ядерными частицами, а именно ядрами кремния (Si), смещёнными из узлов кристаллической решетки при упругом рассеянии протонов, а также вторичными частицами, такими как ионы кремния, образующимися в результате ядерных реакций различных видов:

${}_{14}^{28}S_i(p, p){}_{14}^{28}S_i$ - упругое рассеяние;

${}_{14}^{28}S_i(p, p'){}_{14}^{28}S_i$ - неупругое рассеяние;

${}_{14}^{28}S_i(p, n){}_{15}^{28}P$; ${}_{14}^{28}S_i(p, {}_6^{12}C){}_8^{12}O$; и др.

Могут образовываться и ядра отдачи с $Z = 15$.

Данный процесс можно рассматривать как внутренний источник ТЗЧ.

Существует большое разнообразие различных видов локальных эффектов, возникающих при случайных воздействиях ядерных частиц (рис. 1.4) [16, 18, 55, 56]. Среди них наиболее изучены на сегодняшний день следующие эффекты:

- одиночный сбой (SEU), проявляющийся в инверсии логического состояния ячеек памяти или триггеров;

- многократные сбои (MBU), проявляющиеся в инверсии логического состояния нескольких соседних ячеек памяти или триггеров;

- функциональное прерывание (SEFI) – проявляется в инверсии логического состояния ячейки памяти или триггера управления, приводящая к нарушению хода выполнения программы. Характерно для микроконтроллеров, ПЛИС и ПЗС-матриц;

- кратковременный одиночный сбой (SED), проявляется в кратковременном изменении информации в ячейке памяти;

- «иголка» (SET), проявляется в кратковременном импульсе на выходе элементов ИС;

- отказы отдельных пикселей ПЗС-матрицы (SPIKEs), проявляются в потере информации в отдельной ячейке ПЗС-матрицы;

- «прокол» диэлектрика (SEGR), вызывает образование долговременно проводящих каналов или пробой подзатворного диэлектрика вдоль трека ядерной частицы;

- вторичный пробой (SEB), вторичный пробой p-n перехода, приводящий к его разрушению;

- шунтирование (SESH), приводит к образованию сквозного проводящего канала в многослойных структурах;

- защелкивание (SEL), приводит к включению паразитной четырехслойной p-n-p-n структуры, вследствие чего происходит резкое увеличение тока в цепи питания, носит название тиристорного эффекта.

Самым распространенным локальным радиационным эффектом является одиночный сбой. Одиночный сбой (сокращённое обозначение ОС или SEU) переключения может наблюдаться как в элементах памяти, так и стандартных схмотехнических элементах. ОС приводит к изменению состояния логического элемента и является наиболее распространённым видом локальных эффектов. Одиночные сбои в цифровых ИС проявляются в инверсии логического состояния хотя бы одного элемента схемы, а в аналоговых интегральных схемах – в виде кратковременных импульсных сигналов («иглоки»). Одиночные сбои являются обратимыми и могут быть восстановлены при перезаписи информации в последующем цикле команд, а также с помощью специальных алгоритмических методов.

Локальные радиационные эффекты в изделиях полупроводниковой электроники могут проявляться в виде катастрофических отказов и сбоев.

Катастрофические отказы вызывают эффекты, приводящие к остаточным неустраняемым эффектам, например, разрушению подзатворного диэлектрика, прогоранию металлизации и т.п. К этой же группе относят и тиристорный эффект, т.к. при протекании между стоком и истоком больших токов возникает нагрев ИС, который может вывести полупроводниковую структуру из строя. Как правило, такие отказы не восстанавливаемы и характеризуются как полной, так и частичной потерей работоспособности изделий полупроводниковой электроники.

Сбои вызывают эффекты, не приводящие к неустраняемым эффектам, и целостность информации, нарушенную их появлением, впоследствии можно восстановить. Сбои можно разделить на остаточные и переходные.

Под остаточными сбоями понимаются сбои, в результате которых происходит устойчивое изменение логического состояния элемента ИС, например, переключение состояние триггера или ячейки памяти. Следует отметить, что данная группа эффектов является наиболее распространенной. Под переходными сбоями понимаются сбои, в виде кратковременной импульсной реакции на выходах цифровых и аналоговых микросхем. Данные кратковременные сигналы могут вызывать сбои в работе аппаратуры. Характеристики импульса зависят от быстродействия ИС.



Рис. 1.4 Локальные радиационные эффекты, виды отказов и сбоев

В таблицах 1.1, 1.2 приведен список полупроводниковых изделий потенциально чувствительных к локальным радиационным эффектам при воздействии отдельных тяжёлых заряженных частиц и высокоэнергетичных протонов космического пространства [18]. Для каждого изделия заданы вероятность возникновения сбоя и вид возможного сбоя или отказа.

ОС - одиночные сбои; ТЭ - тиристорные эффекты, ИГ- «иголки», ЭО - эффекты отказов.

Примечание к таблице 2.2:

¹ - анализируются только КМОП ИПЭ с проектными нормами менее 1 мкм;

² - анализируются только МОП транзисторы с вертикальным каналом;

³ - анализируются только изделия, формирующие импульсную выходную реакцию;

⁴ - анализируются только активные фильтры.

Таблица 1.1

ИПЭ	Сбои		Вероятность ТЭ, катастрофического отказа
	Чувствительный элемент, характер сбоя	Вероятность возникновения сбоя	
1	2	3	4
СБИС процессоры, микроконтроллеры	КЭШ-память, РОН, алгоритмические сбои	средняя	высокая
ПЛИС	конфигурационное ОЗУ, память на вентилях и встроенная память	высокая	средняя и высокая
ОЗУ	ячейки памяти	высокая	высокая, зависит от производителя
FIFO	ячейки памяти	высокая	высокая, зависит от производителя
ФЛЭШ	буферная память	низкая	относительно низкая, возможен прокол диэлектрика
МОП транзисторы с рабочим напряжением более 50В	нет	нет	средняя, отказы из-за прокола диэлектрика и вторичного пробоя
АЦП с буферной памятью	ячейки памяти и регистры	высокая	средняя, зависит от технологии и производителя
АЦП без буферной памяти	регистры	низкая	средняя, зависит от технологии и производителя
ЦАП Интегральные многоканальные	регистры	низкая	средняя, зависит от технологии и производителя
ИС ВИП, ИС ФАПЧ	регистры	низкая	низкая, зависит от технологии производства и конкретного производителя

Продолжение таблицы 1.1

1	2	3	4
Таймеры, счетчики	регистры	средняя и низкая (зависит от степени интеграции)	низкая, зависит от технологии и производителя
Операционные усилители	входные каскады («иголки»)	низкая	низкая
Компараторы	входные каскады («иголки»)	низкая	низкая
Оптроны	элементы развязки («иголки»)	низкая	нет
ПЗС-матрицы	пиксели	очень высокая	высокая, по отказам («спайкам») отдельных пикселей

Таблица 1.2

№№ п/п	Группа ЭКБ	Вид эффекта
1	2	3
1.	Микропроцессоры и микроконтроллеры	ОС, ТЭ ¹
2.	Микросхемы памяти	ОС, ТЭ
3.	Программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС) и схемы их конфигурирования	
3.1.	ПИЗУ для задания конфигурации ПЛИС	ТЭ ¹
3.2.	ПЛИС	ОС, ТЭ ¹
4.	ИС АЦП и ЦАП	ОС, ТЭ ¹
4.1.	ИСАЦП	ОС, ТЭ ¹
4.2.	ИСЦАП	ОС, ТЭ ¹
5.	Линейные ИС	ИГ ³
6.	Связные и радиотехнические ИС	
6.1.	ПЧ-тракт	нет ³
6.2.	Делители частоты	ТЭ ¹
6.3.	ВЧ-тракт	нет
6.4.	СВЧ радиосхемы	ТЭ ¹
6.5.	ИС приемно-передающего тракта	ТЭ ¹

Продолжение таблицы 1.2

1	2	3
6.6.	Кварцевые генераторы и резонаторы	нет
7.	Интерфейсные ИС	ОС, ТЭ ¹
8.	Стандартные логические ИС	ОС, ТЭ ¹
9.	ИС вторичных источников питания	
9.1.	ИОН	ТЭ ¹ , ЭО ²
9.2.	Стабилизаторы, преобразователи напряжения и ШИМ-контроллеры	ТЭ ¹ , ЭО ²
9.3.	Фильтры для ВИП ⁴	ТЭ ¹ , ЭО ²
10.	Полупроводниковые приборы, силовые ИС	
10.1.	Транзисторы	ЭО ²
10.2.	Диоды	нет
10.3.	Диодные сборки	нет
10.4.	Стабилитроны и ограничители напряжения	нет
10.5.	Силовые ИС	ЭО ²
11.	Соединители	нет
12.	Оптоэлектронные приборы и устройства отображения информации	ИГ ³ , ОС, ТЭ ¹
13.	Пассивные ЭРИ	
13.1.	Керамические конденсаторы	нет
13.2.	Танталовые конденсаторы	нет
13.3.	Резисторные сборки и резисторы	нет
13.4.	Индуктивности	нет
13.5.	Фильтры	нет
13.6.	Ферромагнитные и молибденпермаллоидные кольца	нет
14.	Преобразователи физических величин и компоненты датчиков	ИГ ³ , ОС, ТЭ ¹
15.	Электронные модули и платы	ИГ ³ , ОС, ТЭ ¹

В большинстве практических случаев из перечня можно исключить ИПЭ, имеющие относительно невысокую чувствительность по эффектам сбоев, которые используются в резервируемых каналах связи типа ЦАП и АЦП (без буферной памяти), регистры, триггера, магистральные приемопередатчики и т.п. Также по этим же причинам можно исключить элементы, формирующие кратковременную ионизационную реакцию – «иголку» (ИГ).

1.6. Концепции моделирования локальных радиационных эффектов

Частота возможных локальных радиационных эффектов от ТЗЧ и ВЭП обусловлена образованием неравновесного заряда $Q_{\text{эд}}$ в чувствительном объёме. Она определяется по результатам расчётной оценки пороговых уравнений $\ddot{E}\dot{Y}_i$ и E_i . Расчёт осуществляется с использованием информации о технологии производства полупроводниковых изделий, топологических размерах чувствительных элементов, критичных электрических параметров ИПЭ.

Граничным условием возможного эффекта является:

$$(dE/dx)_{\text{эд}} \geq E_i, \text{ МэВ}; \quad (1.3)$$

$$E \geq E_i = 22,5Q_{\text{эд}} \approx \Delta U_{\text{ит}} \cdot \tilde{N}_{\text{йо}}, \quad (1.4)$$

где: $\Delta U_{\text{ит}}$ - помехоустойчивость элемента, В;

$\tilde{N}_{\text{йо}}$ - эффективная ёмкость;

$l_{\text{эд}}$ - длина пробега частицы в чувствительном объёме $V_{\text{йо}}$, $\frac{i\tilde{a}}{\tilde{n}\tilde{i}^2}$

(эффективная длина собирания носителей заряда с трека ЗЧ):

$$l_{\text{эд}} = 4V_{\text{йо}} / S_i \text{ или } l_{\text{эд}} = \sqrt{a^2 + b^2 + c^2}, \quad (1.5)$$

где: a, b, c – размеры чувствительного элемента;

S_i - полная поверхность $V_{\text{эф}}$.

При оценке $L_{\text{эд}}$, $S_{\text{йо}}$, $V_{\text{йо}}$ используется модель прямоугольного параллелепипеда, охватывающего чувствительную область образования $Q_{\text{эд}}$, ответственную за возникновение единичного эффекта (сбоя или катастрофического отказа).

В общем случае интенсивность (частота) локальных радиационных эффектов от ТЗЧ на заданной орбите КА за реально защитой БА [18]:

$$V_z = \sum_j^{n_j} n_{\text{эни}} \frac{n \cdot S_i}{4} \int_{\ddot{E}\dot{Y}_i}^{\ddot{E}\dot{Y}_{\text{эд}}} \omega(\ddot{E}\dot{Y}) \int_{\ddot{E}\dot{Y}_i}^{\ddot{E}\dot{Y}_{\text{эд}}} \varphi(\ddot{E}\dot{Y}) \cdot l_i \left(\frac{\ddot{E}\dot{Y}_{\omega} \cdot a}{\ddot{E}\dot{Y}} \right) \cdot d\ddot{E}\dot{Y}_{\omega} \cdot d\ddot{E}\dot{Y}_{\omega} \quad (1.6)$$

где: $\ddot{E}\dot{Y}_{\omega} \approx \ddot{E}\dot{Y}_i \frac{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}}{a}$, $\dot{Y}\hat{A} \cdot \tilde{n}\tilde{i}^2$;

$\ddot{E}\dot{Y}_{\text{эд}}$ - максимальное значение ЛПЭ в спектре ТЗЧ, $\dot{Y}\hat{A} \cdot \tilde{n}\tilde{i}^2 \cdot i\tilde{a}^{-1}$;

$\omega(\ddot{E}\dot{Y})$ - дифференциальная функция зависимости сечения эффекта от ЛПЭ (получена дифференцированием функции Вейбулла для $\sigma_i(\ddot{E}\dot{Y})$);

$\varphi(\ddot{E}\dot{Y})$ - дифференциальный спектр ЛПЭ для ТЗЧ, $\text{см}^2 \cdot t \cdot \text{МэВ} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{мг}^{-1}$;

l_i - интегральное распределение хорд в $V_{\text{эд}}$ зависит от угла подлёта ТЗЧ;

n - количество чувствительных элементов в ИС;

$n_{\text{эни}}$ - количество ИС i -го типа;

n_j - количество применяемых в изделии типов ИС с различающимися зависимостями $\sigma_i(\text{ЛПЭ}) = W \sigma_s^{TЗЧ}$.

Зависимость сечения эффекта $W = \sigma_i(\text{ЛПЭ}) / \sigma_s^{TЗЧ}$ от ТЗЧ аппроксимируются функцией Вейбулла [18].

$$W = \sigma_i(\ddot{E}\dot{Y}) = \sigma_s \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{\ddot{E}\dot{Y} - \ddot{E}\dot{Y}_i}{w} \right)^q \right] \right\}, \quad (1.7)$$

где: σ_s - сечение насыщения для данного типа ИПЭ (ИС), $\tilde{n} \dot{\iota}^2$;

q, w – коэффициенты аппроксимации;

Величины $\sigma_s, \ddot{E}\dot{Y}_i, q, w$ определяются экспериментально.

При отсутствии экспериментальных данных о стойкости ИПЭ используется модель чувствительного объёма.

Для ВЭП локальные радиационные эффекты возникают за счёт вторичных ТЗЧ продуктов ядерной реакции протонов с ядрами материала мишени. Энергия протона, достаточная для образования вторичной ТЗЧ с $\ddot{E}\dot{Y}_i$ эффекта, определяется из сохранения импульса и энергии сталкивающихся частиц.

Для реакции $Si(p, p')Si$ с образованием ядра ${}_{14}Si$ как ТЗЧ пороговая энергия протона:

$$E_{p0} = 29(E_{nz} + 0,69), \text{ МэВ}; \text{ сечение реакции } \sigma_{p_i}(E > E_i), \tilde{n} \dot{\iota}^2. \quad (1.8)$$

Интенсивность (частота) сбоев БА на заданной орбите за реальной защитой от ВЭП [18]:

$$V_{BA}^p = \sum_{i=1}^n n_{uci} \int_{E_{p0}}^{E_{p \max}} \sigma_{sp}^i(E) \cdot \varphi_p(E) \cdot dE \approx \sum_{i=1}^n n_{uci} \left[\sigma_{sp} \cdot F_p(\geq E_{pn}) \right], \dot{y} \hat{o} \cdot t^{-1}, \quad (1.9)$$

где: $\sigma_{sp}^i(E) = \sigma_{яp}^i(E) \cdot N_{я} \cdot V_{эф}$, $\tilde{n} \dot{\iota}^2$ - зависимость сечения эффекта (сбоя ИС i – го типа от энергии протонов);

$\varphi_p(E)$ - дифференциальный энергетический спектр плотности ВЭП, $np \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{МэВ}^{-1}$;

E_{p0} - пороговая энергия протонов, МэВ;

n_i - количество ИС i – го типа в изделии, шт;

$n_{\text{эни}}$ - количество ИС в изделии с различающимися $\sigma_{sp}^i(E)$;

$F_p(> E_{p0})$ - интегральный энергетический спектр средней плотности потока ВЭП с энергией $E_p = E_{p0}$, $np \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

1.7. Методы повышения радиационной стойкости изделий полупроводниковой электроники

В настоящее время изделия полупроводниковой электроники – основной и наиболее важный элемент в бортовой аппаратуре космической техники. Специфика их эксплуатации требует решения основной проблемы при создании подобных микросхем, нахождение компромисса между быстродействием, энергопотреблением, уменьшением размеров, с одной стороны, и повышением надёжности и устойчивости к сбоям и отказам, которые могут возникнуть в результате воздействия ионизирующего излучения космического пространства с другой стороны. При этом производители должны обеспечить устойчивость изделий как к одиночным сбоям, так и к эффектам, связанным с общей накопленной дозой радиации. Так, если для ИС малой степени интеграции основную роль играют эффекты, связанные с общей накопленной дозой, то для БИС и СБИС, среди которых в последнее время всё большую популярность приобретают программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС), на первый план выходят случайные эффекты [24]. Это объясняется конструктивными особенностями ИС, связанными с технологией их изготовления, микросхемы с большой степенью интеграции имеют высокую плотность и малые размеры чувствительных элементов, что сказывается на устойчивости элементов ИС при попадании в неё этих частиц.

Технологические и схемотехнические методы повышения сбое- и отказоустойчивости ИС связаны с изменением параметров элементов, использованием новых материалов, изменением топологии и электрических режимов работы. Они основаны, в первую очередь, на увеличении порога появления локального радиационного эффекта ЛПЭ [3]:

$$ЛПЭ = 10^{-2} \frac{\Delta U_{ном} \cdot C}{l_{эф}}, \quad \dot{y} \hat{A} \cdot \tilde{n} i^2 \lambda \tilde{a}, \quad (1.10)$$

где: $l_{эф}$ - эффективная длина собирания носителей заряда с трека ядерной частицы, см;

$\Delta U_{ит}$ - помехоустойчивость элемента, В;

C - эффективная ёмкость нагрузки, пФ.

Из формулы 1.10 следует, что повышение стойкости возможно за счёт уменьшения эффективной длины собирания, увеличения эффективной ёмкости и повышения помехоустойчивости.

Широкое распространение при создании радиационно-стойких ИПЭ приобрела технология «кремний на диэлектрике» (Silicon-on-insulator, SOI). Данная технология является одним из способов борьбы с одиночными сбоями и эффектами связанными с накопленной дозой

излучения. При использовании технологии «кремний на диэлектрике» снижаются токи утечки и паразитные емкости, исключается возможность образования паразитных структур типа тиристора.

Для повышения сбое- и отказоустойчивости изделий полупроводниковой электроники, построенных на КМОП-технологии, увеличивают длину затвора критически важных транзисторов, для предотвращения одиночных сбоев повышают уровень сигнала, необходимый для переключения триггера.

Различные методы избыточности, как аппаратной, так и алгоритмической традиционно применяются при проектировании надёжной и устойчивой к сбоям аппаратуры. В общем случае данные методы можно условно разделить на две группы, первая из которых включает методы контроля и коррекции ошибок, вторая – методы резервирования.

К первой группе относятся методы избыточного кодирования [38], такие как контроль чётности или контроль по кодам Хэмминга, мажорирование и др. Эти методы предполагают постоянную работу наряду с основной, избыточной аппаратной частью, используемой для обнаружения и исправления ошибок.

Примером избыточного кодирования может служить проверка бит чётности и корректирующие коды (ЕСС), для предотвращения изменения состояний статических элементов служит код Хэмминга, который может обнаруживать все одинарные и двойные битовые ошибки и исправлять все однобитовые ошибки.

Методы повышения помехоустойчивости элементов от одиночных воздействий опираются на схемотехнические решения, применением устойчивых ячеек памяти [38, 45] и регистровых структур, таких как: НІТ, Canaris, DICE, NASA-1, NASA-2 и т.д. В связи с определёнными ограничениями, накладываемыми этими методами на быстродействие, размеры кристалла, энергопотребление изделий полупроводниковой электроники, целесообразно применение помехоустойчивых ячеек в особо критичных областях ИС, например, в конфигурационной памяти.

На данный момент, могут быть выделены следующие виды защищенных ячеек:

- добавление в структуру стандартной ячейки памяти, состоящей из шести транзисторов резистора, позволяет задержать кратковременный импульс (SET) ложного сигнала в ячейке, за это время ячейка успевает восстановиться от возникшего импульса;

- целый ряд ячеек (ячейка IBM, ячейка НІТ (Heavy Ion Tolerant), ячейка Канариса [53]) имеют защиту на основе обратной связи, служащей для восстановления изменённых попаданием отдельной частицы данных;

- на другом принципе, заключающемся в сохранении данных в двух различных местах таким образом, что испорченная часть может быть

восстановлена, построены ячейки DICE (Dual Inter-locked storage Cell) [48] и различные NASA-ячейки [52]. Данные ячейки представляют собой симметричную структуру, связанную таким образом, что имеется несколько альтернативных путей, зависящих от сохраняемого логического значения.

Применительно к тиристорным эффектам существуют свои особенности, для данных эффектов также справедлива формула (1.10), но эффективная длина определяется диффузионно-дрейфовыми процессами в связи с длительными включениями паразитной тиристорной структуры, достигающие 100 нс.

Одним из основных методов защиты ИС от тиристорного эффекта является ограничение тока включения тиристорной структуры, обеспечиваемое включением в цепь питания ИС RC, LC цепочек. Также очень эффективным методом является кратковременное отключение питания ИС при обнаружении возникновения тиристорного эффекта в ней. В тоже время следует иметь в виду, что данные методы могут оказаться не эффективными в случае возникновения подпитки возникшего тиристорного эффекта через входные или выходные цепи.

Другой способ повышения устойчивости ячеек к одиночным сбоям, метод тройного модульного резервирования (Triple Modular Redundancy, TMR), заключается в дублировании критических узлов и элементов схемы, повышая тем самым её устойчивость, относится к методам аппаратного мажорирования. Окончательное значение, выдаваемое схемой, выбирается на основании опроса всех выходов дублирующих элементов. При этом состояние логического элемента может измениться только при условии одновременного воздействия на несколько резервирующих узлов. Очевидно, чем больше избыточность, тем меньше вероятность возникновения одиночного сбоя. Основным минусом данного метода является повышение энергопотребления и увеличение задействованного числа транзисторов и как следствие площади кристалла.

Следует отметить, что все представленные методы, так или иначе, приводят к увеличению геометрических размеров элементов, и как следствие снижению степени интеграции. Поэтому считается, что наибольшей эффективностью обладают аппаратно-алгоритмические методы борьбы с единичными сбоями.

В таблице 1.3 приводится сравнение методов повышения сбое и отказоустойчивости БА КА [38]. Сравнение методов повышения сбое- и отказоустойчивости БА КА.

Для обеспечения сбое- и отказоустойчивости БА КА используются также конструкционные методы, основанные на защитных свойствах конструкционных материалов, выполняющих роль ослабления потоков ЗЧ КП, что предполагает в первую очередь рациональную компоновку различных блоков и узлов аппаратуры. Данное расположение блоков

использует экранирующие способности конструкции аппаратуры в КА, и применение локальных экранов выполняющих защитную роль.

Таким образом, современные подходы при разработке ИПЭ специального назначения позволяют им по характеристикам сравниться с коммерческими аналогами, основным недостатком таких микросхем является их большая цена и отсутствие гибкости перепрограммируемых устройств. Последнее может быть скомпенсировано применением специальных стойких программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) для нужд космической техники [38].

Таблица 1.3

Параметры для сравнения	Устойчивая к сбою ячейка памяти	Код Хэмминга	Тройное модульное резервирование
Используемая площадь кристалла	Обычно удваивает площадь, каждой ячейки памяти. Зависит от топологии и размеров транзисторов	Зависит от числа битов для защиты. Имеет дополнительную последовательную и комбинационную логику	Трёхкратное увеличение площади за счёт мажоритарной схемы
Производительность (время чтения - записи)	Не влияет, т.к. дополнительный путь работает только в режиме удержания	Снижается, за счёт использования блоков кодирования/декодирования	Мажоритарная схема сильно влияет на производительность
Исправление ошибок	Избегает сбоев при помощи задержки в петле памяти, или физического резервирования	Исправляет одиночный сбой на слово	Не исправляет сбои, сбои накапливаются, если нет дополнительной логики
Множественные сбои	Устойчива к множественным сбоям, каждая ячейка защищает себя	Не эффективен в отношении множественных сбоев	Может обеспечить устойчивость к множественным сбоям в различных частях схемы, но не в одном TMR блоке
Технология	Может требовать специальных мер	Совместима со стандартным процессом	Совместима со стандартным процессом

Применение ПЛИС новое слово в развитии аппаратуры для космоса, делающее возможным построение гибких систем с возможностью реконфигурации, и высокой степенью интеграции.

Наиболее распространены ПЛИС матрицы, которых построены на основе SRAM ячеек, минусом такого подхода является незащищенная от воздействия высокоэнергетических частиц коммутационная матрица (ГКМ). ПЛИС, использующие SRAM ячейки, требуют дополнительные средства защиты от воздействия ТЗЧ и ВЭП, в роли которых могут выступать элементы аппаратной избыточности, коды обнаружения и исправления ошибок, основанные на модификациях кода Хемминга, перезапись корректной информации на место модифицированной сбоем [47]. Выбор метода решения, обеспечивающего защиту от сбоев, вызванных воздействием высокоэнергетических частиц, зависит от организации конфигурационной памяти.

Альтернативная технология, разработанная фирмой Actel [54], использует матрицы, построенные на перемычках (антиплавкие перемычки, Antifuse). Их основное отличие от матриц, построенных на SRAM ячейках, заключается в способе хранения конфигурации. Элементами памяти ПЛИС Actel являются перемычки, распределённые по всей площади кристалла и являющиеся одновременно ключами, задающими конфигурацию. Технология Actel стала альтернативой потенциально ненадежной коммутационной матрицы (ГКМ), построенной на ячейках SRAM, не защищённых от воздействия высокоэнергетических частиц.

ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОПЕРАТИВНОЙ ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРИСТИК СЛОЖНОГО ОБЪЕКТА

2.1. Разработка комплексной модели сложной радиоэлектронной системы в рамках интегрированных компьютерных технологий

Реализация процесса анализа оценки и обеспечения сбое- и отказоустойчивости к воздействию заряженных частиц на настоящем этапе должна осуществляться не только с позиций системного подхода, но и в рамках интегрированных компьютерных технологий, направленных на непрерывную информационную поддержку всех стадий жизненного цикла радиоэлектронной аппаратуры [17, 21, 23, 29, 57]. В рамках таких технологий взаимно согласуются CAE-, CAD-технологии, технологии управления данными (PDM-технологии /Product Data Management), интегрированные модели различных объектов и процессов и т. п. Указанные технологии получили название CALS - технологии (Continuous Acquisition and Life-cycle Support). В России, наряду с термином CALS-технологии, получил широкое распространение термин - информационная поддержка жизненного цикла сложного изделия.

Исходя из вышеизложенного, реализация процесса оценки стойкости полупроводниковых изделий средствами математического моделирования должна методологически быть согласована с CALS - технологиями. Элементом такого согласования может служить электронный макет (ЭМ) радиоэлектронной аппаратуры, который представляет собой единое пространство параметров и переменных модельного ряда, отражающего схемотехническую и/или конструкторско-технологическую реализацию отдельных частей или аппаратуры в целом, полученную на основе комплексных исследований характеристик аппаратуры средствами математического моделирования, осуществляемого, в свою очередь, в рамках информационного (электронного) взаимодействия разработчиков на любом этапе жизненного цикла разрабатываемой радиоэлектронной аппаратуры.

Основой электронного макета служит системная комплексная модель радиоэлектронной аппаратуры, в состав которой входит унифицированная комплексная модель физических процессов. Приведенные на рис. 2.1 модели физических процессов имеют формализованный вид с позиций системного анализа.

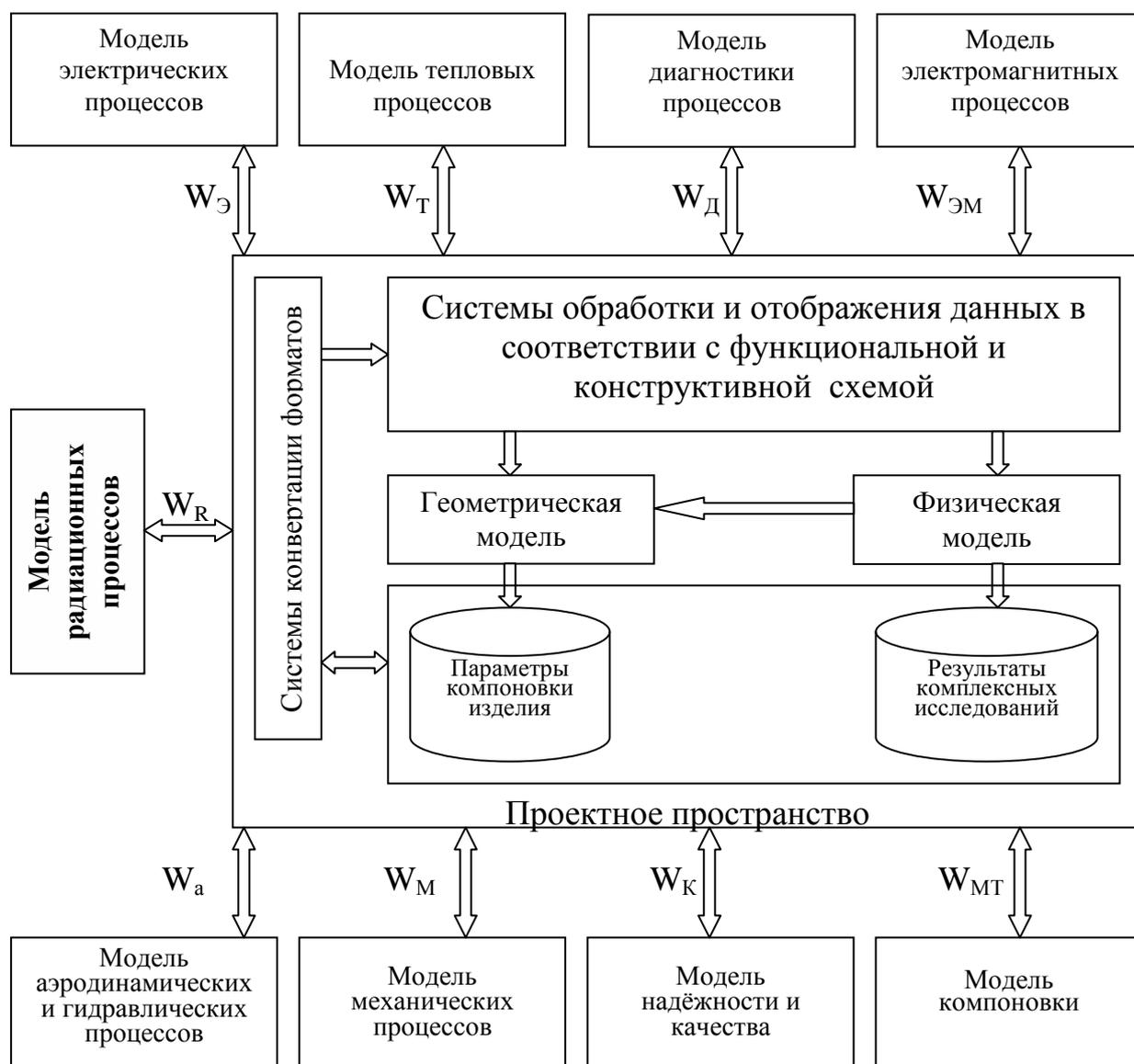


Рис. 2.1. Системная комплексная модель сложной радиоэлектронной системы

Формализованный вид моделей физических процессов позволяет при помощи множества W операторов моделей i -го физического процесса связать между собой множество входных воздействий $X_i(\xi)$, множество выходных характеристик $Y_i(\xi)$ и множество внутренних модельных параметров $Q_i(\xi)$, зависящих, в свою очередь, от множества внешних воздействий:

$$W_i \{ X_i(\xi), Y_i(\xi), Q_i(\xi) \}. \quad (2.1)$$

На унифицированной комплексной модели физических процессов представлены множества модельных параметров, некоторые из которых более детально раскрыты и обозначают: $Y_{\text{э}}(\xi)$ - множество выходных электрических характеристик; $Y_{\text{Р}}(\xi)$, $Y_{\text{Т}}(\xi)$, $Y_{\text{М}}(\xi)$, $Y_{\text{а}}(\xi)$, $Y_{\text{ЭМ}}(\xi)$ - множества выходных радиационных, тепловых, механических, аэродинамических, гидравлических и электромагнитных характеристик; $Y_{\text{НК}}$ - множество

характеристик надежности и качества радиоэлектронной системы; Q_{ε} - множество внутренних электрических параметров ЭС; Q_{GA} , $Q_{ГЭМ}$, $Q_{ГЭХ}$, $Q_{ГФМ}$ - множества геометрических и теплофизических, геометрических и аэродинамических (гидравлических), геометрических и физико-механических параметров системы; $Q_{ГЭМ}$, $Q_{ГР}$ - множества геометрических и электромагнитных, геометрических и радиационных параметров системы; $Q_{п}$ - множество паразитных параметров; $Q_{НК}$ - множество параметров моделей для анализа показателей надежности и качества; $G_{вх}$, $P_{вх}$ - входные расходы и напоры хладоносителей; $U_{BX}(\xi)$, $I_{BX}(\xi)$ - множества входных (воздействующих) напряжений и токов; $T_{ЭКС}(\xi)$ - множество эксплуатационных температур; $a_{BX}(\xi)$ - множество воздействующих вибраций (случайных, гармонических), ударов, линейных ускорений и акустического шума; $R_{в}$ - множество уровней воздействующих радиационных полей; τ_{ε} - время эксплуатации радиоэлектронной системы; $I_{\varepsilon}(\xi)$, $U_{\varepsilon}(\xi)$ - множества выходных токов и напряжений; P_{OC} - давление окружающей среды; V_K - множество скоростей хладоносителя в каналах конструкции; T_K - множество температур стенок каналов; $T_{\varepsilon}(\xi)$ - множество локальных температур электрорадиоэлементов (ЭРЭ); $a_{\varepsilon}(\xi)$ - множество виброускорений на ЭРЭ при различных механических воздействиях; τ_p - множество значений времени до разрушения выводов ЭРЭ; $R_{\varepsilon}(\xi)$ - радиационное поле на ЭРЭ; $T_{II}(x, y, z, \tau)$ - температурное поле конструкции в момент времени τ ; τ_{ε} - время эксплуатации; τ_{ϕ} - технологический фактор (разброс параметров при изготовлении) и временной фактор (постепенное изменение параметров из-за старения и износа).

Опираясь на выражение (2.1), а также разделив на отдельные подмножества внутренние модельные параметры ($Q_{\Phi} = Q_{\varepsilon} \cup Q_a \cup Q_{ТФ} \cup Q_{ФМ} \cup Q_R$; Q_{Φ} - множество физических параметров, характеризующих определённый физический процесс; Q_{Φ} - теплофизические параметры; $Q_{ФМ}$ - физико-механические параметры; Q_a - аэродинамические (гидравлические) параметры и т. п.; G - множество модельных геометрических параметров; Q_m - множество метрических и топологических параметров (количество слоев ПП, переходных отверстий, паек и т. п.), можно описать каждую подмодель единой унифицированной модели РЭС уравнениями (2.2)-(2.8). Кроме этого, уравнением (2,9) можно представить процесс диагностического моделирования.

$$W_{\varepsilon} \{ [I_{вх}(\xi), U_{вх}(\xi)], [Y_{\varepsilon}(\xi), P_{\varepsilon}(\xi)], Q_{\varepsilon} [T_{\varepsilon}(\xi), a_{\varepsilon}(\xi), R_{\varepsilon}(\xi) Q_{II}] \} = 0 \quad (2.2)$$

$$W_a \{ [G_{вх}(\xi), P_{вх}(\xi)], [Y_A(\xi), V_K(\xi)], [Q_A(T_K(\xi)), G] \} = 0 \quad (2.3)$$

$$W_T \{ [T_{ЭКС}(\xi), P_{\varepsilon}(\xi)], [Y_T(\xi), T_{\varepsilon}(\xi), T_{II}(\xi)], [Q_{ТФ}(P_{OC}, V_K, (\xi)), G] \} = 0 \quad (2.4)$$

$$W_M \{ a_{вх}(\xi), [Y_M(\xi), \tau_p, a_{\varepsilon}(\xi)], Q_{ФМ} [T_{II}(\xi)], G \} = 0 \quad (2.5)$$

$$W_{\varepsilon M} \{ Y_{\varepsilon}(\xi), Y_{\varepsilon M}(\xi), [Q_{\varepsilon M} [T_{II}(\xi)], Q_{II}(\xi), G] \} = 0 \quad (2.6)$$

$$W_R \{ R_{вх}(\xi), Y_R(\xi), [Q_R, G] \} = 0 \quad (2.7)$$

$$W_K \{ [Y_{\varepsilon}(\xi), \tau_{\varepsilon}], Y_{НК}(\xi), Q_{НК} [Y_{\varepsilon}(\xi), T_{\varepsilon}(\xi), a_{\varepsilon}(\xi) P_{OC}, Q_{МГ}, T_{ехн}, \tau_{\phi}], \} = 0 \quad (2.8)$$

$$W_{д}\{[Y_{Э}(\xi), Y_{Т}(\xi), Y_{М}(\xi), T_{ТРМ}, \delta_{ИП}], Y_{д}(\xi)[Q_{Э}, Q_{Т}, Q_{д}]\} = 0 \quad (2.9)$$

где $T_{ТРМ}$ - термограммы; $\delta_{ИП}$ - погрешности измерительных приборов; $K, (c)$ - множество выходных диагностических характеристик; $Y_{д}(\xi) = O_{К} \cup O_{К}$, $O_{К}$ - множество катастрофических отказов; $O_{К}$ - множество параметрических откатов; $Q_{Э}, Q_{Т}, Q_{д}$ - множества диагностических модельных электрических тепловых и механических параметров.

где E - множество ЭРЭ; M - множество монтажных пространств; K - количество уровней конструктивной иерархии РЭС; $L_{М}$ - модель монтажного пространства; C - список цепей электрической принципиальной схемы РЭС; S - конфигурация пленочного, печатного или проводного монтажа.

Результаты исследования физических процессов в соответствии с уравнениями (2.2) - (2.8), полученные при помощи соответствующих инженерных методик с применением унифицированной комплексной модели физических процессов радиоэлектронной системы рис. 2.1 диагностического моделирования (2.9), можно представить в виде некоторого проектного решения при разработке системы *PR*:

$$PR = \left\{ \bigcup_{j=1}^k (E_S^j \cup S_U^j \cup Q_{MT}^j \cup S^j \cup Y^j(\xi) \cup Y_A^j : E_S^j = G^j \cup Q_{\phi}^j, S_S^j = E_U^j \cup C^j) \right\} \quad (2.10)$$

где E_S - эскиз конструкции j -го уровня иерархии; S_U - схема электрическая принципиальная, реализуемая на конструкции j -го уровня иерархии.

Выражение (2.10) описывает структуру информации, аккумулирующуюся в информационном проектном пространстве системной комплексной модели радиоэлектронной системы. В общем случае в такой модели реализуются принципы системного подхода [17, 23, 26], в соответствии с которыми, в зависимости от комплекса воздействий, класса радиоэлектронной системы и уровня разукрупнения и т. п., у разработчика имеется возможность изменять количество связей между подмоделями и, таким образом, исследовать наиболее ярко выраженные эффекты, проявляющиеся при совместном протекании физических процессов в радиоэлектронных системах. Иными словами, осуществляется возможность реконфигурирования единой комплексной модели, которая реализуется посредством выделения каждого физического процесса или проектной процедуры в отдельную подсистему и определения связей между такими подсистемами.

В состав ЭМ рис. 2.1 также входит модель конфигурирования структуры, позволяющая в зависимости от особенностей создаваемой системы и способов взаимодействия участников проекта, настраивать структуру ЭМ радиоэлектронной системы.

В общем случае модель конфигурирования ЭМ позволяет:

- выполнять настройку структуры и параметров системной

комплексной модели (устанавливать количество значимых для исследований подмоделей и определять схему взаимосвязей между ними);

- определять перечень конструкторской и технической документации, определяющий степень описания информационного проектного пространства;

- включать в состав ЭМ необходимый для проведения проектных исследований комплект инженерных методик;

- включать в состав ЭМ набор САД-, САЕ-, САМ-систем, необходимых для реализации инженерных методик.

В конечном итоге, при любом конфигурировании все составляющие ЭМ распределяются («растворяются») при помощи разработанных систем конвертации по информационным объектам интегрированного описания радиоэлектронной системы, которое определяется логической структурой разработанной базы данных в соответствии с прикладными протоколами или интегрированными ресурсами стандарта.

Изложенный выше подход рассмотрен на примере процесса анализа оценки и обеспечения сбое- и отказоустойчивости к воздействию заряженных частиц космического пространства для аппаратуры специального назначения (рис. 2.2). Комплекс мер по оценке и обеспечению сбое- и отказоустойчивости аппаратуры, включает следующие основные этапы.

1. Анализ и уточнение заданных в техническом задании (ТЗ) на разрабатываемую аппаратуру требований по сбое- и отказоустойчивости БА КА при воздействии ЗЧ КП с целью определения (уточнения) ресурса и режимов эксплуатации аппаратуры на орбите, полноты заданных в требованиях характеристик ЗЧ КП (обычно задаются в табличном виде в соответствии с пунктом 3 ниже), уточнения критериев и показателей стойкости БА к воздействию ЗЧ КП при условии их задания в ТЗ.

2. Анализ разработчиком БА номенклатуры комплектующих полупроводниковых изделий применяемых в БА КА, в результате которого выявляются изделия, «критичные» (чувствительные) к локальным радиационным эффектам при воздействии ЗЧ КП, определяются возможные виды эффектов и отказов этих ИПЭ, вызываемых действием одиночных ВЭП и ТЗЧ. На основании этого анализа формируется перечень «критичных» полупроводниковых изделий.

Параметрами чувствительности ИПЭ к сбоям и отказам от воздействия отдельных ТЗЧ и ВЭП КП являются: сечение насыщения эффекта, пороговые линейные потери энергии (ЛПЭ) ТЗЧ и пороговая энергия протонов, при которых возникает эффект.

Под сечением насыщения эффекта понимается ненулевая величина сечения эффекта, которая остается практически постоянной при увеличении ЛПЭ ТЗЧ и энергии протонов.

Под пороговыми ЛПЭ ТЗЧ и пороговой энергией протонов понимаются ЛПЭ ТЗЧ и энергия протонов, при которых сечение эффекта составляет 5% от сечения насыщения.

Параметры чувствительности и показатели сбое- и отказоустойчивости ИПЭ определяются по результатам их испытаний на ускорителях ионов, протонов, изотопных и имитационных установках или расчетно-экспериментальными методами.

3. Осуществляется выделение разработчиком из состава БА функционально законченных составных частей (приборов, блоков, устройств и т.п.), в которых применяются полупроводниковые изделия, включенные в перечень критичных узлов.

4. По результатам работ, проведенным в пункте 3, разработчиками БА для каждого «критичного» узла определяется перечень возможных отказов, вызываемых локальными радиационными эффектами в «критичных» полупроводниковых изделиях, с учетом режимов их работы и принятых в аппаратуре мер обеспечения сбое- и отказоустойчивости.

На данном этапе определяется наличие (отсутствие) средств аппаратного и программного контроля, резервирования, коррекции и т.п., используемых для обнаружения и устранения сбоев, оценивается влияние перерыва в работе аппаратуры на работоспособность и функционирование КА.

При необходимости определяются меры защиты «критичных» ИПЭ от возникновения катастрофических отказов (например, схемотехнических).

5. На основании пункта 4 разработчиком БА проводится анализ влияния сбоев и отказов в «критичных» узлах, вызванных локальными радиационными эффектами, на функционирование отдельных систем и КА в целом.

По результатам этого анализа для «критичных» узлов, устанавливаются критерии и показатели их стойкости, такие как: максимально допустимая частота сбоев (или вероятность сбоя) и частота возникновения катастрофического отказа.

6. Для каждого «критичного» узла, в котором возможно влияние локальных радиационных эффектов на функционирование ИПЭ, систем или БА в целом согласно пункту 5, проводится оценка частоты сбоев и вероятности возникновения катастрофических отказов в комплектующих его «критичных» ИПЭ, на основе которых рассчитываются частота сбоев и вероятность возникновения катастрофических отказов для узла.

Энергетические спектры ВЭП и спектры ЛПЭ ТЗЧ задаются в ТЗ на разработку аппаратуры.

Параметры чувствительности для «критичных» полупроводниковых изделий по различным локальным радиационным эффектам берут из ТУ на эти изделия.



Рис. 2.2. Схема организации маршрута оценки и обеспечения сбое- и отказоустойчивости БА КА при воздействии ЗЧ КП

В случае отсутствия необходимых данных в указанных документах, их можно получить экспериментальным и расчетно-экспериментальным путем по методикам, рекомендованным в РД В 319.03.24, РД В 319.03.38, ОСЧ 11.073.013-2008, часть 10.

7. Результаты выполненной расчетной оценки показателей стойкости сравниваются с установленными (уточненными) показателями стойкости, определенными на основании пункта 5. Если показатели стойкости БА, рассчитанные в пункте 6, не превышают допустимых значений установленных в пункте 5, то аппаратура считается стойкой к воздействию ЗЧ КП по одиночным эффектам.

Допускается проводить оценку показателей стойкости ИПЭ расчетным путем на основе доступных источников, содержащих информацию по параметрам чувствительности к эффектам сбоев и отказов ИПЭ отечественного и иностранного производства (научно-технические и реферативные журнальные публикации докладов научных конференций, интернет, справочники и т.п.). При этом показатели стойкости, оцененные подобным образом, должны превышать установленные в пункте 5 значения не менее чем в 10 раз.

8. По «критичным» узлам, в которых в соответствии с пунктами 5, 6 одиночные сбои и отказы недопустимы, и узлам, показатели стойкости, которых ниже установленных в пункте 5 значений, должны быть приняты меры по обеспечению сбоеустойчивости и отказоустойчивости.

2.2. Моделирование локальных радиационных эффектов в полупроводниковых изделиях

В общем случае локальные радиационные эффекты по характеру проявления в ИПЭ делятся на две группы: единичные сбои и полные (катастрофические) отказы. На характер реакции в ИПЭ оказывают влияние ЛПЭ частицы, технология и топология полупроводниковой структуры, геометрические размеры, расположение трека ЗЧ и т.д. [1, 3, 6, 14, 25, 39, 43, 46, 59].

Локальные радиационные эффекты обусловлены большим выделением энергии в микрообъеме чувствительного элемента полупроводниковой структуры при попадании в него отдельной заряженной частицы. Анализ локальных радиационных эффектов основан на зарядовой (энергетической) модели, т.е. возникновение эффекта возможно, если генерируемый частицей избыточный неравновесный заряд в чувствительном объеме $V_{эф}$ элемента ИПЭ превышает некоторую критическую величину $Q_{кр}$.

При оценке показателей и характеристик элемента ИПЭ, а именно $V_{эф}$, $Q_{кр}$ и др., используется модель прямоугольного параллелепипеда, охватывающего чувствительную область рис. 2.3.

Заряд, образуемый ионизирующим излучением за счёт ионизационных процессов в эффективном объёме $V_{эф}$, в пределах которого происходит собиране неравновесного заряда определяется следующей формулой

$$Q = \frac{e\rho}{\mathcal{E}_u} V_{эф} \left(\frac{dE}{dx} \right)_i F = \frac{e\rho}{\mathcal{E}_u} S_{эф} l_{ак} \left(\frac{dE}{dx} \right)_i F, \text{ Кл}, \quad (2.11)$$

где $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ - заряд электрона, Кл;

ρ - плотность вещества мишени, $\tilde{a} \cdot \tilde{n} \tilde{t}^{-3}$ (для кремния $\rho = 2,33 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$);

\mathcal{E}_u - энергия ионизации, МэВ (для кремния $\mathcal{E}_u = 3,6 \cdot 10^{-6} \text{ МэВ}$);

$S_{эф}$ - эффективная площадь активной области $\tilde{n} \tilde{t}^2$, принимается равной $S_{эф} = S_i / 4 = (ab + ac + bc) / 2$;

$S_i = 2(ab + ac + bc)$ - полная поверхность чувствительного элемента, см^2 ;

$l_{ак}$ - протяжённость активной области (путь частицы в $V_{эф}$), см;

величина случайная, среднее значение $l_{ак} = 4V_{эф} / S_i$ или длина хорды параллелепипеда $l_{ак} = \sqrt{a^2 + b^2 + c^2}$;

a, b, c - размеры чувствительного элемента;

F - поток частиц с энергией E, $\div \tilde{a} \tilde{n} \tilde{t} \cdot \tilde{n} \tilde{t}^{-2}$;

$(dE/dx)_i$ - линейные потери энергии частицей (ЛПЭ) на ионизацию, $\tilde{t} \tilde{A} \cdot \tilde{n} \tilde{t}^2 \cdot \tilde{a}^{-1}$;

Для одной частицы на $S_{эф}$ имеем $S_{эф} \cdot F = 1$ и генерированный избыточный неравновесный заряд определяется формулой

$$Q = \frac{e\rho}{\mathcal{E}_u} l_{ак} \left(\frac{dE}{dx} \right)_i = \frac{e}{\mathcal{E}_u} X_{ак} \left(\frac{dE}{dx} \right)_i, \text{ Кл}, \quad (2.12)$$

где $X_{ак} = l_{ак} \rho$ пробег частицы в $V_{эф}$, $\text{г} \cdot \text{см}^{-2}$.

Для кристалла кремния (Si): $\left(\frac{dE}{dx} \right)_i X_{ак} = \frac{\mathcal{E}_u(\text{Si})}{e} Q = 22,5Q, \text{ МэВ}$,

где $Q_{кр}$ - генерированный частицей в $V_{эф}$ критический заряд, пКл.

Если E_n (МэВ) - пороговая энергия, выделенная в чувствительном объёме и соответствующая заряду $Q_{кр}$, то граничным условием возможного эффекта является выполнение неравенств:

$$\begin{cases} \left(\frac{dE}{dx} \right)_n X_{ак} \geq E_n, \text{ МэВ} \\ E \geq E_n = 22,5Q_{кр} = 22,5 \Delta u_{ном} \cdot C_{эф}, \text{ МэВ} \end{cases}, \quad (2.13)$$

где: $(dE/dx)_n$ - пороговое значение линейной потери энергии ЗЧ в веществе на ионизацию [46] достаточное для образования неравновесного заряда $Q_{кр}$ приводящего к единичному эффекту, $\tilde{t} \tilde{A} \cdot \tilde{n} \tilde{t}^2 \cdot \tilde{a}^{-1}$;

$\Delta U_{\text{пом}}$ – помехоустойчивость (или напряжение переключения элемента, В);

$C_{\text{эф}}$ – эффективная ёмкость чувствительного элемента, пФ.

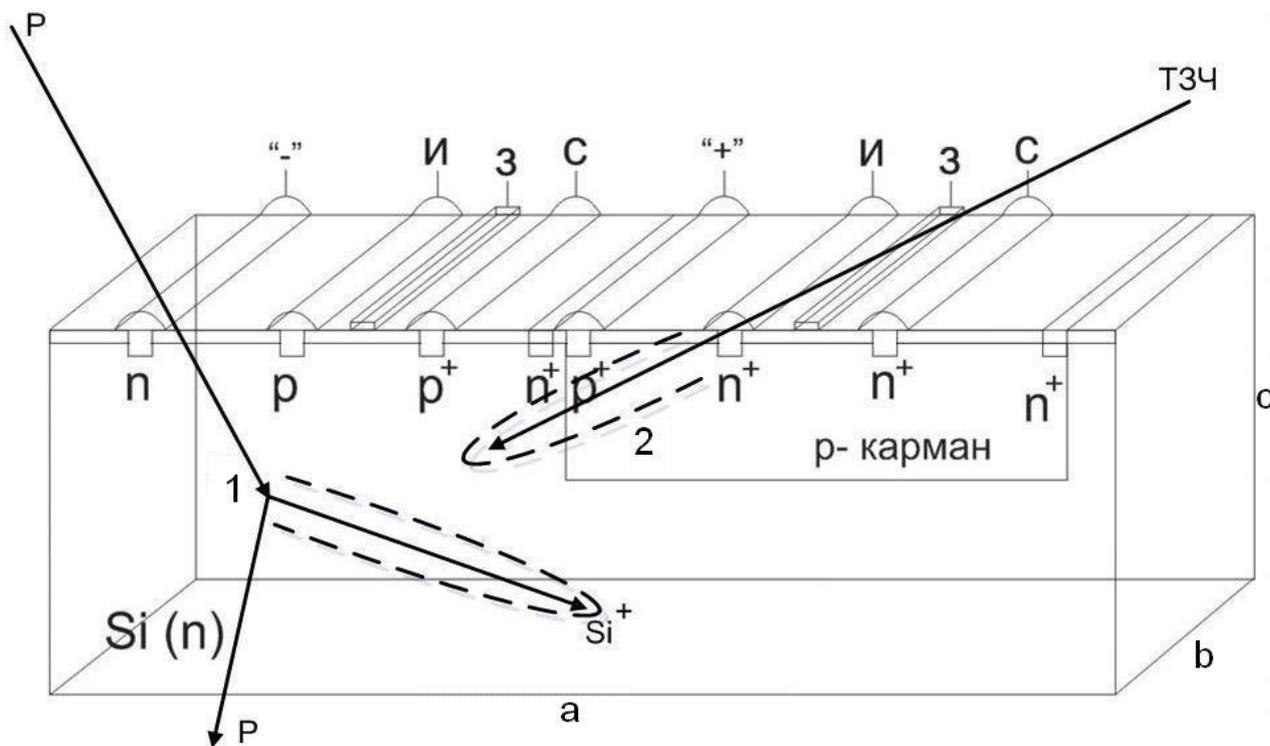


Рис. 2.3 – Модель прямоугольного параллелепипеда со сторонами a, b, c

При известной работе переключения чувствительного элемента (ячейки памяти) с учётом $1\text{МэВ}=1,6 \cdot 10^{-13}$ Дж пороговая энергия, равна

$$E_n = \frac{A_{\text{пер}}}{0,16}, \text{ МэВ}, \quad (2.14)$$

где $A_{\text{пер}} = t_{\text{зд}} \cdot P_{\text{пер}} = C_{\text{эф}} \cdot U_n^2$ работа переключения элемента, пДж;

$t_{\text{зд}}$ – время задержки сигнала (на один элемент), с;

$P_{\text{пер}}$ – потребляемая мощность на один элемент, пВт;

U_n – напряжение питания, В;

$C_{\text{эф}}$ – эффективная ёмкость чувствительного элемента, пФ.

Зарядовая модель возникновения единичных эффектов, обусловленных образованием неравновесного заряда ΔQ в чувствительном объёме ИПЭ, позволяет по результатам расчётной оценки пороговых уровней $ЛПЭ_n$ и пороговой энергии частицы E_n определить основные показатели стойкости интегральных микросхем и других ИПЭ.

Сбое- и отказоустойчивость ИПЭ характеризуется частотой V_i и вероятностью P_i возникновения локальных радиационных эффектов. Эти показатели связаны между собой соотношением

$$P_i = 1 - \exp(-V_i t),$$

где t - время наблюдения.

Важными показателями стойкости являются также:

σ - сечение эффекта отношение общего количества сбоев (отказов) ИПЭ к потоку частиц, см^2 ;

σ_s - сечение насыщения эффекта, т.е. значение сечения насыщения эффекта, которое остаётся практически постоянным при увеличении ЛПЭ ТЗЧ или энергии протонов, см^2 ;

$ЛПЭ_n$ - пороговые потери энергии ТЗЧ в веществе, начиная с которых наблюдается появление эффектов;

E_n - пороговое значение энерговыделения соответствующее $ЛПЭ_n$.

Частота возникновения единичных эффектов (иногда называемых локальными радиационными эффектами) от ТЗЧ и ВЭП КП, обусловленных образованием неравновесного заряда $Q_{кр}$ в чувствительном объёме, определяется по результатам расчетной оценки пороговых уровней $ЛПЭ_n$ и E_n . Расчёт осуществляется с использованием информации о технологии, топологических размерах чувствительного элемента, критических электрических параметров $\Delta U_{пом}$, $U_{п}$, $C_{эф}$, $A_{пер}$, $t_{зд}$ с учётом граничных условий (2.13) и (2.14).

2.3. Математическое обеспечение оценки стойкости полупроводниковых изделий к локальным радиационным эффектам

2.3.1. Типовая модель оценки характеристик стойкости полупроводниковых изделий к воздействию заряженных частиц космического пространства

В первом приближении [18], с учётом модели прямоугольного параллелепипеда и условий (2.13), интенсивность сбоев от ТЗЧ и ВЭП КП в одном чувствительном элементе с объёмом $V_{эф}$ можно представить в виде

$$V_i^z = \sigma_{Si}^z F(> ЛПЭ_n), \text{ эффект} \cdot (\text{бит} \cdot \text{см}^2)^{-1} \text{ для ТЗЧ};$$

$$V_i^p = \sigma_{Si}^p F(> E_{p0}), \text{ эффект} \cdot (\text{бит} \cdot \text{см}^2)^{-1} \text{ для ВЭП},$$

где $\sigma_{Si}^z \approx a \cdot b \approx S_{эф}$, сечение насыщения эффекта в чувствительном объёме элемента $V_{эф}$ от ТЗЧ, см^2 ;

(2.15)

$\sigma_{Si}^p \approx \sigma_{яp} \cdot N_{я} (a \cdot b \cdot c) = \sigma_{яp} \cdot N_{я} \cdot V_{эф}$, сечение насыщения эффекта в чувствительном объёме элемента $V_{эф}$ от ВЭП, см^2 ;

(2.16)

$ЛПЭ_n$ – пороговое значение ЛПЭ, $\text{МэВ} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{мг}^{-1}$;

$\sigma_{яp}$ - сечение ядерных реакций от ВЭП с выходом вторичных ТЗЧ способных создать $\ddot{E}\ddot{Y}_i$, см^2 ;

N_y - концентрация ядер вещества мишени, $\tilde{n}i^3$

E_{p0} = пороговая энергия протонов, значение энергии протонов, начиная с которой наблюдаются единичные эффекты в ИПЭ, МэВ;

$F(>ЛПЭ_n)$, $F(>E_{p0})$ – поток частиц с ЛПЭ > ЛПЭ_n для ТЗЧ и $E_p > E_{p0}$ для ВЭП.

Формулы (2.15) основаны на сечениях насыщения σ_s и не учитывают зависимость сечений единичных эффектов от ЛПЭ и E_p вблизи пороговых значений, а также особенности спектров ТЗЧ и ВЭП. Указанные обстоятельства завышают расчётные значения ν на порядок и более, и могут приниматься как показатель самого «неблагоприятного варианта».

2.3.2. Разработка специализированной математической модели оценки стойкости полупроводниковых изделий к воздействию тяжёлых заряженных частиц космического пространства

В общем случае интенсивность (частота) локальных радиационных эффектов в ИПЭ, комплектующих бортовую аппаратуру от ТЗЧ на заданной орбите за реальной защитой, описывается формулой (1.6) или в укороченном виде

$$\nu_z = \sum_j^{n_j} n_{uc_i} \frac{nS_i}{4} \int_{L_n}^{L_{\max}} \omega(L) \varphi(L) dL, \text{ эффект} \cdot t^{-1}, \quad (2.17)$$

где $\frac{nS_i}{4} = \sigma_s^{ТЗЧ}$ – сечение насыщения эффекта, для ИС значение сечения эффекта, которое остаётся практически постоянным при увеличении ЛПЭ ТЗЧ, см²;

$L_n = ЛПЭ_n$ – пороговое значение линейной потери энергии ЗЧ в веществе, достаточное для образования неравновесного заряда, приводящего к единичному эффекту, МэВ·см²·мг⁻¹;

L_{\max} – максимальное значение ЛПЭ в заданном спектре ТЗЧ МэВ·см²·мг⁻¹;

n – количество чувствительных элементов в ИС;

n_{uc_i} – количество ИС i -го типа;

n_j – количество применяемых в изделии типов ИС с различными σ_s и L_n ;

$\varphi(L)$ – дифференциальный ЛПЭ спектр ТЗЧ, (см²·т·МэВ·см²·мг⁻¹)⁻¹;

$\omega(L) = \frac{dW(L)}{dL}$ – дифференциальная функция зависимости сечения эффекта от ЛПЭ;

W - зависимость сечения эффекта $\sigma^{ТЗЧ}(L)$ от ЛПЭ аппроксимируется трёхпараметрической функцией распределения Вейбулла [18, 59].

$$W = \frac{\sigma^{TЗЧ}(L)}{\sigma_s^{TЗЧ}} = \left[1 - e^{-\left(\frac{L-L_n}{\lambda L_n}\right)^\delta} \right], \quad (2.18)$$

где δ, λ – коэффициенты аппроксимации определяемые экспериментально. Типовые кривые функции Вейбулла приведены на рис. 2.4 и демонстрируют характер зависимости $W(L)$ для разных параметров модели δ и λ .

$$\omega(L) = \frac{dW}{dx} = \frac{\delta}{\lambda} \left(\frac{x}{\lambda}\right)^{\delta-1} e^{-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^\delta} \text{ плотность распределения Вейбулла.}$$

В формулу (2.17) входят дифференциальная функция зависимости сечения эффекта $\omega(L)$ и дифференциальный ЛПЭ спектр ТЗЧ $\varphi(L)$. Как было указано $\omega(L)$ определяется функцией Вейбулла, аналитическое выражение для $\varphi(L)$, как правило не задаётся, т.к. характеристики потока ТЗЧ задаются в табличном виде для дифференциального и интегрального спектров ТЗЧ за различной защитой.

Согласно первой теореме о среднем, если функции $\omega(L)$ и $\varphi(L)$ интегрируемы на $[L_n, L_{\max}]$, то существует такое число $\bar{\omega}$, $m \leq \bar{\omega} \leq M$, что

$$\int_{L_n}^{L_{\max}} \omega(L)\varphi(L)dL = \bar{\omega} \int_{L_n}^{L_{\max}} \varphi(L)dL,$$

где $\bar{\omega}$ - средняя дифференциальная плотность распределения $\sigma(L)$ на рассматриваемом участке спектра

$$\bar{\omega} = \frac{1}{L_{\max} - L_n} \int_{L_n}^{L_{\max}} \omega(L)dL = \frac{1}{L_{\max} - L_n} \left[1 - e^{-\left(\frac{L-L_n}{\lambda L_n}\right)^\delta} \right], \text{ см}^{-2}\text{т}^{-1}(\text{МэВ}\cdot\text{см}^2\cdot\text{мг}^{-1})^{-1};$$

$\int_{L_n}^{L_{\max}} \varphi(L)dL = F(> E_n)$ -интегральная плотность потока ТЗЧ с ЛПЭ $> L_n$, част·см⁻²·т⁻¹;

t-время воздействия, сек., мин., сут., год (приведено в спектре).

Среднее значение ЛПЭ $> \bar{L}$ соответствующее среднему значению сечения единственного эффекта на рассматриваемом участке описывается формулой

$$\bar{L} = \int_{L_n}^L L\omega(L)dL = \bar{\omega} \int_{L_n}^L LdL = \frac{(L-L_n)}{2} \left[1 - e^{-\left(\frac{L-L_n}{\lambda L_n}\right)^\delta} \right], \text{ МэВ}\cdot\text{см}^2\cdot\text{мг}^{-1}.$$

В результате выражение (2.17) с учётом (2.18) для одной конкретной ИС принимает вид

$$V_{uc}^{TЗЧ} = \sigma_s^{TЗЧ} \bar{\omega} \cdot \bar{L} \cdot F_{TЗЧ}(> L_n), \text{ эффект}\cdot\text{т}^{-1}. \quad (2.19)$$

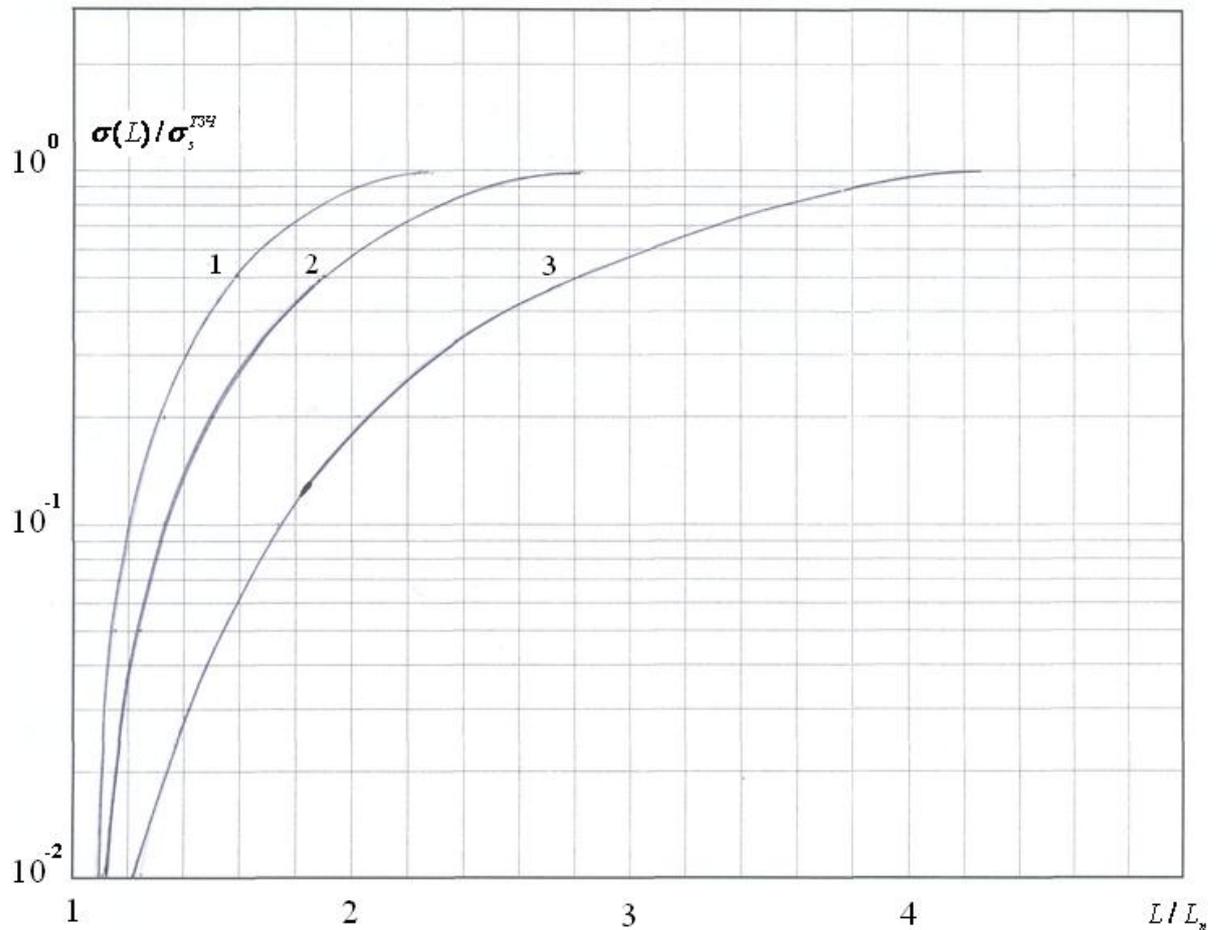


Рис. 2.4. Зависимость $w(L)$ для ряда значений δ и λ

1. $\delta=2,25$ и $\lambda=0,65$.
2. $\delta=2,0$ и $\lambda=1,06$ процессор 1750А.
3. $\delta=2,1$ и $\lambda=2,17$ процессор 1750А1.

Учёт сечения эффекта от угла падения частиц на поверхность чувствительного элемента задаётся как: $\sigma^{T3Ч}(L, \theta) = \sigma_s^{T3Ч} \cos \theta$, см^2 , где θ – полярный угол падения частиц на поверхность кристалла.

$$\overline{\cos \theta} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin \theta d\theta = \frac{2}{\pi}.$$

С учётом углового распределения ТЗЧ, при изотропном облучении в телесном угле 4π стер для одной полусферы, расчётная формула интенсивности (частоты) единичных эффектов одной микросхемы с заданными $\sigma_s^{T3Ч}$ и L_n имеет вид

$$V_{uc}^{T3Ч} = \frac{\sigma_s^{T3Ч}}{\pi} \overline{\omega \cdot L} \cdot F_{T3Ч} (> L_n), \text{ эффект} \cdot \text{т}^{-1}. \quad (2.20)$$

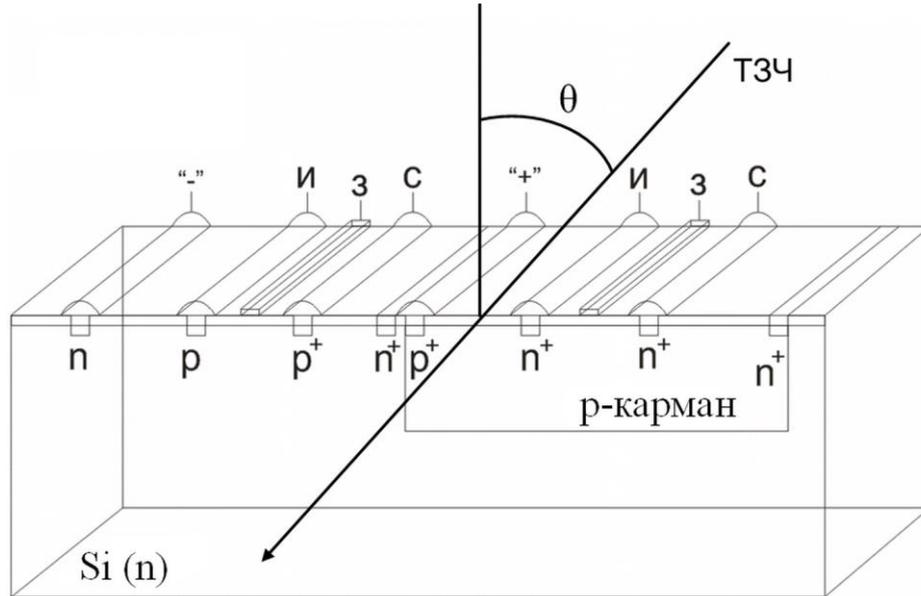


Рис. 2.5 Полярный угол падения частиц на поверхность кристалла θ

Для заданного интегрального спектра ЛПЭ возможны два случая:

- L_{\max} спектра ЛПЭ превышает значение, необходимое для достижения сечения насыщения σ_s^{T3Ch} , т.е. $L_{\max} > L_{\text{нас}}$;

- L_{\max} спектра ЛПЭ меньше или равно значению $\sigma(L) = \sigma_s^{T3Ch}$, т.е. $L_{\max} \leq L_{\text{нас}}$,

где $L_{\text{нас}} = L_n + \lambda L_n (1,6)^{\frac{1}{\delta}}$, МэВ·см²·мг⁻¹ при $\sigma(L) / \sigma_s^{T3Ch} = 0,8$;

λL_n - коэффициент масштаба распределения Вейбулла, МэВ·см²·мг⁻¹;

δ - коэффициент формы распределения Вейбулла.

Коэффициенты δ и λL_n определяются по результатам испытаний ИС на воздействие ТЗЧ с возрастающими значениями ЛПЭ и являются, наряду с L_n и σ_s^{T3Ch} , характеристиками испытаний ИС. На рис. 2.4 даны кривые распределения $\sigma(L) = \sigma_s^{T3Ch}$ для ряда БИС.

При $L_{\max} \leq L_{\text{нас}}$ для учёта быстро убывающей интенсивности потока частиц спектра ЛПЭ от ТЗЧ и активно возрастающего на участке $[L_n, L_{\text{нас}}]$ значения $\sigma(L)$ расчёт по (2.20) следует разбить на два участка.

В общем случае для произвольных δ и λL_n возможны три варианта:

1) $L_{\max} < L_n$, $V_{uc}^{T3Ch} = 0$;

2) $L_{\max} > L_n$, $L_{\max} \leq L_{\text{нас}} = L_n + \lambda L_n (1,6)^{\frac{1}{\delta}}$, МэВ·см²·мг⁻¹,

$$V_{uc}^{T3Ch} = \frac{\sigma_s^{T3Ch}}{2\pi} \left[1 - e^{-\left(\frac{L_{\max} - L_n}{\lambda L_n}\right)^\delta} \right]^2 F(> L_n), \text{ эффект} \cdot \text{t}^{-1}; \quad (2.21)$$

3) $L_{\max} > L_n$, $L_{\max} > L_{\text{нас}} = L_n + \lambda L_n (1,6)^{\frac{1}{\delta}}$, МэВ·см²·мг⁻¹,

$$V_{uc}^{TЗЧ} = \frac{\sigma_s^{TЗЧ}}{\pi(L_{max} - L_n)} \left\{ 0,32\lambda L_n (1,6)^{\frac{1}{\delta}} [F(>L_n) - F(>L_{нас})] + \frac{L_{max} - L_{нас}}{2} F(>L_{нас}) \right\}. \quad (2.22)$$

Приведённые формулы позволяют учесть зависимость сечения единичного эффекта от ЛПЭ до достижения насыщения σ_s , а также особенности распределения ТЗЧ по величине ЛПЭ при любых δ и λL_n .

Для проведения расчёта частоты единичных эффектов ($V_{uc}^{TЗЧ}$) необходимо знать $\sigma_s^{TЗЧ}$, L_n , и коэффициенты δ и λL_n распределения Вейбулла для данной ИС по ним определяется $L_{нас}$:

$$L_{нас} = L_n + \lambda L_n (1,6)^{\frac{1}{\delta}}, \text{ МэВ}\cdot\text{см}^2\cdot\text{мг}^{-1}.$$

А также соответствующие L_n и $L_{нас}$ значения потока ТЗЧ $F_{ТЗЧ}(>L_n)$ и $F_{ТЗЧ}(>L_{нас})$ из спектра ЛПЭ.

Как правило, значения δ и λL_n для ИС неизвестны, и для n-МОП, КМОП и ТТЛШ технологий ИС предлагается воспользоваться типовой моделью со значениями $\delta=2,25$ и $\lambda = 0,65$ с достаточно крутым ходом кривой Вейбулла.

Частота сбоев от ТЗЧ для всего изделия (блока), имеющего несколько разнотипных чувствительных к единичным эффектам ИПЭ, может быть вычислена по следующей формуле

$$V_{изд}^{TЗЧ} = \sum_{j=1}^{n_j} n_{uc_i} V_{uc_i}, \text{ эффект}\cdot\text{т}^{-1}, \quad (2.23)$$

где n_{uc_i} - количество ИС i -го типа, применяемых в изделии;

n_j - количество типов ИС с различными σ_s и L_n , применяемых в изделии.

При отсутствии экспериментальных данных о значении $\sigma_s^{TЗЧ}$ используется модель чувствительного элемента в виде параллелепипеда (часть 2.2).

В таблице 2.1 приведены заданные для Российского сегмента «Международной Космической Станции» интегральные спектры ЛПЭ плотности потока ТЗЧ ($\text{см}^2\text{сут}^{-1}$) в центре сферы за различной защитой (по Al) для ГКЛ при отсутствии солнечных вспышек [60].

Из таблицы следует, что при низких значениях ЛПЭ поток ТЗЧ более интенсивен. Данный факт учитывается при расчёте ν_z по формулам (2.21) и (2.22).

В ходе выполнения расчёта значения $\sigma_s^{TЗЧ}$ (см^2) и $L_{ПЭ} = L_n$ ($\text{МэВ}\cdot\text{см}^2\cdot\text{мг}^{-1}$) берутся из справочных данных на ИПЭ, значения L_{max} ($\text{МэВ}\cdot\text{см}^2\cdot\text{мг}^{-1}$) и $F(>L)$ ($\text{см}^{-2}\cdot\text{т}^{-1}$) - из анализа заданного интегрального спектра ТЗЧ за выбранной величиной предварительной защиты.

Таблица 2.1

ЛПЭ, МэВ·см ² /мг	Массовая толщина защиты по алюминию, г·см ⁻²		
	0,3	1,0	3,0
1,0E+00	4,0E+01	3,8E+01	3,4E+01
2,0E+00	2,9E+00	2,7E+00	2,2E+00
3,0E+00	1,2E+00	1,1E+00	7,8E-01
4,0E+00	7,4E-01	6,3E-01	4,0E-01
5,0E+00	5,1E-01	4,1E-01	2,3E-01
6,0E+00	3,8E-01	3,0E-01	1,5E-01
7,0E+00	2,8E-01	2,2E-01	1,1E-01
8,0E+00	2,2E-01	1,7E-01	7,6E-02
9,0E+00	1,8E-01	1,3E-01	5,7E-02
1,0E+01	1,4E-01	1,0E-01	4,4E-02
2,0E+01	2,2E-02	1,8E-02	5,9E-03
3,0E+01	1,7E-05	2,1E-05	3,6E-05
4,0E+01	9,8E-07	1,2E-06	1,9E-06
5,0E+01	4,1E-07	4,9E-07	8,4E-07
6,0E+01	1,7E-07	2,1E-07	3,6E-07
7,0E+01	7,5E-08	9,3E-08	1,7E-07
8,0E+01	3,1E-08	3,9E-08	7,3E-08
9,0E+01	6,0E-09	7,5E-09	1,4E-08

Оценка соответствия бортовой аппаратуры предъявляемым требованиям основывается на заданных характеристиках потоков ВЭП и ТЗЧ КП. Указанные характеристики, как правило, задаются дифференциальными и интегральными спектрами плотности потока частиц в центре сферической защиты (по Al) разной толщины (для телесного угла облучения 4π стер) в табличном виде.

2.3.3. Разработка специализированной математической модели оценки стойкости полупроводниковых изделий к воздействию высокоэнергетичных протонов космического пространства

Как было указано выше, энерговыделение первичных высокоэнергетических протонов (ВЭП) не превышает в кремнии $0,2$ $\text{МэВ}\cdot\text{см}^2\cdot\text{мг}^{-1}$, что недостаточно для образования критического заряда $Q_{кр}$ в чувствительном объеме $V_{эф}$. Однако ВЭП при попадании в материал (Si) способны образовывать в процессе неупругих взаимодействий с ядрами кремния в $V_{эф}$ или прилегающих областях, вторичное излучение из продуктов ядерных реакций (p , Si) с высокими значениями ЛПЭ_Г. Данный процесс можно рассматривать как внутренний источник ТЗЧ.

Численные характеристики указанных процессов можно определить из анализа экспериментальных данных, приведённых в работе [28]. В данной работе на примере наблюдений изменения логических состояний ячеек памяти ИМС К145ИР1П и К565РУ1, облучаемых источниками высокоэнергетических протонов $E_p = 1000$ МэВ и $E_p = 150$ МэВ, рассмотрена роль ядерных реакций (p, Si) как первопричины одиночных сбоев, т.е. инверсий логических состояний ($0 \rightarrow 1; 1 \rightarrow 0$).

Количество сбоев (инверсий) $N_{инв}$ определяется по формуле

$$N_{сб} = FMN_y V_{эф} \sigma_y \mathcal{E}(E_i), \quad (2.24)$$

где M – объём логической памяти ИМС, (К565РУ1) $1K \cdot 1 = 4096$ бит;

F – интегральный поток протонов, $пр \cdot см^{-2}$, ($5,6 \cdot 10^{11}$ $пр \cdot см^{-2}$ при $E_p = 1000$ МэВ);

$N_y = N_A \rho / A_{Si} = 5,01 \cdot 10^{22}$ $см^{-3}$ – число ядер (Si) в $см^3$;

$V_{эф}$ – эффективный объём чувствительного элемента, $см^3$;

$\sigma_{яp}$ – сечение при неупругом взаимодействии протона с ядрами кремния, $см^2$;

$\mathcal{E}(E_n)$ – доля ядерных реакций с выходом фрагментов, обладающих энергосвободением в $V_{эф}$ более порогового значения E_n .

Характеристика $\mathcal{E}(E_n)$ определяет выход вторичных ТЗЧ с интегральным ЛПЭ₁ достаточным для образования, согласно условию (2.13), порогового энергосвободения $E_i = \ddot{E} \ddot{Y}_i X$, МэВ на пробеге частицы в $V_{эф}$ равном $X = l_{ак} \cdot \rho$.

Из ядерной физики известно, что для ядер кремния:

$$\sigma_{яp} = \pi R^2 \approx 4,6 \cdot 10^{-25} \text{ см}^2, \text{ где } R = 1,3 \cdot 10^{-13} A^{1/3} \approx 3,8 \cdot 10^{-13} \text{ см}.$$

Сечение сбоев на один чувствительный элемент ячейки памяти

$$\sigma_i^p = \frac{N_{инв}}{FM} N_y V_{эф} \sigma_{яp} \mathcal{E}(E_n), \text{ см}^2/\text{бит}. \quad (2.25)$$

Для интегральной микросхемы (ИМС) в целом сечение сбоев описывается формулой

$$\sigma_{ис}^p = M \sigma_{ip}, \text{ см}^2,$$

где M – число чувствительных элементов (бит) в ИМС.

Геометрические размеры $V_{эф}$ определяются технологией и топологией ИМС (ИПЭ).

В рассмотренном эксперименте $\sigma_i^p = 5 \cdot 10^{-12}$, $см^2/\text{бит}$ при

$$V_{эф} = 10^x 10^y 10^z \text{ мкм} = 10^{-9} \text{ см}^3.$$

По результатам эксперимента получены функциональные зависимости $\mathcal{E} = f(E_i)$ (рис 2.6) для энергии протонов 1000 МэВ и 150 МэВ, из которых по заданному E_n однозначно определяется $\mathcal{E}(E_n)$.

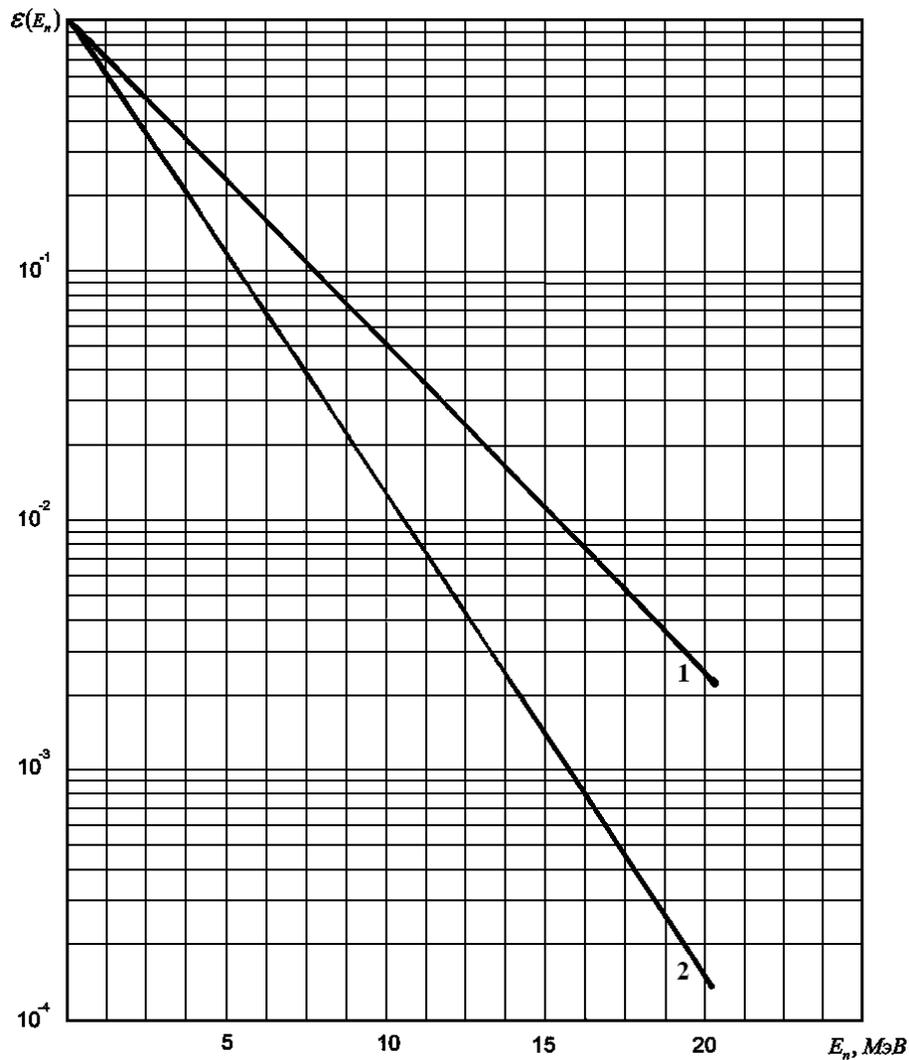


Рис. 2.6. Интегральный спектр энерговыделения в объёме $V_{эф} = 10 \times 10 \times 10$ мкм от (p, Si) ядерных реакций протонов 1 - 1000 МэВ и 2 - 150 МэВ

На рис. 2.6 зависимости $\varepsilon(E_n)$ аппроксимируются выражениями:

1 - $\varepsilon(E_n) = \exp(-0,304E_n)$ и 2 - $\varepsilon(E_n) = \exp(-0,42E_n)$, или в общем случае для $E_p > 50$ МэВ двухпараметрической функцией

$$\varepsilon(E_i, E_p) = \exp[-E_i E_p^{-0,172}]. \quad (2.26)$$

Выражение (2.26) описывает выход, т.е. вероятность получения в объёме $V_{эф}$ энерговыделения E_n , в зависимости от энергии протонов. Таким образом, принятая модель сбоев содержит два параметра исследуемого ИПЭ: E_n и $V_{эф}$. Если для конкретной ИМС эти параметры известны, сечение сбоев в одной ячейке определяется выражением (2.25), а число сбоев ИМС в целом - выражением (2.24), или $N_{\varepsilon i \dot{a}} = \sigma_i^p FM$.

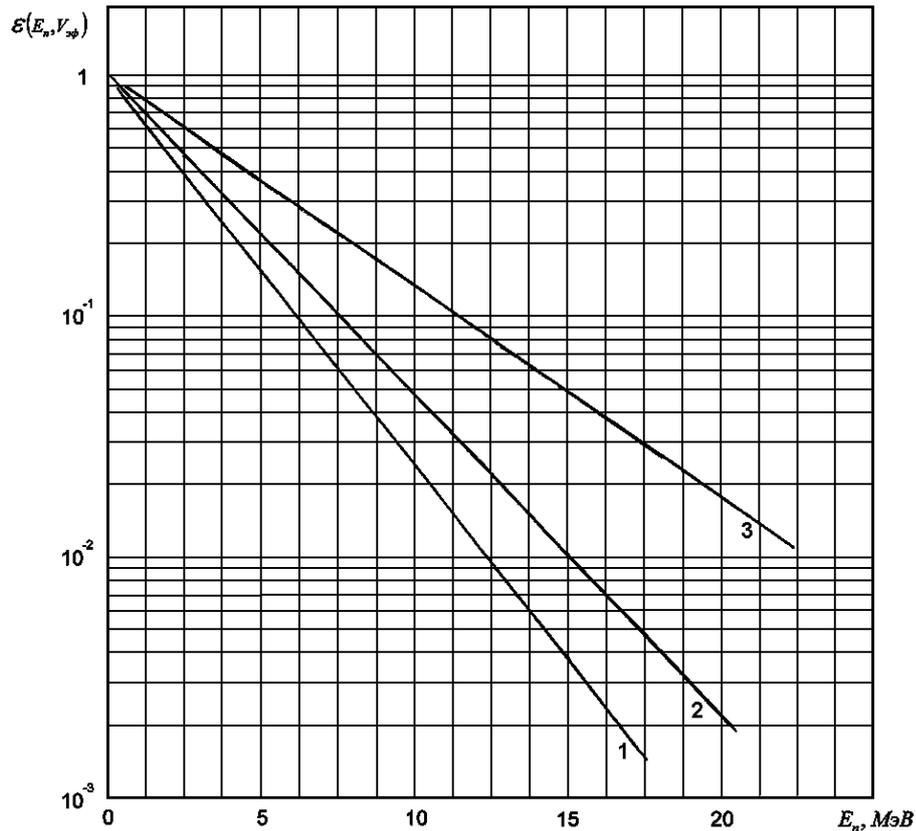


Рис. 2.7. Интегральный спектр энерговыделения в *Si* вторичных ТЗЧ от протонов 1000 МэВ.

1. $V_{эф} = 5 \times 5 \times 10 \text{ мкм}$; 2. $V_{эф} = 10 \times 10 \times 10 \text{ мкм}$; 3. $V_{эф} = 20 \times 20 \times 20 \text{ мкм}^3$

На рис. 2.7 приведены расчётные зависимости $\varepsilon = f(E_n, V_{эф})$ для энергии протонов $E_p = 1000 \text{ МэВ}$ и ряда значений $V_{эф}$.

Из выражений (2.25) и (2.26) следует для сечения сбоя ячейки

$$\sigma_i^p(E_n, E_p) = 2,3 \cdot 10^{-2} V_{эф} \exp[E_n E_p^{-0,172}], \text{ см}^2. \quad (2.27)$$

На рис. 2.8 представлено семейство расчётных значений σ_i^p для ряда заданных E_n , и $V_{эф}$ при этом для $E_p > 2 \text{ ГэВ}$ принято $E_i^{-0,172} = 0,27$.

Для определения интенсивности возможных единичных эффектов в ИПЭ от воздействующих ВЭП можно ввести функцию относительной зависимости сечения эффекта от энергии протонов:

$$W_p = \frac{\sigma_i^p}{\sigma_s^p} = \frac{2,3 \cdot 10^{-2} V_{эф} \exp(-E_n E_p^{-0,172})}{2,3 \cdot 10^{-2} V_{эф} \exp(-E_n E_{\max}^{-0,172})} = \exp[-(E_p^{-0,172} - E_{\max}^{-0,172}) E_n]. \quad (2.28)$$

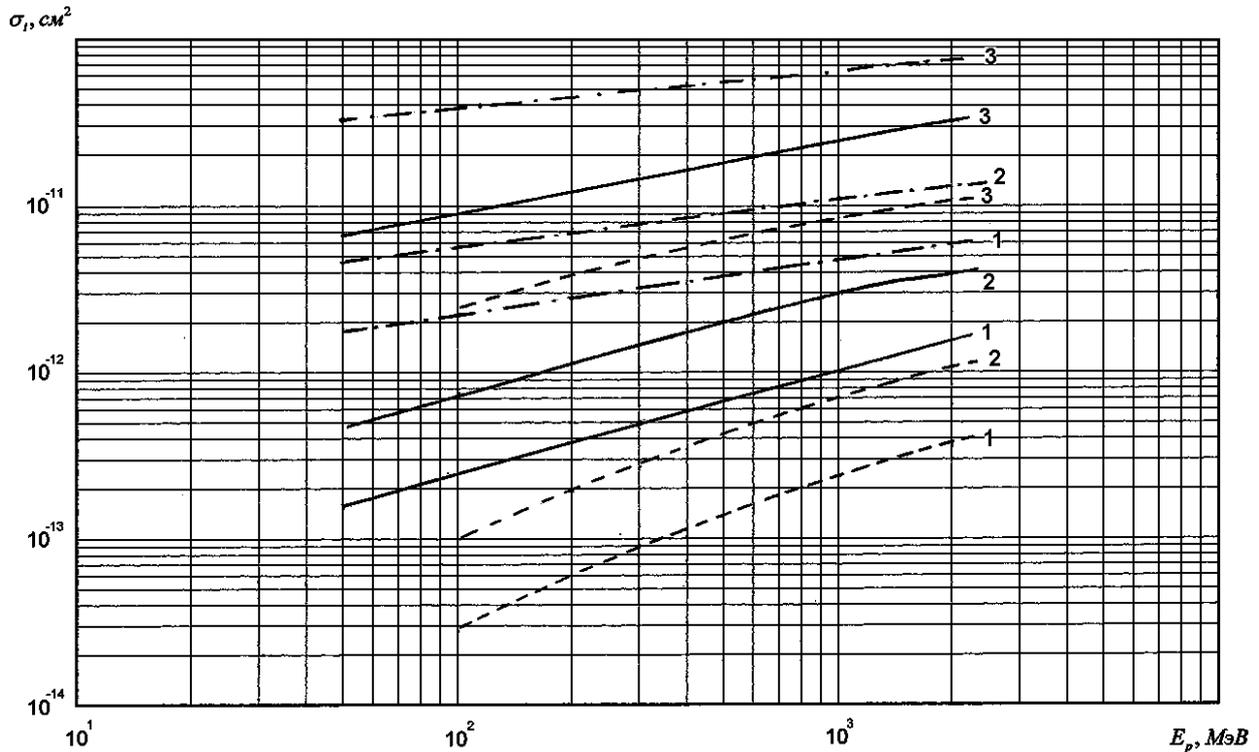


Рис. 2.8. Зависимость сечения сбоя одного чувствительного элемента $\sigma_i=f$

$$(E_n, E_p, V_{\text{эф}})$$

1. $V_{\text{эф}} = 10 \times 10 \times 10$ мкм; 2. $V_{\text{эф}} = 20 \times 10 \times 10$ мкм; 3. $V_{\text{эф}} = 20 \times 20 \times 20$ мкм.

----- $E_n = 5$ МэВ; _____ $E_n = 10$ МэВ; $E_n = 15$ МэВ

При известных σ_s^p , E_n конкретной ИС и заданных параметрах спектра ВЭП за защитой, интенсивность эффектов в ИПЭ (ИС) равна

$$\nu_{\text{ис}}^p = \sigma_s^p \int_{E_{p0}}^{E_{\text{max}}} \omega_p(E) \varphi_p(E) dE, \text{ эффект} \cdot \text{т}^{-1}, \quad (2.29)$$

где $\varphi_p(E)$ – дифференциальный энергетический спектр потока ВЭП КП, $(\text{см}^2 \cdot \text{т} \cdot \text{МэВ})^{-1}$;

$\omega_p = \frac{dW}{dE}$ – дифференциальная функция зависимости сечения

эффекта от энергии протонов, получаемая дифференцированием по E_p выражения (2.28);

E_{max} – максимальная энергия протонов в спектре, МэВ.

В формулу (2.29) входят дифференциальная функция зависимости сечения единичного эффекта $\omega(E_p)$ и дифференциальный спектр ВЭП $\varphi(E_p)$. Как и для ТЗЧ характеристики потока ВЭП задаются в табличном виде.

Применяя для интеграла, входящего в формулу (2.29), первую теорему о среднем получаем выражение

$$\int_{E_{p0}}^{E_{max}} \omega_p(E) \varphi_p(E) dE = \overline{\omega_p} \int_{E_{p0}}^{E_{max}} \varphi_p(E) dE,$$

где $\overline{\omega_p}$ - средняя дифференциальная плотность распределения $\sigma^p(E)$ на рассматриваемом участке спектра $[E_{p0}, E_{max}]$

$$\overline{\omega_p} = \frac{1}{E_{max} - E_{p0}} \int_{E_{p0}}^{E_{max}} \omega_p(E) dE = \frac{1}{E_{max} - E_{p0}} \left[1 - e^{-\left(E_{p0}^{-0,172} - E_{max}^{-0,172}\right) E_n} \right], \text{ МэВ}^{-1}; \quad (2.30)$$

$\int_{E_{p0}}^{E_{max}} \varphi_p(E) dE = F_p(> E_{p0})$ - интегральная плотность распределения ВЭП с энергией $E_p > E_{p0}$, $\text{см}^{-2} \cdot \text{т}^{-1}$.

Средняя энергия $\overline{E_p}$, соответствующая среднему значению сечения единичного эффекта на $[E_{p0}, E_{max}]$ находится как

$$\overline{E_p} = \int_{E_{p0}}^{E_{max}} E \omega_p(E) dE = \overline{\omega_p} \int_{E_{p0}}^{E_{max}} E dE = \frac{(E_{max} - E_{p0})}{2} \left[1 - e^{-\left(E_{p0}^{-0,172} - E_{max}^{-0,172}\right) E_n} \right], \text{ МэВ} \quad (2.31)$$

Частота единичных эффектов в одном изделии от ВЭП определяется выражением

$$\nu_{uc}^p = \sigma_s^p \overline{\omega_p} \overline{E_p} F_p(> E_{p0}), \text{ эффект} \cdot \text{т}^{-1},$$

или в развёрнутом виде

$$\nu_{uc}^p = \frac{\sigma_s^p}{2} \left[1 - e^{-\left(E_{p0}^{-0,172} - E_{max}^{-0,172}\right) E_n} \right]^2 F_p(> E_{p0}) \text{ эффект} \cdot \text{т}^{-1}, \quad (2.32)$$

где $E_{p0} = 29(E_n - 0,69)$ - пороговая энергия протонов, значение энергии протонов, начиная с которой наблюдаются единичные эффекты в ИПЭ от ВЭП, МэВ;

$E_n \approx \text{ЛПЭ}_n \cdot l_{ak} \cdot \rho_{si}$ - пороговая поглощённая энергия, энергия, выделенная ЗЧ в чувствительном объёме $V_{эф}$ на длине собирания заряда l_{ak} (см) и достаточная для образования неравновесного заряда Q_n приводящего к эффекту, МэВ;

ρ_{si} - плотность вещества поглотителя, $\text{мг} \cdot \text{см}^{-3}$ (для кремния $\rho_{si} = 2330 \text{ мг} \cdot \text{см}^{-3}$);

ЛПЭ_n - пороговое значение линейной потери энергии вторичной ТЗЧ в веществе, приводящее к эффекту, $\text{МэВ} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{мг}^{-1}$.

Угловое распределение ВЭП в расчёте не учитывается. Принимаются во внимание все прототипы с энергией $> E_{p0}$ в телесном угле облучения 4π стер, т.е в центре сферы за реальной защитой.

σ_s^p и E_n - справочные данные на ИПЭ, E_{max} (МэВ) и $F(> E_{p0})$ - характеристики данного спектра ВЭП КП.

В качестве примера задания характеристик воздействия протонов КП в таблице 2.2 приведены интегральные спектры средней плотности потока

(см²·сут)⁻¹ ВЭП СКЛ в центре сферической защиты разной толщины для изделий «ЦСКБ-Прогресс» [18].

Выражение (2.32) учитывает зависимость сечения единичного эффекта от энергии протонов и особенности спектра ВЭП.

Таким образом, частота сбоев от ВЭП для всего изделия может быть вычислена по формуле

$$\nu_{изд}^p = \sum_{j=1}^{n_j} n_{uc_i} \nu_{uc_i}, \text{ эффект} \cdot t^{-1}, \quad (2.33)$$

где n_{uc_i} и n_j - определены выше для ТЗЧ.

Таблица 2.2

E _p , МэВ	Интегральный спектр ВЭП СКЛ $F(E_p >)$ (см ² ·сут) ⁻¹ за защитой г·см ⁻² .		
	0,3	1	3,0
50	3,76E+05	2,73E+05	1,41E+05
100	1,63E+05	1,43E+05	9,61E+04
200	6,16E+04	5,80E+04	4,87E+04
500	1,55E+04	1,51E+04	1,38E+04
800	7,39E+03	7,21E+03	6,66E+03
1000	4,99E+03	4,87E+03	4,50E+03
2000	1,38E+03	1,35E+03	1,25E+03
8000	3,53E+01	3,44E+01	3,16E+01

Частота сбоев (отказов) изделия на заданной орбите за реальной защитой определяется отдельно для ВЭП: ЕРПЗ, ГКЛ, СКЛ, и для ТЗЧ: ГКЛ, СКЛ, и вычисляется как сумма:

$$\nu_{из} = [\nu_{ВЭП} + \nu_{ТЗЧ}], \text{ эффект} \cdot t^{-1}; \quad (2.34)$$

$$\nu_{ВЭП} = ВЭП(\nu_{из}^{ЕРПЗ} + \nu_{из}^{ГКЛ} + \nu_{из}^{СКЛ});$$

$$\nu_{ТЗЧ} = ТЗЧ(\nu_{из}^{ГКЛ} + \nu_{из}^{СКЛ}).$$

Для определения общего числа возможных эффектов в изделии за время активного существования на орбите каждое значение $\nu_{из}$ умножается на время воздействия данного вида частиц.

Исходя из известных значений $\sigma_s^{ТЗЧ}$ (см²) и L_n (МэВ·см²·мг⁻¹) по ТЗЧ, для данного ИПЭ, может быть получено сечение сбоя для ВЭП по алгоритму представленному ниже.

Как следует из хода кривых для $\sigma_i^p(E_p)$ рис. 2.7, сечение сбоя относительно слабо зависит от энергии протонов, а при $E_p > 2$ ГэВ практически не зависит.

Сечение насыщения единичного эффекта от протонов для энергии $E_p=2$ ГэВ согласно (2.27) и учитывая, что для ТЗЧ в первом приближении $\sigma_{si}^{TЗЧ} \approx a \times b \text{ см}^2 \cdot \text{бит}^{-1}$, или

$$\sigma_s^P = 2,3 \cdot 10^{-2} M \sigma_{si}^{TЗЧ} l_{ak} \exp(-0,27 E_n), \text{ см}^2,$$

где M – объём логической памяти или количество вентилях в ИС.

Таким образом, для микросхемы в целом сечение насыщения эффекта от ВЭП принимает вид

$$\sigma_s^P = 2,3 \cdot 10^{-2} \sigma_s^{TЗЧ} l_{ak} \exp(-0,27 E_n), \text{ см}^2. \quad (2.35)$$

Пороговые потери энергии вторичной заряженной частицы в чувствительном элементе определяются по формуле

$$E_n = 2,33 \cdot 10^3 \cdot L_n \cdot l_{ak}, \text{ МэВ}. \quad (2.36)$$

Совокупность формул: (2.21 - 2.23), (2.32 - 2.34) представляет собой основу математической модели, на основе которой реализованы алгоритмы оценки стойкости ИПЭ к воздействию ЗЧ КП.

Формулы (2.21), (2.22) основаны на функции Вейбулла, (2.32) также является экспоненциальной, рассматриваемые функции представляют собой плавные, неразрывные интегрируемые функции на рассматриваемых интервалах, что исключает неопределённость в результатах.

Разработанное математическое обеспечение используется в специализированной части универсальной программной системы, учитывающей специфику предметной области.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА ИНТЕРАКТИВНОЙ ПРОГРАММНОЙ СИСТЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

3.1. Разработка универсальной программной системы, настраиваемой на исследование различных объектов

Современные системы математического моделирования и оценки характеристик объекта сейчас полностью охватывают весь путь разработки электронных устройств от идей до функционирующего изделия. В тоже время ряд специфических областей использования программных средств оценки характеристик сложных объектов, таких как моделирование радиоэлектронной аппаратуры эксплуатируемой в условиях космического пространства, обделен интерактивными программными комплексами. При разработке таких сложных систем возникает комплекс проблем интеграции средств процесса разработки аппаратуры на всех этапах её создания.

В ходе проведенного анализа решаемой задачи с учётом специфики построения специализированного программного обеспечения была разработана структурная модель универсальной программной системы, настраиваемой на исследование и оценку различных объектов (рис. 3.1), в состав которой входят:

- внешняя информационная среда поддержки моделирования и оценки характеристик объекта, содержащая перечень ГОСТов и требований, предъявляемых техническими условиями в рамках разрабатываемого проекта;

- встроенная информационная среда поддержки моделирования и оценки характеристик объекта, содержащая справочную систему с интегрированной или загружаемой библиотекой компонентов, обеспечивающую быстрый доступ к различной справочной информации (критичные параметры и эксплуатационные характеристики);

- встроенная среда интеграции проектов, представляющая собой связующее звено между программной средой схемотехнического моделирования и оценки характеристик объекта и универсальной справочной системой;

- система оптимизации проекта на основе заданных и рассчитываемых показателей;

- прикладная подсистема оценки характеристик объекта, ориентированная на определение стойкости ИПЭ от заряженных частиц космического пространства и включающая модуль проверки конфигурации разрабатываемого блока на соответствие требованиям стойкости;

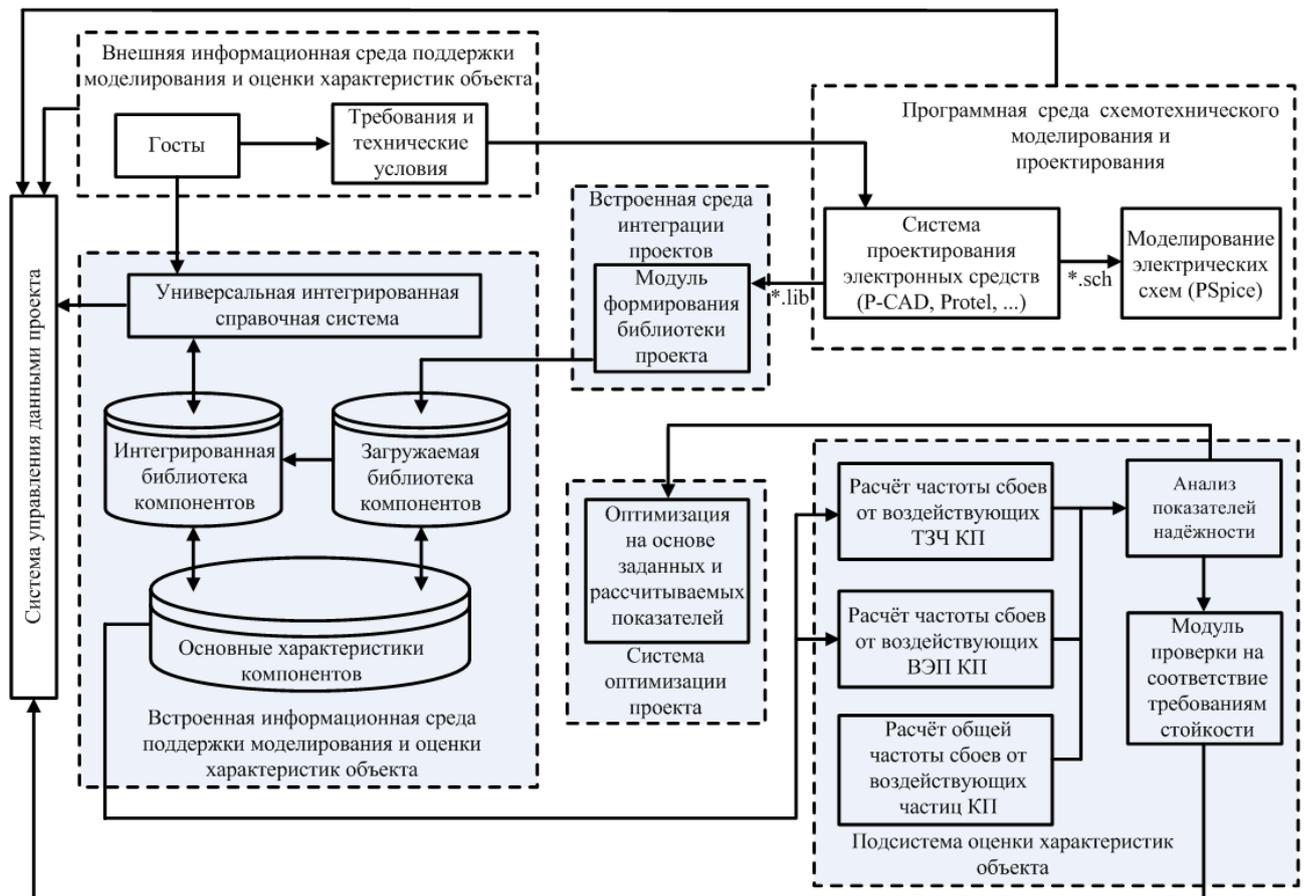


Рис. 3.1. Структурная модель универсальной программной системы исследования сложных объектов

- программная среда схемотехнического моделирования и проектирования, включающая в себя систему математического моделирования работы электрических схем PSpice и системы проектирования схемотехнических решений на основе P-CAD, Protel и др.

3.2. Разработка программного обеспечения оценки характеристик сложного объекта

Программные средства интегрированных систем, позволяющие получать оперативные данные о характеристиках сложных объектов с возможностью проверки конфигурации разрабатываемого блока на соответствие правильности выбора элементной базы, решают задачи связанные с оценкой множества различных параметров, которые зачастую носят экспертный характер. В связи с этим, при разработке программного комплекса необходимо создание различных функциональных модулей, обеспечивающих комплексный подход при проведении оценки характеристик сложных объектов (на примере оценки стойкости отдельных полупроводниковых изделий) с концентрацией информационных и справочных ресурсов в одном месте [4, 5].

Программный комплекс должен состоять из универсальной части, ориентированной на интеграцию проектов, и специализированной части, учитывающей специфику предметной области. Применение программных средств и автоматизация процесса оценки существенно сокращает время проведения оперативного расчёта характеристик объекта.

С учётом структуры универсальной программной системы предложена организация программного обеспечения, позволяющего оперативно проводить оценку характеристик сложных объектов. Программное обеспечение, представленное на рис. 3.2 состоит из инвариантной части, позволяющей проводить интеграцию различных модулей системы, и специализированной части, отражающей специфику предметной области.

В состав инвариантной части входят следующие блоки.

1. Встроенная универсальная справочная система. Модуль, информационного обеспечения проводимого моделирования и оценки сложных объектов, в котором предусмотрены основные операции с базой данных:

- анализ и ведение интегрированной базы данных, включающий операции поиска, редактирования и добавления элементов;
- загрузку внешней базы данных с возможностью редактирования и поиска, в роли которой может выступать отдельный файл;
- подготовку элементов для предоставления их другим модулям комплекса. Создание списка элементов, используемых в специализированных подсистемах комплекса.

2. Встроенная среда интеграции проектов, интеграция с программной средой схемотехнического моделирования и проектирования, отвечает за обеспечение интеграции проектов с различными САПР, заключающееся в добавлении элементов в справочную систему из библиотек САПР.

3. Встроенная система оптимизации проекта позволяет выбирать элементы оптимизации, из группы аналогичных изделий, исходя из заданных и рассчитанных характеристик.

В составе специализированной части можно выделить модуль моделирования сложного объекта. Работа модуля ориентирована на получение оперативных результатов проводимых расчётов и оценок сложного объекта.



Рис. 3.2. Модульная структура программного обеспечения оценки сложных объектов

Исходя из организации модульной структуры программного обеспечения оценки сложных объектов, разработана модель межмодульной интеграции внешних специализированных комплексов на основе универсальной справочной системы рис. 3.3. Для взаимодействия справочной системы с различными функциональными подсистемами необходимо согласование форматов различных видов данных, учитывая специфику каждого модуля.

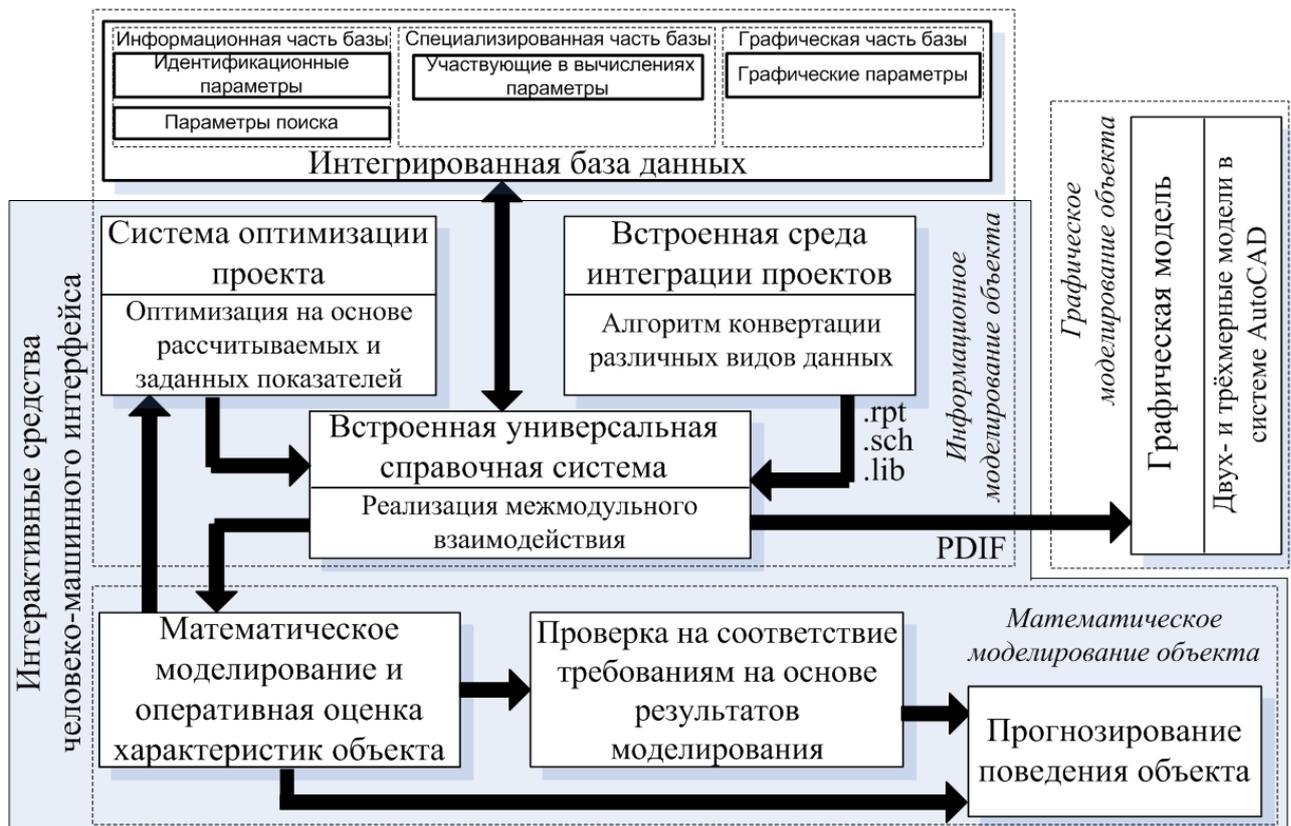


Рис. 3.3. Модель межмодульной интеграции на основе универсальной справочной системы

Взаимодействие с базой данных позволяет решить проблему согласования отдельных подсистем, и позволяет оперативно обеспечивать их информацией в рамках общего информационного пространства.

Организация и состав разрабатываемого программного обеспечения не ограничивается указанными подсистемами и в зависимости от решаемой задачи может меняться, также возможно включение в программный комплекс ряда сервисных функций, таких как: справочные материалы, дополнительные системы навигации и документооборота.

3.3. Синтез структуры интегрированной базы данных изделий

Разработанная электронная база компонентов представляет собой интегрированную библиотеку компонентов, содержит редактируемый

список изделий и выступает в роли источника информации, на основе которой проводятся математическое моделирование и оценка стойкости изделий [4, 5, 19, 22]. В тоже время интегрированная база может выполнять также ряд вспомогательных функций, таких как визуализация параметров ряда выбранных изделий, которая позволяет выбрать оптимальный вариант изделия исходя из заданных параметров надёжности и стойкости. А наличие в базе информации об аналогах позволяет определить ряд недостающих параметров по данным аналога.

Обобщённая структура интегрированной базы данных полупроводниковых изделий представлена на рис. 3.4. Программа базируется на локальной базе данных и работает через интерфейс BDE (процессор баз данных фирмы Borland) с таблицами СУБД Paradox. При необходимости пользователь может перейти от локальной к файл-серверной структуре.

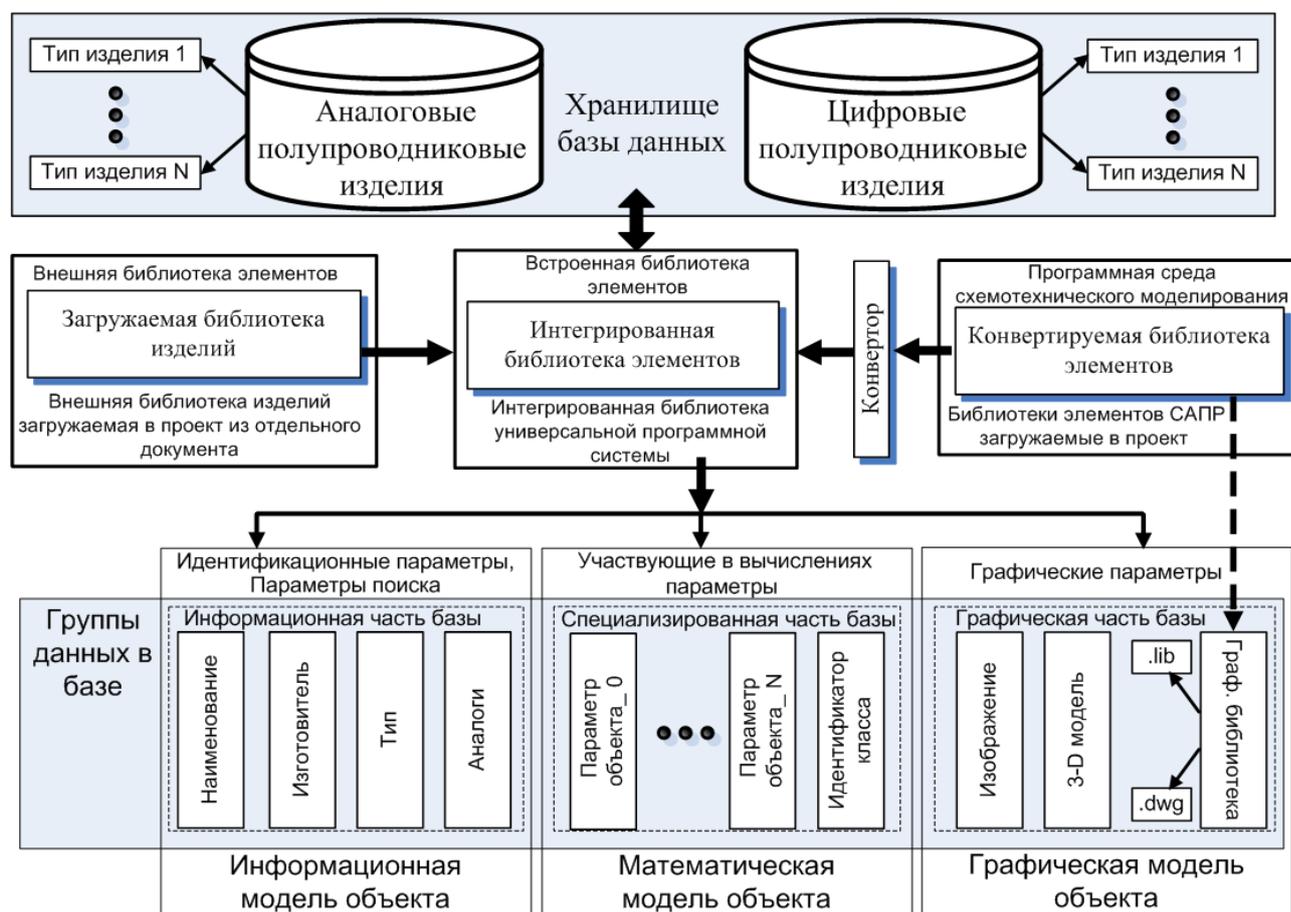


Рис. 3.4. Структура интегрированной базы данных

В базе выделены два основных хранилища (класса) аналоговые и цифровые микросхемы. Каждое из данных хранилищ включает в себя группу подклассов:

- для аналоговых ИС: АЦП и ЦАП; Вторичные источники питания; Дифференциальные, логарифмические, буферные и др. усилители;

Драйверы; Ключи и коммутаторы; Компараторы; Операционные усилители; Прочие линейные ИС;

- для цифровых ИС: Арифметические, логические и др. ИС; Запоминающие устройства; Микропроцессоры; ПЛИСы, БМК и ПЛМ; Цифровые процессоры обработки сигналов.

Информация, содержащаяся в базе, может быть разделена по функциональному назначению на 4 блока.

- идентификационные параметры;
- параметры, участвующие в вычислениях;
- параметры поиска;
- аналоги.

К идентификационным параметрам относятся:

Наименование изделия – универсальный идентификатор.

Фирма изготовитель – с учётом того, что в зависимости от изготовителя параметры аналогичных изделий могут существенно различаться.

Технология – технология изготовления может служить косвенным показателем при оценке различных параметров сложных объектов.

К участвующим в вычислениях параметрам относятся различные данные специализированной части. На примере оценки характеристик стойкости полупроводниковых изделий можно выделить следующие параметры: пороговая ЛПЭ сбоя, сечение сбоя, пороговая ЛПЭ тиристорного эффекта, сечение тиристорного эффекта, доза излучения.

К параметрам поиска относится идентификатор класса, который служит для классификации изделий по функциональному назначению. Основным показателем, по которому проводится сортировка в хранилище базы, является метка – идентификатор класса. Идентификатор класса является информационным полем базы и представляет собой краткую запись, указывающую на тип изделия. В скобках указаны сокращения присвоенные классам/подклассам в программе (принятые для данной программы и имеющие смысл только внутри неё).

Всего в программе предусмотрено 15 идентификаторов класса объединяющих две большие группы аналоговых и цифровых микросхем.

К аналоговым относятся (А) – АЦП и ЦАП (АЦ). Вторичные источники питания (ис). Дифференциальные, логарифмические, буферные и др. усилители (у). Драйверы (д). Ключи и коммутаторы (кк). Компараторы (к). Операционные усилители (оу). Прочие линейные ИС (п);

К цифровым (Ц) – арифметические, логические и др. ИС (ал). Запоминающие устройства (зу). Микропроцессоры (м). ПЛИСы, БМК и ПЛМ (ПП). Цифровые процессоры обработки сигналов (цпос).

Например, запись А/АЦ в столбце класс/подкласс будет означать принадлежность данного образца к типу аналоговых АЦП и ЦАП

микросхем, а запись Ц/м описывает принадлежность образца к цифровым микропроцессорам.

Поиск функциональных аналогов из группы объектов, обеспечивается работой с полем параметров аналогичных изделий, что является актуальным при рассмотрении устройств близких по своим конструктивным и функциональным параметрам. При проектировании аппаратуры специального назначения позволяет разработчику выбрать подходящий вариант.

Ниже, на рис. 3.5 представлена структурная схема интегрированной базы данных полупроводниковых изделий.

База данных состоит из четырёх таблиц:

1. Файл - class.bd. Содержит информацию о классах изделий содержащихся в базе данных. Таблица имеет четыре строковых поля. Три из которых являются ключевыми.



Рис 3.5. Структурная схема интегрированной базы данных полупроводниковых изделий

2. Файл -graf.bd. Данный файл хранит графическую информацию в базе данных, включающую изображение объекта в формате *.jpg, *.bmp, 3-D модель объекта и данные, полученные конвертированием различных библиотек.

3. Файл – param.db. Файл представляет собой основную таблицу, которая является главной и содержит следующую информацию: наименование объекта, класс, к которому относится объект, изготовитель объекта, его тип, перечень передаваемых и статичных параметров, дополнительные характеристики и краткую информацию по аналогам.

Файл -Analog.bd. Данная таблица содержит в себе информацию об объектах - аналогах.

Выбор такой схемы построения интегрированной базы данных позволяет получить хорошую структурированность и доступность данных, при высоком быстродействии внутри программного комплекса.

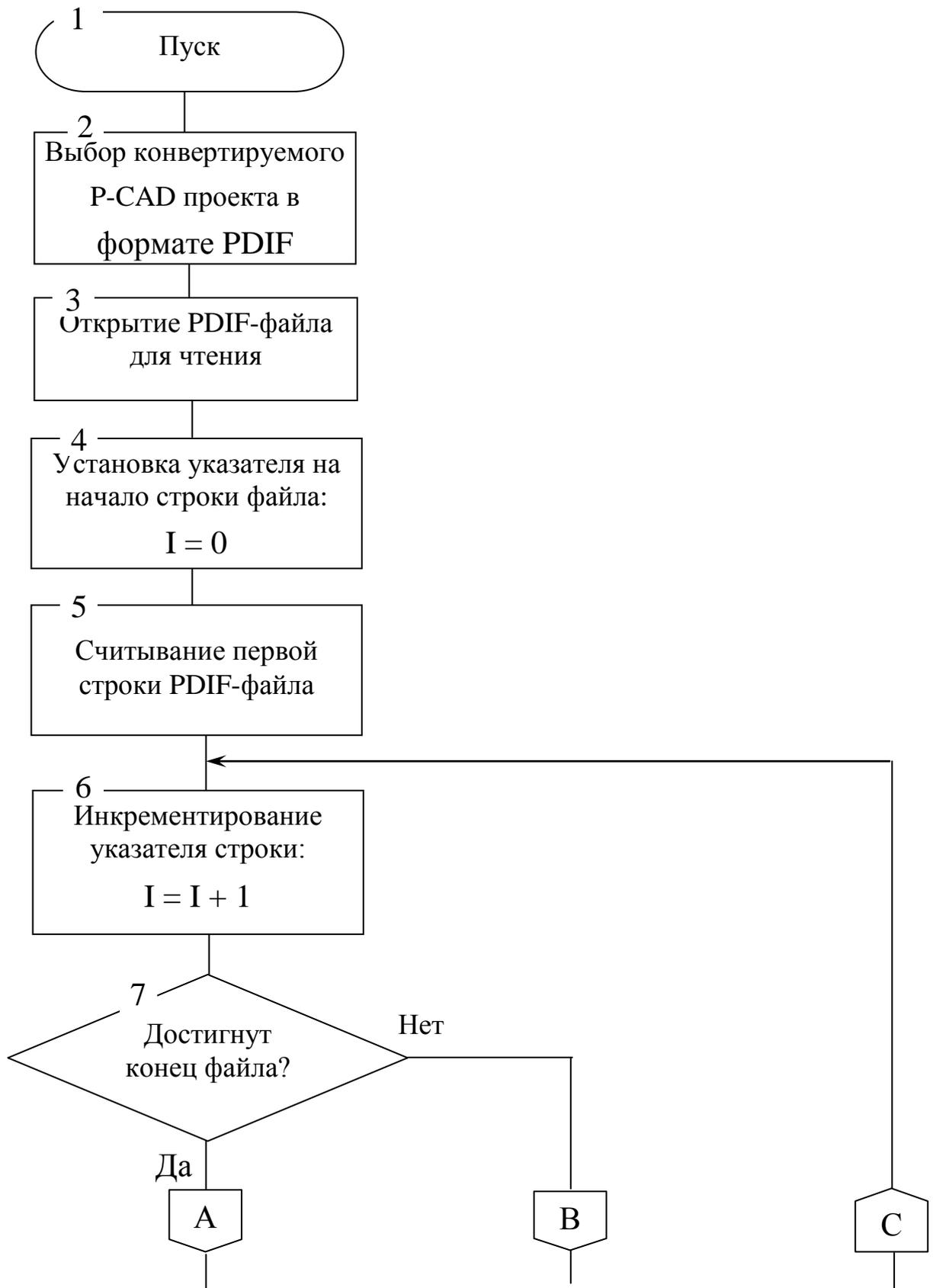
3.4. Инвариантная часть программного обеспечения оценки сложных объектов

3.4.1. Конвертация различных форматов файлов для интеграции систем

Разработчикам приходится работать в различных системах моделирования и проектирования, которые состоят из нескольких разноплановых пакетов [13]. В этой ситуации возникает необходимость «состыковки» различных систем моделирования и проектирования для поэтапной передачи информации из одной в другую. В случае грамотного подбора компонентов системы в целом, особое внимание уделяется, наряду с функциональностью отдельных пакетов, их взаимной совместимости. Передача данных из пакета в пакет может реализовываться, как правило, одним из трех методов.

Во-первых, связь осуществляется при помощи экспорта/импорта, то есть одна из систем может читать или записывать входную/выходную информацию в формате другой, сопрягаемой, системы. Примером такой реализации может служить тандем Protel/AutoCAD, в котором Protel как импортирует, так и экспортирует DWG-файлы, или P-CAD/PADS, где P-CAD может импортировать проекты, разработанные в системе PADS.

Во-вторых, существует конвертор, переводящий информацию из формата первой системы в формат второй. Ярким представителем подобного подхода является утилита P-CAD2SW, формирующая на основе файла P-CAD PCB ASCII трехмерную модель печатной платы в пакете SolidWorks. В-третьих, существует некий промежуточный формат данных, в который преобразуется информация из первой системы, и воспринимаемых во второй. Например, IDF-формат, который является промежуточным для передачи данных из электронных CAD систем в механические. Другим примером может служить формат DXF, используемый для обмена информацией между пакетами векторной графики. Многие зарубежные производители программного обеспечения предлагают своим клиентам различные прикладные модули для связи электронных и механических CAD систем. Среди которых можно выделить PCBto3D для SolidEdge, Protel/SolidWorks 3D PCB Modeler компании Desktop EDA для пакета Protel и другие программы.



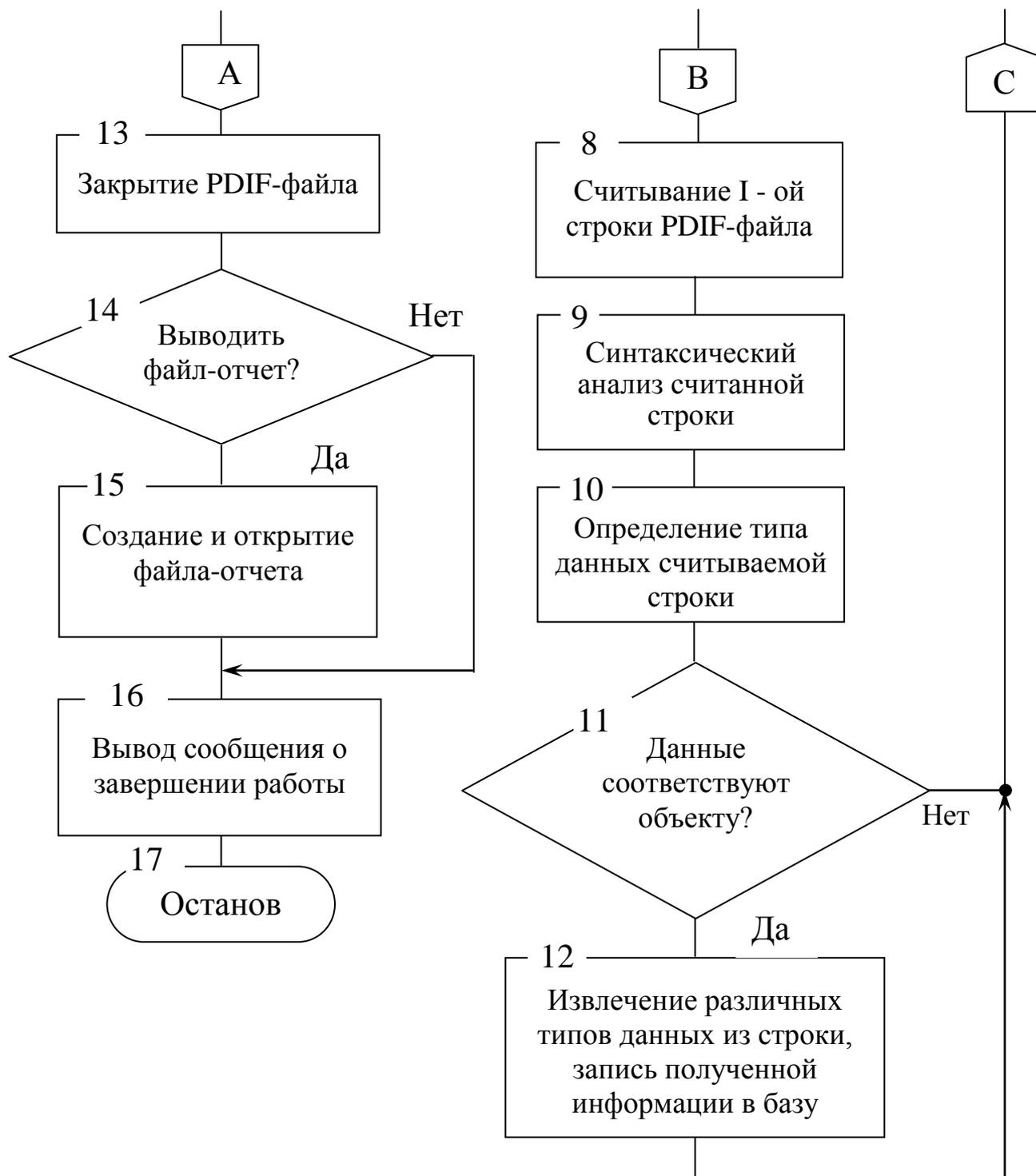


Рис. 3.6 – Общий алгоритм функционирования конвертора различных форматов

Общий алгоритм функционирования программного модуля «Конвертор баз данных PDIF – Интегрированная база данных полупроводниковых изделий специального программного обеспечения» приведен на рис 3.6.

Использование формата PDIF наиболее оптимально для решения задачи интеграции P-CAD с другими системами. Формат P-CAD Database Interchange Format (PDIF) представляет собой текстовый формат системы P-CAD. PDIF стандартный формат, который может быть использован для работы с БД P-CAD и может служить интерфейсом между P-CAD и другими системами (ACCEL, ORCAD и др.). В формате PDIF сохраняется «слоистая» структура проекта, что позволяет переносить проект из одной программы в другую.

Формат PDIF предназначен для текстового представления БД принципиальной схемы или печатной платы. PDIF файл организован в виде двух разделов (SYMBOL и DETAIL), которые соответствуют двум главным видам файла БД проекта в P-CAD. Подобно файлу базы данных P-CAD, файл PDIF может содержать данные либо в одном, либо в обоих разделах. Библиотечные компоненты хранятся в файлах, содержащих данные раздела SYMBOL, включая графические данные и информацию о выводах компонента. Файлы баз данных принципиальной схемы и печатной платы содержат данные раздела DETAIL, включая библиотечные компоненты, их расположение и их соединения.

Базы данных печатных плат всегда конструируются как одноуровневые проекты. БД схем также могут быть одноуровневыми, но часто конструируются с использованием многолистовых и/или иерархических проектов, использующих более одного файла на проект. Одноуровневый проект состоит из библиотечных компонентов, размещаемых в самом проекте. Файл БД проекта содержит данные раздела DETAIL, в то время как библиотечные символы содержат главным образом данные раздела SYMBOL.

Проект принципиальной схемы может состоять из нескольких различных листов, связанных между собой. Каждый лист представляет отдельный PDIF файл. Как и в одноуровневом проекте, данные раздела SYMBOL из файлов компонентов содержатся в разделе DETAIL файла принципиальной схемы. Иерархическая структура использует символы, которые представляют подсхемы принципиальной схемы.

3.4.2. Разработка блок-схемы функционирования подсистемы «Интеграция проектов»

Подсистема интеграции проектов, позволяет разработчику аппаратуры специального назначения автоматизировать цикл создания оборудования космических аппаратов. Интегратор предоставляет

возможность передачи справочной информации из программной среды схемотехнического моделирования и проектирования в интегрированную справочную систему программного комплекса.

Требования, предъявляемые к подсистеме, заключаются в следующем:

- взаимодействие с несколькими видами программных систем;
- гибкий выбор источника информации (оперативный выбор пользователем необходимого файла источника);
- визуализация базы конвертируемых элементов;
- редактирование и дополнение необходимыми параметрами отконвертированных образцов в подсистеме «Справочная система». Блок-схема модуля интеграции проектов показана на рис. 3.7. Алгоритм предусматривает выполнение следующих основных операций настройки: выбор программной системы пользователем, загрузка файла проекта конструируемого блока.

При выборе системы автоматизированного проектирования (САПР) доступны следующие популярные пакеты:

- система проектирования схемотехнических решений на основе P-CAD;
- система проектирования схемотехнических решений на основе Protel;
- программа математического моделирования работы электрических схем PSpice.

Средствами встроенного модуля интеграции проектов обеспечивается загрузка файла проекта программной среды схемотехнического моделирования и проектирования. Для чего указывается путь к файлу источнику базы проекта конструируемого блока. Заданный файл проверяется на наличие данных, если он пуст, поступает предложение смены файла. После файл считывается и формируется список всех электронных компонентов, участвующих в проекте разрабатываемого устройства. Если загруженный файл удовлетворяет требованиям пользователя, его необходимо загрузить в справочную систему для дальнейшей обработки. При этом происходит сравнение списка компонентов, загружаемых из системы САПР, с данными интегрированной базы. Совпадение наименований ЭРЭ инициирует загрузку информационных полей из интегрированной базы в таблицу загружаемого проекта. Если в интегрированной базе не нашлось ни одного совпадающего компонента, данные для интересующих изделий придётся вводить в ручном режиме.

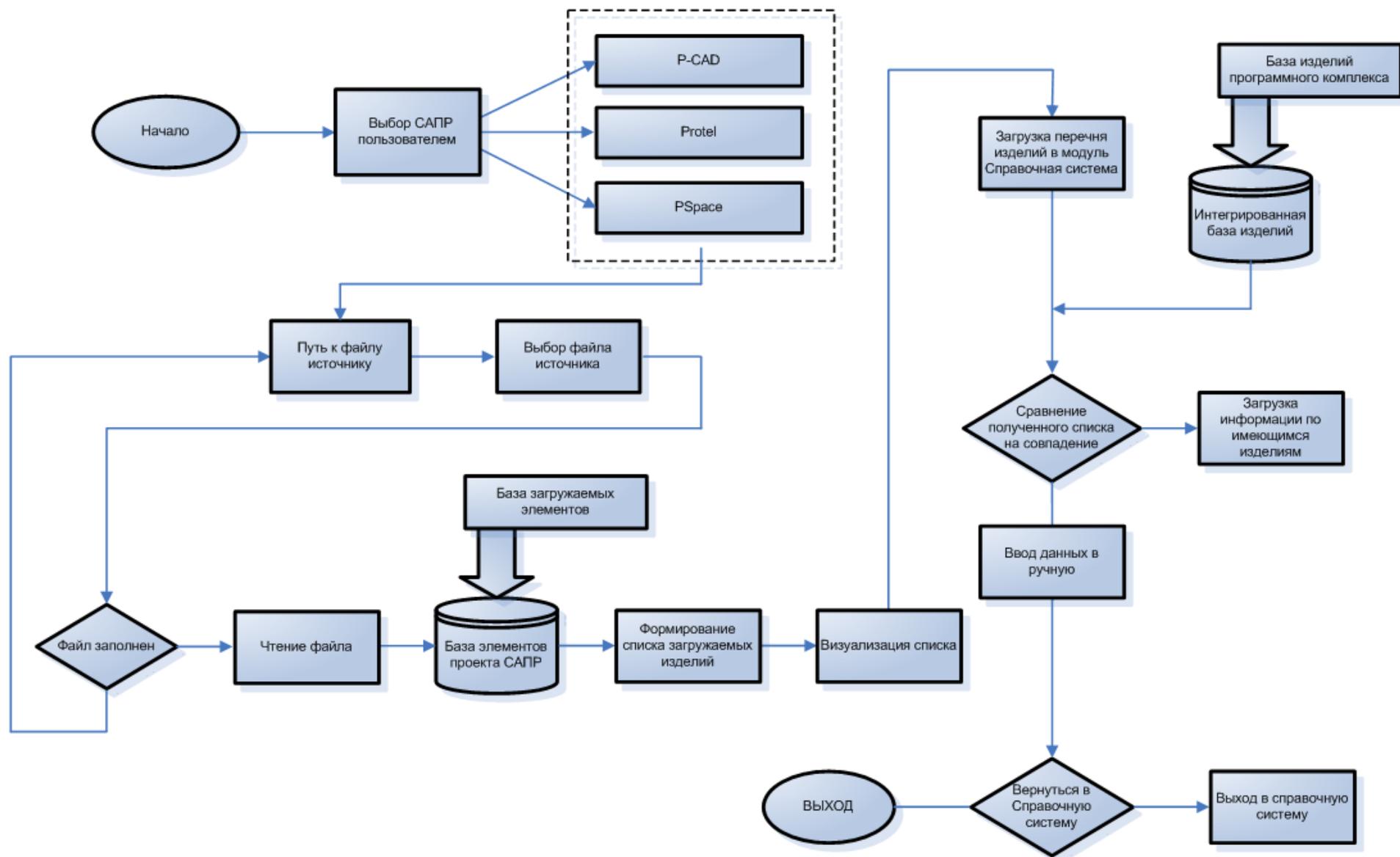


Рис 3.7. Блок-схема работы подсистемы «Интеграция проектов»

По завершении проделанных операций программа находится в модуле «Справочная система» и все дальнейшие операции определяются алгоритмом справочной подсистемы. В любой момент интегратор проектов может быть закрыт, в этом случае программа выходит в основное меню программного комплекса.

3.4.3. Разработка блок-схемы функционирования подсистемы «Справочная система»

В структуре программного комплекса по оперативной оценке характеристик сложных объектов, справочная система занимает особое место, помимо выполнения своей основной функции, заключающейся в представлении по требованию пользователя информации о выбранных изделиях, она выполняет функцию связующего звена между рядом модулей.

При создании справочной системы к ней был предъявлен ряд требований:

- должна содержать интегрированную базу данных;
- должна иметь возможность загрузки базы данных из внешнего, по отношению к программному комплексу, документа;
- обеспечивать просмотр и редактирование базы изделий;
- передачу параметров выбранного изделия в другие модули программного комплекса.

В режиме просмотра пользователь имеет возможность просмотра данных базы. Справочная система изделий обеспечивает доступ к различной справочной информации (данные о типе изделия, пороговые значения линейных потерь энергии, сечение сбой и т. п.).

Система поиска, реализованная в справочнике, имеет ряд фильтров позволяющих быстро найти нужный элемент.

Режим редактирования справочной информации обеспечивает полный доступ ко всем полям интегрированной базы данных для редактирования.

Добавление новых изделий в базу осуществляется несколькими способами: ручной ввод, сохранение данных из внешнего, по отношению к программному комплексу, документа. В последнем случае программа сверяет информационные поля, содержащиеся в документе с информацией уже записанной в интегрированной базе. Для реализации возложенных на справочную систему задач был разработан алгоритм учитывающий специфику требований предъявляемых к справочной системе, рис. 3.8.

В данном алгоритме можно выделить основные процедуры, отвечающие за определённую операцию обработки и визуализации данных. Основными операциями в алгоритме являются: работа со справочниками, подключение базы данных, работа фильтров, работа с изделиями, выборка параметров, формирование списка параметров и списка изделий для передачи в формы расчёта, формирование отчёта по выбранным изделиям.

Работа алгоритма справочной системы может быть описана следующим образом.

Начальным этапом в работе справочной системы, является инициализация базы данных содержащей информацию о различных образцах изделий полупроводниковой электроники (конструкция базы описана выше в главе 3.3), т.е. выбор базы данных (БД) по критерию пользователя. В роли базы здесь может выступать предустановленный справочник – интегрированная база данных программы (загружается при запуске подсистемы по умолчанию), либо загружаемый специальным образом отформатированный документ в формате Microsoft Word. При выборе справочника необходимо задание пути к искомому файлу справочнику. Внесённые изменения в справочнике могут быть сохранены.

По результатам выбора базы данные из неё загружаются в программу, после чего над ними могут выполняться операции сортировки, отображения данных, корректировки, удаления и т.д. Для операций поиска и сортировки в программе реализован ряд фильтров. Фильтр «Класс» позволяет проводить сортировку по классам и открывает доступ к фильтрам деления на подклассы, т.е. может быть задан функциональный тип микросхем. Для поиска изделия по известному наименованию предусмотрен поиск путём задания наименования в поле поиска изделий.

«Поиск по имени», для этой операции выбор фильтров по классам и подклассам не обязателен. В зависимости от параметров поиска на экране отображается список из выбранных изделий. Выбор объекта запроса по критериям пользователя осуществляется на основе фильтрации списка изделий, содержащихся в базе, и выбора интересующего образца, при этом к выбранному образцу прикрепляется метка класса/подкласса.

После выбора поля интересующего образца, для него становятся доступны операции добавления, редактирования и удаления образца.

В случае активации операций добавления и редактирования искомого изделия, инициирует передачу данных из базы, которая загружает все поля с данными, принадлежащими данному образцу, и над ними могут быть проделаны следующие операции: редактирование, удаление и ввод данных. Помимо этого предусмотрена операция вычисления для полей сечение сбоя и сечение тиристорного эффекта. После проведённых изменений база данных может быть сохранена.

Выбор режима работы БД позволяет перейти к добавлению изделий к списку ИПЭ (в списке находятся изделия, которые будут переданы в другие формы программы для последующего расчёта), либо подготовить отчёт по выбранным изделиям в формате MS Word. В случае выбора составления отчёта он может быть распечатан в форме аналогичной составленному документу и сформированной базе.

Операция «Добавить ИПЭ в список» присоединяет выбранное изделие к списку изделий передаваемых в другие модули программы, в данном списке содержатся все выбираемые пользователем изделия с принадлежащими им полями параметров (информационными полями). Помимо добавления изделий к списку предусмотрена операция удаления, если изделия были добавлены по ошибке. После того как все необходимые изделия будут присоединены к списку, формируется список полупроводниковых изделий для расчёта. Сформированный список передаётся в формы специализированной части комплекса («Оценка стойкости комплектующих ИПЭ к локальным радиационным эффектам при воздействии отдельных ЗЧ КП») для дальнейшей обработки.

На любом этапе работы справочной системы возможен выход в главное меню программного комплекса.

Таким образом, разработанный алгоритм модуля справочной системы совмещает в себе ряд разнонаправленных функций (работа с базой данных, предоставление справочной информации по выбранным ИПЭ, передача данных внутри программы). Применённый подход позволяет оптимально задействовать концепцию базы данных, разработанную специально для совместного использования с модулем справочной системы. В рамках алгоритма предусмотрено как редактирование информации, содержащейся в базе, так и её дополнение. Для выполнения роли связующего звена в справочной системе предусмотрена передача информации о выбранном изделии в другие модули. Данная функция реализуется посредством занесения изделий в специальный список выбранных ИПЭ, который в последствии передаётся в другие формы программы со своими информационными полями. Передаваемые параметры используются другими модулями программы для расчёта и являются неотъемлемым условием функционирования комплекса.

3.4.4. Разработка подсистемы «Теоретическая справка»

В программном комплексе теоретическая справка играет роль источника информации, включающего основные теоретические положения, концепции и подходы к оценке стойкости полупроводниковых изделий к локальным радиационным эффектам при воздействии отдельных ЗЧ КП изделий и блоков космических аппаратов. Теоретическая справка

также содержит понятия и определения, которые могут использоваться при расчётных работах и моделировании влияния ЗЧ КП на полупроводниковые изделия.

Блок-схема модуля «Теоретическая справка», представлена на рис. 3.9 относится к классу событийно-управляемых алгоритмов обработки данных. Данный класс алгоритмов, в отличие от поточно-ориентированных, задает направление обработки при выборе пользователем требуемых действий, при этом рассматриваются следующие типы действий (операций):

- выбор класса объектов учета;
- выбор вида объектов учета из выбранного класса;
- выбор подкласса объектов учета;
- выбор вида объектов учета из выбранного подкласса;
- применение фильтрации над множеством объектов учета выбранного вида;
- использование группирования множества объектов учета;
- выбор предоставляемого (отображаемого) документа.

Данные операции выбираются в произвольном порядке в зависимости от решаемой пользователем задачи. С математической точки зрения данный алгоритм может быть представлен как применение множества допустимых операций $On = \{On_i\}$ к допустимым подмножествам множества объектов учета $CL = \{CL_i\}$ модуля «Теоретическая справка», применительно к области решаемых задач описывается следующим образом.

Определено множество классов информационных объектов $\{CL\}$:

$$\{CL\} = \{CL_1, CL_2, CL_3\},$$

где CL_1 – класс – «Основные теоретические положения»;

CL_2 – класс – «Разделы учитывающие специфику предметной области»;

CL_3 – класс – «Понятия и определения».

Определено множество подклассов информационных объектов $\{P_{cl}\}$:

$$\{P_{cl}\} = \{\{P_{cl1}\}, \{P_{cl2}\}, \{P_{cl3}\}\},$$

где: $\{P_{cl1}\}$ – множество подклассов класса «Основные теоретические положения»;

$\{P_{cl2}\}$ – множество подклассов класса «Разделы учитывающие специфику предметной области»;

$\{P_{cl3}\}$ – множество подклассов класса «Понятия и определения».

Определено множество признаков классификации информационных объектов $\{PR\}$.

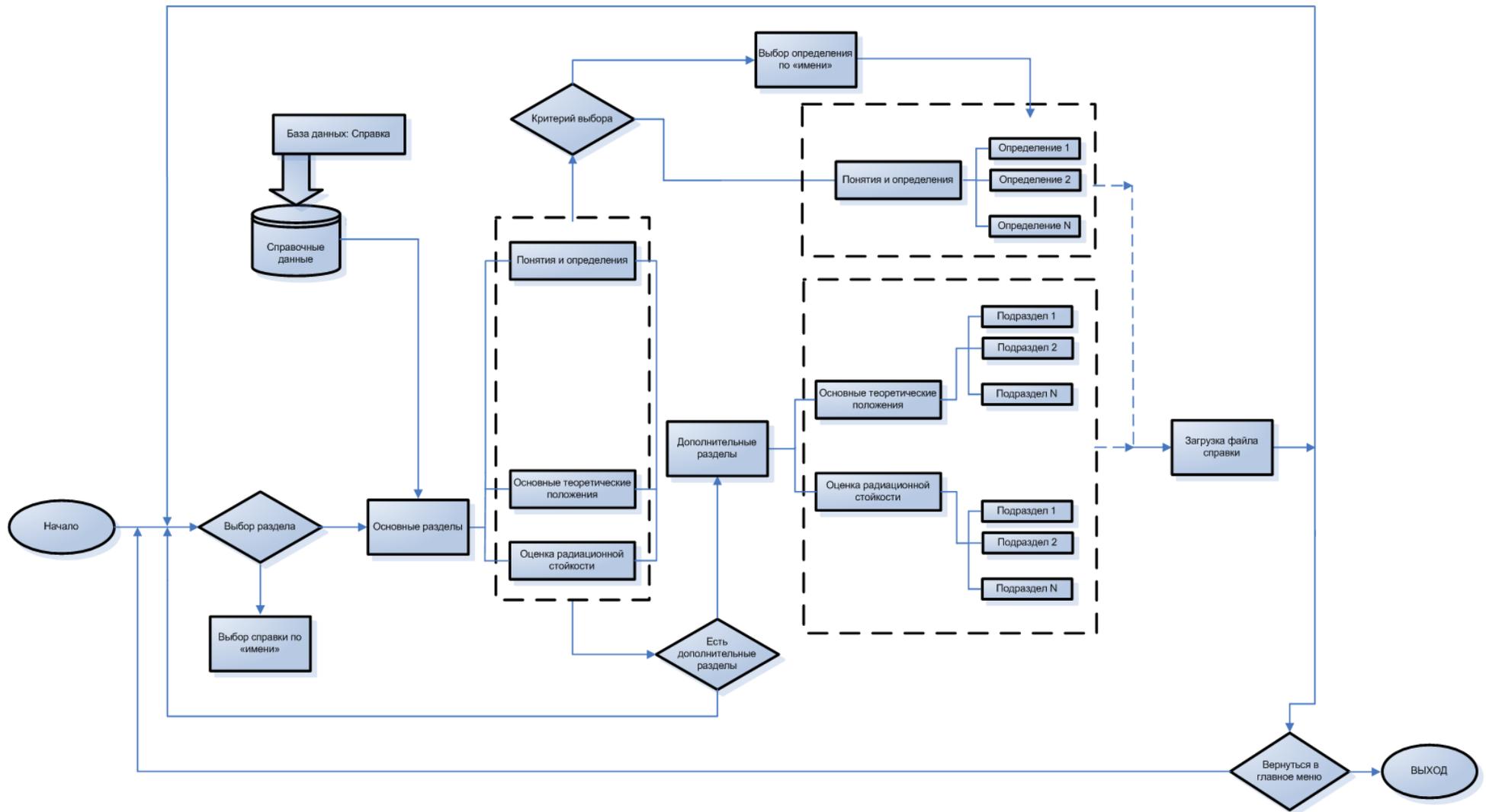


Рис 3.9. Блок-схема обеспечения выбора теоретической справки

Определено множество информационных объектов $\{O\}$.

Информационный объект имеет следующую структуру:

$$o_i = (cl, pcl, data),$$

где: cl – класс информационного объекта;

pcl – подкласс информационного объекта;

$data$ – массив данных, содержащий характеристики информационного объекта.

Определено множество выходных документов, допустимых для информационных объектов $\{D\}$:

$\{D\}_i^j$ – множество выходных документов, допустимых для информационных объектов j -го подкласса i -го класса:

$$\{D\}_i^j = \{D\}_i \circ \chi_j = \{D\} \circ \chi_i \circ \chi_j,$$

где χ_i – характеристический вектор i -го класса информационных объектов.

χ_j – характеристический вектор j -го подкласса информационных объектов.

Определены следующие операции над информационными объектами.

Фильтрация информационных объектов по классам:

$$\{O\}_i \xrightarrow{\{cl\}} \{O\}_{i+1},$$

где $\{O\}_i$ – множество информационных объектов, выбранных на i -ом шаге работы алгоритма.

Фильтрация информационных объектов по подклассам:

$$\{O\}_i \xrightarrow{\{pcl\}} \{O\}_{i+1}.$$

Источником информации, загружаемой в подсистему «Теоретическая справка», является база с одноимённым названием. База данных теоретической справки представляет собой набор отдельных файлов, имеющих формат MS Word, которые загружаются в модуль исполнительной программой согласно запросам, формируемым пользователем. Файлы базы структурированы разделением на основные разделы и подразделы, подразделы находятся в каталогах с соответствующим именем основного раздела.

Начало работы с подсистемой «Теоретическая справка» вызывает загрузку объектов в основные разделы и подразделы. После выбора объекта из основного раздела из базы будут переданы информационные поля, соответствующие данному объекту. Также может быть выбран один из подразделов, соответствующий выбранному объекту в списке основных объектов. Ниже приведен список основных разделов и соответствующих им подразделов:

- основные теоретические положения: характеристики ионизирующих излучений космического пространства, радиационные эффекты от ионизирующего излучения космического пространства,

заряженные частицы космического пространства, локальные радиационные эффекты в изделиях полупроводниковой электроники, сбои и отказы от локальных радиационных эффектов, модель прямоугольного параллелепипеда, методы повышения радиационной стойкости изделий полупроводниковой электроники;

- оценка радиационной стойкости: упругое рассеяние заряженных частиц высокой энергии, потери энергии при неупругих соударениях со связанными электронами (ионизационные потери энергии), потери энергии ЗЧ на эффекты смещения с образованием радиационных дефектов, неупругие взаимодействия частиц с ядрами вещества мишени, локальные радиационные эффекты от ЗЧ;

- понятия и определения: общие теоретические понятия; определения, используемые в математических моделях, описывающих воздействие заряженных частиц космического пространства на ИПЭ, список сокращений.

Деление основных разделов на подразделы определяет множество признаков классификации информационных объектов (полей справки). Преимуществом такого подхода является структурированность данных и, как следствие, удобство работы с ними пользователя, в тоже время обеспечивается фильтрация и поиск по разделам и подразделам.

В программе предусмотрена возможность работы со списком подразделов отдельно, при условии отсутствия выбора основного раздела, в этом случае выводится весь перечень подразделов справки. Получение справки в этом случае становится доступным при выборе необходимого поля из перечня подразделов.

Выбранная справка может быть распечатана в формате документа, содержащего справочные материалы.

3.4.5. Разработка алгоритмов оптимизации выбора изделий и режима функционирования подсистемы «Оптимизация выбора изделий»

Подсистема оптимизации выбора элементной базы призвана помочь разработчику аппаратуры в определении оптимального решения, исходя из рассчитанных и устанавливаемых критических параметров, для списка изделий близких по функциональному назначению. Работа подсистемы «Оптимизация выбора изделий» представлена на рис. 3.10.

В общем случае в задаче выбора элементной базы может быть несколько критериев. В рамках работы рассмотрена оптимизация выбора элементной базы по критериям цены и характеристикам стойкости отбираемых изделий [20, 31].

Метод оптимизации выбора элементной базы по критерию цены построен на основе идей метода Хука-Дживса с одномерной

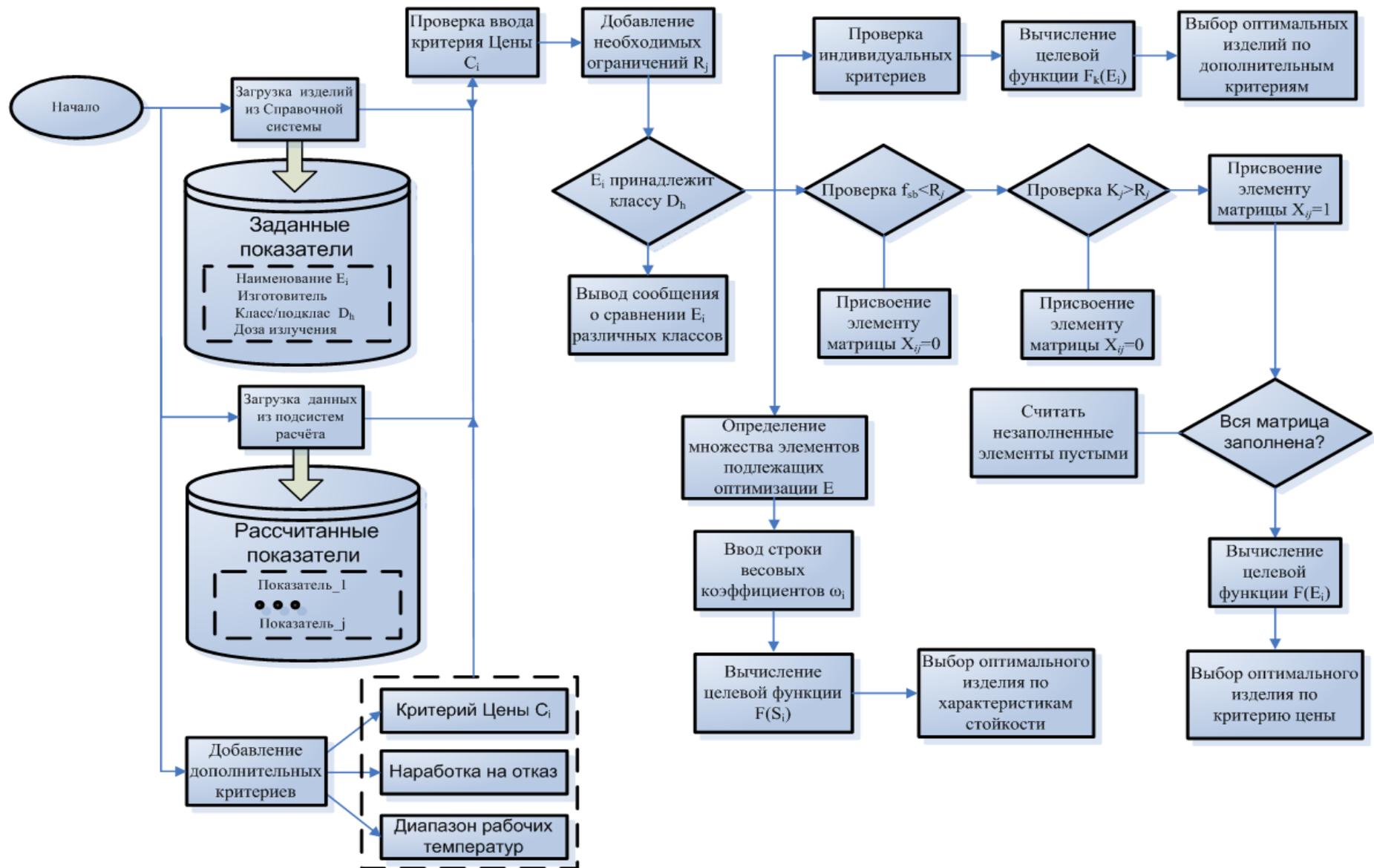


Рис 3.10. Блок-схема работы подсистемы «Оптимизации выбора изделий»

минимизацией. Задача выбора оптимальной элементной базы по критериям цены характеризуется следующими исходными данными:

E – множество элементов оптимизации $e_i, i = \overline{1, n}$;

D – множество классов/подклассов базы данных $D_h, h = \overline{1, l}$;

K – множество рассчитанных и задаваемых показателей $k_j^E, j = \overline{1, m}$;

f_{sb} – подмножество показателей стойкости к единичным эффектам f_{sb}^E , входящее в множество показателей отбора $k_j^E, j = \overline{1, m-3}$;

R – множество ограничений $r_j, j = \overline{1, m}$;

C – множество критериев цены $c_i, i = \overline{1, n}$.

Необходимым условием оптимизации выбора элементной базы по критерию цены является минимизация цены при удовлетворении остальным критериям отбора. В тоже время могут быть полезны и наилучшие решения по другим критериям отбора.

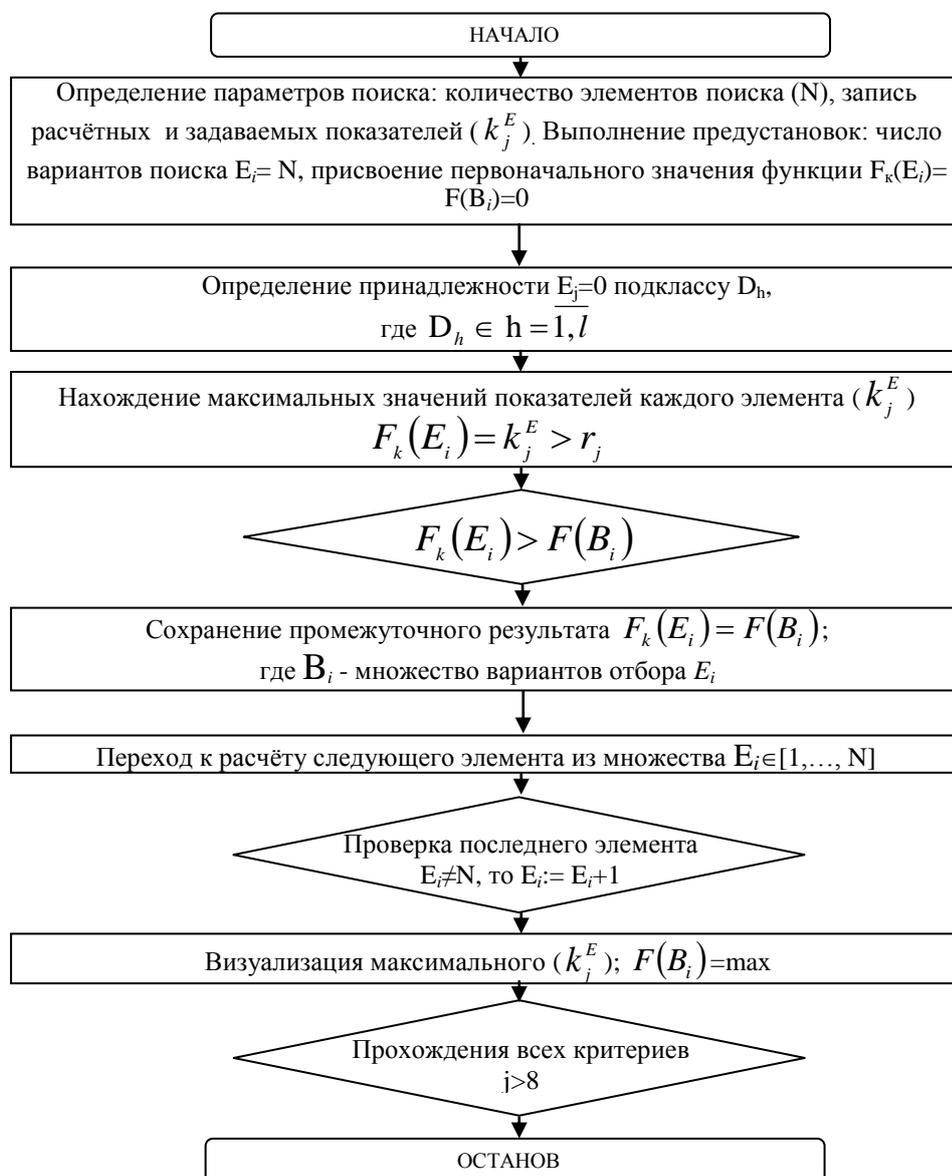


Рис 3.11. Алгоритм нахождения наилучших характеристик изделий

Для нахождения наилучших характеристик изделий разработан алгоритм, представленный на рис 3.11, позволяющий выбрать изделия, исходя из определённого критерия, при условии, если цена не носит решающего характера. Формируется матрица X , размера $n \times m$, элемент которой x_{ij} определён как соответствие показателя отбора k_j^E некоторому элементу множества e_i . Причём элемент матрицы $x_{ij}=1$, если удовлетворяются следующие неравенства $f_{sb}^E < r_j$ и $k_j^E > r_j$, иначе $x_{ij}=0$.

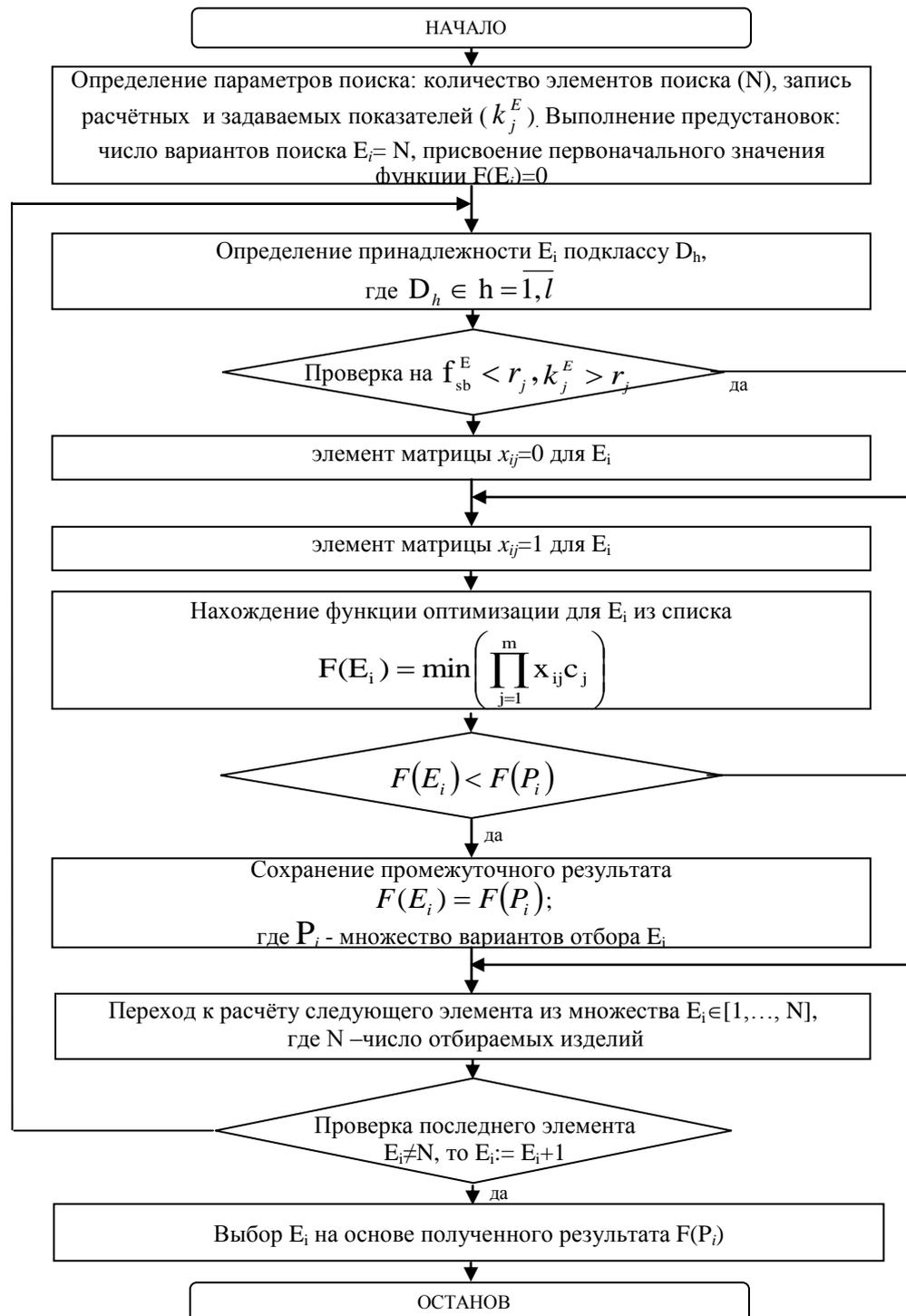


Рис 3.12. Алгоритм системы оптимизации по критерию цены

В качестве целевой функции отбора множества альтернатив E_i , подлежащей минимизации, можно принять произведение приведённого критерия (элемента матрицы x_{ij}) на критерий цены, т.е. функцию

$$F(E_i) = \min \left(\prod_{j=1}^m x_{ij} c_j \right), \quad (3.1)$$

где F – критерий оценки качества выбора изделий;

x_{ij} – приведённый показатель при выборе альтернатив E_i ;

В тоже время необходимо выполнение следующих ограничений.

1. Элементы оптимизации должны полностью располагаться внутри единственного класса/подкласса базы данных: $E_i \in D_h \in h = \overline{1, l}$.

2. Учёт дополнительных критериев отбора. Решение функции $F_k(E_i)$ позволяет производить выбор элементов с наилучшими показателями по конкретному критерию отбора: $F_k(E_i) = \max_{E_i \in D_h} (k_j^E > r_j)$.

Алгоритм разработанной системы оптимизации по критерию цены, дан на рис. 3.12. При решении задачи выбора элементной базы по ценовому признаку определено множество показателей отбора $\{K\}$:

$$\{k_j^E\} = \{fsb_1^E, fsb_2^E, fsb_3^E, fsb_4^E, fsb_5^E, k_6^E, k_7^E, k_8^E\},$$

где $fsb_1^E - fsb_5^E$ – рассчитанные показатели стойкости при воздействии ТЗЧ ГКЛ, ТЗЧ СКЛ, ВЭП ГКЛ, ВЭП СКЛ, ВЭП ЕРПЗ;

k_6^E – задаваемые показатели наработки на отказ;

k_7^E – задаваемые показатели диапазона температур;

k_8^E – задаваемый показатель предельной поглощённой дозы.

Определено множество ограничений в процессе выбора элементной базы $\{R\}$:

$$\{r_j\} = \{r_1, r_2, r_3, r_4, r_5, r_6, r_7, r_8\},$$

где $r_1 - r_5$ – ограничения по стойкости при воздействии ТЗЧ ГКЛ; ТЗЧ СКЛ; ВЭП ГКЛ; ВЭП СКЛ; ВЭП ЕРПЗ;

r_6 – ограничения по показателям наработки на отказ;

r_7 – ограничения по показателям диапазона температур;

r_8 – ограничения предельной поглощённой дозы.

Оптимизация выбора элементов (изделий) по характеристикам стойкости на основе нейронного алгоритма [42] (рис. 3.13). Оптимизация выбора изделия проводится в области определённого функционального типа, т.к. поиск оптимального элемента среди изделий различным функциональным назначением не имеет смысла. Исходя из этого предположения, множество подклассов полупроводниковых изделий D включает набор компонентов (объектов) оптимизации, который может быть представлен в виде множества изделий подлежащих оптимизации $E = \{e_i; i = \overline{1, N}\}$, где N – количество компонентов, участвующих в

оптимизации, и множество элементов из базы, не подлежащих оптимизации $Z = \{z_r; r = \overline{1, R}\}$, где R - количество компонентов, по которым оптимизация не проводится. Таким образом, компоненты выбора представляют собой множество элементов $E^{эл} = \{e_i^{эл}; i = \overline{1, N^{эл}}\} = E \cup Z$, где $N^{эл} = N + R$.

В качестве основного критерия оптимальности выбора полупроводниковых изделий по характеристикам стойкости выделяется требование минимизации возможной частоты сбоев компонентов от воздействующих заряженных частиц с учетом весовых коэффициентов.

Для формализации требований к определению оптимальной элементной базы вводятся весовые коэффициенты ω_i , где $\omega_1 = \omega_{гкл}^{ТЗЧ}$; $\omega_2 = \omega_{скл}^{ТЗЧ}$; $\omega_3 = \omega_{гкл}^{ВЭП}$; $\omega_4 = \omega_{скл}^{ВЭП}$; $\omega_5 = \omega_{ерпз}^{ВЭП}$; $\omega_6 = \omega_{доза}$ - синаптические весовые коэффициенты, определяющие требования к отбору компонентов e_i .

Целевая функция при выборе изделия по характеристикам стойкости на основе нейронного алгоритма может быть представлена следующим образом:

$$F(e_i) = \max_{e_i \in \{1, \dots, N\}} \left(\sum_{j=1}^{N_r} \omega_j (-\ln x_j^{e_i}) + \sum_{j=N_r+1}^{N_z} \omega_j x_j^{e_i} \right).$$

Основная проблема при оптимизации изделия по характеристикам стойкости заключается в согласовании сильно различающихся параметров системы (разница достигает нескольких порядков). Использование нелинейной функции вида $\omega_i (-\ln x_j^{e_i})$ при построении целевой функции позволяет оценивать малые величины.

Нахождение оптимального решения задачи выбора оптимальной элементной базы по характеристикам стойкости предполагает нахождение варианта решения p^0 для множества элементов, подлежащих оптимизации $E = \{e_i; i = \overline{1, N}\}$, из множества подклассов базы данных ИПЭ D_h , $h = \overline{1, l}$, при котором

$$F(p^0) = \max_{e_i \in D} \{F(e_i)\} = \max_{e_i \in D} \left(\sum_{j=1}^{N_r} \omega_j (-\ln x_j^{e_i}) + \sum_{j=N_r+1}^{N_z} \omega_j x_j^{e_i} \right), \quad (3.2)$$

где F – критерий оценки качества выбора; $D = \{E\}$ – множество возможных вариантов выбора E из заданного подкласса D_h , $h = \overline{1, l}$;

$x_j^{e_i}$ – расчётное или заданное значение параметров стойкости для e_i .

При этом должны выполняться следующие ограничения:

1. Если x_i^s неопределено для элемента $e_i; i = \overline{1, N}$, принимается $x_i^s = 0$ и в оптимизации не участвует.

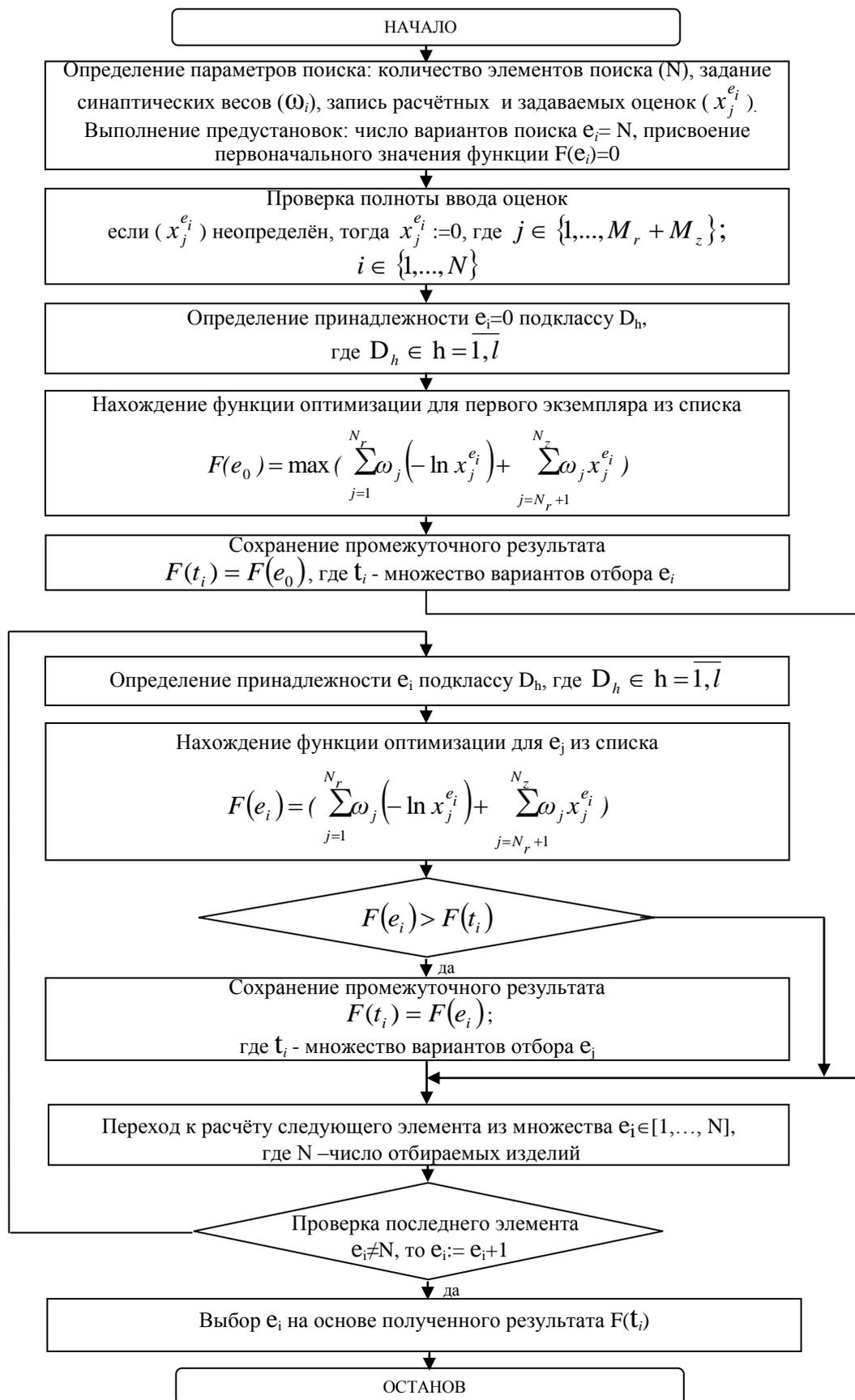


Рис 3.13. Алгоритм оптимизации выбора изделий по характеристикам стойкости

2. Выбираемые элементы оптимизации должны полностью располагаться внутри заданного подкласса: $e_i \in D, i = \overline{1, N}$.

В итоге можно сказать, что разработанные алгоритмы оптимизации позволяют эффективно проводить многокритериальный выбор полупроводниковых изделий в области определённого функционального типа.

3.5. Специализированная часть программного обеспечения оценки сложных объектов

3.5.1. Разработка подсистемы «Оценка стойкости комплектующих полупроводниковых изделий к локальным радиационным эффектам при воздействии тяжёлых заряженных частиц»

Модуль оценки стойкости полупроводниковых изделий к локальным радиационным эффектам при воздействии ТЗЧ космического пространства, позволяет расчётным путём проводить оценку стойкости изделий полупроводниковой электроники к воздействию отдельных ТЗЧ КП. Вычислительные механизмы, используемые в данном модуле, основаны на методике расчёта характеристик стойкости аппаратуры к воздействию отдельных ЗЧ различных видов ионизирующих излучений космического пространства с учётом экспериментальных данных о стойкости ИПЭ и данных о характеристиках потока заряженных частиц, заложенной в главе 2.3.

К модулю «Оценка стойкости комплектующих ИПЭ при воздействии отдельных ТЗЧ» предъявляются следующие требования:

- должен принимать значения, содержащиеся в информационных полях справочной системы в виде массива данных;
- вся информация о ходе расчёта должна предоставляться пользователю в реальном времени;
- должен быть обеспечен ввод дополнительной информации, необходимой для проведения расчёта;
- проводить проверку на корректность и наличие параметров, участвующих в расчёте;
- по результатам проведённого расчёта должен формироваться отчет – документ MS Word отформатированный специальным образом, содержащий информацию о результатах, полученных на каждом этапе работы модуля.

На первом этапе работы алгоритма, представленного на рис. 3.14, решается задача приёма данных из «Справочной системы». Для чего формируется список, аналогичный списку изделий, реализованному в справочной системе, данный список содержит все выбираемые пользователем изделия с принадлежащими им полями параметров.

Параметры, получаемые из справочника и определённые в подсистеме как участвующие в расчётах включают: наименование ИПЭ, пороговая ЛПЭ сбоя, сечение сбоя.

Дополнительно пользователем задаются следующие параметры:

- диапазон ЛПЭ;
- значения плотности потока заряженных частиц заданного спектра за реальной защитой;
- максимальное значение ЛПЭ.

Одним из важнейших условий правильности проведённых расчётов является полнота и правильность задаваемых параметров. Для отслеживания полноты введённых параметров в программе предусмотрена проверка, в случае отсутствия критического параметра, выдаётся сигнальное сообщение обработчика, указывающее на отсутствующий параметр.

При условии использования в блоке (узле, модуле, устройстве) бортовой аппаратуры КА нескольких микросхем данного типа предусмотрен ввод их количества. После того, как все подготовительные этапы пройдены, программа переходит непосредственно к расчёту, включающему в себя комплекс мероприятий по выявлению основных характеристик стойкости отдельных ИПЭ, либо блока бортовой аппаратуры космического аппарата в целом.

Согласно главе 1.5 – тяжёлые заряженные частицы (ТЗЧ) представляют собой ионы химических элементов с атомными номерами $A \geq 4$ и зарядами $Z \geq 2$ галактических и солнечных лучей (ГКЛ и СКЛ), алгоритм программного комплекса предусматривает при проведении расчёта оценку стойкости комплектующих ИПЭ к воздействующим заряженным частицам каждого вида излучения.

Для каждого вида воздействующих частиц космического пространства (ГКЛ и СКЛ) должны быть определены следующие параметры:

- частота сбоев для отдельного ИПЭ i -го типа;
- частота сбоев для всех ИПЭ i -го типа;
- частота сбоев для всех ИПЭ всех типов.

На каждом шаге проводимых вычислений предусмотрен оперативный вывод информации о ходе расчёта. Для удобства восприятия, вывод информации о новой операции начинается с новой строки. Таким образом, информация для каждого i -го типа ИПЭ, по которому проводится оценка стойкости к локальным радиационным эффектам при воздействии ЗЧ КП, выводится в определённой последовательности и строго структурирована.

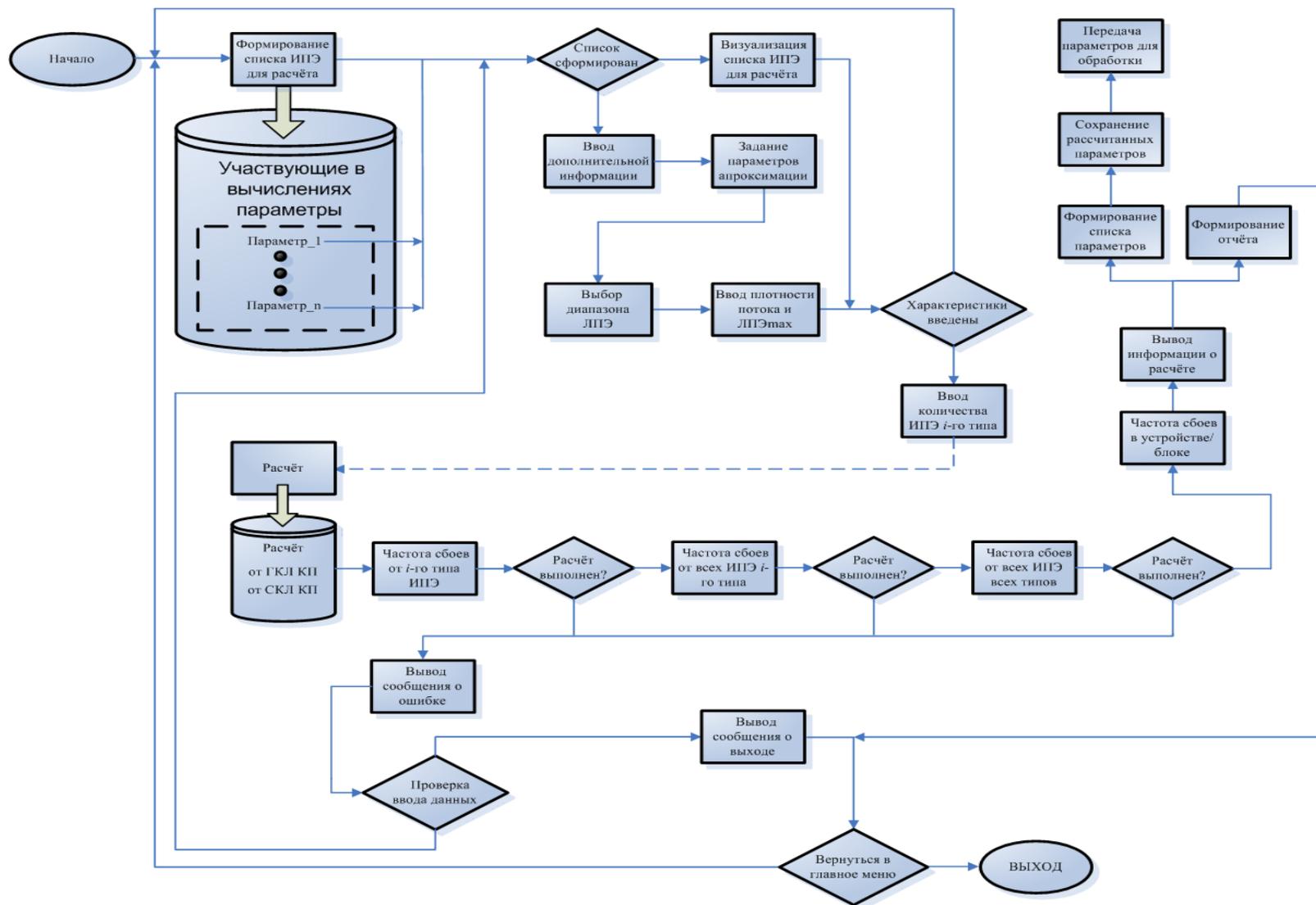


Рис 3.14. Блок-схема работы подсистемы «Оценка стойкости комплектующих ИПЭ к локальным радиационным эффектам при воздействии отдельных ТЗЧ КП»

Дополнительно могут быть заданы коэффициенты аппроксимации функции Вейбулла (типовые значения для сложных изделий полупроводниковой электроники $\lambda=0,65$ и $q=2,25$), отражающей зависимость сечения эффекта $\sigma^{TЗЧ}(L)$ от ЛПЭ, для чего необходимо скорректировать следующие величины:

λ – коэффициент масштаба (в программе: значение Лямда) по умолчанию значение $\lambda=0,65$;

q – коэффициент формы (в программе: значение q) по умолчанию значение $q=2,25$.

Расчёт частоты сбоев для i -го типа ИПЭ производится на основе алгоритма, рассмотренного в главе 2.3.2. Для проведения расчёта используются значения: сечение сбоя, пороговая ЛПЭ сбоя, значение потока частиц (F) исходя из таблицы заданного интегрального спектра за реальной защитой для соответствующего значения ЛПЭ и максимального ЛПЭ.

Частота сбоев от ТЗЧ в зависимости от выбранного интервала ЛПЭ находится по формулам:

1) $L_{max} \leq L_n$, $V_{uc}^{TЗЧ} = 0$. В случае если верно $L_{max} \leq L_n$ условие, а диапазон заданный пользователем отличен от данного, программе предусмотрен обработчик возникновения данной исключительной ситуаций;

$$2) L_{max} > L_n, L_{max} \leq L_{нас} = L_n + \lambda L_n (1,6)^{\frac{1}{q}}, \text{ МэВ} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{мг}^{-1},$$

$$V_{uc}^{TЗЧ} = \frac{\sigma_s^{TЗЧ}}{2\pi} \left[1 - e^{-\left(\frac{L_{max} - L_n}{\lambda L_n}\right)^q} \right] F(> L_n), \text{ эффект} \cdot t^{-1}; \quad (3.3)$$

$$3) L_{max} > L_n, L_{max} > L_{нас} = L_n + \lambda L_n (1,6)^{\frac{1}{q}}, \text{ МэВ} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{мг}^{-1},$$

$$V_{uc}^{TЗЧ} = \frac{\sigma_s^{TЗЧ}}{\pi(L_{max} - L_n)} \left\{ 0,32\lambda L_n (1,6)^{\frac{1}{q}} [F(> L_n) - F(> L_{нас})] + \frac{L_{max} - L_{нас}}{2} F(> L_{нас}) \right\}, \quad (3.4)$$

где: $L_{нас}$ определяется по следующей формуле:

$$L_{нас} = L_n + \lambda L_n (1,6)^{\frac{1}{q}}, \text{ МэВ} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{мг}^{-1}$$

По умолчанию значения λ, q взяты 0,65 и 2,25 соответственно.

Расчёт частоты сбоев для всех ИПЭ i -го типа производится по формуле:

$$V_{uc_i}^{TЗЧ} = n_{uc_i} V_i^{TЗЧ}, \text{ эффект} \cdot t^{-1}, \quad (3.5)$$

где: n_{uc_i} – количество микросхем i -го типа;

$V_i^{TЗЧ}$ – частота сбоев для i -го типа ИПЭ.

Результатом операции является частота сбоев от всех ИПЭ данного типа. В случае использования в блоке бортовой аппаратуры космического аппарата ИПЭ одного типа, вычисленная величина и будет частотой сбоев для рассматриваемого блока. При использовании ИПЭ разных типов

частота сбоев блока бортовой аппаратуры космического аппарата вычисляется по формуле представленной ниже.

Расчёт частоты сбоев для всех ИПЭ различных типов производится по формуле:

$$V_{\text{БЛ}}^{\text{ТЗЧ}} = \sum_{j=1}^{n_{\text{ИС}}} V_{\text{ИС}_i}^{\text{ТЗЧ}}, \text{ эффект} \cdot t^{-1}, \quad (3.6)$$

где: $n_{\text{ИС}}$ - количество микросхем i -го типа; $V_{\text{ИС}_i}^{\text{ТЗЧ}}$ - частота сбоев для i -го типа ИПЭ. Данная операция реализована с помощью цикла с количеством итераций равным $n_{\text{ИС}}$.

Найденная таким образом величина и будет частотой сбоя для рассматриваемого блока бортовой аппаратуры.

Представленные выше процедуры расчёта частоты сбоев ИПЭ к отдельным воздействующим заряженным частицам высокой энергии из состава ГКЛ и СКЛ КП одинаковы и различаются входными параметрами, определяемыми пользователем. Расчёт для частиц ГКЛ и СКЛ КП производится отдельно. Общая частота сбоев для выбранного списка ИПЭ к воздействующим частицам высокой энергии будет различной в зависимости от вида излучения, для которого проводился расчёт.

На основе полученных результатов программа формирует отчёт по проведённому расчёту в формате документа MS Word. Отчёт содержит данные о каждом из этапов расчёта и имеет заданную структуру.

3.5.2. Разработка подсистемы «Оценка стойкости комплектующих полупроводниковых изделий к локальным радиационным эффектам при воздействии высокоэнергетичных протонов»

Модуль оценки стойкости полупроводниковых изделий к локальным радиационным эффектам при воздействии отдельных ВЭП космического пространства аналогичен подсистеме определения характеристик стойкости изделий полупроводниковой электроники от воздействующих ТЗЧ КП.

Используемые математические механизмы определены алгоритмами, разработанными в главе 2.3. оптимизированной модели расчёта и оценки радиационной стойкости ИПЭ.

К подсистеме «Оценка стойкости комплектующих ИПЭ при воздействии ВЭП» предъявляются следующие требования:

- должен принимать значения, содержащиеся в информационных полях справочной системы в виде массива данных;

- вся информация о ходе расчёта должна предоставляться пользователю в реальном времени;

- обеспечение ввода дополнительной информации, необходимой для проведения расчёта;

- проверка параметров участвующих в расчёте на корректность;

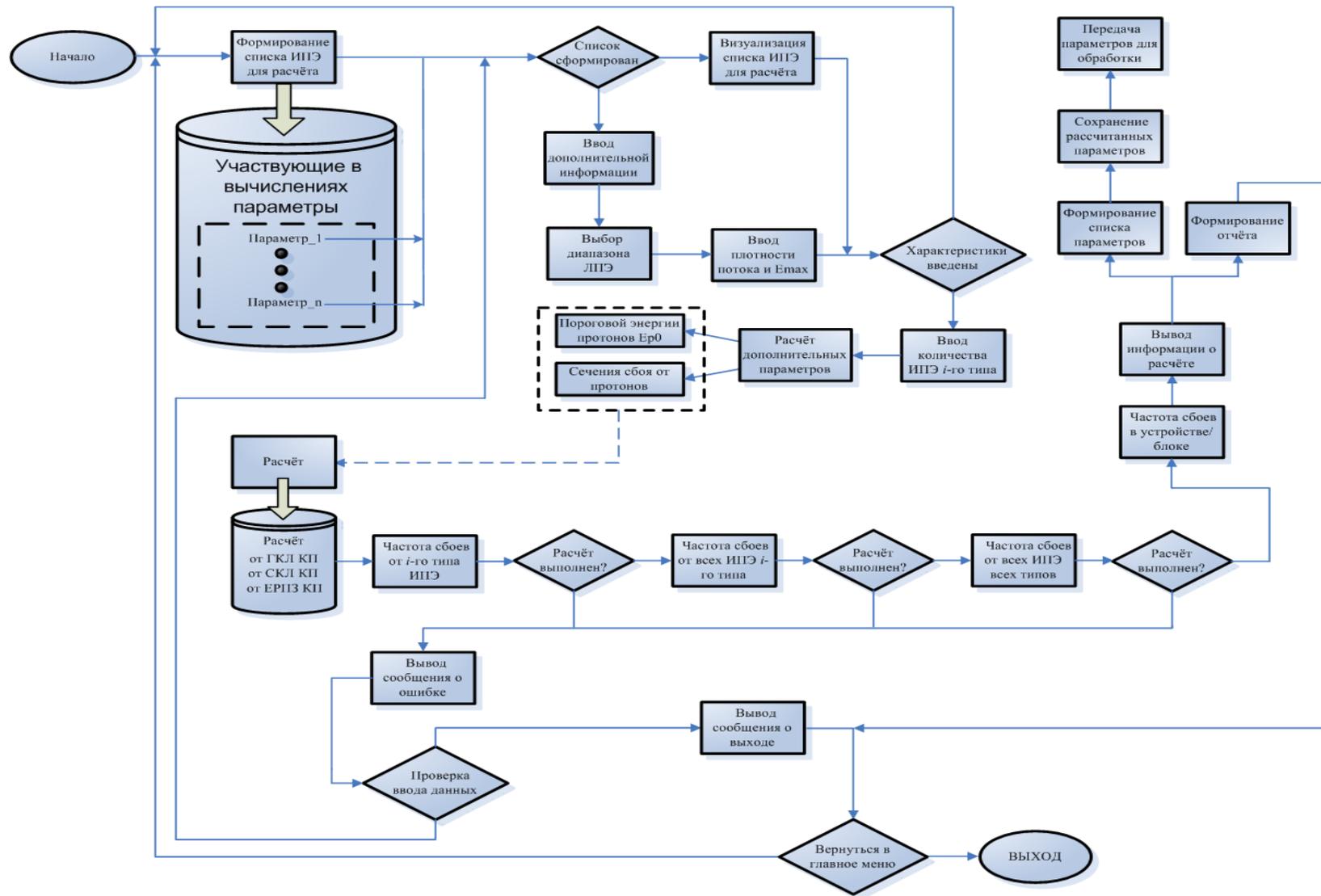


Рис 3.15. Блок-схема работы подсистемы «Оценка стойкости комплектующих ИПЭ к локальным радиационным эффектам при воздействии отдельных ВЭП КП»

- по результатам проведённого расчёта должен формироваться отчет – документ MS Word отформатированный специальным образом, содержащий информацию о результатах, полученных на каждом этапе работы подсистемы.

Разработанный алгоритм подсистемы представлен на рис. 3.15. Первым этапом работы алгоритма является формирование списка изделий содержащего все выбираемые пользователем изделия с принадлежащими им полями параметров.

Список параметров, участвующих в расчётах, включает следующие информационные поля: наименование ИПЭ, пороговая ЛПЭ сбоя, сечение сбоя. Пользователем задаются следующие параметры:

- диапазон ЛПЭ;
- значения плотности потока заряженных частиц заданного спектра за реальной защитой;
- максимальное значение энергии протонов;
- длина собирания заряда заряженной частицей.

Полнота и правильность задаваемых параметров, отслеживаются алгоритмами проверки введённых данных, в случае отсутствия какого-либо критического параметра выдаётся сигнальное сообщение, указывающее на отсутствие или не правильность заполнения информационного поля.

Ввод количества микросхем данного типа позволяет задавать количество микросхем, используемых в блоке бортовой аппаратуры космического аппарата.

После завершения конфигурации настроек, предваряющих работу подсистемы, осуществляется переход программы к расчёту, в ходе которого вычисляется частота сбоев от протонов высокой энергии для различных видов излучений по отдельным ИПЭ, либо для блока бортовой аппаратуры космического аппарата в целом.

Согласно главе 1.5 – под высокоэнергетичными протонами (ВЭП) космического пространства принято понимать протоны естественных радиационных поясов земли (ЕРПЗ) и протоны галактических и солнечных лучей (ГКЛ и СКЛ), алгоритм программного комплекса предусматривает при проведении расчёта оценку стойкости комплектующих ИПЭ к воздействию заряженными частицами каждого вида излучения.

Для каждого вида воздействующих частиц космического пространства (ГКЛ, СКЛ и ЕРПЗ) должны быть определены следующие параметры:

- частота сбоев для отдельного ИПЭ i -го типа;
- частота сбоев для всех ИПЭ i -го типа;
- частота сбоев для всех ИПЭ всех типов.

На каждом шаге проводимых вычислений предусмотрен оперативный вывод информации о ходе расчёта, вывод информации о

новой операции начинается с новой строки. Выводимая информация для каждого i -го типа ИПЭ, по которому проводится оценка стойкости полупроводниковых изделий к локальным радиационным эффектам при воздействии ЗЧ КП, выдаётся в определённой последовательности и строго структурирована.

Расчёт частоты сбоев для i -го типа ИПЭ производится на основе алгоритма, рассмотренного в главе 2.3.3. Для проведения расчёта используются значения: сечения сбоя от протонов, порогового ЛПЭ сбоя, пороговой энергии протонов для выбранного ИПЭ, максимальной энергии частицы, значения потока частиц (F) исходя из таблицы интегрального спектра для соответствующего значения ЛПЭ.

В связи с тем, что исходных данных для расчёта недостаточно, внутри модуля производится дополнительное вычисление следующих величин:

- пороговой энергии протонов;
- сечения сбоя от протонов.

Пороговая энергия протонов вычисляется по формуле:

$$E_{p0} = 29(E_n - 0,69). \quad (3.7)$$

За вычисления сечения сбоя от протонов отвечает следующее выражение:

$$\sigma_s^p = 2,3 \cdot 10^{-2} M \sigma_s^{T34} l_{ak} \exp(-0,27E_n), \text{ см}^2.$$

Формула, используемая при расчёте частоты сбоев от ВЭП, имеет вид:

$$V_{uc}^p = \frac{\sigma_s^p e^{0,27E_n}}{E_{\max} - E_{p0}} \left[e^{-(E_n E_{\max}^{-0,172})} - e^{-(E_n E_{p0}^{-0,172})} \right] F(> E_{p0}), \text{ эффект} \cdot \text{т}^{-1}. \quad (3.8)$$

При $E_{\max} > 2000$ МэВ принимается $E_{\max} = 2000$ МэВ. В работе модуля подсистемы предусмотрен обработчик возникновения таких исключительных ситуаций.

Расчёт частоты сбоев для всех ИПЭ i -го типа производится по формуле:

$$V_{ic_i}^{BЭП} = n_{ic_i} V_i^{BЭП}, \text{ эфф} \cdot \text{т}^{-1}, \quad (3.9)$$

где: n_{ic_i} - количество микросхем i -го типа; $V_i^{BЭП}$ - частота сбоев для i -го типа ИПЭ. Результатом операции является частота сбоев от всех ИПЭ данного типа.

В случае использования в блоке бортовой аппаратуры космического аппарата микросхем только одного типа, вычисленная величина и будет частотой (вероятностью) сбоев для рассматриваемого блока. При использовании микросхем разных типов частота сбоев блока бортовой аппаратуры космического аппарата вычисляется по формуле (3.10).

Расчёт частоты сбоев для всех ИПЭ различных типов производится по формуле:

$$V_{\text{БЛ}}^{\text{ВЭП}} = \sum_{j=1}^{n_{\text{ИС}}} V_{\text{ИС}_i}^{\text{ВЭП}}, \text{эфф} \cdot t^{-1}, \quad (3.10)$$

где: $n_{\text{ИС}}$ - количество микросхем i -го типа; $V_{\text{ИС}_i}^{\text{ВЭП}}$ - частота сбоев для i -го типа ИПЭ. Для реализации данной операции задан цикл с количеством итераций равным $n_{\text{ИС}}$.

Представленные выше процедуры расчёта частоты сбоев ИПЭ от воздействующих заряженных частиц ГКЛ, СКЛ и ЕРПЗ КП одинаковы и различаются входными параметрами, определяемыми пользователем. Расчёт частоты сбоев изделий от отдельных частиц каждого вида излучения КП проводится отдельно и общая частота сбоев для выбранного списка ИПЭ к воздействующим частицам каждого вида излучения будет своей.

На основе полученных результатов программа формирует отчёт по проведённому расчёту в формате документа MS Word. Отчёт содержит данные о каждом из этапов расчёта и имеет заданную структуру.

3.5.3. Разработка блок-схемы работы подсистемы «Проверка на соответствие требованиям стойкости»

Подсистема «Проверка на соответствие требованиям стойкости» служит для визуализации итогов проводимых расчётов полученных в подсистемах расчёта стойкости полупроводниковых изделий к локальным радиационным эффектам от воздействующих отдельных ЗЧ КП. Играя роль интегратора результатов полученных ранее, данная подсистема позволяет определить правильность выбора элементной базы, обеспечивает реализацию процедуры проверки и оценки соответствия данной конфигурации рассчитываемого блока КА требованиям стойкости. Для данного модуля разработана блок-схема, обеспечивающая выполнение требований и поставленных перед подсистемой задач, представленная на рис. 3.16. В роли входных параметров выступают переданные из форм расчёта значения частоты сбоев от: ГКЛ ТЗЧ; СКЛ ТЗЧ, ГКЛ ВЭП, СКЛ ВЭП, ЕРПЗ ВЭП за сутки.

Значения частоты сбоев блока бортовой аппаратуры к ЗЧ каждого вида излучения даются в финальной сводке результатов расчёта. Маска вывода обеспечивает сводку по всем излучениям КП или для каждого в отдельности.

В роли задаваемых пользователем критериев выступают следующие параметры:

- общее время использования КА в условиях КП;
- суммарное время воздействия вспышек солнца;
- установка максимально допустимых частот сбоев для ИПЭ;

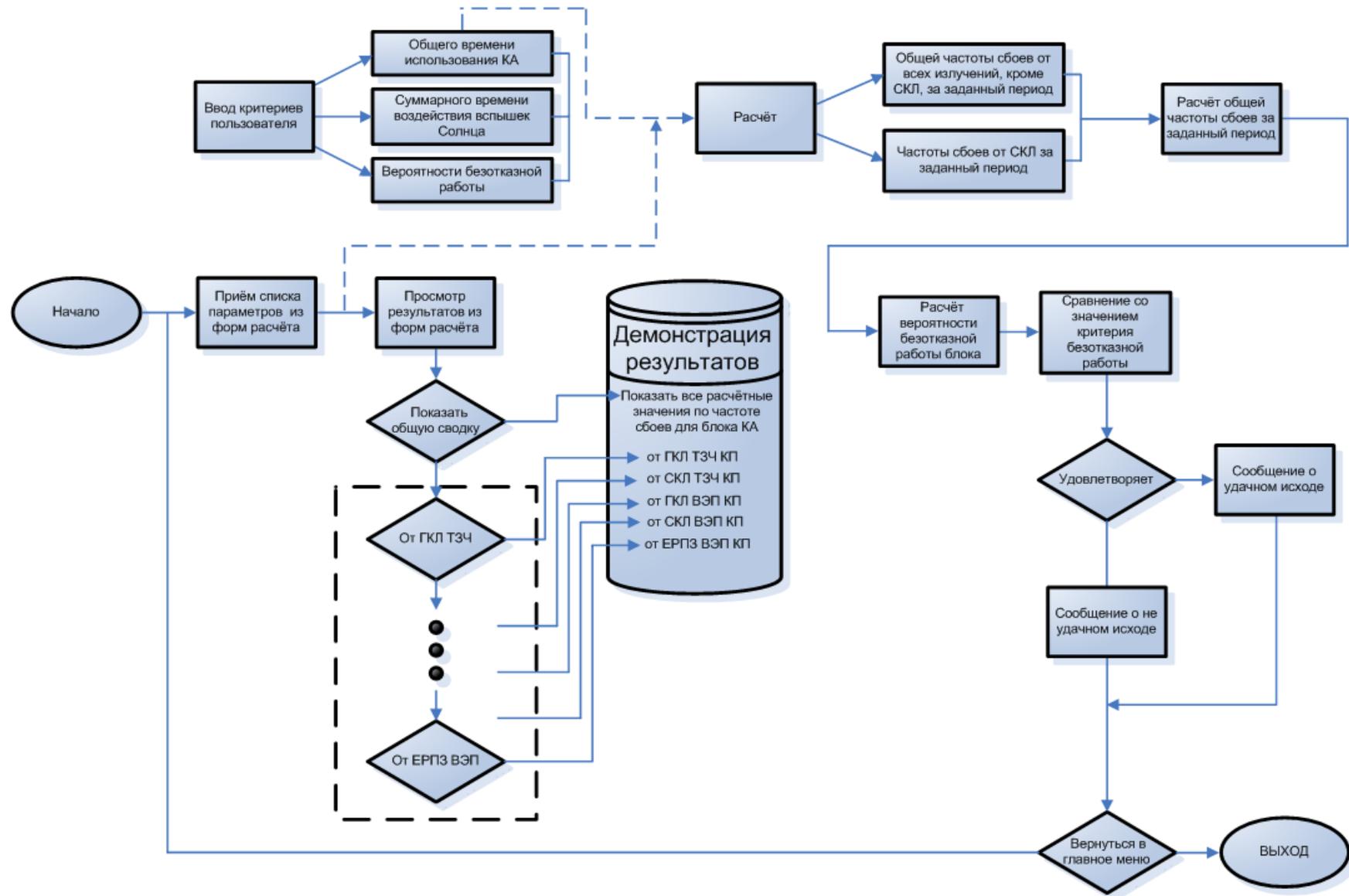


Рис 3.16. Блок-схема работы подсистемы «Проверка на соответствие требованиям стойкости»

Просмотр результатов из форм расчёта определяет параметры настройки выводимых результатов. Предусмотрено несколько режимов вывода информации, полученной в ходе расчёта:

- вывод предельно общей информации (в программе: Показать общую сводку);

- вывод подробных результатов по частоте сбоев от каждого вида излучения.

В случае выбора общей информации будут выданы все расчётные значения по частоте сбоев для блока КА. При выборе подробного отчёта, выводятся данные о полученных значениях частоты сбоев для каждого ИПЭ из состава блока КА, и их весовой вклад в итоговое значение частоты сбоев.

Вклад каждого ИПЭ выражается в процентах, при этом 100% будет присвоено образцу, обладающему максимальной частотой сбоев к выбранному излучению, а процентное отношение остальных будет показывать, в какой степени на итоговый результат влияет то или иное изделие.

Процедуры оценки вероятности безотказной работы могут проводиться как для рассчитываемого блока в целом, так и комплектующих полупроводниковых изделий в отдельности. Для проверки соответствия комплектующих ИПЭ задаваемым критериям стойкости, предусмотрен ввод граничных значений допустимой частоты сбоев от одного конкретного ИПЭ. Проверка на соответствие заданным критериям стойкости проводится для ИПЭ обладающих максимальной чувствительностью к сбоям и отказам от ЗЧ каждого вида излучений КП, превышении заданных параметров выводится предупреждение.

Оценка вероятности безотказной работы блока КА включает ряд этапов расчёта. На первом этапе производятся расчёты общей частоты сбоев от всех излучений кроме СКЛ за заданный период времени и частоты сбоев от СКЛ за заданный период воздействия вспышек. Далее производится расчёт общей частоты сбоев за заданный период времени. Вероятность безотказной работы блока определяется формулой:

$$P = 1 - \exp^{-\gamma}, \quad (3.11)$$

где: P – вероятности безотказной работы блока;

γ – рассчитанное значение общей частоты сбоев за заданный период времени.

Полученное значение вероятности безотказной работы блока может быть сравнено с заданной вероятностью безотказной работы блока. Критерию возможности использования блока в заданной конфигурации в условиях КП является удовлетворение условия, при котором расчётное значение вероятности безотказной работы меньше заданного. Если условие не удовлетворяется, выводится сообщение о превышении заданных параметров и принятию мер по увеличению стойкости блока.

ГЛАВА 4. ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ИНТЕРАКТИВНОЙ СИСТЕМЫ ОПЕРАТИВНОЙ ОЦЕНКИ СТОЙКОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИЗДЕЛИЙ К ЛОКАЛЬНЫМ РАДИАЦИОННЫМ ЭФФЕКТАМ

4.1. Разработка графического интерфейса программного обеспечения на основе функциональной схемы взаимодействия подсистем

На основе результатов полученных в третьей части, определён состав и структура программной системы, а также алгоритмы разрабатываемых подпрограмм. В результате была сформирована функциональная схема взаимодействия подсистем программной системы оперативной оценки стойкости полупроводниковых изделий к локальным радиационным эффектам при воздействии отдельных заряженных частиц космического пространства, представленная на рис. 4.1.

В программной системе определены следующие подсистемы и их функциональные модули.

Подсистема интеграции проектов, отвечающая за взаимодействие различных средств схемотехнического моделирования с программным комплексом, содержит модуль конвертации данных, обеспечивающий межмодульное взаимодействие. Также подсистема предоставляет список объектов, полученный из системы схемотехнического моделирования, с возможностью редактирования информационных полей выбранного образца.

Справочная система отвечает за обеспечение проводимых расчётов различными информационными данными по ИПЭ. Модуль загрузки интегрированной базы данных подключает встроенное хранилище при инициализации подсистемы. Модулем загрузки внешней базы осуществляется выбор и загрузка дополнительных (внешних) баз данных по ИПЭ. Работа со справочником позволяет проводить различные операции поиска, выбора, добавления элементов к списку расчёта. Модуль коррекции данных позволяет проводить полное или частичное изменение информационных полей базы.

Подсистема оценки стойкости определяет характеристики стойкости различных изделий к единичным эффектам от воздействующих ЗЧ, при воздействии отдельных тяжёлых заряженных частиц и высокоэнергетичных протонов КП на основе экспериментальных данных о стойкости полупроводниковых изделий с оперативным информированием пользователя о ходе расчёта и конфигурированием параметров проводимых вычислений. Модуль управления расчётом призван информировать пользователя о ходе расчёта и конфигурировать параметры проводимых вычислений. Результаты проведённого расчёта сохраняются в файл посредством модуля сохранения результатов и подготовки отчёта.

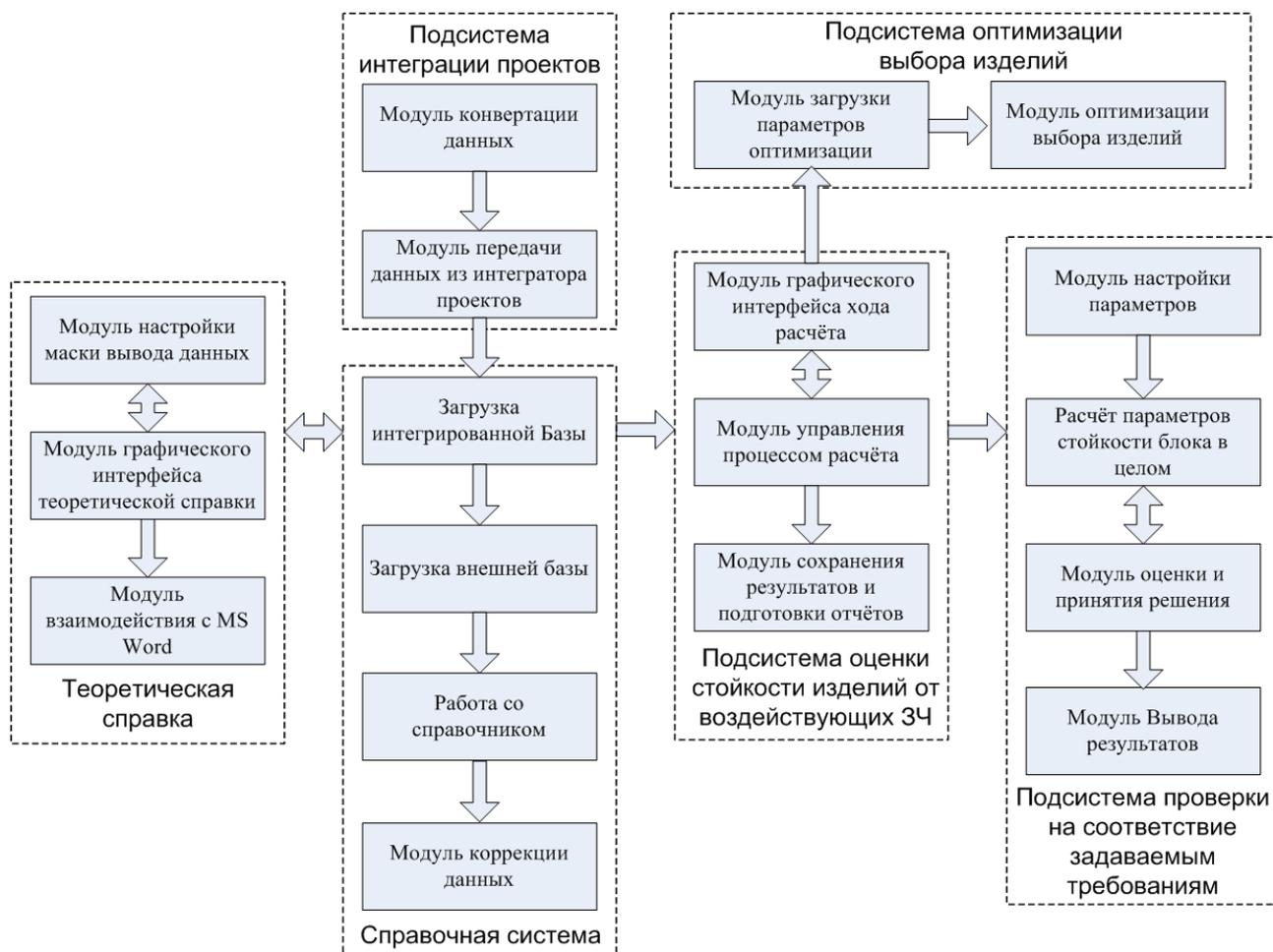


Рис. 4.1 Функциональная схема взаимодействия подсистем в программной системе

Подсистема соответствия задаваемым требованиям обеспечивает пользователя итоговыми результатами проводимых расчётов, позволяет настраивать различные вариации вывода информации и проверку конфигурации аппаратуры на соответствие требованиям стойкости с целью определения правильности выбора элементной базы. Данные задачи решаются модулями вывода информации и настройки параметров, расчёта параметров стойкости блока в целом.

Подсистема теоретической справки в соответствии с устанавливаемыми масками вывода данных формирует документы, выводимые с помощью модуля графического интерфейса. Вывод, редактирование и обработка документа содержащего справочные материалы в подсистеме теоретической справки в формате MS Word обеспечивается модулем взаимодействия подсистемы с MS Word.

Подсистема оптимизации выбора комплектующих ИПЭ, позволяет произвести выбор оптимальной элементной базы с точки зрения характеристик стойкости и цены.

Разработанное программное обеспечение, модульная структура

которого представлена на рис. 4.2, использует интерактивные средства человеко-машинного интерфейса и обеспечивает комплексный подход при проведении оценки характеристик стойкости полупроводниковых изделий.

Исходя из модульной структуры программного обеспечения оценки локальных радиационных эффектов полупроводниковых изделий и алгоритмов отдельных подсистем, была составлена схема организации человеко-машинного интерфейса программного обеспечения. Данная схема отражает основные графические формы программного обеспечения (ПО) и схему их связи внутри программного комплекса (рис 4.3). Таким образом, исходя из выполняемых программным обеспечением функций, была разработана схема организации графического интерфейса программного обеспечения, включающая 8 графических форм.

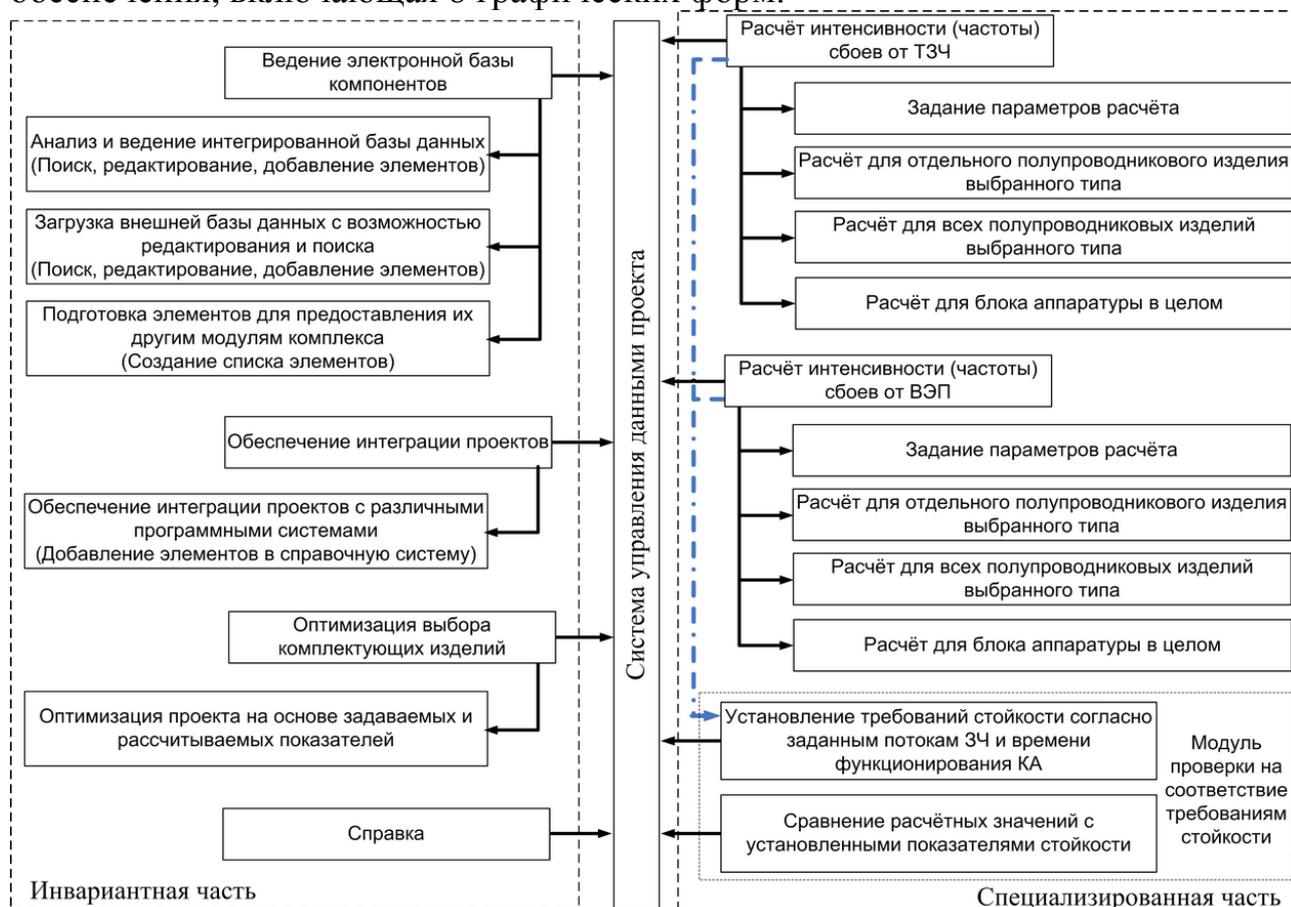


Рис. 4.2. Модульная структура специального программного обеспечения, ориентированного для оценки локальных радиационных эффектов полупроводниковых изделий

К графическим формам и их содержанию были предъявлены следующие требования.

1. Главная графическая форма – возможность выбора режима работы; выход – выход из программы.

2. Графическая форма «Справочная система» – обеспечение работы с встроенной базой данных цифровых и аналоговых микросхемы,

загружаемыми из файлов базами данных, поиск и редактирование данных, выбираемых пользователем, должна содержать элементы поиска, удобной навигации по информационным полям таблицы, обеспечивать представление информации базы данных в виде таблиц, а также добавление и удаление объектов из списка передаваемых изделий в формы расчёта.

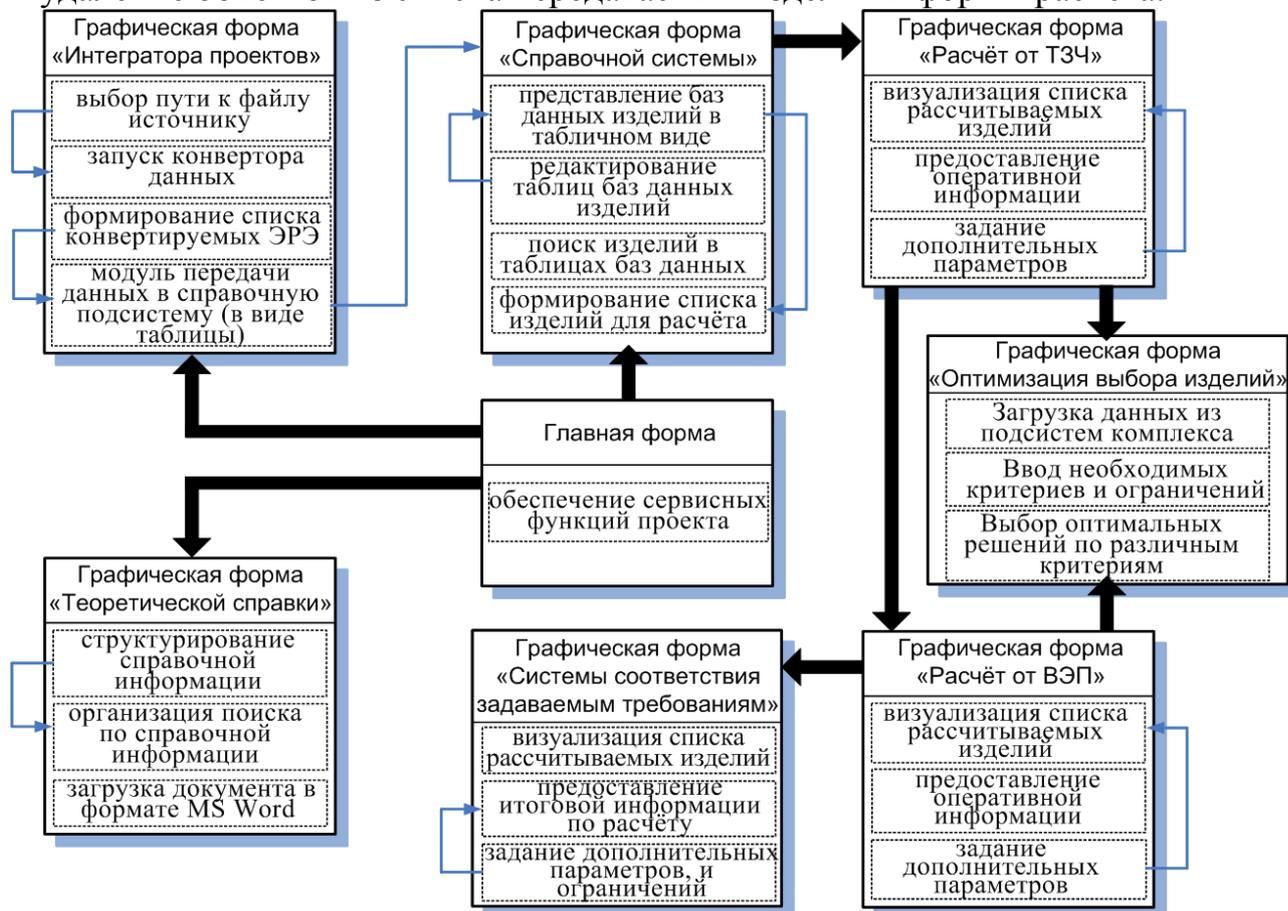


Рис. 4.3 Схема организации человеко-машинного интерфейса программного комплекса

3. Графическая форма «Модуль интеграции проектов» – обеспечение процесса конвертирования данных, внешних по отношению к программному комплексу, в формат встроенной базы данных цифровых и аналоговых микросхем, представление списка ЭРЭ, полученного из системы схемотехнического моделирования в удобном виде, возможность редактирования информационных полей выбранного образца.

4. Графическая форма «Оценка стойкости полупроводниковых изделий при воздействии ТЗЧ» – информирование пользователя о ходе расчёта по оценке стойкости комплектующих ИПЭ к единичным эффектам при воздействии отдельных тяжёлых заряженных частиц КП, обеспечение возможностей ввода необходимых параметров расчёта, формирование файла результатов.

5. Графическая форма «Оценка стойкости полупроводниковых изделий при воздействии ВЭП» – информирование пользователя о ходе

расчёта по оценке стойкости комплектующих ИПЭ к единичным эффектам при воздействии отдельных высокоэнергетичных протонов КП, обеспечение возможностей ввода необходимых параметров расчёта, формирование файла результатов.

6. Графическая форма «Проверка на соответствие требованиям стойкости» – структурированное отображение результатов расчётов проведённых ранее, проведение итоговых расчётов в соответствии со временем эксплуатации космического аппарата и задаваемыми параметрами стойкости, и проверка заданной конфигурации разрабатываемого блока КА на соответствие заданным требованиям стойкости.

7. Графическая форма «Теоретическая справка» – обеспечение удобной навигации по разделам справочных материалов, возможность загрузки, выбора и редактирования справочных документов.

8. Графическая форма «Оптимизация выбора ИПЭ» – представление отбираемых ИПЭ в табличном виде, задание дополнительных параметров отбора исходя из заданных и рассчитанных критериев надёжности и цены, визуализация результатов проводимой оптимизации.

4.2. Графический интерфейс программного обеспечения оперативной оценки стойкости полупроводниковых изделий к локальным радиационным эффектам

4.2.1. Графический интерфейс «Главная графическая форма»

Главная форма играет роль связующего звена между формами. Графический интерфейс обеспечивает выполнение сервисных функций переключения между формами комплекса.

Из главной графической формы обеспечивается переход в одну из следующих графических форм:

- справочная система;
- модуль интеграции проектов;
- теоретическая справка.

Данные вкладки формы являются активными.

Интерфейс главной формы представлен на рис. 4.3

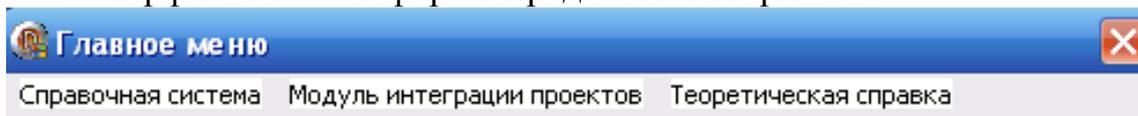


Рис. 4.4 Интерфейс главной формы

При закрытии главной формы, все открытые формы комплекса также будут закрыты и вся информация, полученная на этапах расчёта, будет утрачена.

4.2.2. Графический интерфейс «Справочная система»

На основе схемы функционирования справочной системы, подробно описанной в главе 3.4.3 и предложенной модели графического интерфейса программного комплекса в главе 4.1, сформирована схема связей графических элементов подсистемы «Справочная система», представленная на рис. 4.5. Исходя из данной схемы, обозначен минимально необходимый набор графических компонент, отвечающих за взаимодействие пользователя с ПО.

В состав подсистемы «Справочная система» входят следующие графические модули и компоненты:

- загрузка интегрированной базы ИПЭ – позволяет получить информацию по ИПЭ, находящуюся в базе данных программного комплекса. Загрузка встроенной базы данных происходит автоматически при запуске справочной системы;

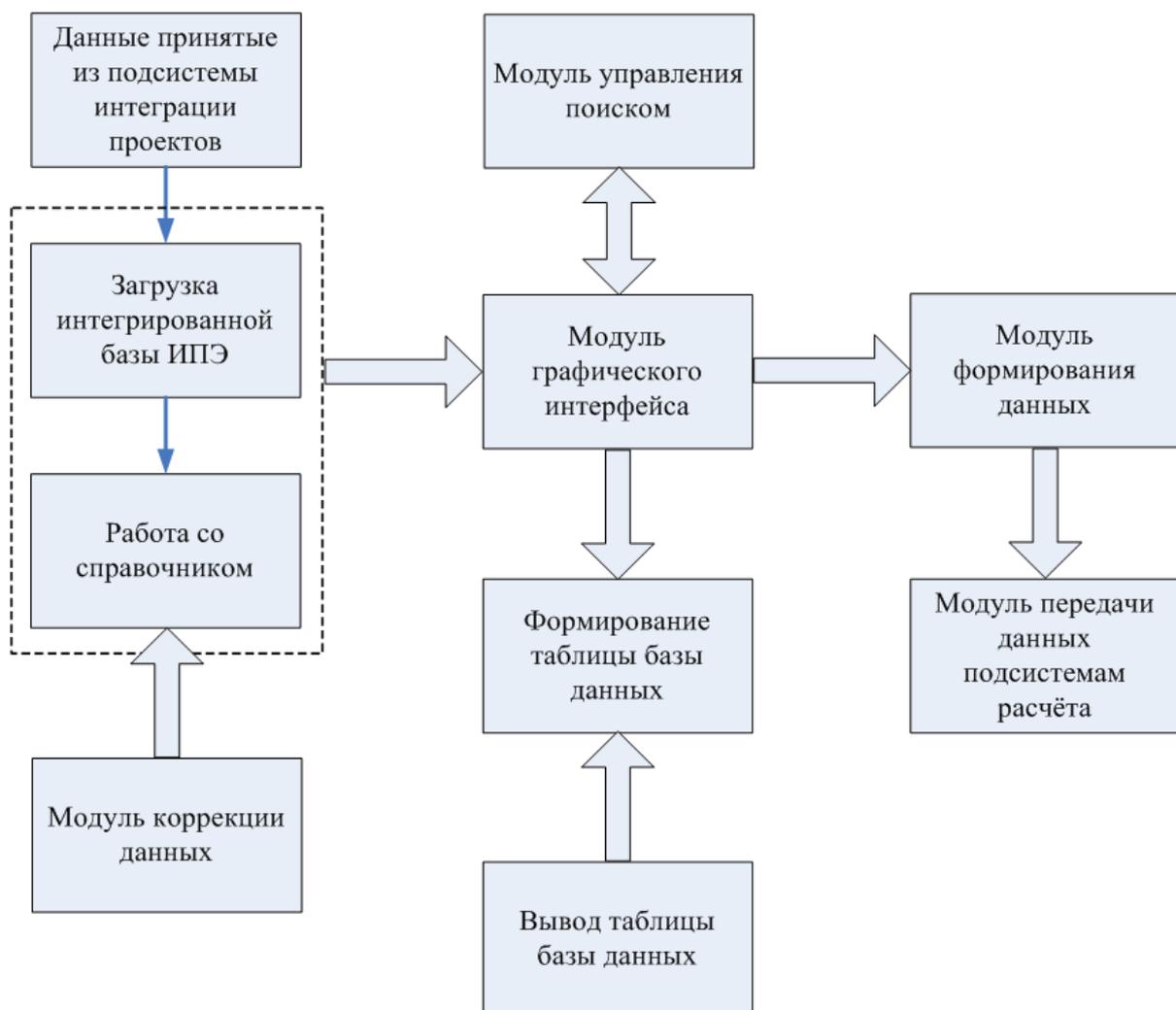


Рис. 4.5. Связи графических элементов внутри подсистемы «Справочная система»

- работа со справочником – при отсутствии данных по определенному ИПЭ, или списку ИПЭ в интегрированной базе, может быть загружен Microsoft Word-документ в виде таблицы, содержащий параметры рассматриваемых ИПЭ. Данный режим удобен, когда вместе с рассчитываемым блоком КА, предоставляется сопроводительная документация в электронном виде;

- модуль коррекции данных – позволяет редактировать информационные поля выбранных ИПЭ. Прежде чем начать редактирование, данные необходимо разблокировать. Также в модуле коррекции данных заложена функция расчёта поля сечения сбоя;

- модуль управления поиском – путём задания масок фильтров и структурирования базы данный модуль позволяет вести поиск необходимых ИПЭ. При известном названии искомого изделия, оно может быть найдено путём набора названия в поле «Наименование»;

- формирование таблицы базы данных – происходит автоматически при загрузке базы данных, в роли которой может выступать либо интегрированная база, либо загружаемый файл;

- вывод таблицы базы данных – визуализация информационных полей таблицы также происходит автоматически при загрузке базы данных источника;

- модуль формирования данных – позволяет проводить отбор интересующих ИПЭ в список для расчёта;

- модуль передачи данных подсистемам расчёта – происходит при согласии пользователя на переход к расчёту, все отобранные ИПЭ и их параметры будут переданы другим подсистемам программного комплекса.

При работе справочной системы с использованием интегрированной базы, загружаемой по умолчанию, все данные из списка ИПЭ базы представляются в виде таблицы рис. 4.6. Для поиска интересующего изделия таблица может быть структурирована, позволяя сужать границы поиска областью класса, подкласса или конкретного изделия. Данная функция реализована через фильтры, включение которых (галочка в поле опций – «Фильтры списка ИПЭ») позволяет выбирать интересующую маску вывода результата. Полосы прокрутки на границе окна таблицы позволяют просмотреть поля, не попавшие в видимую область.

При работе с внешним файлом справочником загружается таблица внешнего Microsoft Word документа. Для чего в меню работа со справочником необходимо выбрать «Открыть справочник», в результате появится меню с предложением выбора файла. Для загружаемой таблицы документа предусмотрены такие опции как выбор заголовка. Примером такого файла может служить следующий фрагмент документа, представленный в таблице 4.1.

Для того чтобы сохранить информацию по ряду интересующих нас образцов в интегрированную базу необходимо в меню «Работа со справочником» выбрать – «Сохранить в базу». При наличии нескольких баз данных, они могут загружаться с помощью опции – «Открыть базу» и выбора пути к актуальной базе, в меню «База данных».

Из справочника наряду с главной экранной формой можно перейти в систему интеграции проектов (подробно работа подсистемы «Интеграция проектов» описана в главе 4.2.3), для чего необходимо в меню файл САПР, выбрать – «Открыть файл САПР».

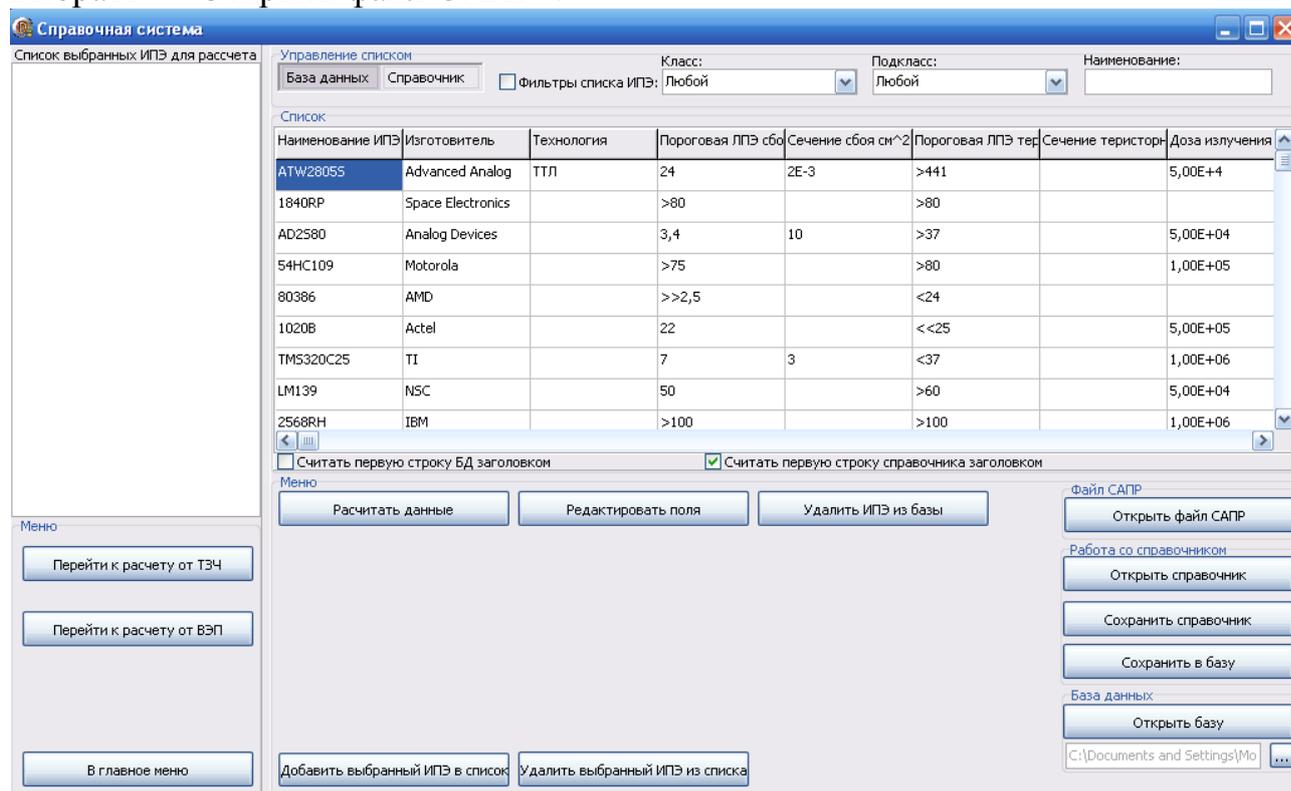


Рис. 4.6. Интерфейс формы «Справочная система»

Для работы с параметрами и данными, содержащимися в загруженной таблице (базе полупроводниковых изделий, интегрированной или полученной из внешних источников), существует меню редактирования полей базы (полей таблицы). Меню редактирования полей базы включает следующий функционал:

- опция «редактировать поля» – позволяет проводить редактирование таблицы, если опция не выбрана любое редактирование данных содержащихся в полях таблицы невозможно. Служит для защиты данных таблицы от случайного изменения;

- опция «рассчитать данные» – позволяет проводить расчёт «Сечения сбоя», выбранного ИПЭ, если оно не известно. Прежде чем проводить расчёт сечения сбоя, необходимо разблокировать таблицу для редактирования, при выборе данной опции на экране появится форма имеющая вид, представленный на рис. 4.7.

Таблица 4.1

Наименование ИПЭ	Изготовитель	Технология	Пороговая ЛПЭ сбоя МэВ·см ² /мг	Сечение сбоя см ²	Пороговая ЛПЭ теристорного эффекта МэВ·см ² /мг	Сечение теристорного эффекта см ²	Доза излучения рад (si)	Класс/подкласс	Аналоги
AD1866	Analog Devices	ТТЛ	<<11		>117		5,00E+04	А/АЦ	
ATW2805S	Advanced Analog	ТТЛ	24		>44			А/ис	
AD524	Analog Devices	ТТЛ	12		>80			А/у	
TSC4429	Teledyne		>120		>120			А/д	
1840RP	Space Electronics		>80		>80			А/кк	
LM139	NSC		50		>60		5,00E+04	А/к	
AD8001	Analog Devices		>82		>82			А/оу	
AD2S80	Analog Devices		3,4		>37		5,00E+04	А/п	
54HC109	Motorola		>75		>80		1,00E+05	Ц/ал	
2568RH	IBM		>100		>100		1,00E+06	Ц/зу	
80386	AMD		>>2,5		<24			Ц/м	
1020B	Actel		22		<<25		5,00E+05	Ц/ПП	
TMS320C25	TI		7		<37		1,00E+06	Ц/цпос	

Поля класс выпадающего списка содержат: аналоговые ИС (А); цифровые ИС (Ц).

Поля подкласс выпадающего списка содержат:

-для аналоговых ИС (А): АЦП и ЦАП (АЦ); Вторичные источники питания (ис); Дифференциальные, логарифмические, буферные и др. усилители (у); Драйверы (д); Ключи и коммутаторы (кк); Компараторы (к); Операционные усилители (оу); Прочие линейные ИС (п).

-для цифровых ИС (Ц): Арифметические, логические и др. ИС (ал); Запоминающие устройства (зу); Микропроцессоры (м); ПЛИСы, БМК и ПЛМ (ПП); Цифровые процессоры обработки сигналов (цпос).

Для проведения расчёта необходима информация по общему количеству чувствительных элементов и размерам отдельного чувствительного элемента ИПЭ (ИС), где размеры чувствительного элемента a , b , c определяются в соответствии с рис. 2.3.

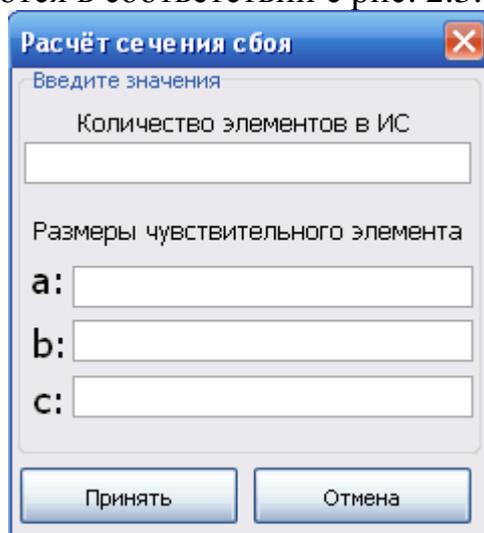


Рис. 4.7. Интерфейс формы «Расчёт сечения с боя»

Список ИПЭ, участвующих в расчётах формируется с помощью кнопок:

- добавить выбранный ИПЭ в список – позволяет добавить элемент таблицы к списку выбранных ИПЭ для расчёта;
- удалить выбранный ИПЭ из списка – удаляет выбираемое изделие из списка выбранных ИПЭ для расчёта.

После того, как отображены все интересующие полупроводниковые изделия участвующие в расчётах, можно приступать к расчёту оценки стойкости ИПЭ к локальным радиационным эффектам, при воздействии отдельных ЗЧ КП.

4.2.3. Графический интерфейс подсистемы «Интеграция проектов»

Подсистема интеграции проектов позволяет расширить функциональные возможности программного комплекса и решает вопрос взаимодействия различных средств проектирования. Графический интерфейс подсистемы разработан на базе алгоритмов, заложенных в главе 3.4.2 в соответствии с разработанной моделью графического интерфейса. Схема, представляющая элементы графического интерфейса подсистемы интеграции проектов и их связи, представлена на рис. 4.8.

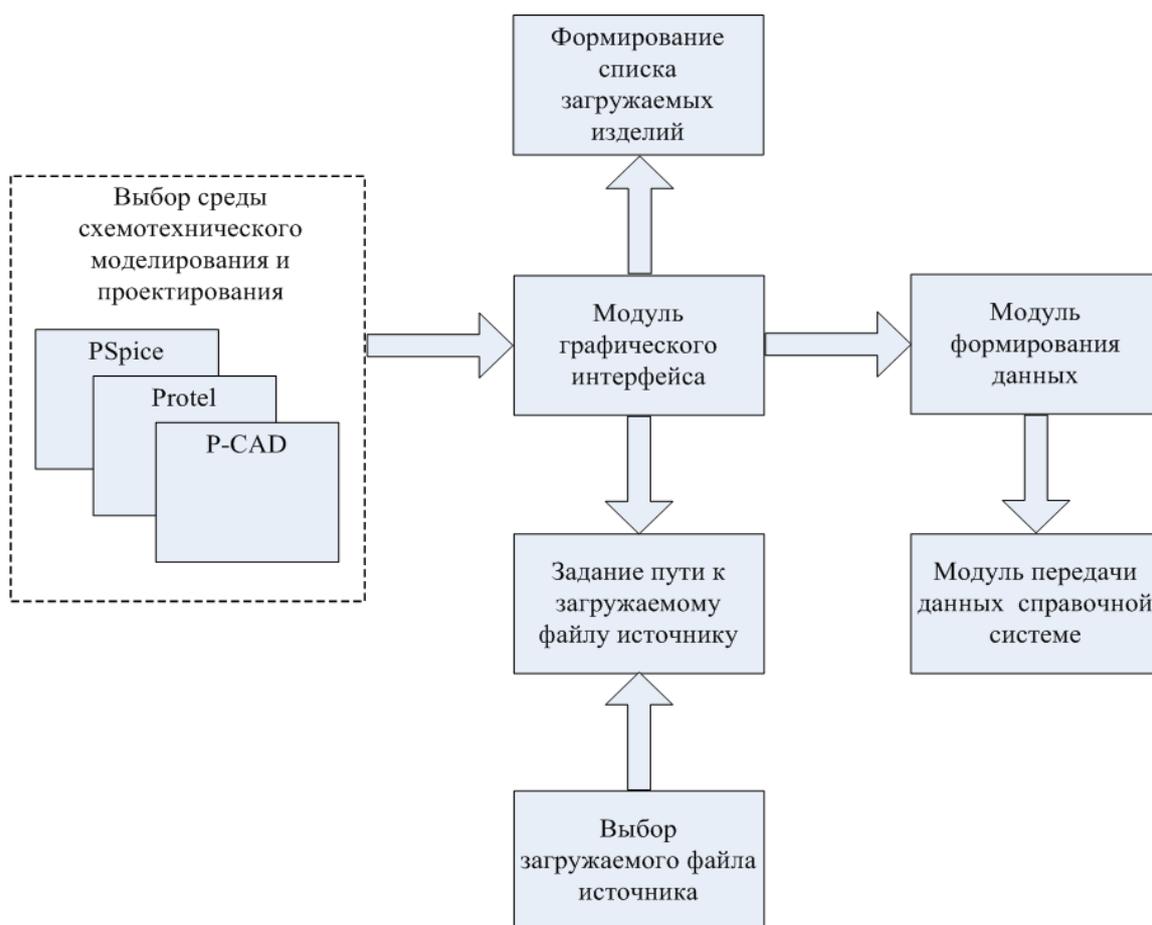


Рис. 4.8. Элементы графического интерфейса внутри подсистемы интеграции проектов

В состав подсистемы интеграции проектов входят следующие графические модули и компоненты:

- выбор среды схемотехнического моделирования – позволяет выбрать одну из САПР;
- формирование списка загружаемых изделий – приводит перечень электронных элементов загруженного проекта САПР;
- задание пути к загружаемому файлу источнику – служит для оперативного поиска и загрузки интересующих проектов, с целью дальнейшего конвертирования библиотек проекта в таблицу компонентов справочной системы;
- модуль передачи данных справочной системе – загружает отконвертированную библиотеку проекта в таблицу компонентов справочной системы.

После процесса конвертирования библиотек элементов из систем автоматизированного проектирования, работа с полученной таблицей элементов аналогична действиям, проводимым над внешним файлом справочником, т.е. обеспечивается возможность коррекции данных выбранного образца, запись в интегрированную библиотеку, добавление элемента к списку расчётов.

Открытая графическая форма модуля интеграции проектов имеет вид, представленный на рис. 4.9. Графическая форма данной подсистемы может быть вызвана, как из главной формы, так и из формы справочника (механизм описан выше).

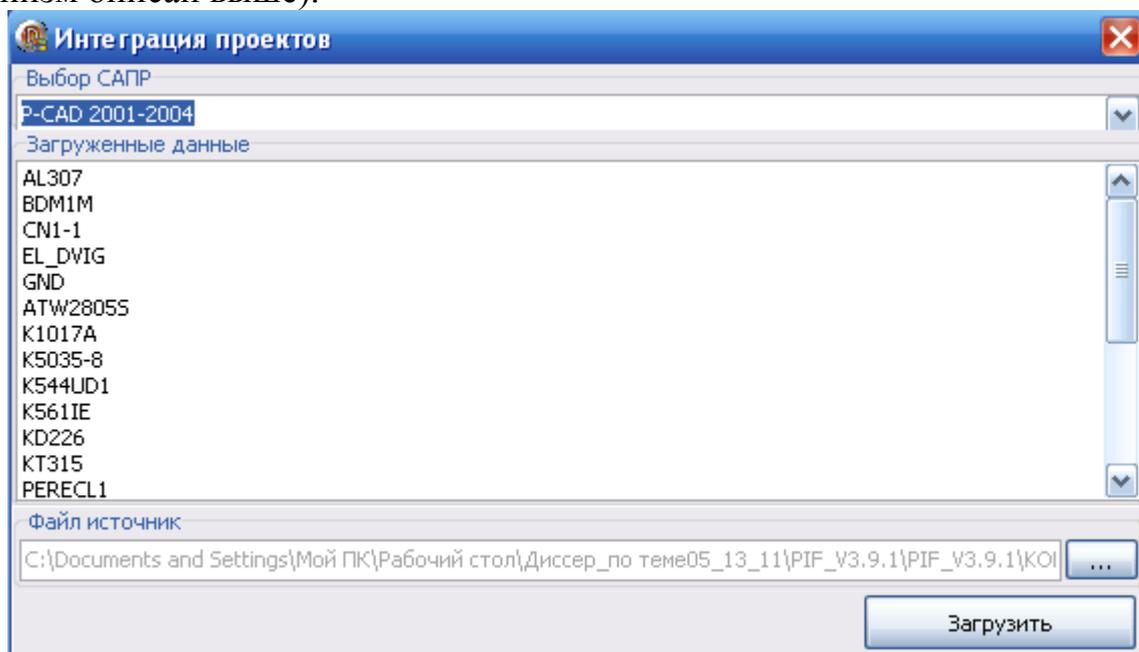


Рис. 4.9. Интерфейс формы подсистемы «Интеграция проектов»

Предваряя процесс конвертирования необходимо провести начальные настройки, т.е. выбрать систему схемотехнического моделирования и источник данных. Для чего, в выпадающем списке «Выбор САПР», задать одну из имеющихся систем моделирования и определить путь к файлу источнику в поле «Файл источник». Результатом будет появление окна «Загружаемые данные», в котором отобразится список компонентов, комплектующих рассматриваемый блок. Выполнив загрузку файла, в таблице окна справочной системы будет отображён полный список всех компонентов. Компонентам, уже имеющимся в интегрированной базе, присваиваются параметры заданные ранее. Недостающие данные могут быть отредактированы аналогично редактированию полей базы при работе со справочной системой.

4.2.4. Графический интерфейс формы «Оценка стойкости полупроводниковых изделий при воздействии ТЗЧ»

Графическая форма «Оценка стойкости полупроводниковых изделий при воздействии ТЗЧ», разработанная в соответствии с моделью графического интерфейса программного комплекса и алгоритмов, описанными в главе 3.5.1, предназначена для предоставления пользователю возможности оперативного определения характеристик стойкости различных ИПЭ к единичным эффектам при воздействии отдельных

тяжёлых заряженных частиц космического пространства. Графический интерфейс учитывает необходимость ввода дополнительных значений, участвующих в расчётах в соответствии с разработанной математической моделью оценки стойкости ИПЭ к локальным радиационным эффектам от воздействующих ТЗЧ КП. Подробно модель рассмотрена в главе 2.3.2.

В зависимости от настроек проводимого расчёта могут быть получены следующие результаты:

- частота сбоев от ГКЛ ТЗЧ для одного изделия данного типа;
- частота сбоев от ГКЛ ТЗЧ для всех изделий данного типа;
- частота сбоев от СКЛ ТЗЧ для одного изделия данного типа;
- частота сбоев от СКЛ ТЗЧ для всех изделий данного типа;
- частота сбоев от ТЗЧ ГКЛ для всего блока;
- частота сбоев от ТЗЧ СКЛ для всего блока.

Специфика задач, решаемых подсистемой «Оценка стойкости полупроводниковых изделий при воздействии ТЗЧ» в составе комплекса, определила схему связей графических элементов подсистемы, представленную на рис. 4.10.

В состав подсистемы входят следующие графические модули и компоненты:

- загрузка списка ИПЭ из справочной системы – отображает загруженные ИПЭ в форме расчёта;
- загрузка параметров выбранного из списка ИПЭ – позволяет в процессе расчёта пользоваться справочными материалами по рассчитываемому ИПЭ;
- ввод необходимых параметров расчёта – служит для ввода дополнительных параметров расчёта, задание которых требуется непосредственно во время проведения расчёта;
- отчистка поля расчёта – позволяет отчистить информацию о ходе расчёта;
- расчёт для ГКЛ – запуск расчёта по оценке характеристик стойкости полупроводниковых изделий при воздействии отдельных тяжёлых заряженных частиц галактических лучей;
- расчёт для СКЛ – запуск расчёта по оценке характеристик стойкости полупроводниковых изделий при воздействии отдельных тяжёлых заряженных частиц порожденных излучениями солнца;
- сохранение результатов расчёта в файл – предоставляет возможность сохранения всех полученных результатов.

Графическая форма подсистемы оценки радиационной стойкости ИПЭ от тяжёлых заряженных частиц КП представлена на рис. 4.11.

Вся информация о результатах проводимого расчёта отражается в поле расчёта частоты сбоев от воздействующих ТЗЧ для ИПЭ из состава блока КА.

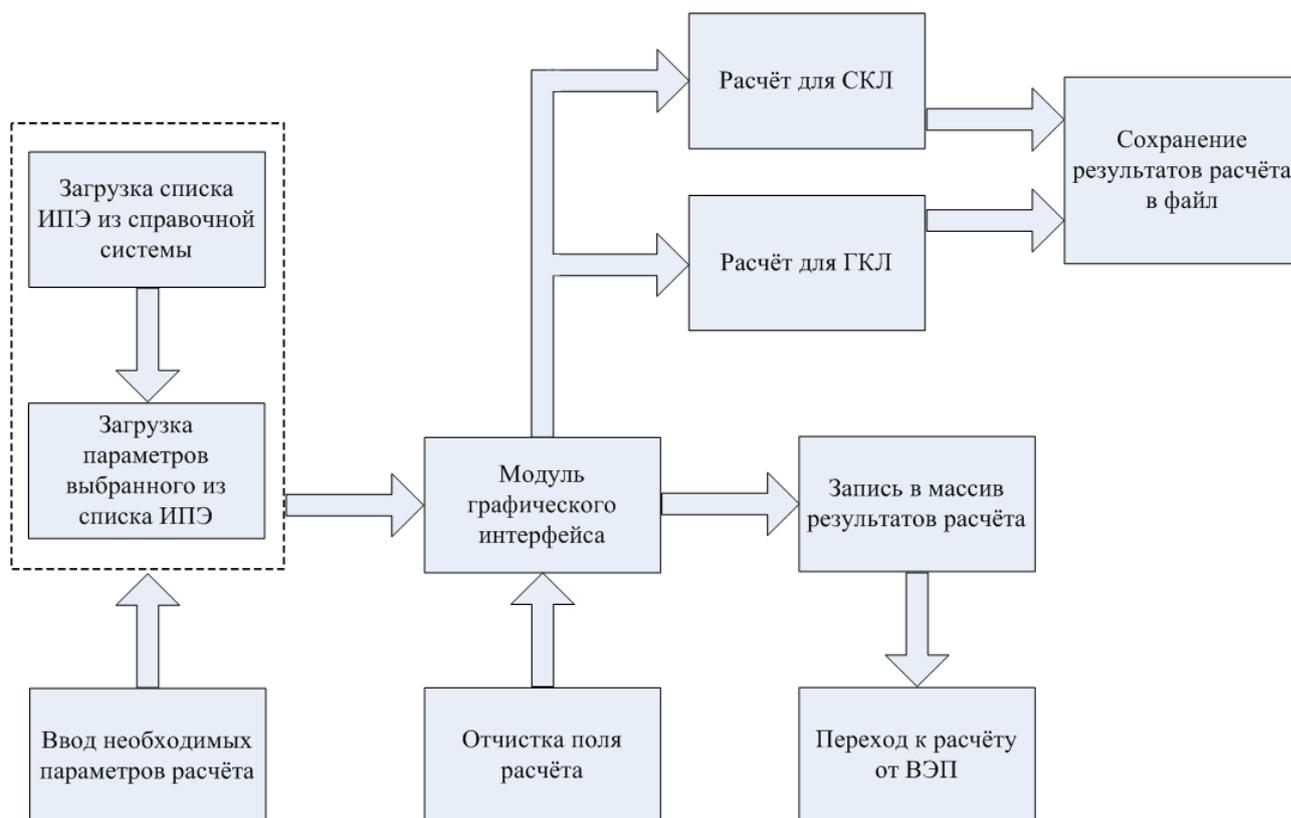


Рис. 4.10. Связь графических элементов в форме «Расчёт от ТЗЧ»

Для каждого рассчитываемого изделия в окне результатов выводится следующая информация:

- расчёт чувствительности к сбоям от воздействующих ТЗЧ ГКЛ (СКЛ) для НАИМЕНОВАНИЕ ИПЭ;
- определение диапазона ЛПЭ для НАИМЕНОВАНИЕ ИПЭ;
- выбранный диапазон ЛПЭ N ;
- значение потока $F(>Ln)$ соответствующее Ln - вводимое значение;
- частота сбоев для НАИМЕНОВАНИЕ ИПЭ = расчётное значение;
- количество микросхем НАИМЕНОВАНИЕ ИПЭ = вводимое значение;
- частота сбоев для всех микросхем типа НАИМЕНОВАНИЕ ИПЭ = расчётное значение для всех ИПЭ данного типа.

Где N – выбирается пользователем и может принимать значения: $L_{max} < Ln$ и $L_{max} < Ln$.

Последнее поле в расчёте для каждого элемента, отражает текущее значение частоты сбоев от конкретного излучения для блока в целом. Таким образом, итоговое значение частоты сбоев от ГКЛ (СКЛ) ТЗЧ для всего блока будет дано при расчёте последнего выбранного образца ИПЭ.

Выбор образца ИПЭ осуществляется в поле «Список выбранных ИПЭ для расчёта». В процессе выбора, выделенное изделие подсвечивается и для него в меню «Параметры выбранного ИПЭ» даётся список данных из базы.

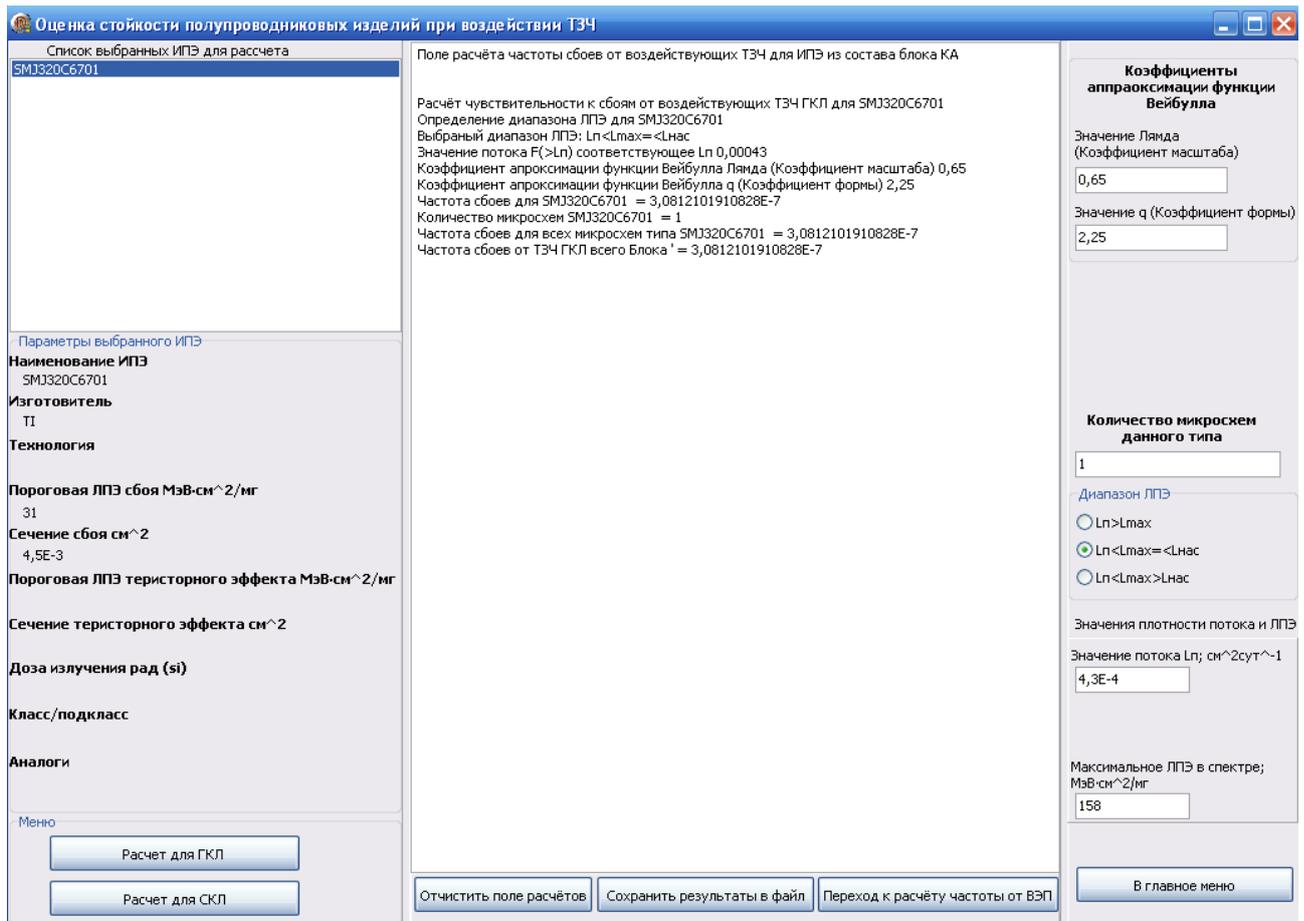


Рис. 4.11. Интерфейс формы «Расчёт от ТЗЧ»

Если изделие не выбрано проведение расчёта будет невозможно и появится сообщение об ошибке. После выбора изделия необходимо провести дополнительные настройки, в поле «Количество микросхем данного типа» определить количество ИПЭ, задействованных в блоке КА (по умолчанию 1), а также указать значения плотности потока и ЛПЭ. Плотность потока задаётся в поле «Значение потока» соответствующее L_n в виде $xE-y$; где x, y – берутся из интегральных спектров средней плотности потока $(\text{см}^2 \cdot \text{сут})^{-1}$. В поле «Максимальное ЛПЭ в спектре», указывается ЛПЭ, соответствующее максимальному ЛПЭ для выбранного спектра.

После того, как все настройки заданы, можно проводить оценку радиационной стойкости, при проведении расчёта от ГКЛ ТЗЧ в меню выбирается «Расчёт для ГКЛ», для СКЛ – «Расчёт для СКЛ».

В случае, если пользователь согласен с исходом проведённого им расчёта, все полученные данные могут быть сохранены в документ Microsoft Word, отформатированный по образцу поля расчёта частоты сбоев от воздействующих ТЗЧ для ИПЭ из состава блока КА. При выборе опции «Сохранить результаты в файл» появится стандартное окно с требованием ввести имя сохраняемого файла и его местоположение.

4.2.5. Графический интерфейс формы «Оценка стойкости полупроводниковых изделий при воздействии ВЭП»

Графическая форма «Оценка стойкости полупроводниковых изделий при воздействии ВЭП», разработанная в соответствии с моделью графического интерфейса программного комплекса и алгоритмов, описанными в главе 3.5.2, предназначена для предоставления пользователю возможности оперативного определения характеристик стойкости различных ИПЭ к единичным эффектам при воздействии отдельных высокоэнергетичных прогонов космического пространства. В целом работа с данной подсистемой аналогична модулю «Оценка стойкости полупроводниковых изделий при воздействии ТЗЧ». Графический интерфейс учитывает необходимость ввода дополнительных значений, участвующих в расчётах в соответствии с разработанной математической моделью оценки стойкости ИПЭ к единичным эффектам от воздействующих ВЭП КП, подробно модель рассмотрена в главе 2.3.3.

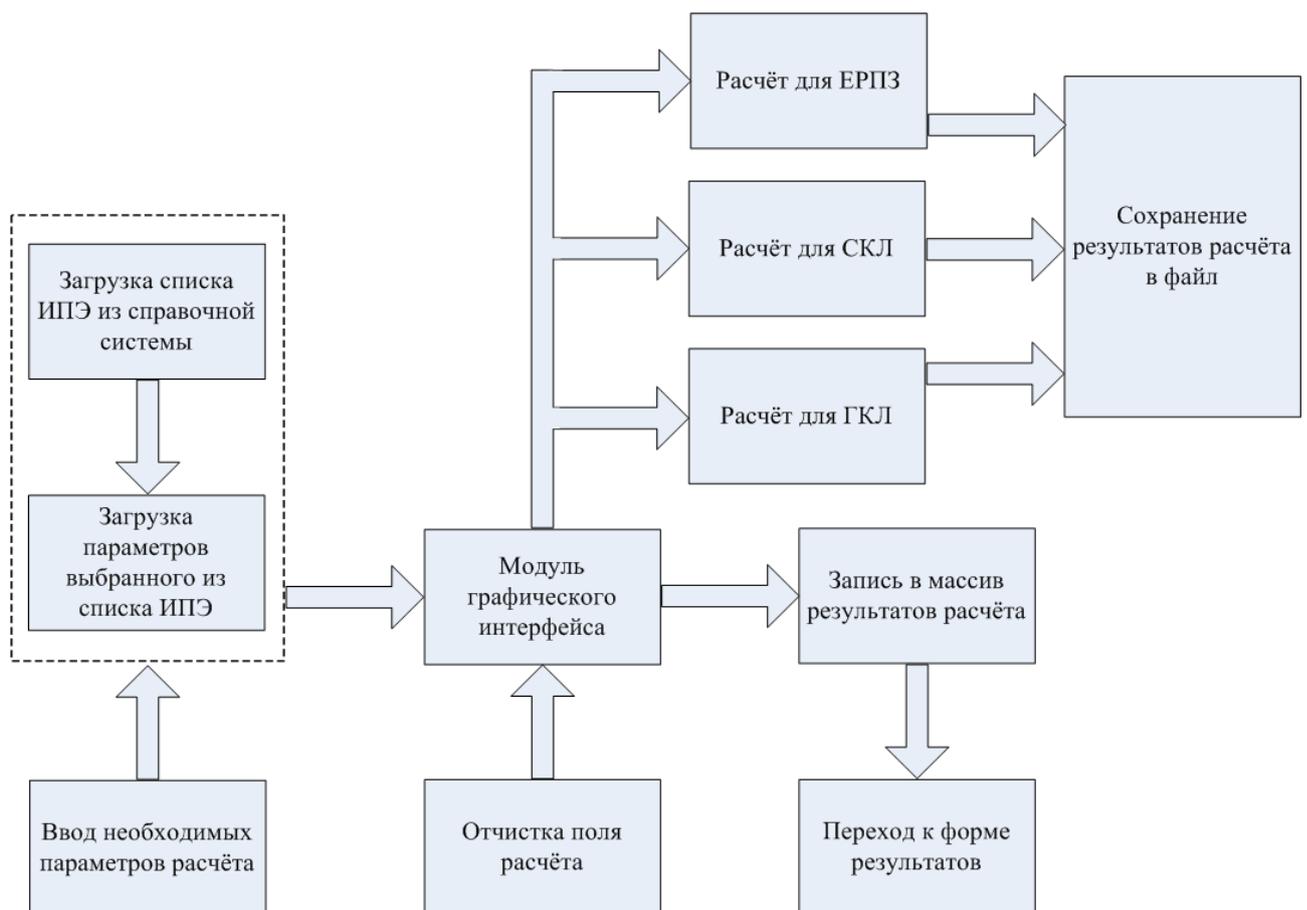


Рис. 4.12. Связь графических элементов в форме «Расчёт от ВЭП»

В зависимости от настроек проводимого расчёта могут быть получены следующие результаты:

- частота сбоев от ГКЛ ВЭП для одного изделия данного типа;
- частота сбоев от ГКЛ ВЭП для всех изделий данного типа;
- частота сбоев от СКЛ ВЭП для одного изделия данного типа;
- частота сбоев от СКЛ ВЭП для всех изделий данного типа;
- частота сбоев от ЕРПЗ ВЭП для одного изделия данного типа;
- частота сбоев от ЕРПЗ ВЭП для всех изделий данного типа;
- частота сбоев от ВЭП ГКЛ для всего блока;
- частота сбоев от ВЭП СКЛ для всего блока;
- частота сбоев от ВЭП ЕРПЗ для всего блока.

Схема связей графических элементов в подсистеме расчёт от ВЭП имеет вид, представленный на рис. 4.12.

В состав подсистемы «Оценка стойкости полупроводниковых изделий при воздействии ВЭП» входят следующие графические модули и компоненты:

- загрузка списка ИПЭ из справочной системы – отображает загруженные ИПЭ в форме расчёта;
- загрузка параметров выбранного из списка ИПЭ – позволяет в процессе расчёта пользоваться справочными материалами по рассчитываемому ИПЭ;
- ввод необходимых параметров расчёта – служит для ввода дополнительных параметров расчёта, задание которых требуется непосредственно во время проведения расчёта;
- отчистка поля расчёта – позволяет отчистить информацию о ходе расчёта;
- расчёт для ГКЛ – запуск расчёта по оценке характеристик стойкости полупроводниковых изделий при воздействии высокоэнергетичных протонов галактических лучей;
- расчёт для СКЛ – запуск расчёта по оценке характеристик стойкости полупроводниковых изделий при воздействии высокоэнергетичных протонов, порожденных излучениями солнца;
- расчёт для ЕРПЗ – запуск расчёта по оценке характеристик стойкости полупроводниковых изделий при воздействии высокоэнергетичных протонов естественных радиационных поясов Земли;
- сохранение результатов расчёта в файл – предоставляет возможность сохранения всех полученных результатов.

Графическая форма подсистемы оценки радиационной стойкости ИПЭ от высокоэнергетичных протонов КП представлена на рис. 4.13.

Вся информация о результатах проводимого расчёта отражается в поле расчёта частоты сбоев от воздействующих ТЗЧ для ИПЭ из состава блока КА. Для каждого рассчитываемого изделия в окне результатов выводится следующая информация:

- расчёт чувствительности к сбоям от воздействующих ВЭП ГКЛ (СКЛ, ЕРПЗ) для НАИМЕНОВАНИЕ ИПЭ;

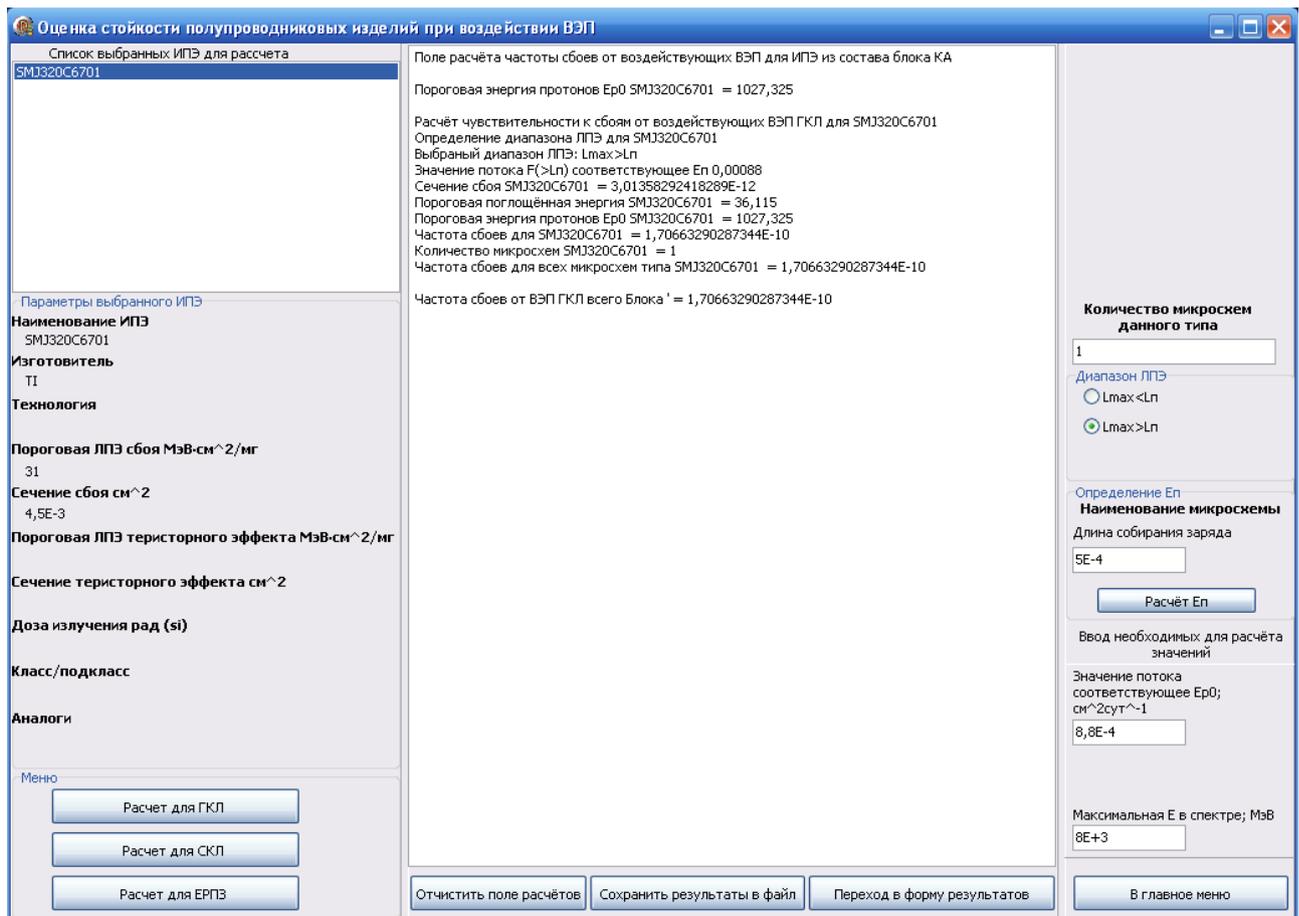


Рис. 4.13. Интерфейс формы «Оценка стойкости полупроводниковых изделий при воздействии ВЭП»

- определение диапазона ЛПЭ для НАИМЕНОВАНИЕ ИПЭ;
- выбранный диапазон ЛПЭ N ;
- значение потока $F(>E_n)$ соответствующее E_n - вводимое значение;
- пороговая энергия протонов E_{p0} для НАИМЕНОВАНИЕ ИПЭ - вводимое значение;
- сечение сбоя НАИМЕНОВАНИЕ ИПЭ = расчётное значение;
- частота сбоев для НАИМЕНОВАНИЕ ИПЭ = расчётное значение;
- количество микросхем НАИМЕНОВАНИЕ ИПЭ = вводимое значение;
- частота для всех микросхем типа НАИМЕНОВАНИЕ ИПЭ = расчётное значение для всех ИПЭ данного типа.

Где N – выбирается пользователем и может принимать значения: $L_{max} < L_n$ и $L_{max} > L_n$.

Последнее поле в расчёте для каждого элемента отражает текущее значение частоты сбоев от конкретного излучения для блока в целом. Таким образом, итоговое значение частоты сбоев от ГКЛ (СКЛ, ЕРПЗ) ВЭП для всего блока будет дано при расчёте последнего выбранного образца ИПЭ.

Технология проведения расчёта аналогична описанной ранее, для подсистемы оценки стойкости от ТЗЧ. Некоторые особенности описаны ниже. На первом этапе расчёта находится пороговая энергия протонов (E_{p0}), по ней определяется соответствующее ей значение потока. Для определения расчётных значений, пользователем задаётся пробег вторично образованной частицы, в поле «Длина собирания заряда», по умолчанию эта величина в программе равна $5E-4$ см. Данное значение может быть взято из различной сопроводительной документации по полупроводниковым изделиям (на основе топологических и технологических характеристик изделия), используемым в составе бортовой аппаратуры. В поле «Максимальное значение энергии» задаётся E_{max} взятое из интегральных спектров для ВЭП.

Оценка стойкости проводится от воздействующих протонов ГКЛ, СКЛ и ЕРПЗ, для чего в меню необходимо выбрать «Расчёт для ГКЛ», «Расчёт для СКЛ» и «Расчёт для ЕРПЗ» соответственно.

В остальном интерфейс графической формы оценки стойкости ТПЭ к локальным радиационным эффектам при воздействии ВЭП и работа с ней, не отличается от формы оценки стойкости для ТЗЧ.

4.2.6. Графический интерфейс формы «Проверка на соответствие требованиям стойкости»

Разработка графического интерфейса формы «Проверка на соответствие требованиям стойкости» проводилась с учётом модели графического интерфейса программного комплекса, в основе подсистемы лежит алгоритм, разработанный в главе 3.5.3. Состав и конфигурация графического интерфейса определялась исходя из задач, решаемых подсистемой, включающих обобщение результатов, полученных ранее на этапах расчёта для отдельных комплектующих блока БА, а также реализацию системы проверки конфигурации блока БА на соответствие заданным требованиям стойкости.

Согласно разработанной схеме связей графических элементов в форме «Проверка на соответствие требованиям стойкости», показанной на рис. 4.14, в состав подсистемы входят следующие графические модули и компоненты:

- загрузка списка ИПЭ из справочной системы – отображает загруженные ИПЭ в форме расчёта;

- загрузка параметров выбранного из списка ИПЭ – позволяет в процессе расчёта пользоваться справочными материалами по рассчитываемому ИПЭ;

- ввод необходимых параметров расчёта – служит для ввода дополнительных параметров расчёта, задание которых требуется непосредственно во время проведения расчёта;

- отчистка поля расчёта – позволяет отчистить информацию о ходе расчёта;

- сохранение результатов итогового расчёта в файл – предоставляет возможность сохранения всех полученных результатов;

- конфигурация вывода результата – настройка масок вывода, вариации предоставляемой информации;

- демонстрация результатов расчёта – обеспечение оперативного отслеживания получаемых результатов на этапе расчёта;

- конфигурация параметров надёжности – задание критериев стойкости;

- расчёт вероятности безотказной работы – запуск расчёта по оценке характеристик стойкости и вероятности безотказной работы блока бортовой аппаратуры космических аппаратов при воздействии заряженных частиц космического пространства.

Конфигурация и обобщение результатов, полученных ранее, реализованы посредством настройки параметров и различных масок вывода результата работы программного комплекса. В зависимости от настроек визуализации результатов в поле «Параметры вывода» могут быть сформированы следующие возможные варианты.

1. Установлена опция «Показать всё» – выводится предельно общая информация о итогах расчёта, которая включает следующие поля:

- частота сбоев за сутки от ТЗЧ ГКЛ для всего блока;
- частота сбоев за сутки от ТЗЧ СКЛ для всего блока;
- частота сбоев за сутки от ВЭП ГКЛ для всего блока;
- частота сбоев за сутки от ВЭП СКЛ для всего блока;
- частота сбоев за сутки от ВЭП ЕРПЗ для всего блока;
- общая частота сбоев за сутки от ТЗЧ;
- общая частота сбоев за сутки от ВЭП;
- общая частота сбоев за сутки.

2. Установлена опция «Частота сбоев от ТЗЧ ГКЛ» – выводится подробная информация по итогам расчёта от ТЗЧ ГКЛ, которая включает следующие поля:

- частота сбоев от ТЗЧ ГКЛ всего блока;
- частота для каждого ИПЭ, участвующего в расчётах;
- наименование ИПЭ, имеющего в заданной конфигурации блока БА максимальную частоту от ТЗЧ ГКЛ.

3. Установлена опция «Частота сбоев от ТЗЧ СКЛ» – выводится подробная информация по итогам расчёта от ТЗЧ СКЛ, по аналогии с пунктом 2.

4. Установлена опция «Частота сбоев от ВЭП ГКЛ» – выводится подробная информация по итогам расчёта от ТЗЧ ГКЛ, по аналогии с пунктом 2.



Рис. 4.14. Связь графических элементов в форме «Проверка на соответствие требованиям стойкости»

5. Установлена опция «Частота сбоев от ВЭП СКЛ» – выводится подробная информация по итогам расчёта от ТЗЧ ГКЛ, по аналогии с пунктом 2.

6. Установлена опция «Частота сбоев от ВЭП ЕРПЗ» – выводится подробная информация по итогам расчёта от ТЗЧ ГКЛ, по аналогии с пунктом 2.

В списке ИПЭ, комплектующих блок КА, отображены все изделия, по которым ранее проводился расчёт.

В области «Задание временных интервалов» задаются дополнительные параметры времени функционирования блока КА, необходимые для расчёта частоты сбоев за весь промежуток времени эксплуатации данного блока аппаратуры, включающие:

- время функционирования блока КА (кол-во суток);
- время воздействия СКЛ (кол-во суток).

При выполнении расчёта общей частоты сбоев за всё время функционирования блока КА будут выданы следующие результаты:

- общая частота сбоев от всех излучений кроме СКЛ за время N суток;

- общая частота сбоев от СКЛ за время M суток;
- где N – время функционирования блока КА (кол-во суток);
 M – время воздействия СКЛ (кол-во суток).

Графическая форма «Проверка на соответствие требованиям стойкости» представлена на рис. 4.15.

Помимо вывода информации по частоте сбоев для каждого ИПЭ, участвующего в расчётах, предусмотрен режим непосредственного сравнения рассчитанных значений с задаваемой максимально допустимой частотой сбоев ИПЭ от каждого вида излучений.

При вызове подробной информации по итогам расчёта будет получен следующий список результатов:

- частота сбоев от ТЗЧ ГКЛ всего Блока = результат полученный для всего блока;
- частота для НАИМЕНОВАНИЕ ИПЭ 1 = результат полученный для 1го ИПЭ (%);
- частота для НАИМЕНОВАНИЕ ИПЭ 2 = результат полученный для 2го ИПЭ (%);
- частота для НАИМЕНОВАНИЕ ИПЭ n = результат полученный для 3го ИПЭ (%);
- в заданной конфигурации блока КА максимальную частоту сбоев имеет НАИМЕНОВАНИЕ ИПЭ.

При этом значение 100% будет присвоено образцу, обладающему максимальной частотой сбоев к выбранному излучению, а процентное отношение остальных будет показывать, в какой степени на итоговый результат влияет то или иное изделие.

На случай если нормативная документация, на разрабатываемое изделие, даёт ограничение по максимальной частоте сбоев для конкретного ИПЭ от какого-либо вида ионизирующего излучения, в подсистеме есть возможность отследить такие ограничения в области «Ограничения». Внесённые ограничения по максимальной частоте сбоев, сравниваются с расчётными результатами, для образца с максимальной чувствительностью к сбоям от выбранного излучения (т.е. того, возле которого находится 100%).

При превышении расчётных значений заданных, выводится сообщение: «Частота сбоев для НАИМЕНОВАНИЕ ИПЭ превышает заданную в ограничениях, данное ИПЭ не удовлетворяет требованиям».

Если расчётные значения меньше заданных, выводится сообщение: «Частота сбоев для НАИМЕНОВАНИЕ ИПЭ не превышает заданную в ограничениях, данное ИПЭ удовлетворяет требованиям».

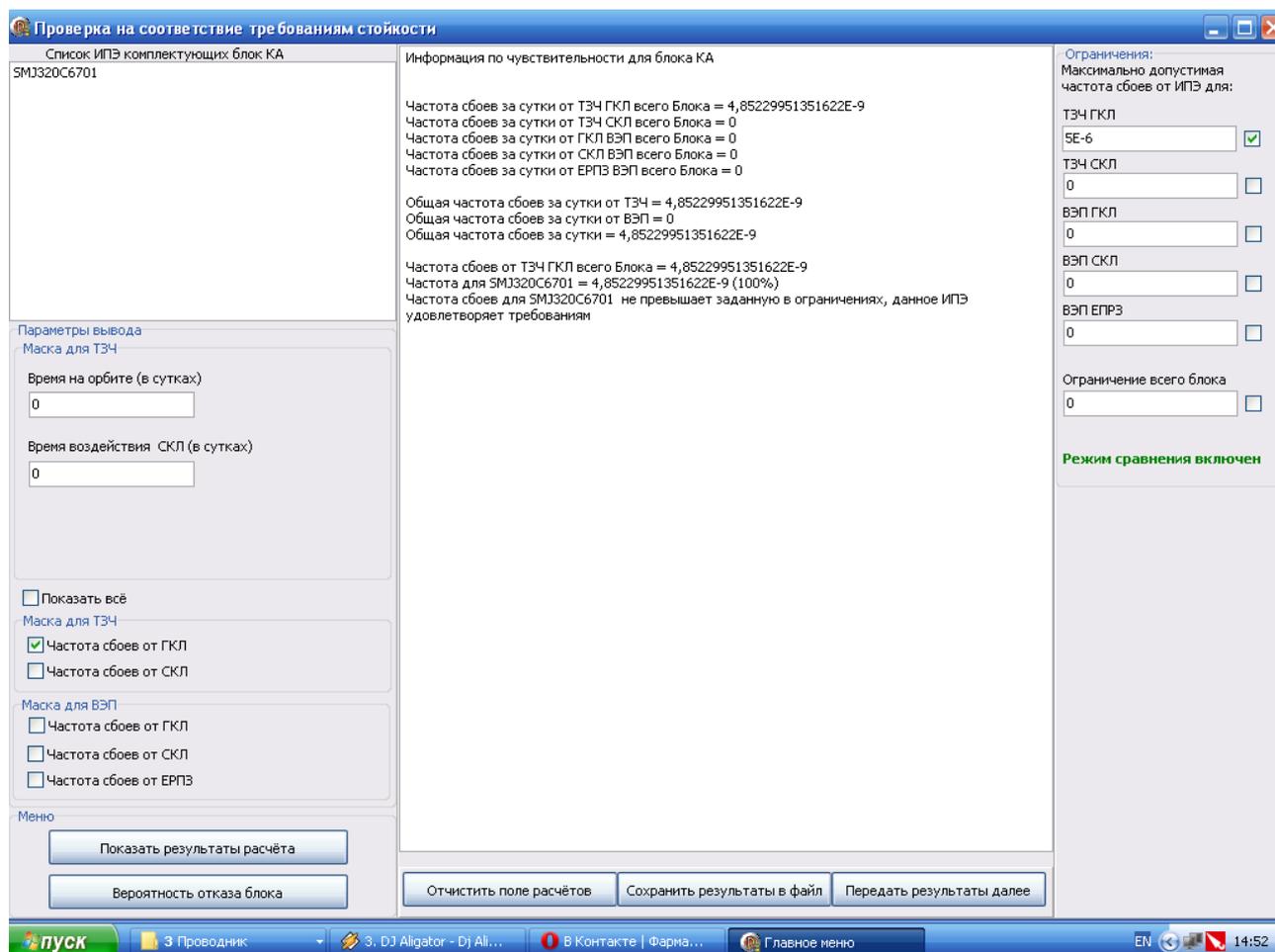


Рис. 4.15. Интерфейс формы «Проверка на соответствие требованиям стойкости»

Для получения заключения о возможности использования заданной конфигурации блока БА в составе КА может быть рассчитана вероятность возникновения сбоя и вероятность безотказной работы. Полученные результаты сравниваются с заданными, на основе чего, делается вывод о пригодности данной конфигурации блока к эксплуатации. В случае если вывод о пригодности данной конфигурации блока к эксплуатации определяется ограничениями, указанными в нормативной документации на разрабатываемое изделие, в поле «Ограничения» задаётся максимальное значение частоты сбоев для всего блока (за указанный период функционирования).

Все расчётные данные по характеристикам устойчивости блока КА к единичным сбоям могут быть сохранены в документ Microsoft Word. При выборе опции «Сохранить результаты в файл» появится стандартное окно с требованием ввести имя сохраняемого файла и его местоположение.

4.2.7. Графический интерфейс подсистемы «Теоретическая справка»

Графический интерфейс теоретической справки разрабатывался в соответствии с моделью графического интерфейса программного комплекса. В основе подсистемы лежит алгоритм, разработанный в главе 3.4.4. Состав справочных материалов определяется пользователем. Базовый набор справок может быть дополнен и отредактирован пользователем.

Графический интерфейс подсистемы представлен на рис. 4.16. «Теоретическая справка» содержит две вкладки – информационная справка и раздел понятий и определений.

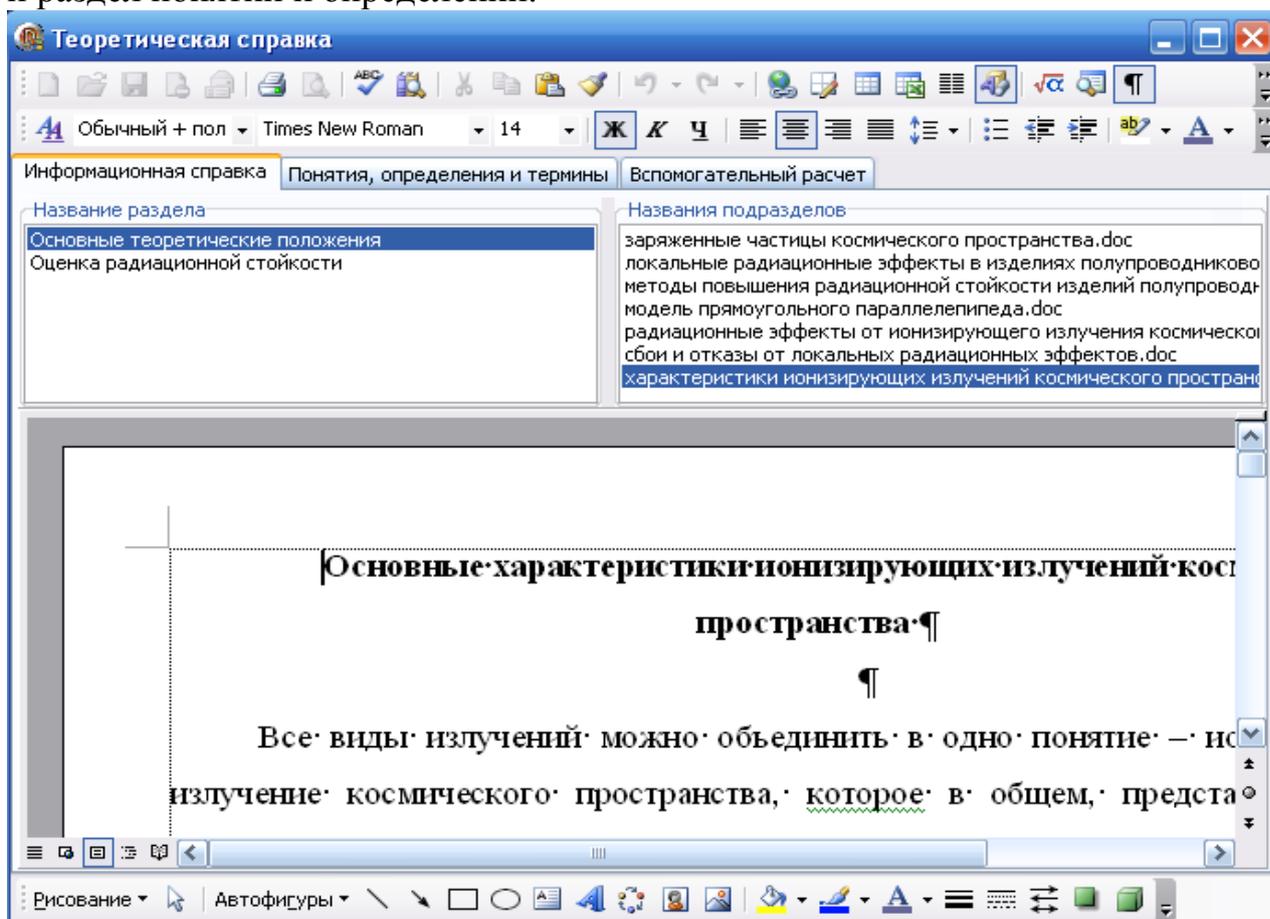


Рис. 4.16. Интерфейс формы «Теоретическая справка»

При выборе раздела информационной справки выводится список доступных справочных материалов, присущих данному разделу. Уже имеющиеся справочные материалы могут быть дополнены пользователем.

Из состава информационной справки могут быть выбраны следующие информационные разделы:

- основные теоретические положения;
- оценка радиационной стойкости.

Вкладка «Основные теоретические положения» содержит следующие справочные подразделы:

- характеристики ионизирующих излучений космического пространства;
- радиационные эффекты от ионизирующего излучения космического пространства;
- заряженные частицы космического пространства;
- локальные радиационные эффекты в изделиях полупроводниковой электроники;
- сбои и отказы от локальных радиационных эффектов;
- модель прямоугольного параллелепипеда;
- методы повышения радиационной стойкости изделий полупроводниковой электроники.

Вкладка «Оценка радиационной стойкости» включает следующие справочные подразделы:

- упругое рассеяние заряженных частиц высокой энергии;
- потери энергии при неупругих соударениях со связанными электронами (ионизационные потери энергии);
- потери энергии ЗЧ на эффекты смещения с образованием радиационных дефектов;
- неупругие взаимодействия частиц с ядрами вещества мишени;
- локальные радиационные эффекты от ЗЧ КП в ИПЭ в результате неравновесного энерговыделения.

Раздел «Понятия, определения и термины» – позволяет выбрать доступные определения сокращения и понятия из списка, необходимые в работе, в нём содержатся следующие элементы:

- общие теоретические понятия;
- определения, используемые в математических моделях, описывающих воздействие заряженных частиц космического пространства на ИПЭ;
- список сокращений.

Список определённых в подсистеме понятий выводится при выборе данной вкладки. При внесении изменений в справочный материал, он может быть сохранён. Операции «Редактирование» и «Сохранение файла» обеспечиваются средствами MS Word.

4.2.8. Графический интерфейс подсистемы «Оптимизация выбора изделий»

Графический интерфейс подсистемы оптимизации разрабатывался в соответствии с моделью графического интерфейса программного комплекса, в основе подсистемы лежат алгоритмы, разработанные в главе 3.4.5. Оптимизация выбора изделий осуществляется по критерию цены и характеристикам стойкости.

На основе разработанной схемы связей графических элементов в форме «Оптимизация выбора элементов» (рис. 4.17), в подсистеме могут быть выделены следующие графические модули и компоненты:

- загрузка списка изделий из справочной системы – отображает загруженные изделия в таблице;

- загрузка рассчитанных параметров изделий – загрузка в таблицу результатов, полученных в модулях оценки стойкости ИПЭ к локальным радиационным эффектам от воздействующих ЗЧ КП;

- создание таблицы. Ввод необходимых параметров расчёта – создание таблицы в окне экранной формы, «Ввод параметров расчёта» позволяет настраивать проводимую оптимизацию выбора изделий;

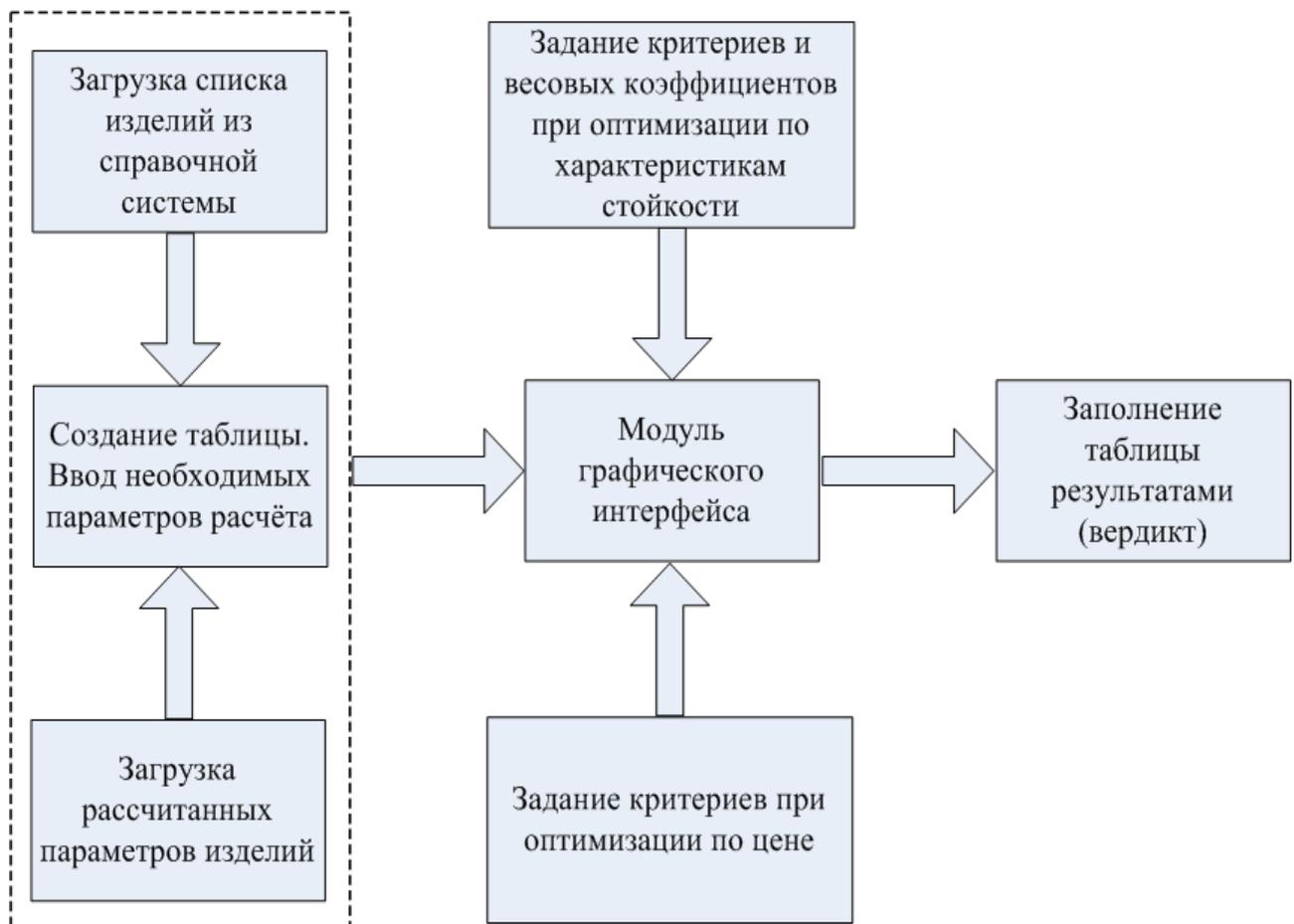


Рис. 4.17. Связь графических элементов в форме «Оптимизация выбора элементов»

- задание критериев и весовых коэффициентов при оптимизации по характеристикам стойкости – обеспечивает оперативную настройку значений критериев оптимизации, и синоптических весов критериев отбора;

- задание критериев при оптимизации по цене – обеспечивает оперативную настройку значений критериев оптимизации;

- заполнение таблицы результатами (вердикт) – заполнение таблицы результатами оптимизации, обеспечение наглядности предоставляемых данных.

При загрузке подсистемы формируется таблица, в которой отображается список изделий с рассчитанными (частота сбоев от воздействующих частиц) или задаваемыми параметрами (наработка на отказ, диапазон температур, цена, поле доза берется из справочной системы), графическая форма подсистемы представлена на рис. 4.18.

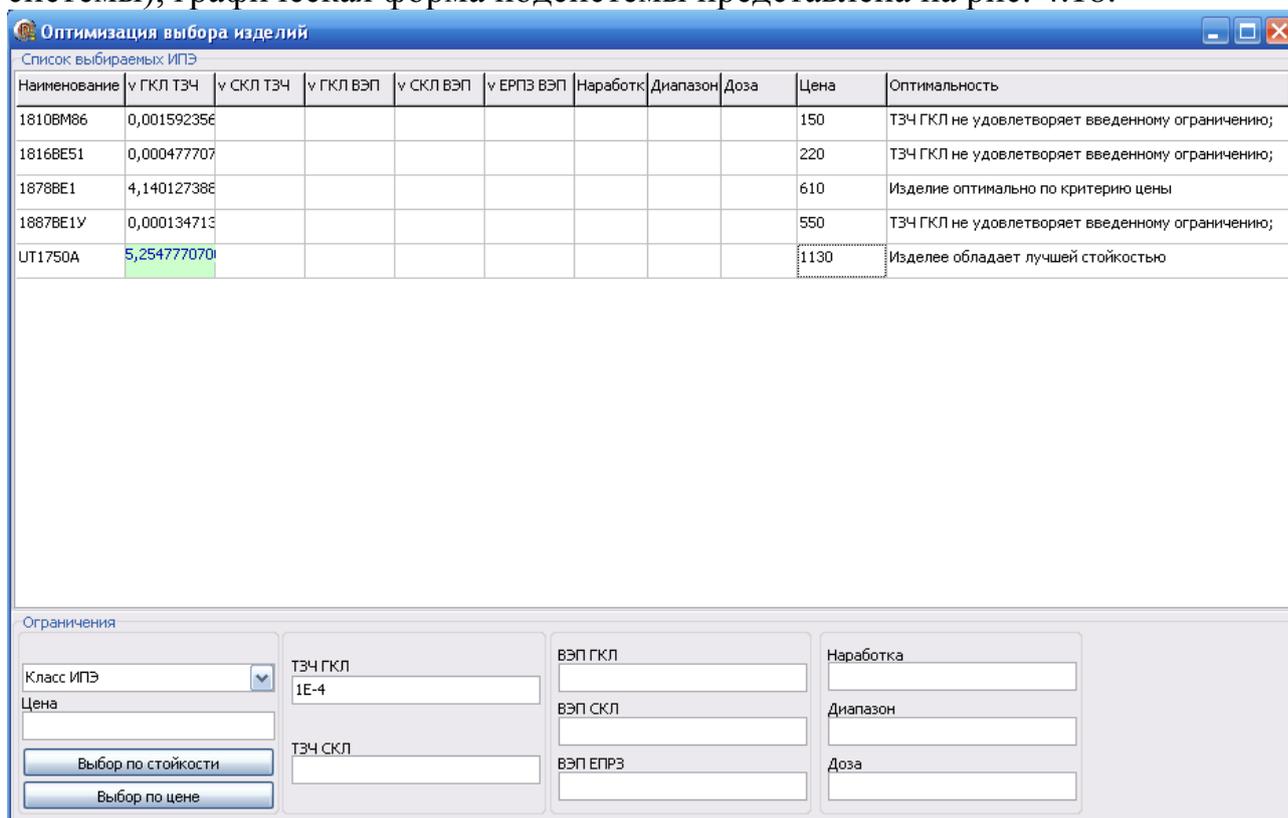


Рис. 4.18. Интерфейс формы «Оптимизация выбора изделий»

Для проведения оптимизации по характеристикам стойкости необходимо выбрать класс оптимизируемых изделий и задать дополнительные параметры оптимизации, в роли которых выступают следующие ограничения:

- максимально допустимая частота сбоев от ТЗЧ ГКЛ;
- максимально допустимая частота сбоев от ТЗЧ СКЛ;
- максимально допустимая частота сбоев от ВЭП ГКЛ;
- максимально допустимая частота сбоев от ВЭП СКЛ;
- максимально допустимая частота сбоев от ВЭП ЕРПЗ.

При проведении оптимизации по критерию цены дополнительно могут быть заданы наработка на отказ, диапазон температур, предельная поглощенная доза, необходимым условием является заполнение поля «Цена» в таблице.

Результатом оптимизации является выбор изделий, оптимальных с точки зрения цены и характеристик стойкости.

4.3. Методика проведения расчёта стойкости изделий полупроводниковой электроники от воздействующих заряженных частиц космического пространства

Методика оперативной оценки стойкости блока космического аппарата к эффектам от единичных сбоев или отказов рассмотрена на примере виртуальной конфигурации. В качестве наиболее чувствительного полупроводникового изделия выступает ПЛИС фирмы Actel RTSX72SU. Для проведения расчёта обязательным условием является наличие данных по сечению сбоев и ЛПЭ (определяются в результате испытаний или расчётным путём), для рассматриваемого ИПЭ в справочке уже имеется необходимая информация, при её отсутствии данные поля должны быть заполнены.

Значения сечения сбоев и порогового ЛПЭ для выбранных ИПЭ – Actel RTSX72SU: ЛПЭ пороговое = 40, сечение сбоя = 0,27.

Изделие из справочника, участвующее в расчёте, добавляется к списку выбранных ИПЭ. В зависимости от цели расчёта пользователь может задавать варианты проводимых вычислений. При этом оценка радиационной стойкости может проводиться от ЗЧ всех видов ИИ КП, или выборочно от ЗЧ определённых пользователем излучений.

При проведении оценки стойкости ИПЭ от воздействующих ТЗЧ КП необходимо задание дополнительных параметров, в роли которых выступают: диапазон $L_n...L_{max}$ и интегральный спектр ЛПЭ плотности потока ТЗЧ ($\text{см}^2\text{сут}^{-1}$) за реальной защитой $F(>L_n)$. Данные спектры приводятся в технических условиях (ТУ) на разрабатываемую аппаратуру.

Выбор дополнительных параметров рассматривается на примере Actel RTSX72SU и выдержек из таблицы 4.2, приведенных для Российского сегмента «Международной Космической Станции», демонстрирующих работу со спектром, заданном в табличном виде. Для микросхемы Actel RTSX72SU в приведённом спектре выделено значение ЛПЭп = 40 МэВ·см²/мг и соответствующее ему значение потока $F(>L_n)$ за защитой 1 г·см⁻².

Максимальное значение ЛПЭ будет соответствовать последней строке таблицы (выделено курсивом).

Итоги расчёта для тестовой конфигурации от воздействующих ТЗЧ ГКЛ:

- выбранный диапазон ЛПЭ: $L_{max} > L_n$;
- значение потока $F(>L_n)$ соответствующее L_n - 7,7E-6;
- частота сбоев для Actel RTSX72SU = 1,496E-10;
- количество микросхем Actel RTSX72SU = 1;
- частота сбоев для всех микросхем типа Actel RTSX72SU = 1,496E-10.

Результаты расчёта от воздействующих ТЗЧ СКЛ представляются пользователю в аналогичном виде.

Таблица 4.2

ЛПЭ, МэВ·см ² /мг	Интегральный спектр ЛПЭ за различной защитой $F(>L), (\text{см}^2/\text{сут})^{-1}$		
	0,3 Г·см ⁻²	1,0 Г·см ⁻²	3,0 Г·см ⁻²
1,0E+00	4,0E+01	3,8E+01	3,4E+01
2,0E+00	2,9E+00	2,7E+00	2,2E+00
·	·	·	·
·	·	·	·
·	·	·	·
3,0E+01	1,7E-05	2,1E-05	3,6E-05
4,0E+01	9,8E-07	1,2E-06	1,9E-06
5,0E+01	4,1E-07	4,9E-07	8,4E-07
·	·	·	·
·	·	·	·
·	·	·	·
9,0E+01	6,0E-09	7,5E-09	1,4E-08

При оценке стойкости ИПЭ от воздействующих ВЭП КП, для выбранных изделий из списка расчёта, необходимо задание следующих параметров: диапазон $L_{\min} \dots L_{\max}$ и интегральные спектры средней плотности потока $(\text{см}^2 \cdot \text{сут})^{-1}$ ВЭП, максимальную энергию протонов E_{\max} и пробег частицы. Необходимые данные приводятся в технических условиях на разрабатываемую аппаратуру.

Выбор дополнительных параметров также рассматривается на примере Actel RTSX72SU и выдержек из таблицы 4.3, приведенных для изделий «ЦСКБ-Прогресс». Для микросхемы Actel RTSX72SU в приведённом спектре выделено значение пороговой энергии протонов $E_{p0} = 1000$ МэВ· и соответствующее ему значение потока $F(>E_{p0})$ за защитой 1 Г·см⁻².

Максимальное значение E_{\max} будет соответствовать последней строке таблицы (выделено курсивом). Поток F выбирается следующим образом – алгоритм выбора потока описан выше.

Расчёт E_{p0} для каждого выбираемого ИПЭ производится отдельно, на основе внутренних алгоритмов программы.

Пробег частицы обычно берётся равным 100 мкм, т.е. $1E-2$ см.

Итоги расчёта для тестовой конфигурации от воздействующих ВЭП ГКЛ:

- расчёт чувствительности к сбоям от воздействующих ВЭП ГКЛ для Actel RTSX72SU;

- рассчитанная пороговая энергия протонов для Actel RTSX72SU – 1331;

Таблица 4.3

E_{p0} , МэВ	Интегральный спектр ВЭП СКЛ $F(E_p >)$ ($\text{см}^2 \cdot \text{сут}$) ⁻¹ за защитой $\text{г} \cdot \text{см}^{-2}$.		
	1	3	10
50	3,76E+05	2,76E+05	1,41E+05
100	1,63E+05	1,43E+05	9,61E+04
200	6,16E+04	5,80E+04	4,87E+04
500	1,55E+04	1,51E+04	1,38E+04
800	7,39E+03	7,21E+03	6,66E+03
1000	4,99E+03	4,87E+03	4,50E+03
2000	1,38E+03	1,35E+03	1,25E+03
8000	3,53E+01	3,44E+01	3,16E+01

- выбранный диапазон ЛПЭ: $L_{max} > L_n$;
- значение потока $F(>E_n)$ соответствующее $E_n - 7,1E+3$;
- пороговая энергия протонов для Actel RTSX72SU – 1331;
- сечение сбоя Actel RTSX72SU = $2,842E-13$;
- частота сбоев для Actel RTSX72SU = $2,746E-12$;
- количество микросхем Actel RTSX72SU = 1;
- частота для всех микросхем типа Actel RTSX72SU = $2,746E-12$.

Расчёт от воздействующих ВЭП СКЛ и ВЭП ЕРПЗ аналогичен проведенному расчёту для ВЭП ГКЛ.

После того, как определены рассчитываемые данные для комплектующих ИПЭ из состава проектируемого блока КА, возможна оценка стойкости блока КА в целом. Таким образом, получены значения для блока в целом:

- частота сбоев за сутки от ТЗЧ ГКЛ для всего блока = $1,496E-10$;
- частота сбоев за сутки от ТЗЧ СКЛ для всего блока = $7,696E-6$;
- частота сбоев за сутки от ВЭП ГКЛ для всего блока = $2,746E-12$;
- общая частота сбоев за сутки от ТЗЧ = $7,696E-6$;
- общая частота сбоев за сутки от ВЭП = $2,746E-12$;
- общая частота сбоев за сутки = $7,696E-6$.

При вызове более подробной информации для заданной конфигурации будет получено:

- частота сбоев от ТЗЧ ГКЛ всего Блока = $1,496E-10$;
- частота для Actel RTSX72SU = $1,496E-10$ (100%);
- в заданной конфигурации блока КА максимальную частоту сбоев имеет Actel RTSX72SU.

В рассматриваемом случае в расчёте принимает участие только Actel RTSX72SU, она и будет иметь максимальную частоту сбоев для данной конфигурации блока.

4.4. Апробация расчётных значений стойкости изделий полупроводниковой электроники от воздействующих заряженных частиц космического пространства

Оценка стойкости к эффектам от единичных сбоев или отказов при воздействии ТЗЧ и ВЭП КП проводилась на примере различных ИПЭ, на основе которых был сформирован список. Рассматриваемый список содержит изделия различных типов, функциональных подгрупп и фирм производителей.

В табличном виде приведены результаты расчетов, полученные с использованием программного комплекса, по ряду отечественных и зарубежных полупроводниковых изделий. В таблице 4.4 приведены результаты оценки характеристик стойкости полупроводниковых изделий к воздействию отдельных ТЗЧ ГКЛ.

Для рассмотренного примера при проведении расчёта задавались следующие параметры: значение потока $F(>Ln)$ или $F(>E_{p0})$ из интегральных спектров средней плотности потока $(\text{см}^2 \cdot \text{сут})^{-1}$ ионизирующих излучений космического пространства, максимальное значение ЛПЭ, максимальное значение энергии протонов и длина собирания заряда. Условия проводимого расчёта (задаваемые характеристики) приводятся для каждой таблицы отдельно. Изделия разделены на группы функциональных аналогов.

Значение потока частиц выбиралось исходя из интегральных спектров ЛПЭ плотности потока ТЗЧ ГКЛ в центре сферической защиты разной толщины для изделий 47КС, 14Ф137, 14Ф138, 14Ф139, 14Ф145, 14К035, «БИОН-М» $(\text{см}^2 \cdot \text{сут})^{-1}$, максимальное значение ЛПЭ по спектру 158 МэВ·см²/мг, рассчитанные величины частоты сбоев приведены в таблице 4.4.

Точность, проводимой оценки стойкости при моделировании, подтверждена сравнением результатов с полётными данными для КМОП статического ОЗУ с тех. процессом 0,25 мкм, полученными с двух спутников в период с 2001-2006 г. [49]. Результат расчёта, полученный разработанным программным комплексом, ближе к натурным полётным данным, чем полученный по зарубежному программному обеспечению (CREME96) [73].

Таблица 4.4

Наименование	Изготовитель	Сечение эффекта (σ)	ЛПЭ пороговое (Лп)	Значение потока F	ν предлагаемое сб/сут	ν типовое сб/сут
Микропроцессоры и микроконтроллеры						
1847BM286		8E-3	12	7,8E-2	9,936E-5	6,24E-4
1867BM2		1E-2	10	1,41E-1	2,245E-4	1,41E-3
1874BE76T		6E-3	20	1,6E-2	1,528E-5	9,6E-5
1878BE1		2E-3	10	1,41E-1	4,490E-5	2,82E-4
1887BE1Y		6E-3	10	1,41E-1	1,347E-4	8,46E-4
1887BE2T		2E-2	10	1,41E-1	4,490E-4	2,82E-3
UT69R000	Aeroflex	4E-2	60	1,8E-6	1,146E-8	7,2E-8
UT1750A	Aeroflex	1E-2	35	3,3E-5	5,254E-8	3,3E-7
ПЛИСы, БМК и ПЛМ						
1580XM3		2E-4	20	1,6E-2	5,095E-7	3,2E-6
1582BM3		2E-3	20	1,6E-2	5,095E-6	3,2E-5
RTSX72SU	Actel	7,2E-3	40	7,7E-6	8,828E-9	5,54E-8
RTAX2000S/S L	Actel	9,0E-3	37	9,5E-6	1,361E-8	8,55E-8
XQR5VFX130	Xilinx	1,95E-3	35	3,3E-5	1,024E-8	6,43E-8
XQR4VFX60	Xilinx	2,27E-3	35	3,3E-5	1,192E-8	7,49E-8
HX2000	Honeywell	2E-3	32	2,7E-4	8,598E-8	5,4E-7
HX5000	Honeywell	1E-2	32	2,7E-4	4,299E-7	2,7E-6
UT6325	Honeywell	1,28E-2	42	7,55E-6	1,539E-8	9,66E-8
Цифровые процессоры обработки сигналов						
SMJ320C6701	TI	4,5E-3	31	4,3E-4	3,081E-7	1,93E-6
RTAX4000D	Actel	1,8E-2	37	9,5E-6	2,723E-8	1,71E-7
Запоминающие устройства						
537PY24		1,6E-2	15	3,9E-2	9,936E-5	6,24E-4
565PY5		1E-2	20	1,6E-2	2,547E-5	1,6E-4
581PY5		8E-3	20	1,6E-2	2,038E-5	1,28E-4
1617PY4		1,6E-3	20	1,6E-2	4,076E-6	2,56E-5
1617PY18		6,5E-3	20	1,6E-2	1,656E-5	1,04E-4
1821PY55		1,8E-3	40	7,7E-6	2,207E-9	1,38E-8
HXSRO6432	Honeywell	9,6E-2	26	4,1E-3	6,267E-5	3,93E-4
UT8Q1024K8	Aeroflex	3,2E-3	10	1,41E-1	7,184E-5	4,51E-4
Арифметические, логические и др. ИС						
564ИД5		8E-5	50	3,5E-6	4,458E-11	2,8E-10
564ЛЕ5		3E-5	50	3,5E-6	1,672E-11	1,05E-10
564ЛН1		1E-5	50	3,5E-6	5,573E-12	3,5E-11
1554АП3		6E-5	40	7,7E-6	7,356E-11	4,62E-10
1554ИЕ10		7E-5	40	7,7E-6	8,582E-11	5,39E-10
1554ЛА9		2E-5	40	7,7E-6	2,452E-11	1,54E-10
UT54ACS1646 46S	Aeroflex	2,4E-5	74	8,2E-7	3,039E-12	1,97E-11

На основе разработанной системы оптимизации в главе 3.4.5 были получены результаты проверки оптимальности выбора элементной базы по критерию цены, приведенные в таблице 4.5.

Таблица 4.5

Наименование ИПЭ	Частота сбоев от ТЗЧ ГКЛ; сб/сут	Цена	Класс/подкласс	Вердикт
1816BE51	4,777E-4	310	Ц/м	ТЗЧ ГКЛ не удовлетворяет введенному ограничению;
1835BE51	2,929E-5	260	Ц/м	
1858BM1	1,592 E-3	250	Ц/м	ТЗЧ ГКЛ не удовлетворяет введенному ограничению;
1867BM2	2,245E-4	320	Ц/м	ТЗЧ ГКЛ не удовлетворяет введенному ограничению;
1874BE36	2,929E-5	310	Ц/м	
1874BE76T	1,528E-5	310	Ц/м	
1878BE1	4,490E-5	400	Ц/м	
1882BE53У	2,929E-5	230	Ц/м	Изделие оптимально по критерию цены
1887BE1У	1,347E-4	500	Ц/м	ТЗЧ ГКЛ не удовлетворяет введенному ограничению;
1887BE2T	4,490E-4	500	Ц/м	ТЗЧ ГКЛ не удовлетворяет введенному ограничению;
1556ХЛ8	7,452E-4	410	Ц/ПП	ТЗЧ ГКЛ не удовлетворяет введенному ограничению; ИПЭ иного типа.
1580ХМ3	5,095E-7	450	Ц/ПП	ИПЭ иного типа.
1582ВМ3	5,095E-6	450	Ц/ПП	ИПЭ иного типа.
SMJ320C6701	3,081E-7	3400	Ц/цпос	ИПЭ иного типа.
RTSX72SU	8,828E-9	5000	Ц/ПП	ИПЭ иного типа.
НХ2000	8,598E-8	8000	Ц/ ПП	ИПЭ иного типа.
UT8Q1024K8	7,184E-5	4200	Ц/зу	ТЗЧ ГКЛ не удовлетворяет введенному ограничению; ИПЭ иного типа.
UT54ACS164646S	3,039E-12	700	Ц/ал	ИПЭ иного типа.
UT1750A	5,254E-8	680	Ц/м	Лучший образец по частоте сбоев от ТЗЧ ГКЛ

Приведённые в таблице расчёты стойкости от воздействующих ТЗЧ ГКЛ, участвующие в роли критериев выбора элементной базы, даны по результатам проведения одного из расчётов, в роли заданного ограничения по частоте сбоев от ТЗЧ ГКЛ взято значение $5E-5$ сб/сутки.

По итогам проведенной оптимизации получено, что изделие 1882BE53У удовлетворяет заданным ограничениям по стойкости и является наиболее подходящим с точки зрения цены. Также было установлено, что наиболее стойким к ЗЧ рассматриваемого вида излучения

(ТЗЧ ГКЛ), и как следствие лучшим изделием без учёта ценового фактора из данной выборки является UT1750A.

В поле «Вердикт» заносится итоговая информация по проведённой оптимизации, отсутствие информации в данном поле означает, что в изделие удовлетворяет критериям отбора, но с точки зрения цены оно не оптимально.

В ходе проведённой оперативной оценки характеристик стойкости полупроводниковых изделий, комплектующих бортовую аппаратуру к воздействию отдельных ЗЧ КП, с использованием программного комплекса выявлено, что разработанная математическая модель позволяет точнее определять характеристики стойкости комплектующих и предоставляет разработчику возможность определить правильность выбора элементной базы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведённой работы по разработке специального математического и программного обеспечения универсальной программной системы с использованием интегрированной базы данных для оперативной оценки характеристик сложных объектов, были получены следующие результаты.

1) Разработана структурная модель универсальной программной системы исследования сложных объектов, отличающаяся наличием в составе инвариантной части, позволяющей проводить интеграцию внешних проектов и специализированной части, учитывающей специфику предметной области.

2) Предложена модель межмодульной интеграции на основе универсальной справочной системы с использованием оригинального алгоритма конвертации различных видов данных.

3) Сформирована интегрированная база данных, отличающаяся возможностью хранения различных, в том числе графических, типов данных с возможностью гибкого, многовариантного поиска по информационным полям и загрузки элементов из внешних библиотек.

4) Создано специальное программное обеспечение в виде интерактивных средств человеко-машинного интерфейса, позволяющее проводить оценку стойкости полупроводниковых изделий, комплектующих бортовую аппаратуру к локальным радиационным эффектам при воздействии отдельных заряженных частиц космического пространства.

5) Разработано специальное программное обеспечение оперативной оценки стойкости полупроводниковых изделий к локальным радиационным эффектам, апробированное на ряде предприятий в интересах оценки радиационной стойкости радиоэлектронной аппаратуры специального назначения.

Список сокращений

БА – бортовая аппаратура
БА КА – бортовая аппаратура космических аппаратов
БД – база данных
ВЭП – высокоэнергетичные протоны
ГКЛ – галактические космические лучи
ЕРПЗ – излучения естественных радиационных поясов
ЗЧ – заряженные частицы
ЗЧ КП – заряженные частицы космического пространства
ИИ – ионизирующее излучение
ИИ КП – ионизирующее излучение космического пространства
ИПЭ – изделия полупроводниковой электроники
ИМС – интегральная микросхема
ИС – интегральная схема
КА – космический аппарат
КП – космическое пространство
ЛПЭ – линейные потери энергии
ОЗУ – оперативное запоминающее устройство
ОС – одиночный сбой
ОЯЧ – отдельных ядерных частиц
ПО – программное обеспечение
СКИ – солнечное космическое излучение
СКЛ – солнечные космические лучи
ТЗ – техническое задание
ТЗЧ – тяжёлые заряженные частицы
ТУ – технические условия
ЭРЭ – электро-радио элемент
ЭМ – электронный макет

Библиографический список

1. Агаханян Т.М. Радиационные эффекты в интегральных микросхемах / Т.М. Агаханян, Е.Р. Аствацатурьян, П.К.Скоробогатов. -М.: Энергоатомиздат, 1989. 256 с.
2. Агаханян Т.М. Моделирование радиационных эффектов в интегральных микросхемах / Т.М. Агаханян, А.Ю. Никифоров. Микроэлектроника - М.: Наука/Интерпериодика, 2004. т.33 № 2. С. 85-90.
3. Алавердов В.В. Проблемы методологии проектирования космических аппаратов с длительным сроком активного существования / В.В. Алавердов, Ю.Е. Левицкий, и др. // Радиационная стойкость электронных систем. 1999. Вып. 2. С. 7–8.
4. Архангельский А.Я. Программирование в С++ Builder 6 / А.Я. Архангельский. 2-е изд. –М.: ООО «Бином-Пресс», 2005. 1168 с.
5. Архангельский А.Я. Программирование в Delphi 6 / А.Я. Архангельский. –М.: ООО «Бином-Пресс», 2004. 1120 с.
6. Аствацатурян Е.Р. Переходные ионизационные эффекты в цифровых интегральных микросхемах / Е.Р. Аствацатурян, А.И. Чумаков, и др. – Зарубежная электронная техника, 1983. Вып. 9 (267). С. 36-72.
7. Барабанов В.Ф. Интерактивные средства моделирования сложных технологических процессов / В.Ф. Барабанов, С.Л. Подвальный. - Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2000. 124 с.
8. Барабанов В.Ф. Интерактивная система оценки знаний / В.Ф. Барабанов, Л.И. Лыткина: Учеб. пособие. - Воронеж: Воронеж. гос. технол. акад., 2000. 100 с.
9. Барабанов В.Ф. Интерактивные средства моделирования динамических систем / В.Ф. Барабанов // Технология компьютерного обучения. - Воронеж: Изд-во ВГУ, 1988. С. 123-127.
10. Барабанов В.Ф. Автоформализуемая система профессиональных знаний / В.Ф. Барабанов, А.М. Нужный // Системы управления и информационные технологии: Сб. науч. тр. –Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2000. С. 63.
11. Барабанов В.Ф. Интерактивные средства моделирования сложных технологических процессов / В.Ф. Барабанов, А.М. Нужный, С.Л. Подвальный // Системы управления и информационные технологии: Сб. науч. тр. –Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2000. С. 4.
12. Барабанов В.Ф. Разработка универсальной справочной системы электронных компонентов. / В.Ф. Барабанов, Д.М. Брагин // Новые технологии в научных исследованиях, проектировании, управлении, производстве: Труды Всероссийской конференции. ВГТУ, 2004. С. 27-29.
13. Брагин Д.М. Разработка специального математического и программного обеспечения эволюционного размещения электрорадио

элементов с учётом тепловых полей. - Автореф. дис. канд. технических наук. – Воронеж, 2007. С. 17.

14. Барашенков В.С. Взаимодействие высокоэнергетических частиц и атомных ядер с ядрами / В.С. Барашенков, В.Д. Тонеев. - М: Атомиздат, 1972. 648 с.

15. Брагин Д.М. Интегрированный программный комплекс моделирования и проектирования электронных средств с учётом тепловых полей / Д.М. Брагин, В.Ф. Барабанов, А.М. Нужный // Системы управления и информационные технологии: научно-технический журнал. №3(29), 2007. С. 63-66.

16. Вологдин Э.Н. Радиационные эффекты в интегральных микросхемах и методы испытаний изделий полупроводниковой электроники на радиационную стойкость: учебное пособие / Э.Н. Вологдин, А.П. Лысенко. – Москва, 2002. 46 с.

17. Гольдин, В.В. Информационная поддержка жизненного цикла электронных средств / В.В. Гольдин, В.Г. Журавский, и др. - М: Радио и связь, 2002. 386 с.

18. Горчаков Е. Методические указания часть 2. Методические указания по оценке и обеспечению сбоеустойчивости и отказоустойчивости бортовой аппаратуры / Е. Горчаков, В. Герасимов, А. Чумаков, 2009. 74 с.

19. Дейт К. Введение в системы баз данных / К. Дейт. - 8-е изд. -М.: Вильямс, 2005. 1328 с.

20. Кнут Д. Искусство программирования. Основные алгоритмы: пер. с англ. / Д. Кнут. -3-е изд. -М.: Вильямс, 2006. -Т. 1: 720 с.

21. Коваленок В.И. Комплексное моделирование физических процессов высоконадежных РЭС / В.И. Коваленок, А.В. Сарафанов, С.В. Работин //Современные проблемы радиоэлектроники: Сб. науч. тр. / Под ред А.В. Сарафанова. - Красноярск: КГТУ, 2000. С. 276-283.

22. Когаловский М.Р. Энциклопедия технологий баз данных. / М.Р. Когаловский. -М.: Финансы и статистика, 2002. 800 с.

23. Кофанов Ю.Н. Автоматизация проектирования РЭС. Топологическое проектирование печатных плат: Учеб. пособие. 2-е изд., перераб. и доп. / Ю.Н. Кофанов, А.В. Сарафанов, С.И. Трегубое. - М.: Радио и связь, 2001. 220 с.

24. Криницкий А. Воздействие отдельных ядерных частиц на интегральные схемы / А. Криницкий //Современная электроника, 2008. №4. С. 60-63.

25. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Краткий курс теоретической физики. Книга 1. / Л.Д.Ландау, Е.М. Лифшиц. -М.: Наука, 1969. 271 с.

26. Лидский Э.А. Задачи синтеза при системном анализе РЭА / Э.А. Лидский. - Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 1995. 67 с.

27. Лихачев А. Система ТехноПро – новый уровень автоматизации проектирования технологии / А. Лихачев // САПР и Графика. 1997. Вып. № 9. С. 12-27.
28. Лобанов О.В. Перемежающиеся отказы вызванные ядерными реакциями в устройствах электронной техники при облучении первичными ускоренными частицами / О.В. Лобанов, М.В. Мирошкин, М.В. Стабников. СРЭ Вып. 2. 1988. 32. с.
29. Малинский В.Д. Испытания аппаратуры и средств измерений на воздействие внешних факторов: Справочник / В.Д. Малинский, В.Х. Бегларьян, Л.Г. Дубицкий; Под ред. В.Д. Малинского. - М: Машиностроение, 1993. 573 с.
30. Мырова Л.О. Обеспечение радиационной стойкости аппаратуры связи / Л.О. Мырова, А.З. Чепиженко. -М.: Радио и связь, 1983. 216 с.
31. Немнюгин С.А. Практикум Turbo Pascal / С.А. Немнюгин. -2-е изд. -СПб.: Питер, 2007. 268 с.
32. Пашковский М.Е. Модель энерговыделения от высокоэнергетичных протонов космического пространства / М.Е. Пашковский, В.Ф. Барабанов // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2010. Т. 6. №9. С. 45-48.
33. Пашковский М.Е. Разработка интегрированного программного комплекса моделирования локальных радиационных эффектов от заряженных частиц космического пространства / М.Е. Пашковский, В.В. Мамута, В.Ф.Барабанов // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. Т. 7. №1. С. 15-19.
34. Пашковский М.Е. Разработка программной и математической модели определения характеристик устойчивости аппаратуры к единичным эффектам при воздействии отдельных заряженных частиц космического пространства / М.Е. Пашковский, В.Ф. Барабанов // Системы управления и информационные технологии: научно-технический журнал. 2010. Вып. 4.1(42). С. 186-190.
35. Пашковский М.Е. Концепция интегрированного программного комплекса моделирования локальных радиационных эффектов от заряженных частиц космического пространства / М.Е. Пашковский, В.Ф. Барабанов // Современные проблемы информатизации в анализе и синтезе технологических и программно-телекоммуникационных систем: сб. тр. XVI Междунар. открытой науч. конф., Воронеж: Научная книга, 2011. Вып. 16. С. 430-432.
36. Рыбаков А.В. Интеллектуальная компьютерная среда / А.В. Рыбаков // Автоматизация проектирования. 1997. -№ 3. С. 40-45.
37. Рыбаков А.В. Создание систем автоматизации поддержки инженерных решений / А.В. Рыбаков, С.А. Евдокимов, А.А. Краснов // Автоматизация проектирования. 1997. -№ 5. С. 12-22.

38. Телец В. ПЛИС для космических применений. Архитектурные и схемотехнические особенности / В. Телец, С. Цыбин, и др. Электроника: наука, технология бизнес, 2005. Вып. № 6. С. 44-48.
39. Устюжанинов В.Н. Радиационные эффекты в биполярных интегральных схемах / В.Н. Устюжанинов, А.З. Чепиженко. -М.: Радио и связь, 1989. 142 с
40. Фаронов В.В. Delphi 2005. Разработка приложений для баз данных и Интернета / В.В. Фаронов. –П.: ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ДОМ, 2006. 603 с.
41. Фленов М. Е. Библия Delphi. 2-е изд. / М. Фленов. –П.: БХВ-Петербург, 2006. 802 с.
42. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс/ С. Хайкин. 2-е издание. пер. с английского. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. 1104 с.
43. Хенли Э. Радиационная химия: пер. с английского. / Э. Хенли, Э. Джонсон. – Н.: Атомиздат, 1974. 416 с.
44. Чумаков А.И. Действие космической радиации на ИС / А.И. Чумаков. – М. Радио и Связь, 2004.
45. Чумаков А.И. Методы защиты микросхем от единичных сбоев. – В кн.: Сб. научных трудов Электроника и автоматизация в научных исследованиях; под ред. В.М. Рыбина. – М. Энергоатомиздат, 1988, С.114-115.
46. Шалаев А.М. Свойства облученных металлов и сплавов / А.М. Шалаев. -Киев: Наукова думка, 1985. 308 с.
47. Юдинцев В. Радиационно стойкие интегральные схемы надёжность в космосе и на земле / В. Юдинцев. Электроника: наука, технология бизнес Вып. № 5 2007. С.72-77.
48. Canaris J., Whitaker S.– Circuit techniques for the radiation environment of space.– IEEE 1995 Custom Integrated Circuits Conference, 1995.
49. Hansen D.L. et all. “Correlation of Prediction to On-Orbit SEU Performance for a Commercial 0.25- μ m CMOS SRAM” IEEE Trans. on Nuclear Science, vol. 54, no. 6, p.2525, Dec. 2007.
50. Romanko Th., Clegg B. SOI eases radiation-hardened ASIC design. – www.eetimes.com/showArticle.jhtml?articleID=165700727. 2005.
51. Wang J.J., Katz R., Sun J., Cronquist B., McCollum J., Speers T. and Plants W.. SRAM Based Re-programmable FPGA for Space Applications.– IEEE Transactions on Nuclear Science, 1999. NS-46.
52. S. Whitaker, J. Canaris, K. Liu.– SEU Hardened Memory Cells for CCSDS REED Solomon Encoder. – IEEE Transactions on Nuclear Science, 1991. NS-38:6, pp. 1471–1477.
53. D. Wiseman, J. Canaris, S. Whitaker, J. Vembrux, K. Cameron, K. Arave, L. Arave, N. Liu, K. Liu.– Design and Testing of SEU/SEL Immune

Memory and Logic Circuits in a Commercial CMOS Process.– NSREC Conference, 1993.

54. <http://www.actel.com/documents/RadResultsIROCreport.pdf>, 2004.

55. http://en.wikipedia.org/wiki/Radiation_hardening Radiation hardening.

56. http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc4170.pdf

57. Средства и технологии проектирования и производства электронных устройств. - М.: Изд-во ОАО "Родник Софт", 2000. - № 1. 32 с.

58. Порядок использования испытательных средств Роскосмоса для контроля стойкости электронной компонентной базы к ионизирующему излучению космического пространства. ОАО НИИ КП «Роскосмос», 2010. 40 с

59. РМ ПО.200.000. Электрорадиоэлементы и узлы радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов. 1971.

60. ТЗ. 0071.160. На ОКР «Комплект унифицированных приборов автоматического регулирования и контроля для системы электроснабжения Российского сегмента МКС. 1997.