

Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)
(МГТУ им. Н. Э. Баумана)

На правах рукописи



Терехов Владимир Владимирович

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ФРАКТАЛЬНЫХ
МИКРОСИСТЕМ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ТИПА, УСТОЙЧИВЫХ К
ВОЗДЕЙСТВИЮ ТЯЖЁЛЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Специальность 2.3.7. Компьютерное моделирование и автоматизация
проектирования

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
д. т. н., профессор
Зинченко Людмила Анатольевна

Москва, 2023

Список сокращений и условных обозначений

САПР	– Система автоматизированного проектирования
СБИС	– Сверхбольшая интегральная микросхема
ИС	– Интегральная схема
МКЭ	– Метод конечных элементов
МЭМС	– Микроэлектромеханические системы
ПО	– Программное обеспечение
ОС	– Операционная система
ПК	– Персональный компьютер
ТП	– Технологический процесс
КМОП	– Комплементарная логика на транзисторах металл-оксид-полупроводник
ФМЭМС	– Фрактальные микроэлектромеханические системы
BCA	– Binary Collision Approximation (бинарная аппроксимация коллизий)
CPU	– Central Processing Unit (центральное процессорное устройство)
SRIM	– Stopping Range of Ions in Matter (диапазоны остановок ионов в материи)
TCAD	– Technology computer-aided design (технологическая система автоматизированного проектирования)
TRIM	– Transport of Ions in Matter (перемещение ионов в материи)
UML	– Unified Modeling Language (унифицированный язык моделирования)
API	– Application Programming Interface (интерфейс программирования приложений)
SoC	– System-on-Chip (системы на кристалле)
IP	– Intellectual Property (сложно функциональные блоки)

Содержание	Стр.
Введение	7
Глава 1. Маршруты и методы моделирования электростатических	
микроэлектромеханических систем при спецвоздействиях.....	15
1.1 Аналитический обзор методов моделирования	
микроэлектромеханических систем при спецвоздействиях.....	15
1.1.1 Маршруты проектирования электростатических	
микросистем	19
1.1.2 Численные методы.....	22
1.1.3 Метод конечных элементов	24
1.1.3 Методы моделирования полупроводниковых устройств при	
спецвоздействиях	28
1.2 Аналитический обзор программного обеспечения, используемого	
для моделирования микроэлектромеханических систем при	
спецвоздействиях	36
1.2.1 Использование SRIM для моделирования	
микроэлектромеханических систем при спецвоздействиях.....	36
1.2.2 Использование Sentaurus TCAD для моделирования	
микроэлектромеханических систем при спецвоздействиях.....	41
1.2.3 Интегрированный маршрут моделирования изменений	
электрических характеристик электростатических элементов	
фрактальных микроэлектромеханических при попадании	
тяжёлых заряженных частиц	45
1.3 Фрактальные конструкции.....	47
Выводы по главе 1.....	50
Глава 2. Разработка алгоритмов моделирования характеристик	
микросистем при спецвоздействиях с использованием систем	
приборно-технологического моделирования	52

2.1 Параллельный алгоритм компьютерного моделирования воздействия тяжёлых заряженных частиц на электростатические фрактальные микросистемы	53
2.2 Параллельный алгоритм компьютерного моделирования воздействия тяжёлых заряженных частиц на электростатические фрактальные микроэлектромеханические системы с использованием параллельных архитектур	58
2.3 Алгоритм компьютерного моделирования стойкости распределённых электростатических фрактальных микросистем к воздействиям тяжёлых заряженных частиц	62
2.4 Физические модели.....	64
2.5 Алгоритмы расчёта характеристик внедрения ионов	67
2.6 Аппроксимационный подход: полный и упрощённый цифровой двойник.....	71
Выводы по главе 2.....	76
Глава 3. Алгоритмы моделирования электростатических фрактальных микроэлектромеханических систем при учете технологических погрешностей	78
3.1 Технологическое моделирование электростатических микроэлектромеханических систем	78
3.2 Технологический процесс производства микроэлектромеханических систем	80
3.3 Технологические погрешности при производстве микроэлектромеханических систем	85
3.4 Модификация алгоритма компьютерного моделирования воздействия тяжёлых заряженных частиц на электростатические микросистемы с использованием систем приборно-технологического моделирования	86

3.4 Алгоритм оценки изменений механических характеристик электростатических фрактальных микроэлектромеханических систем ...	88
3.5 Алгоритм генерации топологии электростатических фрактальных микроэлектромеханических систем с заданными электрическими характеристиками	92
Выводы по главе 3.....	94
Глава 4. Программное обеспечение и результаты96	
4.1 Обзор разработанного программного обеспечения	96
4.2 Оценка результатов работы программного обеспечения	99
4.2.1 Исследование алгоритмов компьютерного моделирования электрических характеристик микроэлектромеханических систем под воздействием тяжёлых заряженных частиц.....	99
4.2.2 Исследование модифицированного алгоритма компьютерного моделирования воздействия тяжёлых заряженных частиц на электростатические микроэлектромеханические системы с учётом технологических погрешностей	104
4.2.3 Исследование алгоритма с использованием упрощенного цифрового двойника	106
4.2.4 Исследование алгоритма компьютерного моделирования электрических характеристик распределённых микроэлектромеханических систем под воздействием тяжёлых заряженных частиц	114
4.2.5 Исследование алгоритма оценки механических характеристик микроэлектромеханических систем.....	119
4.2.6 Исследование алгоритма формирования топологии фрактальных микроэлектромеханических систем	123
Выводы по главе 4.....	125

Общие выводы и заключение.....	127
Список использованной литературы.....	129

Введение

Актуальность. В связи с широким распространением микроэлектромеханических систем (микросистемы, МЭМС) исследование вопросов надежности МЭМС является одной из актуальных проблем. Надёжность микросистем быстро росла в последние 10 лет, и в то время, как каждый год производятся десятки миллионов МЭМС, количество их отказов составляет менее одного на миллион.

Микросистемы широко применяются как в бытовых устройствах, так и в специализированной аппаратуре, где могут подвергаться целому спектру вредных воздействий, включая механические (удары, вибрации), термальные (перепады температур) и другие. МЭМС также используются в космических аппаратах, где одним из главных показателей надёжности микросистем является радиационная стойкость.

Основные типы радиации, встречающиеся в космическом пространстве вблизи Земли, включают:

- захваченную радиацию (энергетические электроны с энергией в несколько мегаэлектронвольт и протоны с энергией до нескольких сотен мегаэлектронвольт, захваченные магнитным полем Земли — пояса Ван Аллена);
- солнечные энергетические частицы, в основном высокоэнергетические протоны с энергией до 300 МэВ, интенсивность которых значительно варьируется в течение 11-летнего солнечного цикла;
- галактические космические лучи, состоящие, в основном из протонов и альфа-частиц с энергиями от 1 МэВ до 1 ГэВ, но также включающие более тяжёлые ионы;
- вторичная радиация, вызванная влиянием вышеперечисленных типов радиации на материалы космических аппаратов и включающая, в

основном, индуцированное электронами тормозное излучение, вторичные электроны и вторичные нейтроны.

Одной из отличительных особенностей МЭМС в сравнении с классическими интегральными схемами является то, что при изготовлении микросистем, помимо широко используемого кремния, применяются другие материалы, включая как диэлектрики (полимеры), так и проводники (металлы). Кроме того, МЭМС могут быть основаны на различных физических принципах: электростатическом (ёмкостном), электромагнитном, пьезорезистивном и пьезоэлектрическом, электротермальном, оптическом. Ионизирующее и неионизирующее воздействие, вызываемое перечисленными выше типами космической радиации, оказывает различное влияние на микросистемы, основанное на различных физических принципах. Например, ионизирующее излучение способно вызвать серьёзное повреждение кремниевых МЭМС, работающих на любых физических принципах, за исключением электростатического, для которого наибольший вред оказывает неионизирующее излучение. Перечисленные факторы делают невозможным создание универсального маршрута моделирования МЭМС различных типов. Данная работа посвящена моделированию и разработке подходов к автоматизированному проектированию микросистем электростатического (ёмкостного типа). Примерами МЭМС такого типа являются акселерометры и гироскопы, широко применяемые в механизмах мониторинга и управления космическими аппаратами.

Приборно-технологическое моделирование является самым важным методом исследования, поскольку, в конечном итоге, приводит к снижению затрат на разработку путём уменьшения финансово-материальных затрат на проведение натурных испытаний, а также позволяет увеличить долю выхода пригодных микросистем при серийном производстве. Данный метод основывается на решении фундаментальных физических уравнений, которые описывают протекающие в металлах, окислах и полупроводниках процессы. Программным обеспечением, реализующим метод приборно-технологического

моделирования, являются системы автоматизированного проектирования технологического процесса (САПР ТП или TCAD).

Перспективной разновидностью электростатических МЭМС являются фрактальные микросистемы (ФМЭМС) электростатического типа, поскольку последние обладают повышенной стойкостью к радиационным воздействиям [1]. В данной работе рассматриваются ФМЭМС, основанные на фракталах «Канторово множество» (параллельная фрактальная топология) и «Снежинка Коха» с усечёнными углами. Однако существующие САПР в своём базовом варианте не могут быть использованы для построения полного интегрального маршрута моделирования влияния тяжёлых заряженных частиц на ЭФМЭМС, требуя использования нескольких САПР, различных операционных систем, вспомогательных программ и/или проведения дополнительных расчётов.

Поэтому существующие подходы к повышению радиационной стойкости полупроводниковых интегральных схем можно применить в проектировании ЭФМЭМС лишь частично.

Состояние проблемы. Основной проблемой является разработка интегрированного маршрута моделирования стойкости микросистем к воздействиям тяжёлых заряженных частиц.

Вопросы радиационной стойкости МЭМС представлены в работах Г. Р. Ши (Herbert R. Shea), С. С. МакКриди (S. S. McCready), Шахнова В. А., Жукова А. А., Зинченко Л. А. и др. Вопросы компьютерного моделирования МЭМС представлены в работах Шахнова В. А., Зинченко Л. А., Косолапова И. А., Глушко А. А. и др.

Цель работы. Разработка и исследование алгоритмов компьютерного моделирования характеристик полупроводниковых электростатических микросистем при спецвоздействиях.

Решаемые задачи. Для достижения поставленных целей были решены следующие задачи:

1. Анализ существующих подходов и алгоритмов компьютерного моделирования воздействий тяжёлых заряженных частиц на фрактальные МЭМС электростатического типа.
2. Разработка и исследование алгоритмов и методик компьютерного моделирования стойкости одиночных и распределённых ФМЭМС к воздействию тяжёлых заряженных частиц (ТЗЧ).
3. Разработка и исследование алгоритма компьютерного моделирования механических характеристик фрактальных МЭМС электростатического типа.
4. Разработка и исследование алгоритма выбора топологии электростатических ФМЭМС по заданным электрическим характеристикам.
5. Исследование способов снижения вычислительных затрат при компьютерном моделировании стойкости фрактальных микросистем электростатического типа к воздействию тяжёлых заряженных частиц.

Методы исследования. Для решения данных задач в работе использованы: теория алгоритмов, теория параллельных вычислений, методы численного моделирования и анализа, а также когнитивная информатика.

Научная новизна работы. Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Разработан модифицированный маршрут моделирования стойкости ёмкостных элементов ФМЭМС электростатического типа к воздействиям одиночных попаданий тяжёлых заряженных частиц (ТЗЧ).
2. Разработаны и исследованы алгоритмы компьютерного моделирования стойкости ёмкостных элементов фрактальных МЭМС к воздействиям ТЗЧ, в том числе с учётом технологических погрешностей при производстве.
3. Разработан алгоритм моделирования механических характеристик фрактальных МЭМС электростатического типа.
4. Разработан алгоритм генерации топологии электростатических фрактальных МЭМС по заданным электрическим характеристикам.

5. Предложены способы снижения вычислительных затрат при моделировании стойкости ёмкостных элементов ФМЭМС электростатического типа к воздействиям ТЗЧ с использованием упрощённых моделей и с учетом технологических погрешностей при последующем производстве.

Достоверность полученных научных результатов, выводов и рекомендаций диссертационной работы подтверждается корректным использованием методов математического моделирования и численного анализа, практической реализацией разработанных алгоритмов в программном обеспечении, положительными результатами применения разработанных алгоритмов, а также анализом результатов проведения исследований разработанных алгоритмов и при решении практически важных задач.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Маршрут компьютерного моделирования стойкости одиночных ёмкостных элементов фрактальных МЭМС электростатического типа к воздействию тяжёлых заряженных частиц, в том числе с учётом технологических погрешностей при производстве.
2. Алгоритмы компьютерного моделирования стойкости одиночных и распределённых электростатических ФМЭМС к воздействию тяжёлых заряженных частиц, в том числе с учётом технологических погрешностей при производстве.
3. Алгоритм формирования топологии электростатических фрактальных МЭМС по заданным электрическим характеристикам.
4. Алгоритм компьютерного моделирования механических характеристик ФМЭМС электростатического типа.
5. Способ снижения вычислительных затрат при моделировании стойкости ёмкостных элементов ФМЭМС электростатического типа к воздействиям ТЗЧ с использованием упрощённых моделей.

Практическая значимость и результаты внедрения. Разработка маршрута и алгоритмов компьютерного моделирования одиночных ёмкостных

элементов МЭМС, а также распределённых МЭМС. На основании разработанных маршрута и алгоритма разработано программное обеспечение для автоматизации исследования стойкости распределённых микросистем к воздействию тяжёлых заряженных частиц.

Предложенные в диссертации алгоритмы и разработанное программное обеспечение были использованы при выполнении научно-исследовательской работы в рамках грантов РФФИ 16-07-00676 А «Теория проектирования распределенных микросистем, устойчивых к спецвоздействиям, на основе самоподобных множеств» и 18-29-18043 мк «Разработка и исследование методов когнитивной визуализации инженерных решений обеспечения работоспособности компонентов в условиях спецвоздействий». Предложенные в диссертации математические модели, алгоритмы и проектные процедуры внедрены в работу акционерного общества «Научно-исследовательский институт электронной техники» (АО «НИИЭТ») г. Воронежа. Результаты работы были внедрены в учебный процесс кафедры «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры» МГТУ им. Н. Э. Баумана, а также в учебный процесс научно-образовательного центра «Проектирование и испытание изделий микроэлектроники» и центра коллективного проектирования «Электронная компонентная база, микросистемы и наносистемы» ВГЛТУ им. Г. Ф. Морозова.

Апробация работы. Основные теоретические и практические результаты работы представлены на:

- международной конференции ICMNE-2016 (Звенигород, 2016);
- девятой всероссийской конференции «Будущее машиностроения России» (Москва, 2016);
- международной конференции «Информационные системы и технологии (ИСТ-2016)» (Нижний Новгород, 2016);
- международном научно-техническом конгрессе «IS&IT'17» (Геленджик, 2017);

- XV научно-технической конференции «Радиолокация и связь — перспективные технологии» (Москва, 2017);
- международной конференции ICMNE-2018 (Звенигород, 2018);
- V международной научно-технической конференции «Энергосбережение и эффективность в технических системах» (Тамбов, 2018);
- V международной научно-практической конференции «Информатизация инженерного образования» (Инфорино-2020) (Москва, 2020);
- XI ежегодной конференции нанотехнологического общества России (Москва, 2020);
- XII ежегодной конференции нанотехнологического общества России (Москва, 2021);
- XIX молодежной научно-технической конференции «Радиолокация и связь — перспективные технологии» (Москва, 2021);
- 5-й международной молодёжной конференции «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика (REEPE 2023)» (Москва, 2023).

Публикации. Основные результаты работы опубликованы в 17 научных работах, в том числе:

- 2 публикации в журналах, входящих в перечень ВАК РФ;
- 3 публикации в изданиях, индексируемых в международных базах цитирования «Scopus» и «Web of Science»;
- получен патент РФ на конструкцию микросистемы с повышенной радиационной стойкостью к воздействию одиночных заряженных частиц.

Структура и объем работы. Диссертация содержит введение, четыре главы с выводами, общее заключение, библиографический список. Общий объем работы составляет 140 страниц. Диссертационная работа содержит 65 рисунков 9 таблиц, список использованных источников из 102 наименований.

В первой главе представлен аналитический обзор существующих методов компьютерного моделирования, которые могут быть использованы для анализа радиационной стойкости МЭМС. Приведены алгоритмы, которые применяются

для решения задач компьютерного моделирования радиационной стойкости микросистем.

Во второй главе приведены разработанные алгоритмы компьютерного моделирования устойчивости одиночных фрактальных МЭМС электростатического типа к попаданию тяжёлых заряженных частиц на примере отдельных элементов ёмкостного типа. Предложено с помощью программного обеспечения SRIM определять следующие характеристики внедрения тяжёлых заряженных частиц в материалы микросистем: энергетические потери на ионизацию (электронное торможение), энергетические потери на взаимодействие с ядрами атомов кристаллической решётки (ядерное торможение), глубина внедрения, продольный разброс и поперечный разброс.

В третьей главе рассматриваются алгоритмы моделирования фрактальных МЭМС электростатического типа при учёте технологических погрешностей. Погрешность при осаждении и травлении зависит от многих факторов, в первую очередь от метода травления, который определяет рабочее давление и показатели селективности и анизотропности. Технологические погрешности при производстве ФМЭМС могут привести к различным нежелательным эффектам, ведущим к невозможности использования микросистем, в том числе к повышенному влиянию тяжёлых заряженных частиц на рабочие характеристики ФМЭМС.

В четвертой главе рассматривается программное обеспечение, реализующее алгоритмы, предложенные во второй и третьей главах, в том числе программное обеспечение, реализующее алгоритм компьютерного моделирования воздействия тяжёлых заряженных частиц на электростатические микросистемы, а также модифицированный алгоритм компьютерного моделирования воздействия тяжёлых заряженных частиц на электростатические микросистемы с учётом технологических погрешностей.

В заключении представлены основные результаты работы.

Глава 1. Маршруты и методы моделирования электростатических микроэлектромеханических систем при спецвоздействиях

1.1 Аналитический обзор методов моделирования микроэлектромеханических систем при спецвоздействиях

Микроэлектромеханические системы (МЭМС) находят применение во всех сферах науки и техники. МЭМС активно используются как в бытовых приборах, так и в специализированной аппаратуре, работающей в неблагоприятных условиях.

В том числе, в последние десятилетия микросистемы активно используются в космических аппаратах, в том числе в критических блоках, отвечающих за управление, навигацию и стабилизацию. В космическом пространстве МЭМС подвергаются целому ряду вредных факторов, включая вакуум, вибрацию, удары, а также ионизирующее излучение, состоящее, в том числе, из тяжёлых заряженных частиц — ионов ряда химических элементов с широким диапазоном энергий.

Для оценки работоспособности МЭМС в условиях воздействия механических факторов используется как компьютерное моделирование, так и натурные испытания.

В работе [3] рассмотрены различные подходы к автоматизации проектирования микросистем. Для проектирования и моделирования МЭМС предлагается использование различных САПР, включая ANSYS, MATLAB, MEMSPro и CoventorWare, а также затрагиваются вопросы построения интегрированных маршрутов моделирования МЭМС и СБИС. Однако в работе не рассматриваются вопросы моделирования радиационной стойкости МЭМС, а также вопросы интеграции САПР МЭМС с программным обеспечением для расчётов характеристик внедрения тяжёлых заряженных частиц в различные материалы.

Отличительной особенностью микроэлектромеханических систем от большинства других приборов является то, что МЭМС могут выполняться из широкого спектра материалов (включая полупроводники, металлы и диэлектрики), а также основываться на различных физических принципах [4]. Всё это не позволяет разработать универсальный инструмент для оценки моделирования МЭМС. Каждый случай должен быть детально проанализирован и должны быть подобраны соответствующие инструменты.

В работе [5] рассматриваются вопросы формирования объёмных структур СБИС и МЭМС для космических применений. Для моделирования параметров легирования и некоторых других параметров транзисторов была использована САПР Sentaurus TCAD фирмы Synopsys, однако вопросы моделирования радиационной стойкости микроструктуры в работе рассмотрены не были.

В работе [6] был предложен маршрут автоматизации проектирования МОЭМС (микрооптоэлектромеханических систем). Автором были разработаны математические модели механической, оптической и электронной подсистем интерферометра Фабри-Перо и проведено их моделирование, в том числе для распределённых МОЭМС (также эти вопросы рассмотрены в [7]) и с учётом технологических погрешностей при производстве. Однако вопросы радиационной стойкости МОЭМС и её моделирования в работе также не рассматривались.

Однако в случае с воздействием ТЗЧ, натурные испытания не только являются слишком дорогими, но и недостаточно безопасными, а потому могут быть недоступны для многих исследователей и разработчиков. Именно поэтому компьютерное моделирование может стать основным способом оценки радиационной стойкости микросистем.

Обзор радиационной стойкости МЭМС различных типов на основе натурных испытаний приведён в [8–15]. Согласно исследованиям, электростатические МЭМС, в целом, наиболее подвержены влиянию тяжёлых заряженных частиц; основными причинами отказа являются изменения механических свойств микросистемы (отказ работы гребенчатого привода,

защёлкивание параллельных пластин), а также изменение калибровки ёмкостных сенсоров. Однако отмечается, что чувствительность электростатических МЭМС к радиации в значительной степени зависит от конструкции конкретного устройства.

Существуют различные способы защиты МЭМС от радиации, включая резервирование и программную обработку, экранирование с использованием различных материалов, поиск новых материалов для производства микросистем и увеличение топологической нормы (см. Рисунок 1.1). В данной работе исследуются особенности нового способа защиты МЭМС от радиации — использование конструкций с фрактальной формой [1], в частности, основанных на фракталах Канторово множество и снежинка Коха.

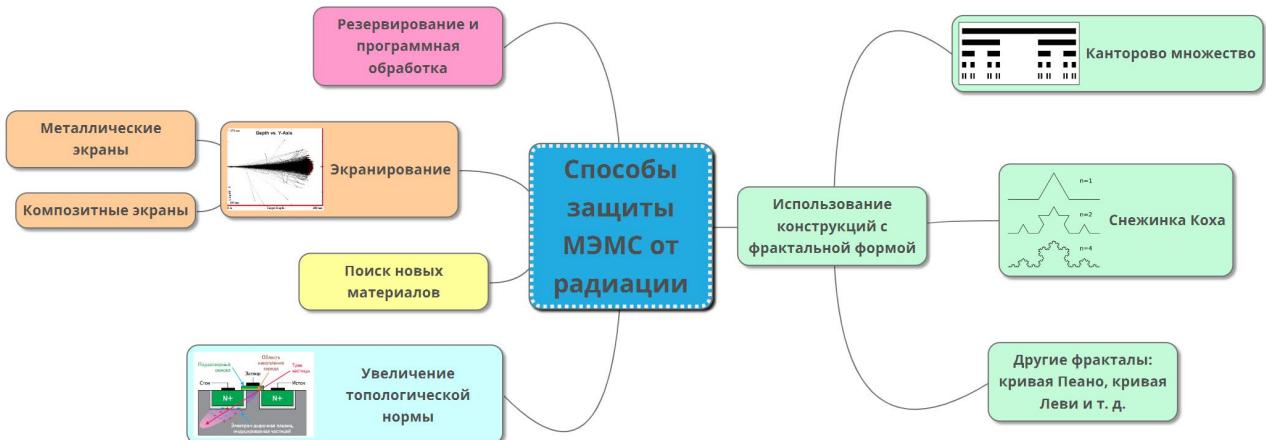


Рисунок 1.1.

Существующие и перспективные способы защиты МЭМС от радиации

В [1] было предложено использовать гребенчатые приводы и пластины с фрактальной формой обкладок микроконденсаторов для снижения вероятности выхода электростатических МЭМС из строя под воздействием тяжёлых заряженных частиц. Был получен патент РФ на конструкцию микросистемы с повышенной радиационной стойкостью к воздействию одиночных заряженных частиц, механическая и электрическая часть которой имеет трёхмерную фрактальную форму Канторова множества (см. Рисунок 1.2).

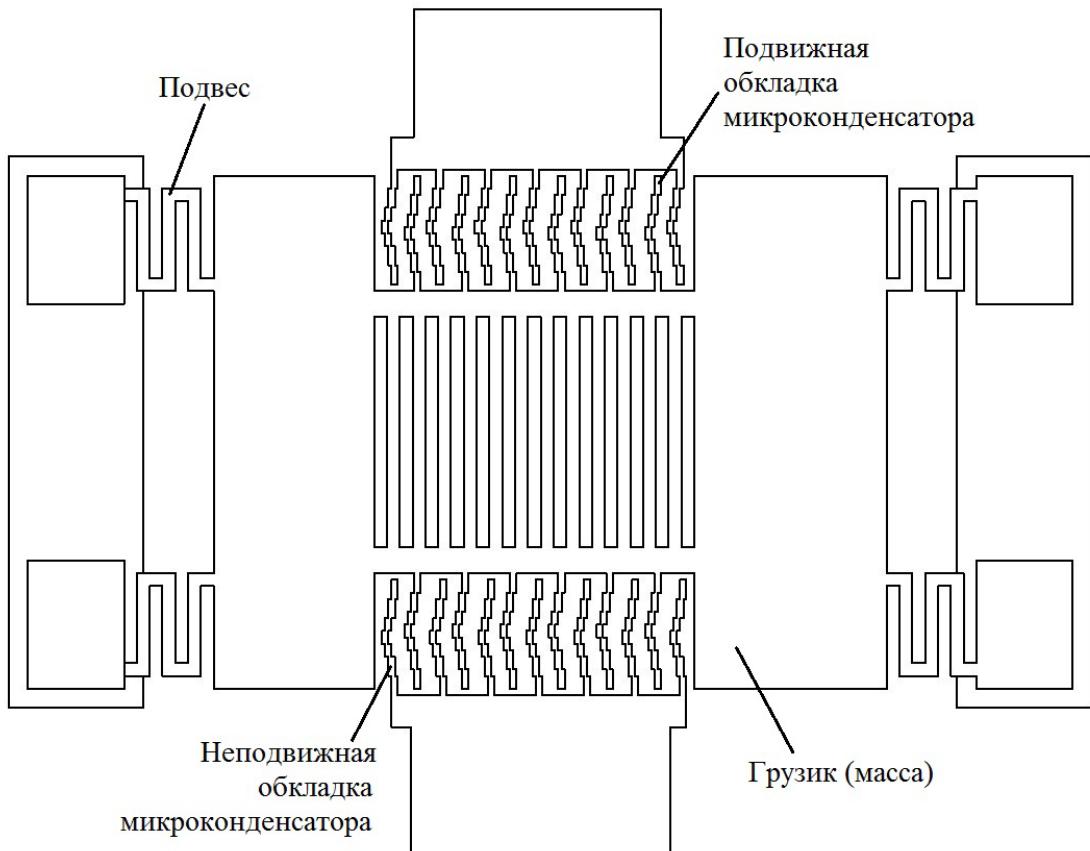


Рисунок 1.2.

Модель МЭМС-акселерометра, обкладки микроконденсаторов которого имеют трёхмерную фрактальную форму Канторова множества

Патент относится к деталям и конструктивным элементам полупроводниковых приборов, интегральных схем с защитой от радиационного излучения. Задачей изделия является снижение статистической вероятности радиационных повреждений МЭМС, которые могут привести к выходу устройства из строя. Выполнение данной задачи достигается двумя способами. Первый — уменьшение вероятности прохождения тяжёлой заряженной частицы по наиболее длинной из всех возможных траекторий сквозь микроконденсатор. Второй — уменьшение площади контакта между тяжёлой заряженной частицей и поверхностью микроконденсатора. Полученные по результатам моделирования численные результаты показали, что расширение диапазона работы микроконденсатора с трёхмерной фрактальной формой Канторова множества составляет до 1301,5% по сравнению с микроконденсаторами классической плоской формы.

Для исследования характеристик нового класса устройств необходимо разработать программное обеспечение, которое позволит уменьшить временные затраты на компьютерное моделирование электрических и механических характеристик, а также радиационной стойкости.

На Рисунке 1.3 показаны ёмкостные элементы МЭМС с различными топологиями, рассматриваемые в данной работе.

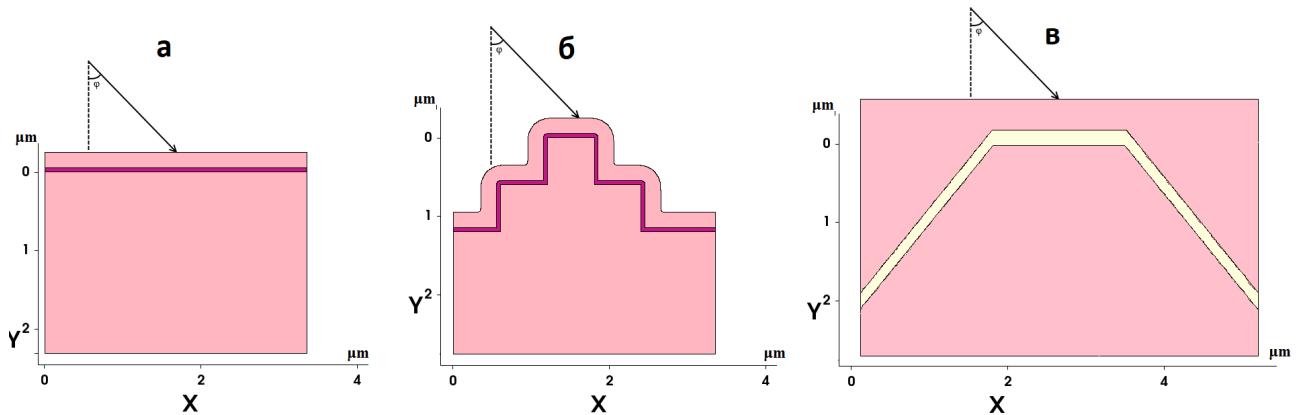


Рисунок 1.3.

Ёмкостные элементы МЭМС с плоской топологией (а), параллельной фрактальной топологией (б), фрактальной топологией «Снежинка Коха» (в)

1.1.1 Маршруты проектирования электростатических микросистем

Маршруты проектирования в различных САПР подразделяются на два типа: маршруты «снизу вверх» (восходящее проектирование) и маршруты «сверху вниз» (нисходящее проектирование) [3]. При проектировании «сверху вниз» (см. Рисунок 1.4) сначала прорабатывается общая концепция модели, затем — её отдельные части. При этом, как правило, задействуются встроенные в САПР механизмы связей между частями модели и параметризации, позволяющие динамически изменять параметры различных частей модели с автоматической перестройкой всей модели, что делает нисходящее моделирование более автоматизированным и избавляет от множества ручных проверок и операций. Проектирование «сверху вниз» позволяет работать с

относительно малым числом данных, адаптивно перестраивать расчётную сетку и быстро вносить изменения в геометрию модели [16].

Ключевое преимущество концепции проектирования «сверху вниз» заключается в том, что связи между параметрами верхнего уровня и детализировкой присутствуют не только в воображении конструктора, а создаются физически внутри макета. Геометрия создается увязанной между собой уже на стадии разработки, что устраняет необходимость дополнительного согласования и проверок, и радикально снижает вероятность появления ошибок собираемости. Параметризация макета дает возможность оперативного внесения изменений и быстрой оценки альтернативных вариантов решений по сценарию «что, если». В результате чего существенно сокращаются сроки внесения изменений и вероятность забыть отразить изменения во всех взаимосвязанных частях изделия.



Рисунок 1.4.

Нисходящий маршрут проектирования МЭМС

В случае проектирования «снизу вверх» (см. Рисунок 1.5) разработчик имеет полный контроль над исследуемой моделью, но должен вручную задавать его полную спецификацию на самом низшем уровне, а также задавать узлы, линии, поверхности и объёмы. В случае, если проектируемая система состоит из нескольких компонентов, каждый компонент создаётся независимо друг от друга. В случае восходящего моделирования разработчику предоставляется полный контроль над геометрией и параметрами модели. Однако такой способ проектирования является намного более трудоёмким, а итерационный цикл оптимизации моделей может занимать намного больше времени по сравнению с нисходящим проектированием.

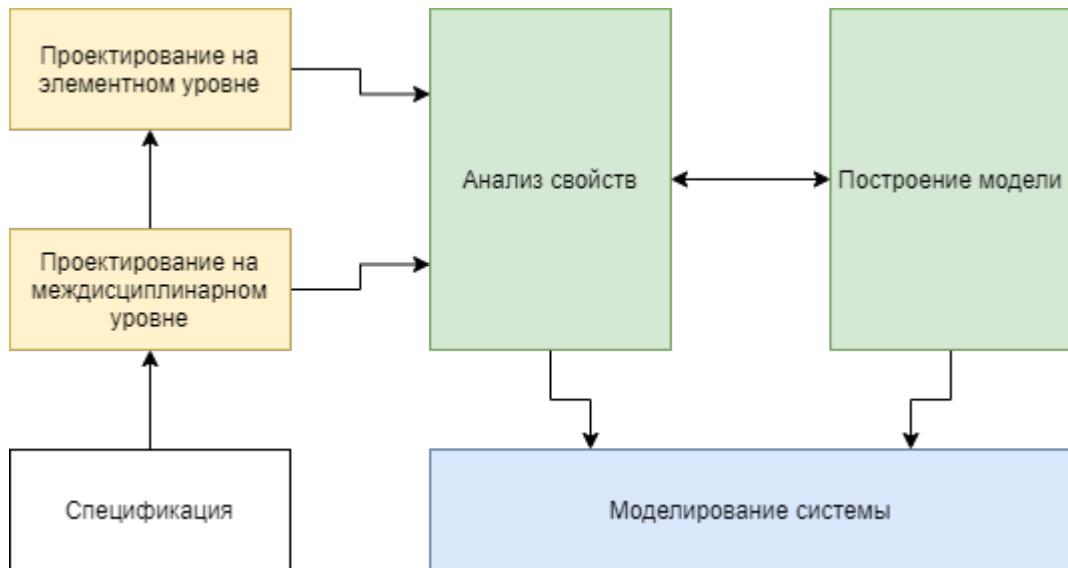


Рисунок 1.5.

Восходящий маршрут проектирования МЭМС

Каждый из маршрутов проектирования МЭМС обладает своими особенностями, преимуществами и недостатками, но ни один из маршрутов не может стать универсальным средством, пригодным для моделирования любых микросистем [17]. Выбор подходящего маршрута осуществляется разработчик, основываясь на имеющихся входных данных и поставленных задачах.

САПР для проектирования и моделирования МЭМС, как правило, позволяют осуществлять проектирование микросистем на различных уровнях

иерархии: компонентном и междисциплинарном [18]. При проектировании на компонентном уровне используются дифференциальные модели в полных производных [19]. К преимуществам такого подхода относится скорость, а к недостаткам — низкая точность. Проектирование на междисциплинарном уровне основывается на использовании физических моделей в частных производных [20]. Этот подход имеет намного более высокую точность и позволяет выполнять расчёты надёжности, однако требует значительных вычислительных ресурсов, а потому является сравнительно медленным [21]. В общем случае интегральные уравнения математической физики не могут быть решены аналитически, а потому необходимо использовать численные методы.

1.1.2 Численные методы

Численные методы представляют собой способы решения математических задач, при которых все данные и результаты выражаются в числовой форме и обрабатываются с помощью электронно-вычислительной техники. Количество необходимых действий для решения задачи зависит от ее сложности, точности, используемого метода и других факторов. Если требуется выполнить не более тысячи действий, то человек может справиться с задачей. Однако, для выполнения миллиона действий или решения задачи в кратчайшие сроки необходима быстродействующая ЭВМ.

Численные методы решения математических задач основаны на использовании числовых данных, которые обрабатываются с помощью компьютеров. Однако приближенное решение, полученное таким образом, содержит погрешность, которая может быть вызвана несоответствием математической модели реальному явлению, ошибками в исходных данных, методе решения или округлениях при вычислениях.

Неустранимая погрешность возникает из первых двух источников и может присутствовать даже при точном решении математической задачи. Для проверки точности математической модели проводят эксперименты и сравнивают

результаты с частными решениями при различных значениях параметров. Для оценки влияния погрешности исходных данных можно изменять эти данные и фиксировать решения. Если имеется большое количество данных и их погрешности случайны, то можно применять статистические методы. Некоторые случаи неустранимой погрешности могут быть рассмотрены как погрешность функции, вызванная погрешностью аргументов.

При использовании численных методов возникает погрешность, даже если входные данные точны и арифметические действия выполнены идеально. Это связано с тем, что численный метод приближенно решает более простую задачу, которая аппроксимирует исходную. Некоторые методы основаны на бесконечном процессе, предел которого способен дать искомое решение. Однако на практике предельный переход невозможен, поэтому при проведении исследований используется приближенный результат с некоторой погрешностью.

При использовании численных методов возникают погрешности, даже если входные данные точны и арифметические действия выполнены без ошибок. Это происходит потому, что численный метод решает упрощенную задачу, которая приближенно описывает исходную задачу. Некоторые методы требуют бесконечного процесса, чтобы получить точное решение, но на практике этот процесс невозможно завершить, и результат получается только приближенным. Одним из параметров численного метода является точность, которая зависит от числа итераций, числа учитываемых членов или шага, используемого при вычислении. Оценка погрешности также зависит от этих параметров, но иногда можно получить оценку только через известные величины.

Численные методы приближенно решают упрощенную задачу, поэтому возникают погрешности, даже если входные данные точны и арифметические действия выполнены без ошибок. Точность численного метода зависит от параметров, таких как число итераций, число учитываемых членов или шаг вычисления. Оценка погрешности также зависит от этих параметров, но иногда содержит неизвестные постоянные множители. Оценка позволяет определить

значения параметра метода, при которых погрешность лежит в требуемых пределах, и судить о скорости убывания погрешности при изменении параметра метода, что является важной характеристикой метода. Однако, некоторые методы требуют бесконечного процесса, чтобы получить точное решение, что на практике невозможно.

Чтобы считать численный метод эффективным, его погрешность должна быть значительно меньше неустранимой и вычислительной погрешностей. Если неустранимая погрешность отсутствует, то погрешность метода должна быть достаточно малой, чтобы удовлетворить заданную точность решения.

Существуют различные численные методы решения интегральных и дифференциальных уравнений, среди которых — метод конечных разностей, метод конечных элементов, метод конечных объёмов, метод граничного элемента и другие. Однако наиболее распространённым в различных САПР и универсальным является метод конечных элементов, поскольку он применим к обрабатываемым областям произвольной формы и позволяет гибко варьировать плотность расчётной сетки в зависимости от задач [22, 23].

1.1.3 Метод конечных элементов

Метод конечных элементов (МКЭ) — это численный метод, который применяется для решения уравнений с частными производными и интегральных уравнений, возникающих в задачах прикладной физики.

Ричард Галлагер, американский специалист в области проектирования конструкций, считает, что история метода конечных элементов (МКЭ) начинается в период 1850–1875 гг. [24], когда были разработаны основные концепции теории анализа стержневых конструкций. Эти концепции были использованы для создания матричных методов строительной механики, которые стали предпосылками для развития МКЭ спустя 80 лет. С появлением вычислительных машин в 50-х годах XX века ученые начали формулировать

алгоритмы расчета строительных конструкций в удобной для компьютеров матричной форме, что способствовало развитию МКЭ.

Изначально развитие МКЭ происходило в двух независимых направлениях: инженерном и математическом. На начальном этапе метод формулировался только на основе принципов строительной механики, что значительно ограничивало его применение. Только после того, как были сформулированы основы МКЭ, стало возможным использование его для решения других задач. Развитию МКЭ способствовало активное развитие компьютерной техники и возможность его применения во многих областях науки и практики [25].

Важную роль в развитии метода сыграли как вариационные основы механики, так и математические методы на их основе. Вариационный метод Ритца был впервые использован Рихардом Курантом в 1943 году, а в 50-е годы XX века аналогичные работы проводили другие ученые.

Современная концепция метода была определена группой американских ученых (Тернером, Клаффом, Мартином и Топпом) в 1956 году [26]. Они, решая задачу теории упругости на плоскости, применили новый элемент треугольной формы и сформировали для него не только матрицу жесткости, но и вектор узловых сил.

Для решения проблемы МКЭ разделяет большую систему на множество более мелких и более простых частей, которые и называются «конечными элементами». Конечные элементы могут иметь различную форму и различные размеры. Это достигается за счёт определённой дискретизации пространства, которая реализуется путём построения сетки объекта, т. е. числовой области решения, которая имеет конечное число точек. Формулировка метода конечных элементов в конечном итоге приводит к системе алгебраических уравнений [27].

Важным этапом вычислений методом конечных элементов является построение на модели расчётной (вычислительной) сетки. Расчётные сетки могут быть упорядоченными (множество узлов сетки является упорядоченным, см. Рисунок 1.6) и произвольными (см. Рисунок 1.7). При вычислениях методом

конечных элементов используются, преимущественно, неструктурированные расчётные сетки, поскольку они позволяют изменять размер и количество конечных элементов в тех областях объекта моделирования, которые наиболее интересуют исследователя. Это позволяет получать более точные результаты при сокращении вычислительных затрат.

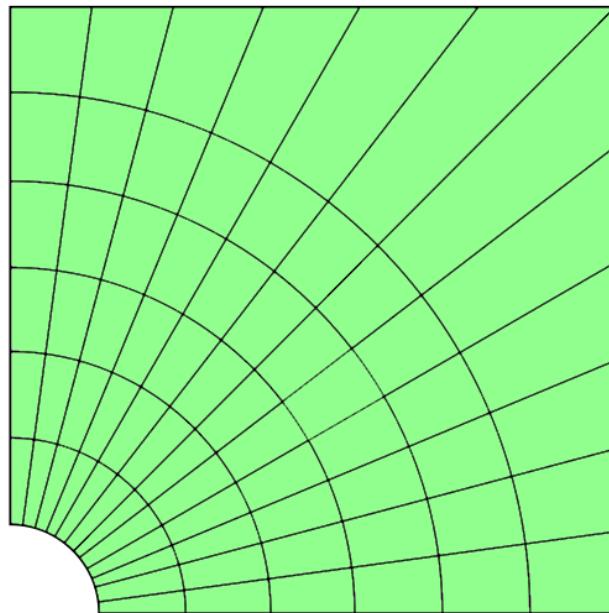


Рисунок 1.6.
Упорядоченная вычислительная сетка

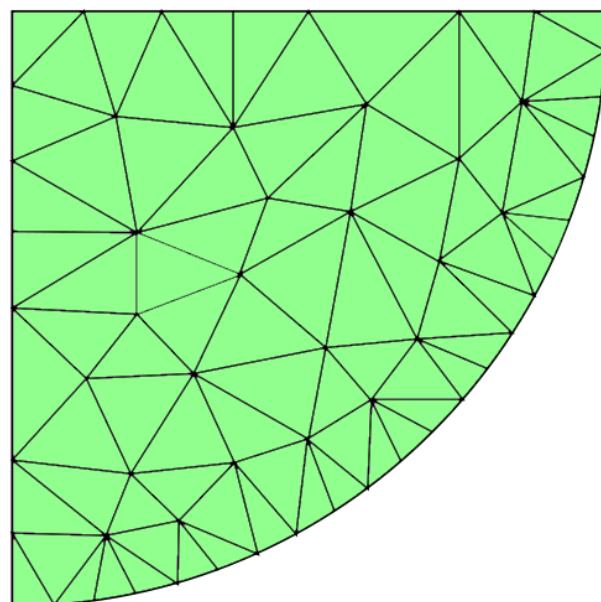


Рисунок 1.7.
Произвольная вычислительная сетка

Выбор характеристик конечного элемента (КЭ), включая тип, форму и размер, зависит от характеристик самого исследуемого тела, включая его форму и нагрузку, которой оно подвергается. При моделировании кручения, изгиба, а также одноосного напряжённого состояния при сжатии и растяжении обычно применяется стержневой конечный элемент [28].

Двумерный, или плоский КЭ может быть использован при моделировании плоского деформированного или плоского напряжённого состояния. Такой конечный элемент чаще всего принимает вид треугольной или четырёхугольной пластины. КЭ, основанные на геометрических фигурах с большим числом углов, используются намного реже, поскольку моделирование с использованием таких конечных элементов является более ресурсоёмким. Анализ напряжённого состояния требует использования трёхмерных (объёмных) конечных элементов — призм и тетраэдров.

К более редко используемым и специфичным видам конечных элементов относятся КЭ в виде кольца (моделирование осесимметричного напряжённого состояния) и оболочки (моделирование оболочек).

Для целей эффективного использования вычислительных ресурсов и получения более точного результата целесообразно увеличивать плотности КЭ-сетки и/или порядок элементов в тех местах модели, где ожидаются наибольшие градиенты и концентрации напряжений и других деформаций, моделирование которых осуществляется.

Каждый вид конечного элемента обладает набором свойств, который необходимо задать при моделировании. Например, площадь поперечного сечения для стержневого КЭ, количество узлов — для плоского КЭ. Также любой конечный элемент имеет привязку к определённому материалу, который характеризуется модулем упругости, коэффициентом теплового расширения, коэффициентом Пуассона, плотностью и другими физическими характеристиками, необходимыми для конкретной задачи моделирования.

Каждый элемент и его узел должен быть пронумерован, причём нумерация узлов может быть как глобальной (сквозной для всей КЭ-модели), так и

локальной (для конкретного элемента). Для определения связей между локальными и глобальными номерами должны быть построены массивы связей этих номеров. Нумерация элементов и узлов может оказывать непосредственное влияние на трудоёмкость вычислений, поэтому производить нумерацию следует с использованием оптимизирующих алгоритмов.

1.1.3 Методы моделирования полупроводниковых устройств при спецвоздействиях

Методы Монте-Карло — это широкий класс вычислительных алгоритмов, которые основываются на использовании повторяющихся случайных выборок для получения численных результатов. Датой рождения этого метода считают 1949 г., когда появилась статья под названием «The Monte Carlo Method» [29]. Авторами метода Монте-Карло являются математики Дж. Нейман и С. Улам. Несмотря на то, что теория этого метода была разработана уже давно, практическое применение этого метода стало возможным только после появления электронно-вычислительных машин, так как моделирование случайных величин без компьютера — очень сложная задача.

В задачах прикладной физики используется метод конечных элементов для решения уравнений с частными производными и интегральных уравнений. С другой стороны, методы Монте-Карло используются для решения проблем, которые в принципе могут быть детерминированными, включая оптимизацию, численное интегрирование и генерацию выборок из распределения вероятностей. Они имеют большое значение для вычислительной физики и близких к ней областей науки. [30].

Одним из методов Монте-Карло, широко используемым в физике тяжёлых заряженных частиц, является бинарная аппроксимация коллизий (BCA, binary collision approximation) [31]. Этот метод позволяет производить компьютерное моделирования глубины проникновения, а также дефектов, вызываемых воздействием частиц с энергией порядка килоэлектронвольта и выше на твёрдые

вещества (см. Рисунок 1.8). При использовании этого метода движение иона в материале аппроксимируется как серия независимых бинарных столкновений с ядрами атомов материала. Предполагается, что между столкновениями ион движется по прямой, испытывая на себе останавливающую силу электронов, но не теряя энергию при коллизиях с ядрами [32].

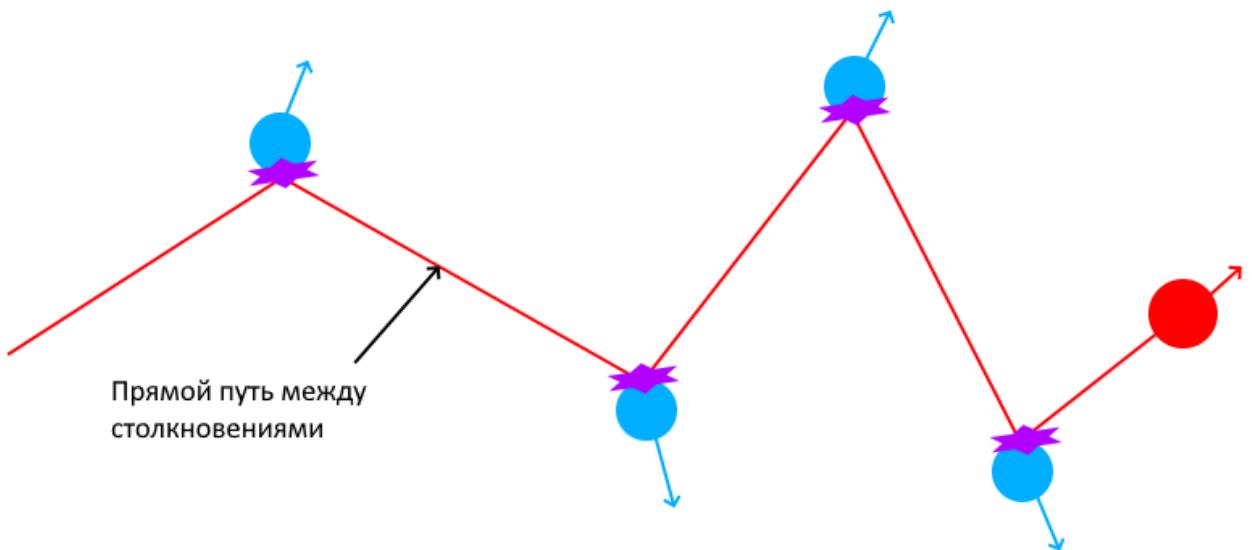


Рисунок 1.8.

Схематическое изображение серии независимых бинарных столкновений тяжёлой заряженной частицы с атомами

При использовании метода ВСА каждое столкновение между ионом и ядром атома обрабатывается путём решения классического интеграла рассеяния. Решение интеграла позволяет вычислить угол рассеяния иона, а также его энергетические потери. Интеграл рассеяния определяется в системе координат центра масс (две частицы рассматриваются как единственная частица с одним межатомным потенциалом). Также возможно решение временного интеграла коллизий для определения количества времени, прошедшего за время столкновений.

Классические уравнения движения могут быть решены в барицентрических координатах для получения барицентрического угла рассеяния:

$$\theta = \pi - p \int_R^\infty dr [r^2 g(r)]^{-1} = \pi - p I_1 \quad (1.1)$$

и интеграла по времени:

$$\tau = (R^2 - p^2)^{\frac{1}{2}} - I_2, \quad (1.2)$$

где

$$I_2 = \int_R^\infty dr \left\{ [g(r)]^{-1} - \left(1 - \frac{p^2}{R^2}\right)^{-\frac{1}{2}} \right\}, \quad (1.3)$$

$$g(r) = [1 - \frac{p^2}{r^2} - \nu(r)]^{1/2}, \quad (1.4)$$

$$\nu(r) = (1 + A)V(r)/AE_0, \quad (1.5)$$

r — межатомное разделение,

$V(r)$ — межатомная потенциальная энергия,

R — апсиса при столкновении, определяемая $g(R) = 0$.

При обсуждении классического рассеяния (и некоторых имитационных моделей) также используется дифференциальное сечение рассеяния:

$$d\sigma = (4\pi p / \sin\theta)(d\theta/dp)^{-1}. \quad (1.6)$$

Удобно заменить $d\theta/dp$ интегральным представлением:

$$d\theta/dp = (1/\kappa - 1)I_1 + (1/\kappa)I_3, \quad (1.7)$$

где

$$\kappa = 1 - \frac{R^3 \nu'(R)}{2p^2}, \quad (1.8)$$

$$I_3 = \int_R^\infty dr/r [r g(r)]^{-3} [R^3 \nu'(R) - r^3 \nu'(r)]. \quad (1.9)$$

При составлении интегралов предполагается, что L достаточно велико, чтобы его можно было считать бесконечным. Это упрощает вычисление интегралов и согласуется с общей картиной бинарных столкновений. Поскольку

$g(R) = 0$, подынтегральные выражения являются сингулярными в нижних пределах, но они интегрируемы при $p^2 K > 0$ или $v'(R) < 2p^2/R^3$, условие, которому соответствует любой потенциал с отталкивающим ядром. Интеграл I_2 также требует $\lim_{r \rightarrow \infty} r v(r) = 0$, которому подчиняются все вероятные потенциалы, кроме кулоновского потенциала.

Существует несколько методов точной оценки интегралов рассеяния. Сингулярность может быть устранена путем замены $r = R/(1 - u^2)$. Преобразованные интегралы могут быть вычислены с помощью квадратуры Гаусса-Лежандра, однако более эффективным методом является квадратура Гаусса-Мелера. Подстановка равна $r = R/u$. Интегралы преобразуются следующим образом:

$$I_1 = (2/R) \int_0^1 du (1 - u^2)^{-1/2} [(1 - u^2)^{1/2}/G(u)], \quad (1.10)$$

$$I_2 = R \int_0^1 du (1 - u^2)^{-1/2} [(1 - u^2)^{1/2} \{G(u)^{-1} - (1 - p^2 u^2/R^2)^{-1/2}\}], \quad (1.11)$$

$$I_3 = R \int_0^1 du (1 - u^2)^{-1/2} [(1 - u^2)^{1/2} \{u^2 v'(R) - v'(R/u)/u\}/\{G(u)\}^3] \quad (1.12)$$

где

$$G(u) = [1 - p^2 u^2/R^2 - v(R/u)]^{1/2}. \quad (1.13)$$

Квадратурная формула Гаусса-Чебышева идеально подходит для подобных интегралов. Абсциссы и весовые коэффициенты представляют собой простые круговые функции и могут быть быстро вычислены для любой степени квадратуры. Таким образом, решив классический интеграл рассеяния, мы получаем значение угла рассеяния иона, который используется для метода ВСА.

Метод ВСА имеет два основных подвида. Первый — так называемый «Монте-Карло ВСА». Эта вариация метода основана на оценке расстояния и прицельного параметра по отношению к следующему атомному ядру как случайных величин, полученных из распределения вероятностей, которая

зависит только от атомной плотности материала. Такой подход, в сущности, моделирует движение иона в полностью аморфном материале. Метод Монте-Карло ВСА используется в различном программном обеспечении, например, SRIM (Stopping Range of Ions in Matter, диапазоны остановок ионов в материи) [33]. Второй подвид ВСА носит название «кристаллический ВСА» и является более сложным для моделирования, однако учитывает положение атомов в кристаллической решётке и позволяет моделировать влияние ионов на металлические материалы.

Также, моделирование с использованием метода ВСА может учитывать или не учитывать дефекты, вызванные попаданием предыдущих ионов. Моделирование с учётом дефектов, вызванных предыдущими попаданиями, является более точным и носит название «режим полного каскада».

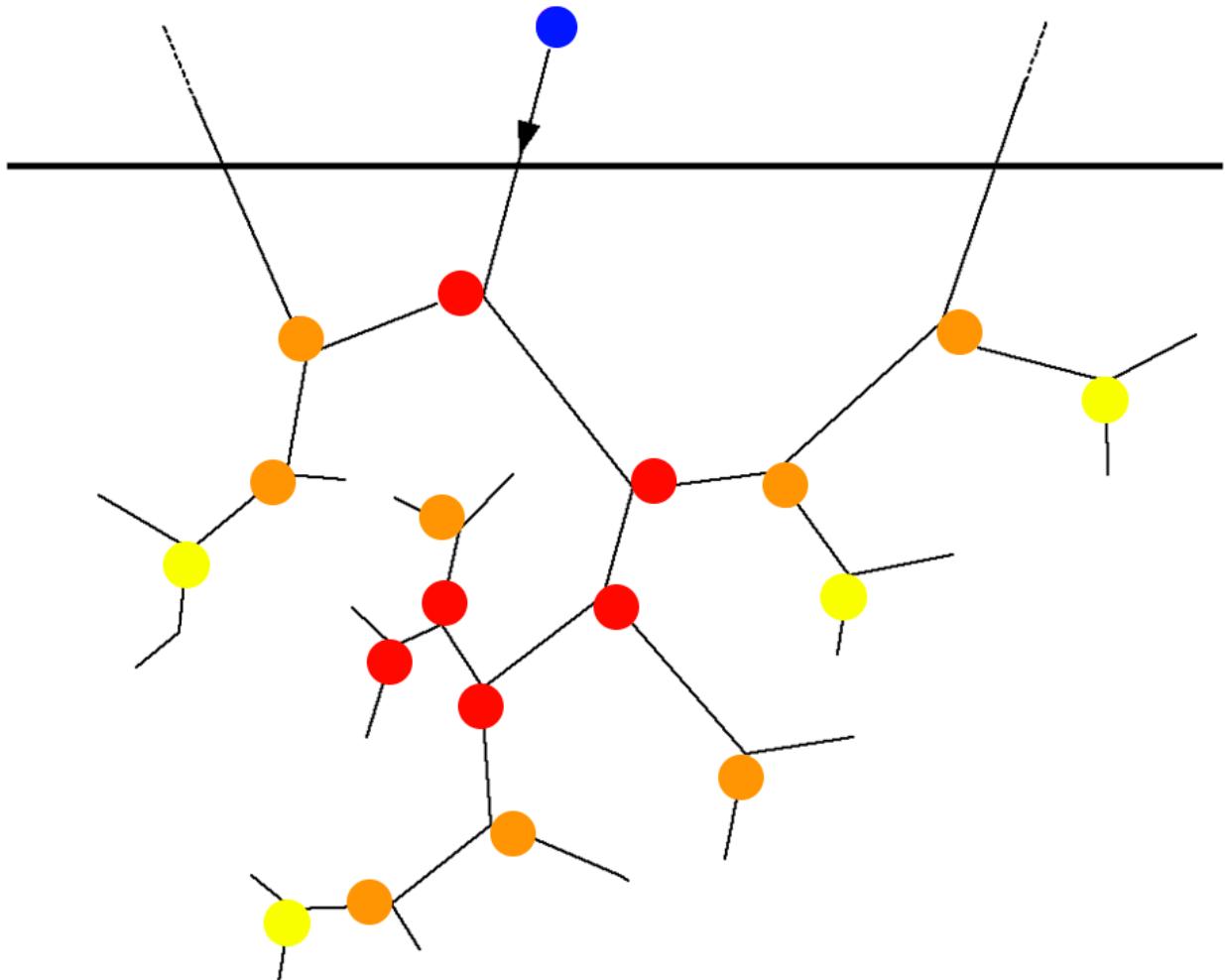


Рисунок 1.9.

Схематическая иллюстрация линейного каскада столкновений

На Рисунке 1.9 приведена схематическая иллюстрация линейного каскада столкновений. Толстая горизонтальная линия показывает расположение поверхности материала, другие тонкие линии — баллистические пути атомов от их изначального положения до мест остановки в материале. Синим цветом показан внедрённый в материал ион. Красным, оранжевым, и жёлтым цветами показаны первичные, вторичные и третичные отскоки атомов с их местоположений соответственно. Моделирование с использованием метода ВСА в режиме полного каскада позволяет получать точные математические описания этого процесса.

Моделирование ВСА позволяет рассчитать такие параметры, как глубина проникновения иона, боковой разброс, распределение энергии ядерного и электронного осаждения в пространстве. Также ВСА можно использовать для оценки ущерба, причиняемого материалам тяжёлыми заряженными частицами.

Основной задачей при моделировании изменений электрических характеристик электростатических МЭМС при воздействии тяжёлых заряженных частиц является решение уравнения Пуассона методом конечных элементов [34]. Уравнение Пуассона — это эллиптическое дифференциальное уравнение в частных производных, которое описывает электростатическое поле, стационарное поле температуры и поле давления. В общем случае уравнение Пуассона имеет вид:

$$\Delta\varphi = f, \quad (1.14)$$

где Δ — оператор Лапласа (лапласиан);

f — вещественная или комплексная функция на некотором многообразии.

Для получения частного уравнения Пуассона для области пространственного заряда полупроводниковой структуры необходимо представить объёмную плотность заряда в виде:

$$\rho = q(p - n + N_{D+} - N_{A-}). \quad (1.15)$$

Согласно фундаментальным уравнениям Maxwella при отсутствии магнитного поля:

$$\operatorname{div} D = \rho, \quad (1.16)$$

$$\operatorname{div}(\epsilon \epsilon_0 E) = \rho, \quad (1.17)$$

$$\operatorname{div}(\epsilon \epsilon_0 \operatorname{grad} \varphi) = -\rho, \quad (1.18)$$

где D — вектор электрического смещения;

E — вектор электрического поля;

φ — электростатический потенциал.

Полагая диэлектрическую проницаемость константной и подставив в уравнение (1.18) выражение для плотности заряда (1.17), получим уравнение Пуассона для области пространственного заряда полупроводника (1.19) [10].

$$\operatorname{div}(\epsilon_0 \epsilon \operatorname{grad} \psi) = -q(p - n + N_{D+} - N_{A-}), \quad (1.19)$$

где ϵ_0 — электрическая постоянная, $\Phi/\text{м}$;

ϵ — диэлектрическая проницаемость, $\Phi/\text{м}$;

ψ — электростатический потенциал, В;

q — заряд электрона, Кл;

N_{D+} и N_{A-} — концентрации ионизированных атомов донорной и акцепторной примесей соответственно.

Уравнения непрерывности для электронов и дырок определяются следующим образом:

$$\operatorname{div} \bar{J}_n = -q(G - R) + q \frac{\partial n}{\partial t} \quad (1.20)$$

и

$$\operatorname{div} \bar{J}_p = -q(G - R) + q \frac{\partial p}{\partial t}, \quad (1.21)$$

где \bar{J}_n и \bar{J}_p — векторы плотности дока тока электронов и дырок соответственно, $\text{А}/\text{м}^2$;

G — скорость генерации носителей заряда;

R — скорость рекомбинации носителей заряда.

Влияние тяжёлых заряженных частиц на образец материала приводит к генерации дополнительных носителей заряда. Скорость генерации носителей заряда G рассчитывается следующим образом:

$$G(l, w, t) = G_{pot}(l) R(w, l) T(t), \quad (1.22)$$

где l — длина пробега электрона в полупроводнике, м;
 w — расстояние между траекторией иона и рассматриваемой точкой, м;
 t — время, с;
 $G_{pot}(l)$ — функция, характеризующая энергетические потери иона;
 $R(w, l)$ — функция пространственного распределения генерации носителей заряда;
 $T(t)$ — функция временного распределения генерации носителей заряда.

Функция $G_{pot}(l)$ определяется следующим образом:

$$G_{pot}(l) = \frac{1}{\pi w_t^2(l)} LET_f(l), \quad (1.23)$$

где $LET_f(l)$ — функция энергетических потерь, Кл/м;
 $w_t(l)$ — характеристический радиус, являющийся функцией от энергетических потерь иона и его глубины проникновения, м.

Функция пространственного распределения генерации носителей заряда определяется следующим образом:

$$R(w, l) = \exp\left(-\left(\frac{w}{w_t(l)}\right)^2\right). \quad (1.24)$$

Функция временного распределения генерации носителей заряда определяется следующим образом:

$$T(t) = \frac{2\exp\left(-\left(\frac{t-t_0}{T_0}\right)^2\right)}{T_0\sqrt{\pi}\left(1 + \operatorname{erf}\left(\frac{t-t_0}{T_0}\right)\right)}, \quad (1.25)$$

где t_0 — точка во времени, которая соответствует проникновению иона в материал;

T_0 — константа, значение которой принята за $2 \cdot 10^{-12}$;

erf — функция ошибок.

Для кремниевых пластин значение функции энергетических потерь LET_f может быть найдено исходя из энергетических потерь на расстоянии электронного торможения [100]:

$$LET_f \approx \frac{\left(\frac{dE}{dx}\right)_{electron}}{100}, \quad (1.26)$$

где $\left(\frac{dE}{dx}\right)_{electron}$ — энергетические потери на электронное торможение.

1.2 Аналитический обзор программного обеспечения, используемого для моделирования микроэлектромеханических систем при спецвоздействиях

Для моделирования воздействий ионов на электростатические микросистемы подходящим является использование таких программных продуктов, как SRIM и Sentaurus TCAD.

1.2.1 Использование SRIM для моделирования микроэлектромеханических систем при спецвоздействиях

Приложение SRIM было изначально разработано американским физиком Джеймсом Циглером в 1980 году, после чего получило множество дополнений и улучшений. Последняя версия была выпущена в 2013 году [33]. Главная функциональность приложения заключается в моделировании воздействий

ионов на материалы [35]. Алгоритмы, используемые в SRIM для моделирования, основаны на методе Монте-Карло ВСА.

На Рисунке 1.10 показано главное окно SRIM.



Рисунок 1.10.
Главное окно SRIM

В качестве входных параметров SRIM требует указания типа тяжёлой заряженной частицы (её химический элемент), её энергию (допускается диапазон 10 эВ – 2 ГэВ) и материал одного или нескольких слоёв цели. На Рисунке 1.11 показано окно настройки модуля TRIM (Transport of Ions in Matter, перемещение ионов в материи).

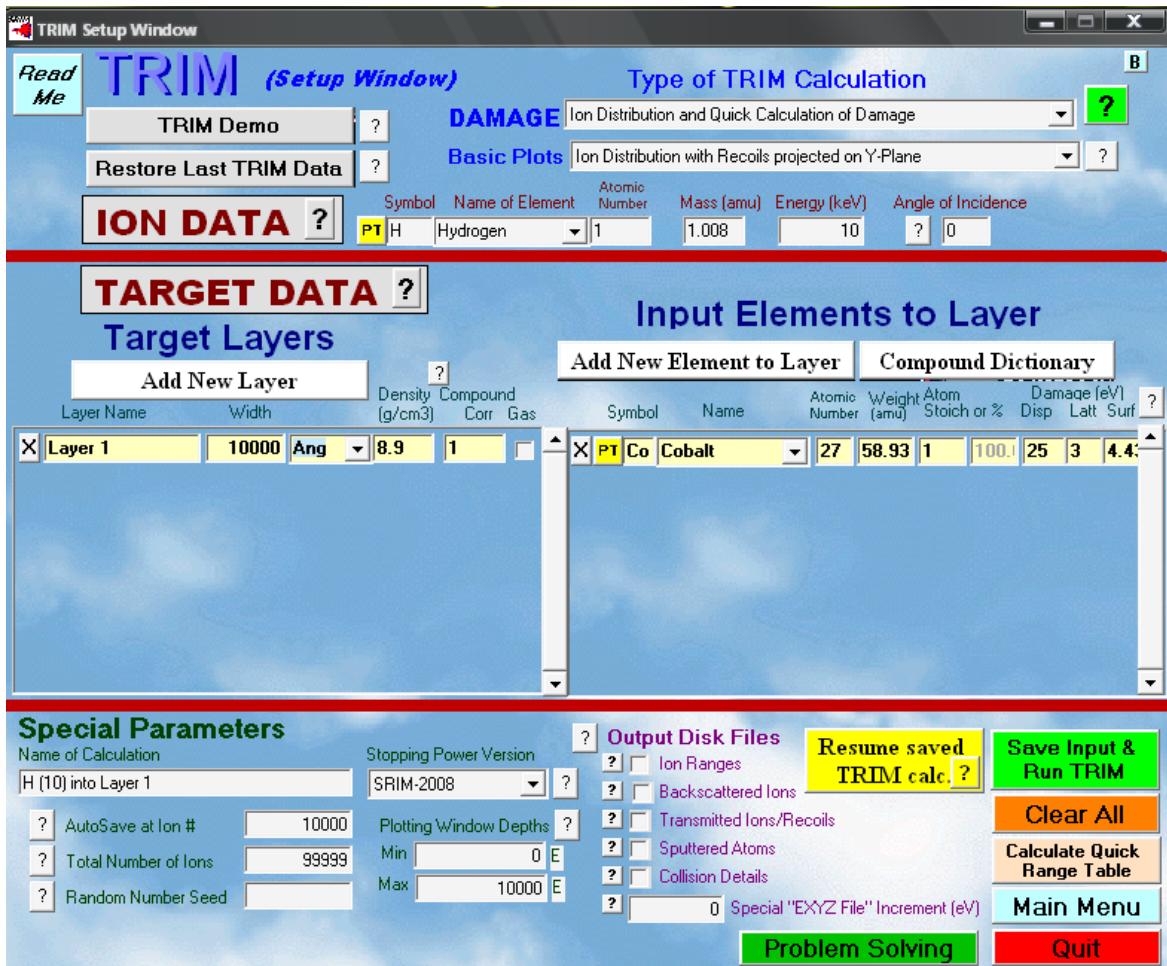


Рисунок 1.11.

Окно задания параметров модуля TRIM

В качестве результатов вычислений SRIM генерирует текстовый или трёхмерный результат распределения ионов в твёрдом веществе и его различные параметры, такие как глубина проникновения, разброс, концентрация вакансий, ионизация, генерация фононов, ядерные и электронные потери энергии и другие. На Рисунке 1.12 показан примеров результатов расчётов SRIM в модуле TRIM.

Модуль TRIM может быть использован для расчёта защитных экранов, предназначенных для остановки тяжёлых ионов и защиты микроэлектромеханических систем в космических условиях. В [36] было показано, что для остановки протона с энергией 50 МэВ толщина защитного экрана из алюминия должна составлять 10,75 мм, в то время как при использовании свинца достаточно толщины экрана 4,34 мм.

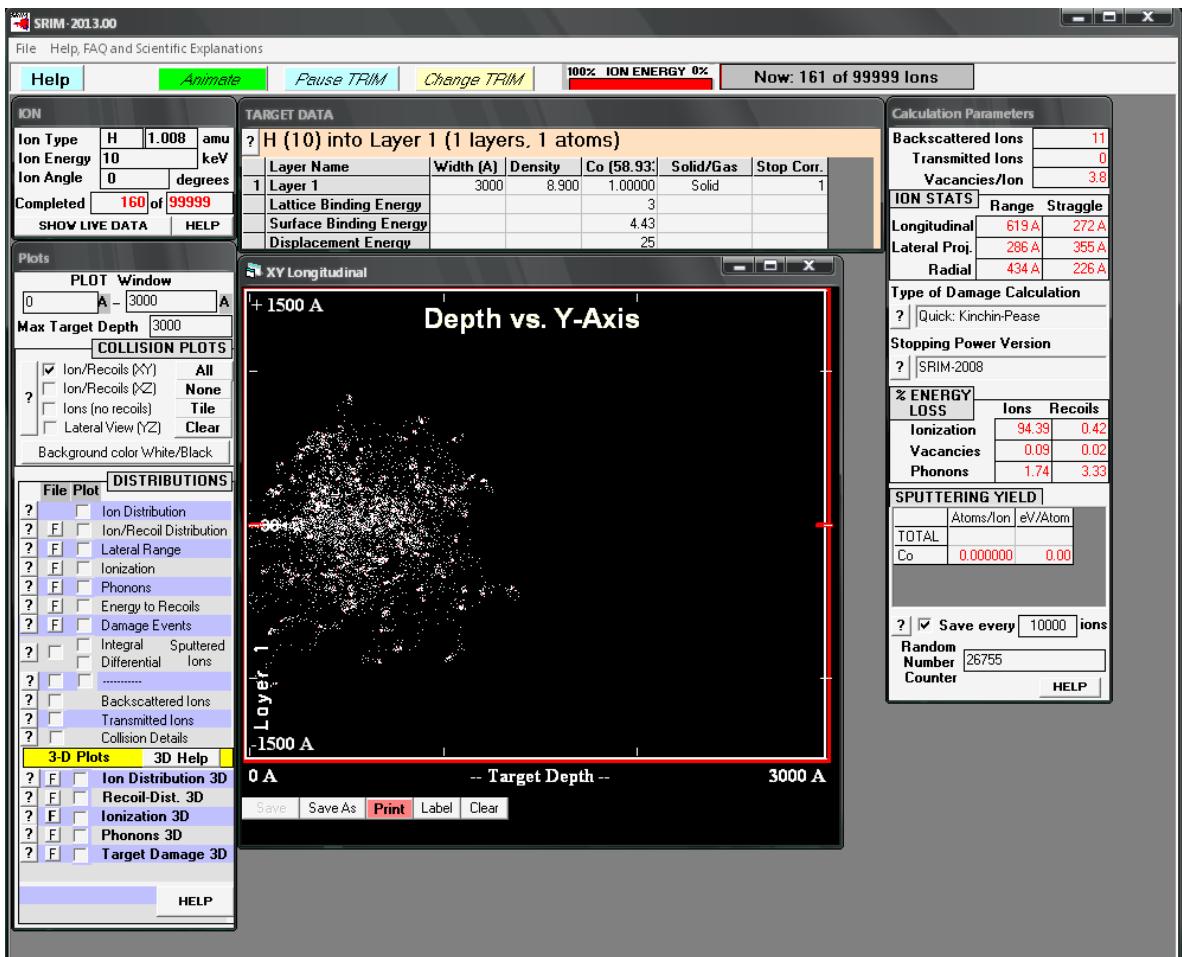


Рисунок 1.12.

Окно расчётов в модуле TRIM

К числу ключевых особенностей SRIM следует отнести возможность прервать вычисления в любой момент, а затем продолжить их с места остановки. Кроме того, SRIM имеет встроенную периодическую таблицу химических элементов со всеми необходимыми для расчётов параметрами элементов, а также обширную базу данных различных сплавов и композитов, которая позволяет быстро создавать цели для вычислений.

Однако, SRIM также обладает и рядом недостатков [35, 38, 39]. Так, приложение не учитывает кристаллическую структуру материалов (также, следовательно, возможность канализования ионов) и рассматривает их как полностью аморфные. Также SRIM рассматривает все коллизии как бинарные, т. к. учитывает влияние соседних атомов при столкновениях ионов с ядрами атомов. В SRIM отсутствует описание кластеризации дефектов, а также

дефектов, вызванных излучением аморфизации, хотя первая встречается в большинстве материалов, а вторые — важны для полупроводников [40].

Метод конечных элементов применяется в задачах прикладной физики для решения уравнений с частными производными и интегральных уравнений, в то время как методы Монте-Карло используются для решения проблем, которые могут быть детерминированными, таких как оптимизация, численное интегрирование и генерация выборок из распределения вероятностей. Однако при использовании программы SRIM для расчета коэффициента распыления Y и углового распределения распыленных атомов наблюдаются серьезные артефакты в случае наклонного падения ионов, особенно при скользящей бомбардировке, а также при падении частиц по нормали к поверхности. Причина этого связана с недостатками алгоритма расчета траекторий частиц при их приближении к поверхности [41], что приводит к недооценке поверхностного рассеяния и искажению каскадов столкновений, особенно при больших углах падения ионов на мишень. Длина свободного пробега частиц в модели SRIM определяется средним межатомным расстоянием, и первое столкновение падающего иона с атомом мишени происходит на расстоянии λ от точки пересечения поверхности, не учитывая рассеяние на атомах, расположенных ближе к поверхности.

Таким образом, несмотря на высокое качество реализованных в SRIM алгоритмов, программа давно не обновлялась разработчиком и имеет ряд ошибок, допущенных при программировании, а потому накладывает ряд технических ограничений. По информации с сайта разработчика, для стабильной работы SRIM необходима операционная система Windows XP фирмы Microsoft. Кроме того, ПО невозможно запустить, если в операционной системе в качестве основного установлен язык не на основе латинской письменности, в том числе русский язык. Поскольку большинство пользователей в России предпочитает использовать ПО на родном языке, а ОС Windows XP официально не продается и не поддерживается компанией Microsoft, разработчики вынуждены

использовать для запуска приложения сторонние средства, например установку SRIM внутри виртуальной машины с правильно настроенным окружением.

1.2.2 Использование Sentaurus TCAD для моделирования микроэлектромеханических систем при спецвоздействиях

САПР Sentaurus TCAD фирмы Synopsys [42] позволяет решать задачи двумерного и трёхмерного моделирования, включая задачи формирования структуры прибора (имплантация, диффузия, травление, осаждение), построение КЭ-сетки, а также расчета электрических характеристик прибора. Моделирование полупроводниковых структур в САПР Sentaurus TCAD фирмы Synopsys основано на использовании метода конечных элементов.

Целью Sentaurus TCAD является предоставление инженерам средств приборно-технологического моделирования, которые сосредоточены на трёх основных направлениях:

- трехмерное моделирование субмикронных приборов, включающее моделирование технологического процесса формирования структуры прибора, механических напряжений внутри прибора и анализ трехмерного распределения носителей заряда;
- моделирование мощных кремниевых и гетероприборов, в том числе на основе SiC и GaN, приборов на основе материалов A^3B^5 , использующих гетеропереходы, фотодетекторов, светоизлучающих диодов и полупроводниковых лазеров;
- построение компактных моделей на базе результатов моделирования или измерений конкретного прибора, отражающих зависимость выходных электрофизических параметров от разброса входных технологических параметров.

В последних версиях программы добавлены новые модели технологических процессов, включая лазерный и импульсный отжиг примесей, улучшенные модели диффузии примесей и другие. Также внедрена полная

поддержка моделирования технологии и электрических характеристик приборов на широкозонных полупроводниках, таких как SiC, GaN и другие. Кроме того, математический блок решения систем дифференциальных уравнений был значительно улучшен, что позволило улучшить сходимость уравнений при решении сложных задач, таких как расчет выходной вольтамперной характеристики транзисторов и диодов, а также моделирование электрофизических характеристик приборов на основе широкозонных полупроводников.

В настоящее время в Sentaurs TCAD была реализована возможность распараллеливания и многопоточности расчета, что позволяет полностью использовать возможности современных многоядерных процессоров и значительно сокращать затраты времени на моделирование. Был разработан новый генератор расчетной сетки высокого качества, который адаптируется к конструктивным особенностям прибора и профилям распределения примесей. Использование этого генератора вместо устаревших позволяет значительно увеличить точность и скорость расчета, а также улучшить сходимость систем уравнений.

В производстве полупроводниковых приборов используются как простые, так и сложные технологические процессы, включая травление, осаждение, химико-механическую полировку, имплантацию с низкими энергиями, быстрый тепловой отжиг и окисление в многокомпонентных средах [43, 44, 45]. Для моделирования процесса формирования структур полупроводниковых компонентов в системе Sentaurs TCAD используется гибридный подход, который предусматривает моделирование простых операций на геометрическом уровне и трехмерной структуры прибора в виде набора геометрических объектов. Этот процесс эмулируется с помощью встроенного трехмерного генератора структур Sentaurs Structure Editor (SSE).

Sentaurs Structure Editor (SDE) — модуль, позволяющий графически конструировать полупроводниковые структуры в двух и трех измерениях без необходимости использования программ технологического моделирования.

Создание структуры включает в себя формирование геометрической модели, задание профилей легирования и определение процесса построения вычислительной конечно-элементной сетки. Это позволяет значительно упростить процесс моделирования и повысить точность результатов.

Sentaurus Process — это программный модуль, который используется для математического моделирования сложных процессов, таких как внедрение и распространение примесей. Он позволяет определить распределение примесей и механических напряжений в устройстве, решая систему уравнений на узлах сетки конечных элементов.

Пакет Sentaurus TCAD фирмы Synopsys является многофункциональной САПР и позволяет, в числе прочего, оценивать изменения технических характеристик полупроводниковых приборов при попадании в них тяжёлых заряженных частиц. Вид главного окна Sentaurus TCAD с открытым проектом приведён на Рисунке 1.13.

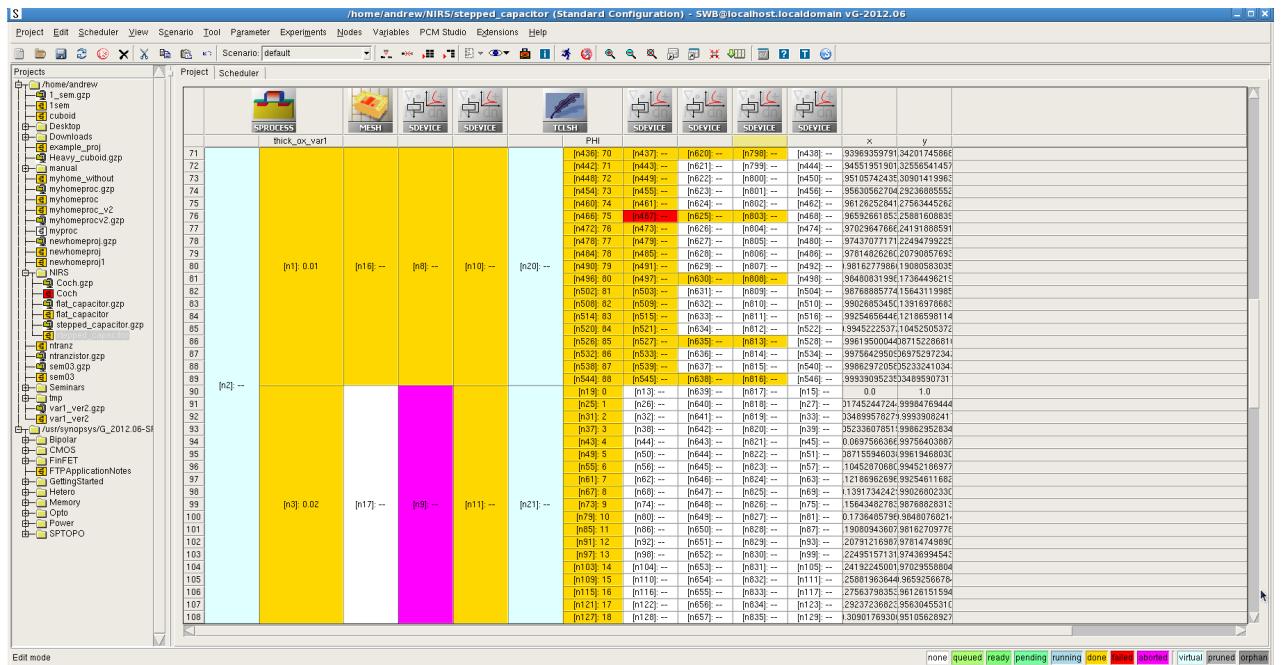


Рисунок 1.13.

Вид главного окна Sentaurus TCAD

Одной из возможностей пакета Sentaurus TCAD является моделирование воздействия тяжёлых заряженных частиц на характеристики

полупроводниковых структур. При большом наборе входных параметров можно воспользоваться встроенным средством автоматизации расчётов, модулем TCLSH. Модуль позволяет предварительно вычислить изменяемые параметры путём написания кода на языке программирования TCL и задать переменные, которые затем будут использованы в конфигурационных файлах sdevice вместо абсолютных значений. Это может быть полезно, при, например, составлении зависимостей электрических характеристик построенной модели в зависимости от каких-либо внешних условий.

Sentaurus TCAD — ресурсоёмкое программное обеспечение, требующее для запуска и работы определённой вычислительной мощности. Так, фирма Synopsys рекомендует запускать Sentaurus TCAD на компьютере с процессором серии не ниже Intel Core i7, иметь не менее 16 ГБ оперативной памяти и не менее 100 ГБ свободного места на жёстком диске или твердотельном накопителе. Другой важной особенностью является то, что ПО предназначено для работы в операционных системах GNU/Linux, причём официально разработчиком поддерживается только 64-битная редакция дистрибутива Red Hat Enterprise Linux (RHEL). Всё вышеперечисленное налагает жёсткие ограничения на требования к рабочей станции для работы в Sentaurus TCAD.

В [46] проводилось моделирование воздействий ТЗЧ на характеристики FET-транзисторов со структурой SOI (Silicon on Insulator, кремний на изоляторе). Авторами была разработана модель полевого транзистора в Sentaurus TCAD, а также программный модуль для TCAD, позволяющий рассчитывать координаты направляющего вектора в зависимости от угла внедрения тяжёлой заряженной частицы. По результатам моделирования были получены временные зависимости тока стока n- и p-канального транзисторов при различных воздействиях ионов неона и криптона. Также было сделано заключение о том, что попадания ионов с определённым характеристиками (в зависимости от массы ядра, энергии и угла внедрения) в полевые транзисторы могут привести к выходу логического элемента из строя. Для снижения вероятности выхода транзисторов из строя при прохождении тяжёлой заряженной частицы по всей

протяжённости канала полевого транзистора было предложено проектировать канал непрямым, что не позволит иону создавать область генерации свободных носителей заряд по всей длине канала.

1.2.3 Интегрированный маршрут моделирования изменений электрических характеристик электростатических элементов фрактальных микроэлектромеханических при попадании тяжёлых заряженных частиц

На Рисунке 1.14 представлен существующий интегрированный маршрут моделирования воздействия тяжёлой заряженной частицы на электростатические полупроводниковые микросистемы. Маршрут содержит операцию ручного переноса данных, поскольку SRIM и Sentaurus TCAD работают в различных операционных системах и не имеют возможностей интеграции.

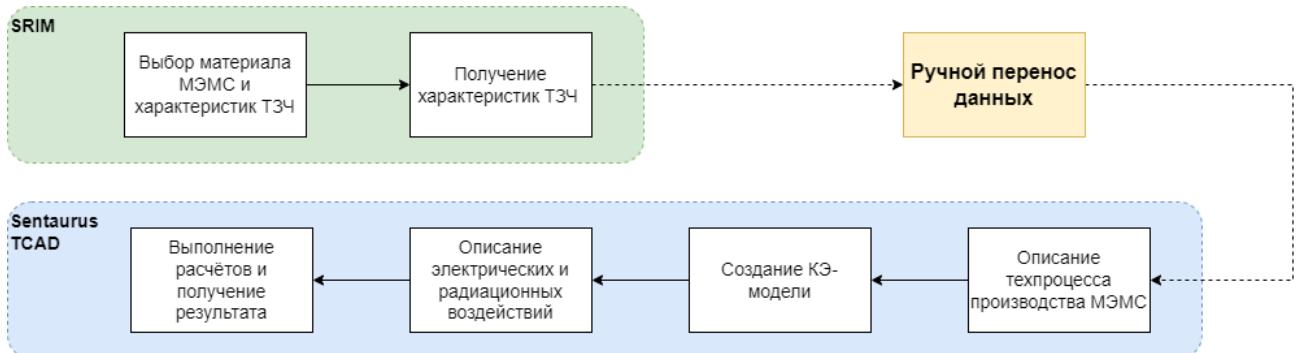


Рисунок 1.14.

Интегрированный маршрут моделирования воздействия тяжёлой заряженной частицы на электростатические ФМЭМС

Первый этап моделирования воздействия тяжёлых заряженных частиц на электрические характеристики электростатических фрактальных микросистем при использовании существующих инструментов и подходов осуществляется в приложении SRIM. Используя SRIM, необходимо выбрать исследуемый материал, тип внедряемого иона и его энергию, после чего запустить расчёт для получения таких характеристик ТЗЧ, как глубина внедрения, продольный и

поперечный разброс и другие. При использовании при проектировании микросистемы различных материалов данные операции необходимо повторить для каждого используемого материала. Пример расчётов для ионов водорода и неона в кремний и диоксид кремния, полученный в SRIM, представлен в таблице 1. Полученные результаты расчётов необходимо вручную сохранить и перенести в среду запуска Sentaurus TCAD.

Таблица 1.

Показатель распределения ионов водорода и неона в кремний и диоксид кремния для различных значений энергии, рассчитанные в SRIM

Ион	Материал	Энергия, МэВ	Электронное торможение, МэВ/(мг·см ²)	Ядерное торможения, МэВ/(мг·см ²)	Глубина проникновения, мкм	Продольн. разброс, мкм	Попереч. разброс, мкм
H	Si	10	$3,48 \cdot 10^{-2}$	$1,79 \cdot 10^{-5}$	709,2	32,7	31,7
		100	$5,86 \cdot 10^{-3}$	$2,24 \cdot 10^{-6}$	41620	1890	1600
	SiO_2	10	$3,73 \cdot 10^{-2}$	$1,86 \cdot 10^{-5}$	656,3	29,8	25
		100	$6,13 \cdot 10^{-2}$	$2,31 \cdot 10^{-6}$	39640	1790	1320
Ne	Si	10	8,86	$2,35 \cdot 10^{-2}$	6,28	0,31	0,38
		100	5,44	$3,26 \cdot 10^{-3}$	60,87	2,19	0,93
	SiO_2	10	10,21	$2,43 \cdot 10^{-2}$	5,96	0,29	0,36
		1000	5,79	$3,34 \cdot 10^{-2}$	57	2,05	0,77

В Sentaurus TCAD необходимо описать технологический процесс производства ФМЭМС и получить её модель, после чего разбить полученную модель на сетку конечных элементов. Затем необходимо описать электрические и радиационные воздействия на исследуемую ФМЭМС. Для этого из заранее сохранённых данных, полученных в SRIM, необходимо заполнить конфигурационный файл Sentaurus TCAD, осуществив, при необходимости, преобразование полученных значений в используемые в САПР единицы измерения. На финальном этапе осуществляется выполнение автоматизированных расчётов и визуализация результатов.

Ключевым недостатком описанного маршрута моделирования является трудоёмкость ручного переноса данных между несовместимыми средами запуска SRIM и Sentaurus TCAD. Кроме того, SRIM в принципе не предполагает наличие API и/или других средств интеграции с другим программным обеспечением, а также не поддерживает запуск в операционных системах семейства Linux.

1.3 Фрактальные конструкции

Известны системы различного назначения, в том числе микроэлектромеханические, основывающиеся на различных физических принципах и имеющие конструкцию, основанную на фракталах.

В [47] предлагается «микрокамера горения», основанная на термофотоэлектрическом физическом принципе работы. Данное устройство обладает фрактальными Y-образными рёбрами, позволяющими повысить энергоэффективность и КПД процесса получения энергии.

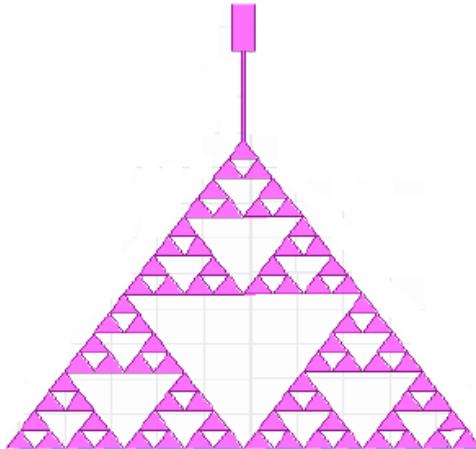


Рисунок 1.15.

Модель антенны, основанной на фрактале «треугольник Серпинского»

В [48] рассматривается антенна, основанная на фрактале «треугольник Серпинского» (см. Рисунок 1.15). Согласно результатам исследования, использование основанных на фрактале конструкций антенны с частотой

резонанса около 2,4 ГГц позволило значительно улучшить радиус беспроводной связи в указанном диапазоне.

Похожая идея использована в работе [49], однако в данном случае геометрия антенны основана на фрактале «кривая Минковского» (см. Рисунок 1.16). Благодаря использованию явления сдвига частоты на заранее рассчитанное значение при изменении характеристик используемого предфрактала авторы разработали antennную систему 2x2 MIMO (Multiple In, Multiple Out — множественный вход, множественный выход) для работы в широком диапазоне частот.

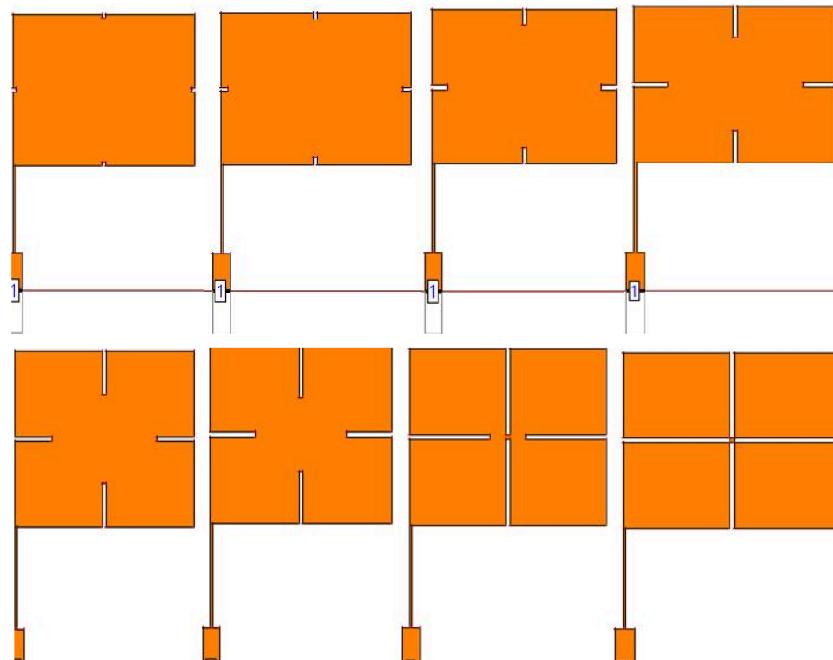


Рисунок 1.16.

Различные варианты антенн, основанной на фрактале «кривая Минковского»

В работе [50] автором методом R-функций рассчитывались волны в регулярном волноводе с поперечным сечением в виде предфрактала острова Коха. По результатам исследований различных типов колебаний (см. Рисунок 1.17) автором отмечено вырождение некоторых мод. Также автором был предложен алгоритм моделирования поверхностей гофрированных волноводов сложного поперечного сечения.

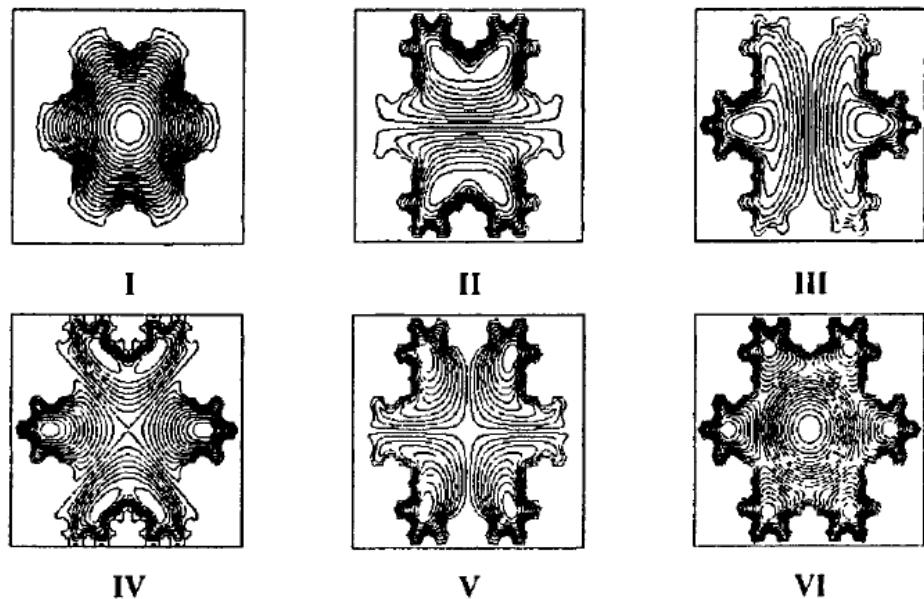


Рисунок 1.17.

Колебания различных типов, исследовавшихся для регулярного волновода с поперечным сечением в виде предфрактала «остров Коя»

Использование фрактальных конструкций в производстве МЭМС-конденсаторов переменной ёмкости с целью увеличения диапазона изменения ёмкости (см. Рисунок 1.18) было предложено в работе [51]. Согласно опубликованным данным, авторам удалось достичь диапазона изменения ёмкости в 25,3% относительно номинальной ёмкости микроконденсатора для рабочей частоты 5 ГГц.

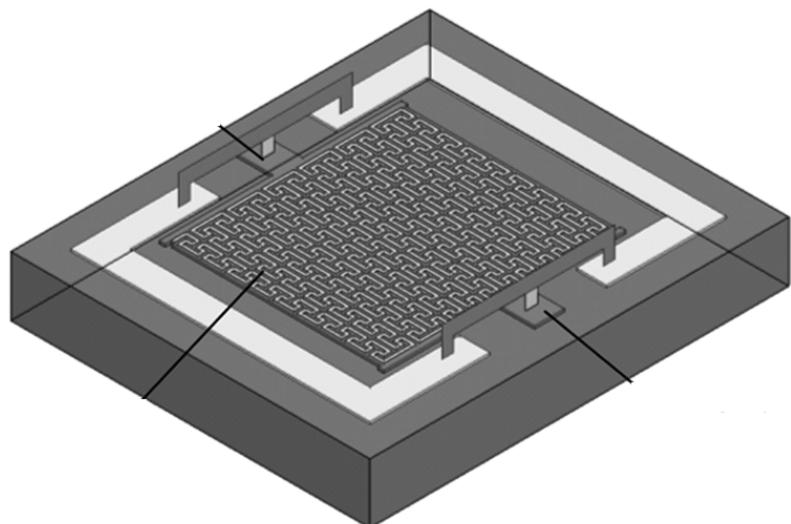


Рисунок 1.18.

Фрактальный МЭМС-конденсатор переменной ёмкости

Важно отметить, что использование основанных на фракталах конструкций электростатических МЭМС в целях повышения их радиационной стойкости ранее работы [1] не предлагалось.

Выводы по главе 1

Микроэлектромеханические системы нашли применение во многих сферах науки и техники, в том числе в космической отрасли. В космосе МЭМС подвергаются различным вредным воздействиям, в том числе — радиации. Для уменьшения расходов и сроков разработки микросистем для использования в космических аппаратах целесообразно применение компьютерного моделирования для оценки их радиационной стойкости.

Моделирование МЭМС может осуществляться по двум маршрутам. При использовании исходящего маршрута сначала моделируется система в целом, а затем — её отдельные компоненты. При моделировании по восходящему маршруту разработчик строит необходимые компоненты и задаёт их поведение с нуля, а также имеет больший контроль над моделью. Подходящий маршрут моделирования, а также компонентный или междисциплинарный тип моделирования выбираются разработчиком и могут зависеть от поставленной задачи, имеющихся вычислительных ресурсов и целей моделирования.

Основным способом моделирования микросистем является решение дифференциальных уравнений (например, уравнения Пуассона) методом конечных элементов. При этом, для расчётов используется, в основном, произвольная вычислительная сетка с повышенной плотностью в тех местах, где важна точность расчётов. Для моделирования радиационной стойкости МЭМС используется модификация метода конечных элементов — метод Монте-Карло ВСА, в котором движение тяжёлой заряженной частицы в материале представляется серией независимых столкновений между ионом и ядрами атомов материала МЭМС.

Для моделирования радиационной стойкости микросистем в настоящее время применяются различные САПР, например SRIM и Sentaurus TCAD фирмы Synopsys. Однако вследствие ряда технических и функциональных ограничений существующие САПР не позволяют реализовать интегрированный маршрут моделирования радиационной стойкости МЭМС «с нуля» и требуют использования дополнительных инструментов (например, виртуальных машин) и ручных операций по переносу данных.

Различными авторами, в том числе в [46], рассматривалось моделирование стойкости интегральных схем к воздействиям одиночных тяжёлых заряженных частиц. Предложенный подход может быть использован при моделировании радиационной стойкости МЭМС лишь частично, поскольку, в отличие от кремниевых ИС, микросистемы могут быть основаны на различных физических принципах, а также состоять из различных материалов, в том числе проводников и диэлектриков. Даже при условии ограничения рассматриваемых физических принципов до электростатического, разработка интегрального маршрута моделирования радиационной стойкости микросистем требует исследования подходов к моделированию и разработки инструментов сопряжения имеющихся программных инструментов.

Из главы 1 следует постановка задачи: разработать маршрут и алгоритмы для автоматизации моделирования радиационной стойкости электростатических микросистем к воздействию тяжёлых заряженных частиц.

В данной работе рассматриваются ФМЭМС, основанные на фракталах «Канторово множество» (параллельная фрактальная топология) и «Снежинка Коха» с усечёнными углами. Поскольку идеальные фракталы недостижимы в реальности, в работе вместо них используются соответствующие предфракталы.

Глава 2. Разработка алгоритмов моделирования характеристик микросистем при спецвоздействиях с использованием систем приборно-технологического моделирования

Как было показано в главе 1, одной из основных систем приборно-технического моделирования для изучения процессов, происходящих в электростатических микросистемах при внедрении тяжёлых заряженных частиц, является Sentaurus TCAD. Отличительной особенностью Sentaurus TCAD является поэтапный процесс моделирования с использованием различных инструментов, при котором, в общем случае, результат моделирования на текущем шаге зависит от результатов моделирования на предыдущем. Например, при изменении технологического процесса достаточно последовательно запустить последующие этапы моделирования (разбиение на сетку, приложение напряжения к электродам, внедрение тяжёлой заряженной частицы) для получения нового результата без необходимости внесения изменений в настройки других инструментов моделирования.

Инструмент моделирования также может зависеть от нескольких предыдущих инструментов. Например, использование инструмента TCLSH позволяет добавить следующему инструменту зависимость от некоторых вычисляемых параметров. Такой подход был использован в [52] для составления базы данных величины изменения тока при внедрении тяжёлых заряженных частиц в микроконденсатор под разными углами. Эти особенности САПР фирмы Sentaurus позволяют выполнять различные математические вычисления, результаты которых могут быть использованы при дальнейших шагах моделирования, в том числе выполнять расчёты по методу Монте-Карло ВСА для получения характеристик внедрения ионов в исследуемые материалы. Это, в свою очередь, позволяет реализовать интегрированный маршрут моделирования воздействий тяжёлых заряженных частиц на электростатические микросистемы в рамках одного программного комплекса.

2.1 Параллельный алгоритм компьютерного моделирования воздействия тяжёлых заряженных частиц на электростатические фрактальные микросистемы

Проведённый в Главе 1 анализ показал, что в коммерческих версиях Sentaurus TCAD отсутствуют модули и инструменты, необходимые для построения автоматизированного маршрута моделирований воздействий тяжёлых заряженных частиц на фрактальные электростатические МЭМС.

Для автоматизации маршрута компьютерного моделирования воздействия тяжёлых ионов на электростатические микросистемы был разработан модифицированный маршрут моделирования воздействия ТЗЧ на электростатические фрактальные МЭМС (см. Рисунок 2.1). Шрифтом и рамкой на Рисунке выделены шаги, поддержка которых реализована в данной работе в виде дополнительных программных модулей (расширений) для Sentaurus TCAD.



Рисунок 2.1.

Модифицированный маршрут моделирования воздействий ТЗЧ на электростатические фрактальные МЭМС при использовании Sentaurus TCAD

Разработанный маршрут отличается от существующего маршрута моделирования с использованием SRIM и Sentaurus TCAD (см. Рисунок 1.14) отсутствием операции ручного переноса данных: моделирование целиком осуществляется в Sentaurus TCAD. Благодаря этому ряд этапов возможно

выполнять параллельно, что позволяет снизить временные затраты на моделирование.

Для реализации предложенного модифицированного маршрута моделирования был разработан параллельный алгоритм компьютерного моделирования воздействия тяжёлых заряженных частиц на электростатические микросистемы. Входными данными для алгоритма является физическая модель электростатической микросистемы или её части [53]. В Sentaurus TCAD технологическое моделирование МЭМС является ручной операцией, которая требует создания топологии и описания характеристик моделируемой микросистемы.

Для компьютерного моделирования воздействия тяжёлых ионов на микросистемы в САПР Sentaurus TCAD были разработаны модели ёмкостных элементов ФМЭМС (см. Рисунок 1.3) При моделировании предполагалось, что тяжёлая заряженная частица испускается источником и может проходить сквозь все три части ёмкостного элемента (две обкладки и диэлектрик). При этом траектория частицы может отклоняться от вертикальной на произвольный угол в диапазоне от 0° до 89° .

Все последующие шаги моделирования могут использовать или не использовать в качестве входных параметров результаты предыдущих этапов (см. Рисунок 2.2) однако, вне зависимости от этого, являются независимыми с точки зрения возможности внести изменения в настройки каждого из инструментов в любой момент без необходимости проведения повторного моделирования предыдущих этапов. Например, операция разбиения на сетку не требует участия оператора в том случае, если топология, включая физические размеры электростатической микросистемы и физические размеры её отдельных областей, остаётся неизменной. При изменении других параметров технологического моделирования (например, температуры отжига, степеней легирования), повторное задание параметров инструмента SNMESH не требуется.

Алгоритм состоит из ряда предопределённых действий, для каждого из которых указан соответствующий инструмент Sentaurs TCAD. После выполнения каждого из представленных в алгоритме действий САПР выполняет сохранение промежуточного состояния, что позволяет прервать выполнение алгоритма между выполнения двух разных задач и продолжить его выполнение в другое время с сохранением всех проведённых расчётов.

Временная сложность параллельного алгоритма компьютерного моделирования воздействия тяжёлых заряженных частиц на электростатические микросистемы: $O(N^2 \log_2 N)$, где N — количество конечных элементов модели.

Шаги, показанные в центральной части алгоритма, от загрузки топологии до задания разности потенциалов (см. рисунок 2.2), выполняются с использованием встроенных в Sentaurs TCAD инструментов, которые требуют только предварительного задания ряда параметров, не требующего вычислений. Однако предфинальный шаг решения уравнений Пуассона требует указания характеристик тяжёлых заряженных частиц, используемых для внедрения в материал электростатической микросистемы. Эти характеристики не могут быть рассчитаны в Sentaurs TCAD и требуют использования другого ПО, например, SRIM. Вследствие отсутствия какой-либо интеграции между Sentaurs TCAD и сторонними программами, выполняющими расчёты по алгоритму Монте-Карло BCA, перенос результатов из этих программ в САПР фирмы Synopsys может выполняться только вручную, что является неэффективной тратой временных ресурсов.

Разработанный алгоритм включает два дополнительных этапа, выполняющихся параллельно с основным рабочим процессом моделирования и не зависящих от него — «Вычисление характеристик ионов» и «Вычисление векторов ТЗЧ». Эти этапы будут реализованы с использованием инструмента TCLSH, позволяющего реализовать произвольные алгоритмы и использовать результаты вычислений в конфигурационных файлах других инструментов.

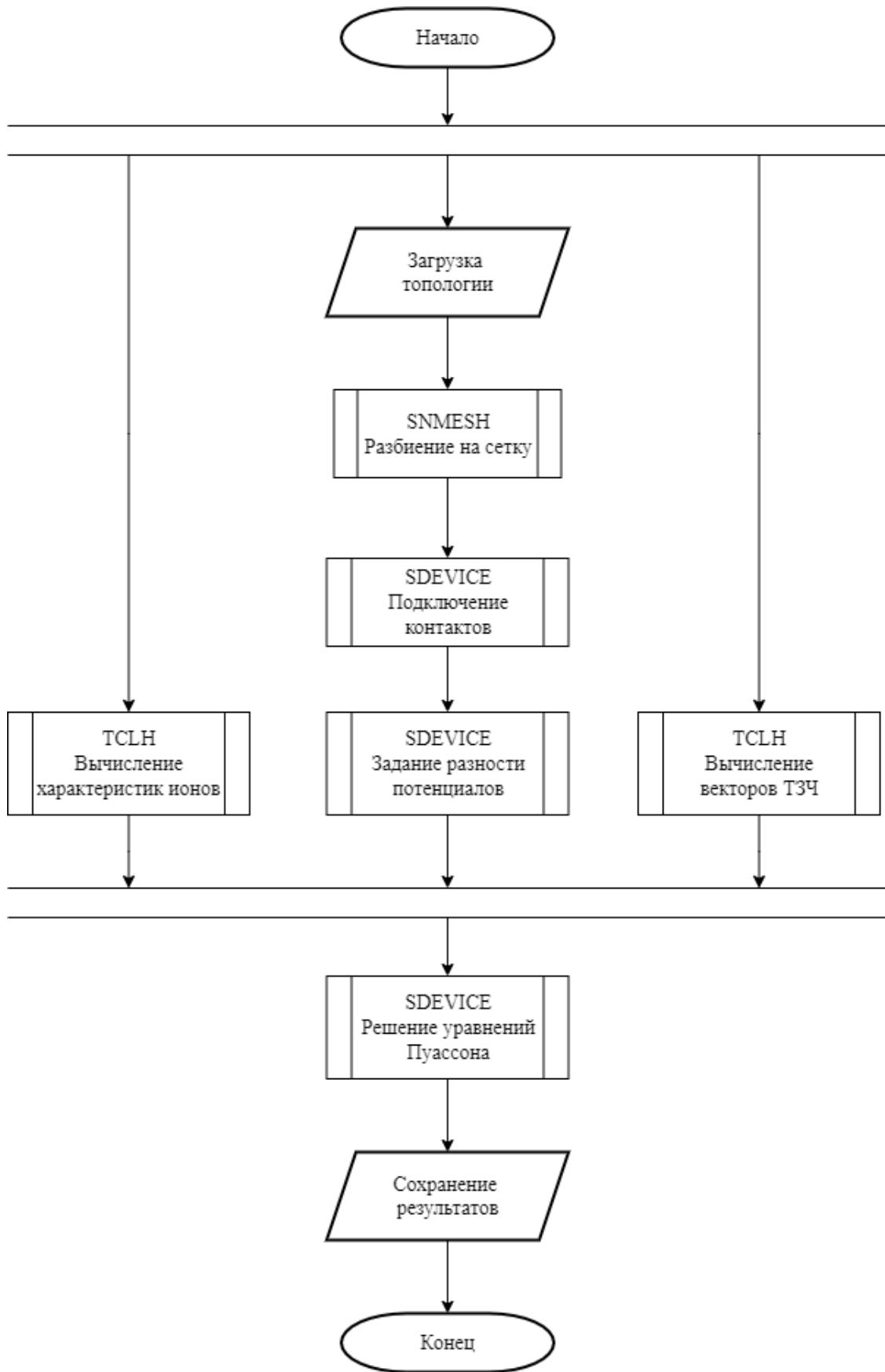


Рисунок 2.2.

Параллельный алгоритм компьютерного моделирования воздействия тяжёлых заряженных частиц на электростатические микросистемы

Описанные шаги алгоритма выполняются одновременно с основными шагами моделирования для достижения максимального снижения временных затрат на моделирование воздействий одиночных ТЗЧ на электростатические фрактальные микросистемы.

На шаге вычисления характеристик ионов программный модуль на основании заданных характеристик ионов (химический элемент и энергия) и материала микросистемы (химический состав) выполняет расчёт таких характеристик внедрения тяжёлых заряженных частиц, как характеристический радиус, значение функции энергетических потерь и ряд других. Рассчитанные значения затем могут быть использованы на шаге решения уравнений Пуассона благодаря предварительному заданию правил подстановок результатов вычислений в конфигурационный файл инструмента SDEVICE.

В зависимости от формы микросистемы и направления потока тяжёлых заряженных частиц изменение характеристик МЭМС может варьироваться от незначительного до фатального, приводящего к отказу всей микросистемы. Для определения интегральной стойкости электростатических микросистем к воздействию ТЗЧ используются методы статистического анализа, применяемые к наборам данных, содержащих зависимости характеристик МЭМС от угла внедрения ионов. Встроенные инструменты Sentaurus TCAD позволяют проводить подобные исследования только вручную, подставляя вычисленные значения векторов частиц в конфигурационный файл модуля SDEVICE.

Для автоматизации указанной процедуры в алгоритм был добавлен шаг вычисления векторов тяжёлых заряженных частиц, который выполняется параллельно с основным процессом моделирования и вычислением характеристик ионов. По завершении этого шага, результаты вычислений также используются на этапе решения уравнений Пуассона благодаря подстановке значений в конфигурационный файл инструмента SDEVICE по предварительно заданным правилам.

Алгоритм использует архитектуру параллелизации OpenMP (потоки запускаются на различных ядрах ЦПУ и имеют общий доступ к памяти) [102].

2.2 Параллельный алгоритм компьютерного моделирования воздействия тяжёлых заряженных частиц на электростатические фрактальные микроэлектромеханические системы с использованием параллельных архитектур

Чтобы снизить времязатраты на расчеты при использовании алгоритма компьютерного моделирования воздействия ТЗЧ на электростатические микросистемы можно проводить моделирование на суперкомпьютерах, но получить существенный прирост в производительности невозможно без алгоритмической оптимизации [54, 55]. Современные процессоры используют принцип «множественный поток команд, множественный поток данных» (MIMD), но программа не будет работать в многопоточном режиме, если это не было предусмотрено в процессе её разработки. Также стоит отметить, что суперкомпьютеры имеют высокую стоимость, большое энергопотребление и требуют использования специального оборудования для поддержания оптимальной температуры для их работы.

В качестве более простого и эффективного способа для уменьшения временных затрат при моделировании изменений электрических характеристик ЭФМЭМС под воздействием тяжёлых ионов предложен параллельный алгоритм компьютерного моделирования воздействия ТЗЧ на электростатические МЭМС с использованием параллельных архитектур (см. Рисунок 2.3) [56].

Алгоритм работы вычислительной сети представлен на Рисунке 2.3. Работу всей вычислительной сети обеспечивает управляющий сервер. При запуске вычислений управляющий сервер производит загрузку заданий на вычислительные узлы. Далее узлы опрашиваются сервером до готовности результата, после чего осуществляется выгрузка результатов моделирования. По завершении выполнения задачи на одном или нескольких вычислительных узлах управляющий сервер запускает на освободившемся узле новую задачу с очередным набором входных данных.

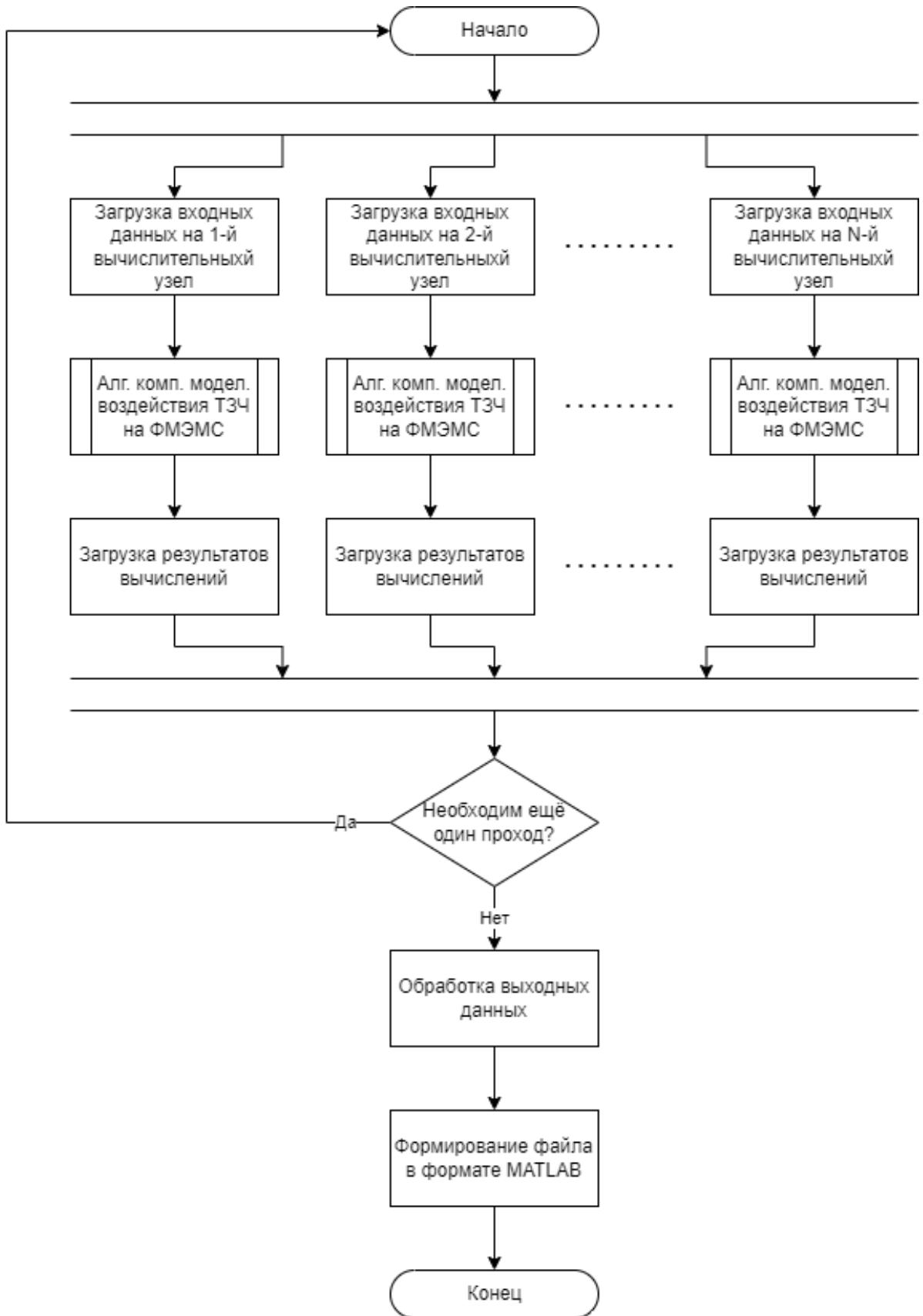


Рисунок 2.3.

Параллельный алгоритм компьютерного моделирования воздействия тяжёлых заряженных частиц на электростатические микросистемы с использованием параллельных архитектур

Временная сложность алгоритма при соблюдении условия $N \geq M$: $O\left(\left\lceil \frac{N}{M} \right\rceil\right)$,

где N — количество наборов входных данных; M — количество вычислительных узлов.

После завершения необходимого количества проходов управляющий сервер выполняет обработку всех полученных выходных данных и в результате формирует файл в формате, поддерживаемым математическим программным обеспечением MATLAB. Сформированный файл может быть загружен на рабочую станцию и использован для дальнейшего анализа радиационной стойкости анализируемой микросистемы.

Алгоритм предполагает работу с распределённой вычислительной сетью. Составными частями вычислительной сети являются вычислительные узлы, управляющий сервер, рабочие станции, промежуточные сетевые устройства.

Алгоритм использует гибридную архитектуру параллелизации MPI + OpenMP (задачи запускаются на различных ЦПУ и не обмениваются данными, каждая задача содержит потоки, запускаемые на различных ядрах и имеющие общий доступ к памяти).

На Рисунке 2.4 показана возможная структурная схема вычислительной сети. Данная схема является одним из вариантов построения сети и при необходимости может быть модифицирована, исходя из имеющихся вычислительных ресурсов и поставленных задач. Например, может быть объединена функциональность управляющего сервера и рабочей станции в одном устройстве. Для корректного функционирования такой топологии необходимо, чтобы рабочая станция во время всего процесса вычисления была включена и доступна.

Для моделирования воздействий ионов на МЭМС используются вычислительные узлы, которые могут быть физическими устройствами или виртуальными машинами и контейнерами, работающими на гипервизорах. Эти узлы могут быть подключены к локальной сети или взаимодействовать через Интернет с помощью VPN. Главное требование — доступность управляющего сервера к вычислительному узлу по имени хоста или IP-адресу.

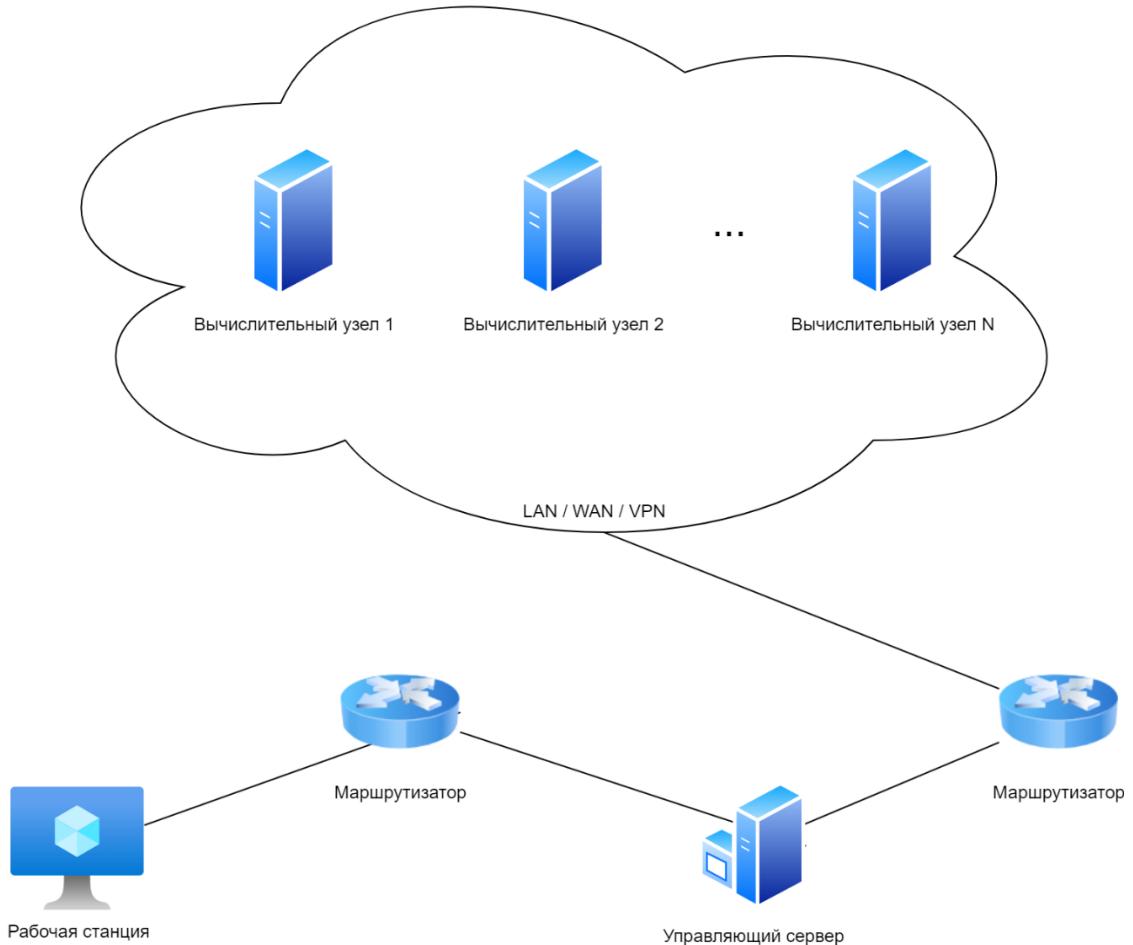


Рисунок 2.4.

Пример топологии вычислительной сети

Ограничением для количества вычислительных узлов является доступная вычислительная мощность и количество лицензий на программное обеспечение. Максимальная эффективность кластера достигается, если количество задач кратно количеству вычислительных узлов. В противном случае потребуется дополнительный проход алгоритма, в результате которого некоторые вычислительные узлы будут простаивать.

Для обеспечения связи между всеми устройствами сети, включая вычислительные узлы, управляемый сервер и рабочую станцию, используется шифрованный протокол SSH (secure shell, «безопасная оболочка»). Данный протокол обеспечивает стабильную работу алгоритма и безопасность передачи данных, что актуально при работе в незащищенных сетях. Преимуществом протокола SSH является поддержка наиболее распространёнными

операционными системами, включая все дистрибутивы Linux, Windows и macOS. Благодаря этому вычислительная сеть может быть гетерогенной, т. е. состоять из узлов, работающих на базе различных ОС. Однако, при выборе платформы необходимо учитывать ограничения, которые могут быть заданы используемым программным обеспечением и САПР [57, 58].

2.3 Алгоритм компьютерного моделирования стойкости распределённых электростатических фрактальных микросистем к воздействиям тяжёлых заряженных частиц

Распределённые МЭМС — это массив одинаковых микросистем, выполняющих одну и ту же задачу, но распределённых в пространстве. На Рисунке 2.5 в качестве иллюстрации показана структурная схема распределённого МЭМС-гироскопа. Сбор, усреднение и анализ данных с распределённых гироскопов (а также других устройств, например акселерометров) в космических аппаратах позволяет получать более точную информацию о текущем движении и ориентации космического аппарата.

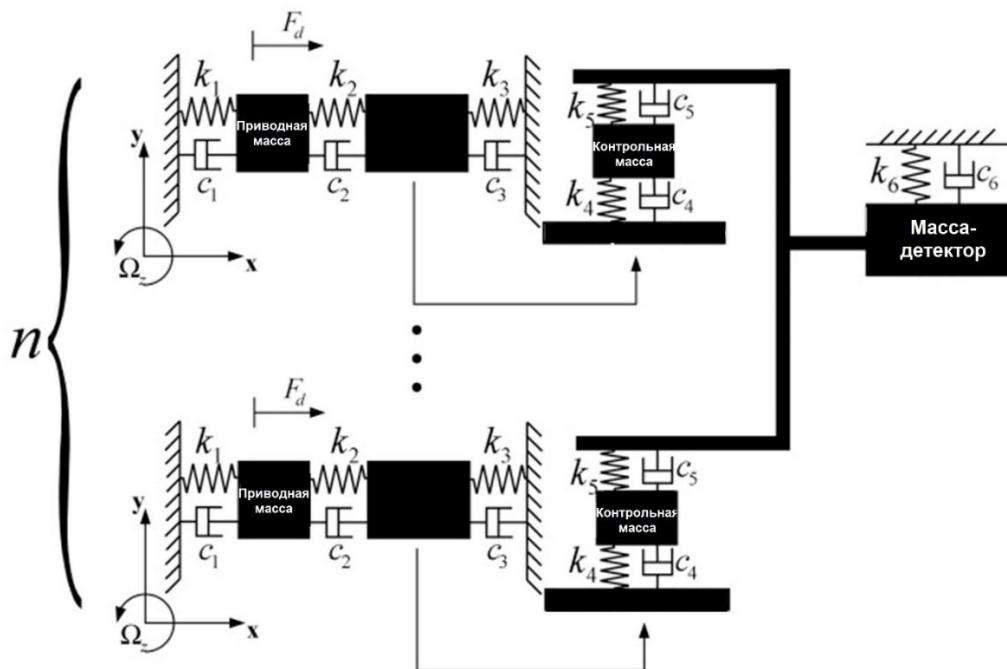


Рисунок 2.5.

Структурная схема распределённого МЭМС-гироскопа

Для компьютерного моделирования стойкости распределённых фрактальных микросистем к воздействиям тяжёлых заряженных частиц был разработан следующий алгоритм (см. Рисунок 2.6) [59].

В качестве исходных данных разработанный алгоритм использует базу данных, содержащую зависимости изменения тока от угла падения одной или нескольких тяжёлых заряженных частиц. База данных получена с использованием алгоритма компьютерного моделирования воздействия тяжёлых заряженных частиц на электростатические микросистемы [60].

Используя готовые зависимости, алгоритм случайным образом генерирует расположение заданного количества ёмкостных элементов микросистем, после чего также случайным образом генерируются векторы падения тяжёлых заряженных частиц. Затем алгоритм проходит по списку всех сгенерированных ёмкостных элементов МЭМС и анализирует наличие попаданий в них тяжёлых ионов. В случае, если с данным элементом существует пересечение одного или нескольких векторов ТЗЧ, алгоритм извлекает из базы данных значение тока, соответствующее конкретному углу падения тяжёлой заряженной частицы и их количеству.

Полученные данные сохраняются в файл в формате, совместимом с MATLAB, для дальнейшего анализа с использованием стороннего программного обеспечения. Также алгоритм предусматривает визуализацию результатов в виде расположения ёмкостных элементов микросистем в пространстве и векторов пролёта тяжёлых ионов.

Описанный алгоритм пригоден при анализе устойчивости распределённых МЭМС к попаданиям ТЗЧ с использованием метода Монте-Карло, поскольку большом числе итераций алгоритма (тысячи и десятки тысяч) случайные входные данные приобретают вид дискретного равномерного распределения.

Временная сложность алгоритма составляет $O(N)$, где N — количество векторов ТЗЧ.

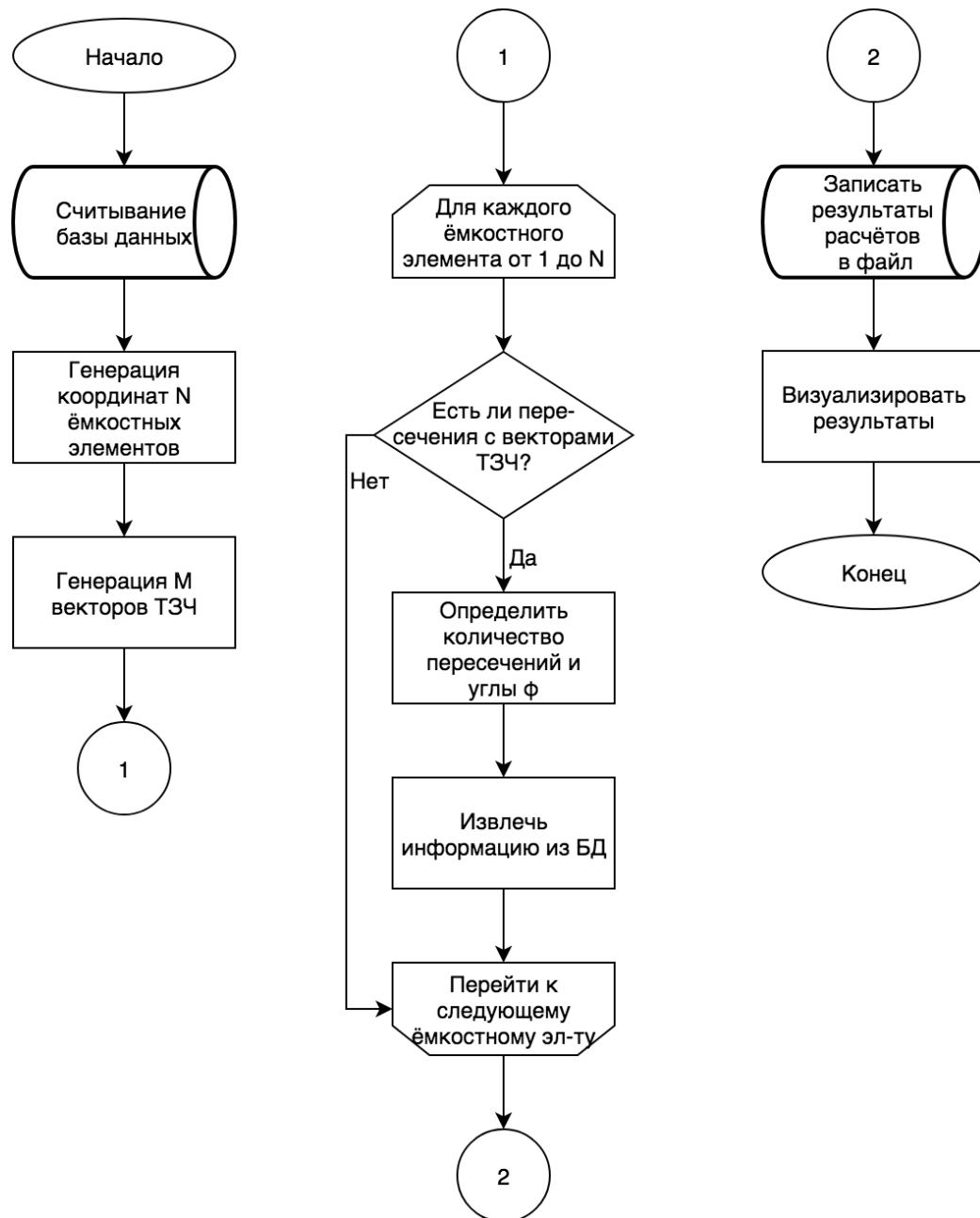


Рисунок 2.6.

Алгоритм компьютерного моделирования стойкости распределённых микросистем к воздействиям тяжёлых заряженных частиц

2.4 Физические модели

Операция вычисления характеристик ионов требует описания отдельных физических моделей материалов, используемых при моделировании электростатических МЭМС [61, 62, 63]. Физика столкновений основана на

подходах, используемых в SRIM и других подобных программах, и включает аппроксимацию случайных фаз (RPA), бинарную аппроксимацию коллизий (BCA) и центральную потенциальную аппроксимацию (CPA). Алгоритм рассчитывает случайные траектории ионов для получения статистически значимых данных. Каждая траектория соответствует частице (иону или смещённому атому материала цели) с определёнными стартовой позицией, направлением и падающей или основной энергией. Путь частицы отслеживается как случайная последовательность прямолинейных путей свободного полёта, каждый из которых заканчивается столкновением ядер частицы и атомов материала, в который она была внедрена. В момент столкновения частица изменяет направление движения и/или теряет энергию в результате ядерного (упругого) или электронного (неупругого) взаимодействия. Энергия и направление частицы пересчитываются согласно закону сохранения энергии и импульса.

Вероятность энергетических потерь зависит от атомной плотности материала цели, в то время как ядерная и электронная останавливающая силы полагаются независимыми от плотности. Также, точечные дефекты могут возникать при упругих столкновениях. Наконец, внедрённый ион останавливается, когда его энергия падает ниже определённого значения E_{min} или частица покидает пределы цели.

Для упругих столкновений классический угол атомного рассеяния Θ_{CM} в центре масс координатной системы может быть найден из интеграла рассеяния [35]:

$$\Theta_{CM} = \pi - 2 \int_{r_0}^{\infty} \frac{p \, dr}{r^2 \sqrt{1 - \frac{V(r)}{E_C} - \left(\frac{p}{r}\right)^2}}, \quad (2.1)$$

где p — прицельный параметр (перпендикулярная дистанция между траекторией внедрённой частицей и центром поля, созданного целью);

r_0 — ближайшее расстояние r между двумя ядрами в процессе столкновения;

$V(r)$ — оценочный потенциал межатомного взаимодействия;

E_C — кинетическая энергия атома в пределах центра масс.

Интеграл (2.1) не может быть вычислен аналитически в общем случае, а потому необходимо применять затратное по времени численное интегрирование. Для повышения эффективности вычислений может быть использована аналитическая формула аппроксимации или таблица с предварительно рассчитанными значениями. Потенциал взаимодействия между двумя атомами $V(r)$ — это оценочный, отталкивающий кулоновский потенциал, описываемый безразмерными оценочными функциями, такими, как потенциал Томаса-Ферми, потенциал Ленса-Йенсена, потенциал Мольера, потенциал Бора или потенциал Зиглера-Бирсака-Литтмарка (потенциал ZBL). Вдобавок, энергия отскока атомов материала цели вследствие упругих ядерных столкновений может быть оценена методом ВСА между двумя заряженными частицами, вовлечёнными в один и тот же процесс рассеяния.

Смещения и точечные дефекты могут быть смоделированы с использованием аналитически модифицированной модели Кинчина-Пиза или полнокаскадной симуляции. Модель Кинчина-Пиза отслеживает только изначальную траекторию иона и упрощает процесс генерации дефектов, исключая отслеживание субкаскадных процессов, вызванных смещением атомов материала цели. После каждого упругого столкновения в модели Кинчина-Пиза применяется эмпирическая формула Норгетта-Робинсона-Торренса (NRT) для оценки суммарного количества смещений и дефектов в последующих каскадных процессах:

$$N_d = \begin{cases} 0, & E_v < E_d \\ 1, & E_d \leq E_v < \frac{2E_d}{0,8} \\ \frac{0,8E_v}{2E_d}, & E_v \geq \frac{2E_d}{0,8} \end{cases} \quad (2.2)$$

где E_v — размер кинетической энергии иона, поглощённый атомом цели;

E_d — пороговая энергия смещения.

Важно отметить, что формула (2.2) даёт достаточно точную оценку количества смещений и дефектов в одноатомных материалах и теряет точность в многоатомных материалах.

В отличие от модели Кинчина-Пиза, полнокаскадная модель отслеживает весь каскад траекторий как внедрённого иона, так и смещённых из-за столкновений атомов. При использовании полнокаскадной модели считается, что тяжёлая заряженная частица с атомным числом Z_1 и энергией E сталкивается с атомом цели с атомным числом Z_2 . После столкновения энергия иона становится E_1 , а атом цели приобретает энергию E_2 . В зависимости от соотношения энергий, столкновение иона и атома может привести к различным результатам:

1. $E_2 > E_d$. Атом приобрёл достаточно энергии, чтобы покинуть кристаллическую решётку. Энергетические потери E_L вычитаются из энергии атома E_2 , после чего должен быть рассмотрен последующий каскад столкновений. В общем случае величина энергетических потерь E_L может быть принятой равной энергии связи между атомами материала цели.
2. $E_1 > E_d$ и $E_2 > E_d$. Образуется вакансия в кристаллической решётке цели.
3. $E_2 < E_d$. Атом материала цели остаётся на своём месте в кристаллической решётке, энергия E_2 высвобождается в виде фононов.
4. $E_1 < E_L$ и $E_2 > E_d$. Ион замещает атом материала. Если $Z_1 \neq Z_2$, возникает дефект примесного атома замещения.
5. $E_1 < E_{min}$ и $E_2 < E_d$. Ион становится примесным атомом внедрения.

2.5 Алгоритмы расчёта характеристик внедрения ионов

На Рисунке 2.7 представлен алгоритм расчёта характеристик внедрения ионов с использованием модели Кинчина-Пиза.

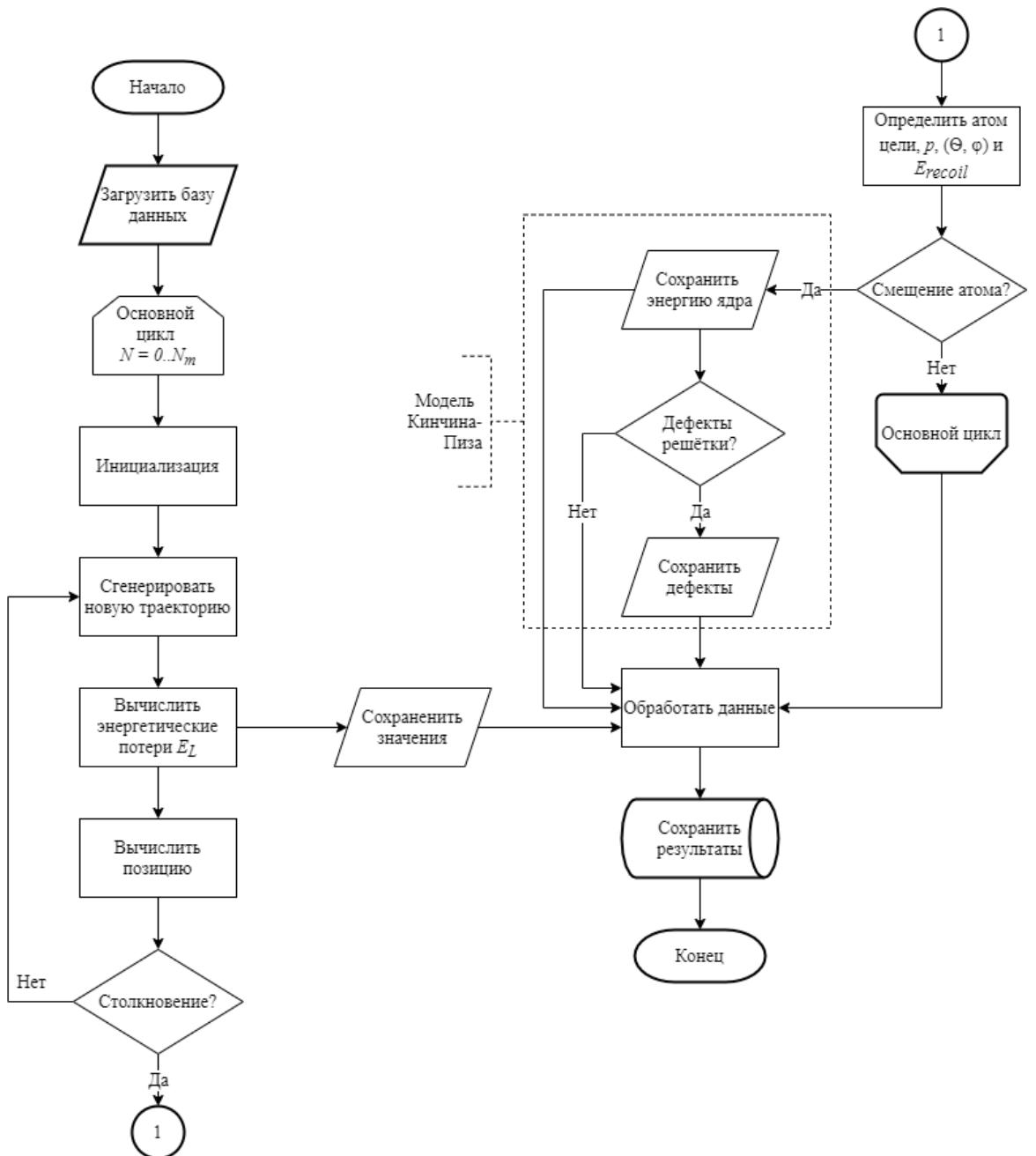


Рисунок 2.7.

Алгоритм расчёта характеристик внедрения ионов с использованием модели Кинчина-Пиза. N_m — число итераций основного цикла; p — прицельный параметр, (Θ, φ) — угол рассеяния, E_{recoil} — энергия столкновения иона и атома

Работа алгоритма начинается с загрузки базы данных базовых параметров ионов, используемых для внедрения, и атомов материала цели. Алгоритм выполняет N_m независимых итераций; чем выше число N_m — тем выше точность результата. На каждой итерации алгоритм генерирует новую траекторию и вычисляет потенциальные энергетические потери иона, которые сохраняются

для последующего анализа. Далее алгоритм вычисляет позицию тяжёлой заряженной частицы после внедрения в материал и анализирует, произошло ли столкновение иона с атомом цели.

Если столкновения не произошло, выполняется следующая итерация цикла. В противном случае анализируется, с каким атомом цели произошло столкновение и вычисляются прицельный параметр p , энергия смещения атома E_{recoil} , и угол рассеяния Θ . В случае, если энергии E_{recoil} недостаточно для смещения атома с его места (количество дефектов определяется по модели Кинчина-Пиза) в кристаллической решётке, цикл переходит к следующей итерации. Если энергии достаточно, алгоритм сохраняет рассчитанные характеристики и анализирует, привело ли смещение атома цели к возникновению дефекта кристаллической решётки. Эта информация также сохраняется для последующего анализа. Результатом работы алгоритма являются статистические данные о распределении глубин проникновения тяжёлых заряженных частиц определённого типа в материал.

На Рисунке 2.8 представлен алгоритм расчёта характеристик внедрения ионов с использованием полнокаскадной модели.

Алгоритм расчёта характеристик внедрения ионов с использованием полнокаскадной модели в основе похож на алгоритм, использующий модель Кинчина-Пиза, в частности, неизменными остаются начальные шаги итераций основного цикла, включая расчёт позиций, вычисление энергетических потерь и анализ столкновений. Однако, в отличие от модели Кинчина-Пиза, при использовании полнокаскадной модели, в случае обнаружения отскока атома, выполняется расчёт каскадных эффектов, которые анализируют наличие полных смещений атомов из их мест в кристаллической решётке, а также наличие объёмных смещений.

При этом в рамках основного цикла выполняются циклы расчётов поверхностного распыления и цикл расчёта объёмных смещений вплоть до итерации, на которой у иона не остается достаточно энергии, чтобы вызвать смещение атома материала с его места в кристаллической решётке. В таком

случае расчёт следующей позиции (направления) тяжёлой заряженной частицы осуществляется случайным образом, и работа алгоритма начинается заново.

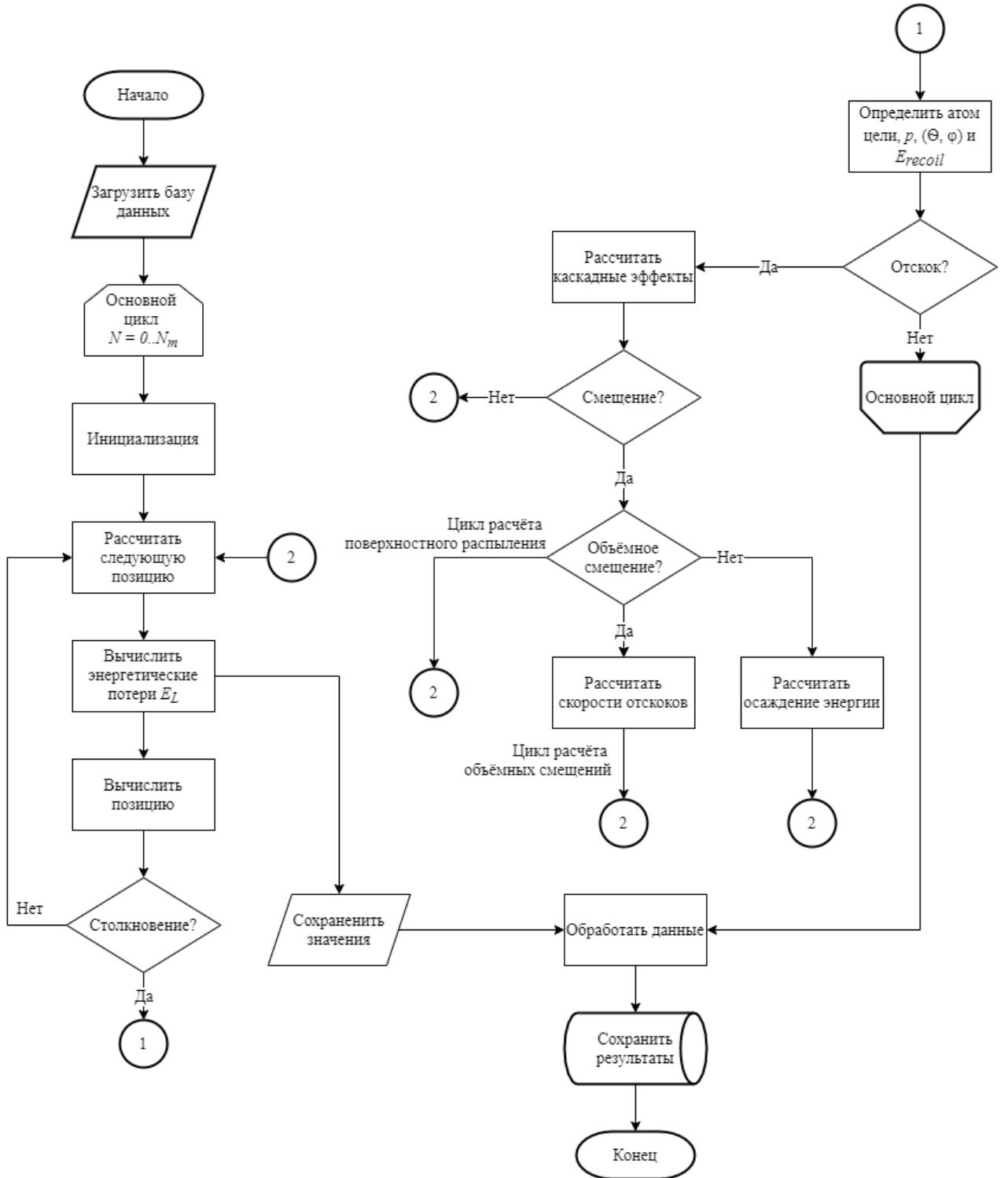


Рисунок 2.8.

Алгоритм расчёта характеристик внедрения ионов с использованием полнокаскадной модели. N_m — число итераций основного цикла; p — прицельный параметр, (Θ, φ) — угол рассеяния, E_{recoil} — энергия столкновения иона и атома

2.6 Аппроксимационный подход: полный и упрощённый цифровой двойник

Цифровые двойники — следующий шаг в разработке на основе моделирования систем. Концепция цифрового двойника появилась еще в 2000-х и заключается в том, что физический объект имеет цифровую копию и обменивается с ней определенным набором информации [64, 65, 66, 67, 68]. Один из способов применения цифровой копии — сохранение информации, полученной от физического оригинала. Для передачи данных используются специальные датчики, а передача может осуществляться как в режиме реального времени, так и оффлайн. Цикл жизни цифровой копии повторяет жизненный цикл физической сущности: создание, тестирование, доработка, эксплуатация и утилизация. При этом на этапе утилизации цифровая копия может быть отправлена в архив или использоваться для усовершенствования физического объекта. Производители различных изделий могут исследовать свой продукт и вносить необходимые корректировки на любом этапе жизненного цикла физического объекта, используя данные, полученные от цифровой копии.

Один из способов использования цифровых двойников — использование их в качестве прототипа будущего продукта [69, 70, 71], что позволяет производителям проводить тестирование виртуальной копии, вместо того чтобы каждый раз создавать физический прототип, что значительно экономит средства. Концепция цифровых двойников подразумевает их классификацию на определенные группы, о которых будет рассказано далее.

Digital Twin Instance (DTI) — двойник реального физического объекта. Представляет собой виртуальную копию реального объекта, которая содержит информацию обо всех действиях, выполненных объектом, таких как сервисное обслуживание, поломки и замены компонентов.

Digital Twin Prototype (DTP) — двойники-прототипы. Является виртуальной моделью будущего устройства, которое в данный момент не существует. Может содержать в себе сведения, касающиеся производства

модели, перечень необходимых материалов и другую информацию для создания реальной физической копии.

Digital Twin Aggregate (DTA) — это совокупность цифрового двойника DTI и реального объекта, объединённая в одну систему для эффективного управления и обмена информацией.

Digital Twin Environment (DTE) — виртуальное окружения для работы с цифровыми двойниками, симуляции и компьютерного моделирования.

К числу преимуществ использования цифровых двойников относятся:

- повышение качества физических объектов, поскольку вся их история хранится в общем хранилище в виде цифровых двойников;
- возможность непрерывного совершенствования физического объекта при сопровождении его жизненного цикла цифровым двойником;
- проведение превентивных мер по техническому обслуживанию на основании хранящихся в цифровом двойнике данных о состоянии физического объекта;
- значительное снижение затрат на натурные испытания перед отправкой физического объекта в серийное производство благодаря компьютерному моделированию с использованием цифровых двойников.

Несмотря на большое количество очевидных преимуществ, использование цифровых двойников также обладает и рядом недостатков:

- в случае, если требуется обмен данными между физическим объектом и цифровым двойником в режиме реального времени, необходимо наличие устойчивого канала связи, например через Интернет;
- также, в случае передачи данных через общедоступные каналы связи, необходимо обеспечить высокий уровень защиты информации;
- в ряде случаев для создания и работы с цифровыми двойниками требуется дорогостоящее оборудование и программное обеспечение;
- в ряде случаев потребуется дополнительное обучение персонала и/или привлечение сторонних специалистов (если для построения и

использования цифровых двойников необходимы специальные компетенции).

В данной работе используются упрощённые цифровые двойники электростатических фрактальных микросистем, виртуальные копии которых содержат только ключевые характеристики, необходимые для компьютерного моделирования. Например, цифровые двойники МЭМС могут быть использованы для оценки технологических ошибок или влияние конкретных тяжёлых заряжённых частиц на электрические характеристики устройства. Благодаря указанным особенностям цифровые двойники упрощают параметрическое макромоделирование, которое широко используется в инженерной практике.

Для создания цифрового двойника электростатической микросистемы её электрические характеристики при внедрении тяжёлых заряженных частиц были многократно промоделированы для различных углов внедрения ионов в материал МЭМС. Полученные результаты моделирования были объединены в базу данных, поля которой содержат информацию о токе, протекающем через микросистему при попадании в неё ТЗЧ, а также характеристики ТЗЧ (см. Таблицу 2).

Для удобства просмотра и редактирования базы данных в ручном режиме все данные хранятся в текстовом виде и преобразуются в численный вид при обработке данных разработанным программным обеспечением.

Исходными данными для описанной базы данных служат результаты моделирования, полученные с использованием алгоритма компьютерного моделирования воздействия тяжёлых заряженных частиц на электростатические микросистемы (см. Рисунок 2.2). На Рисунке 2.9 показан график зависимости протекающего через микросистему тока при воздействии на микросистему ионом неона с энергией 10 МэВ, построенный из сохранённых в базе данных исходных значений, полученных для различных 89 углов.

Таблица 2.

Структура базы данных

Поле	Описание	Формат данных	Примечание
Номер	Порядковый номер записи базы данных	Целое число	
Форма микросистемы	Форма микросистемы в численной форме	Целое число	1 — плоская форма обкладок; 2 — фрактальная форма «Канторово множество»; 3 — фрактальная форма «Снежинка Коха»; 4 и далее — резерв
Количество ТЗЧ	Количество ионов, внедрённых в материал микросистемы	Целое число	
Угол	Угол между траекторией иона и нормалью к поверхности МЭМС, выраженный в градусах	Целое число	Допустимый диапазон от 0° до 89°
Ток	Значение пика тока, вызванного внедрением ТЗЧ в материал микросистемы, выраженный в амперах	Число с плавающей запятой	Хранится в экспоненциальной форме записи

Однако использование «полного» цифрового двойника имеет недостатки, связанные с высокой вычислительной сложностью [72, 73, 74]. Процесс моделирования для заполнения базы данных и получения приведённого на Рисунке 2.9 графика может занимать время от одних до нескольких суток в зависимости от производительности рабочей станции.

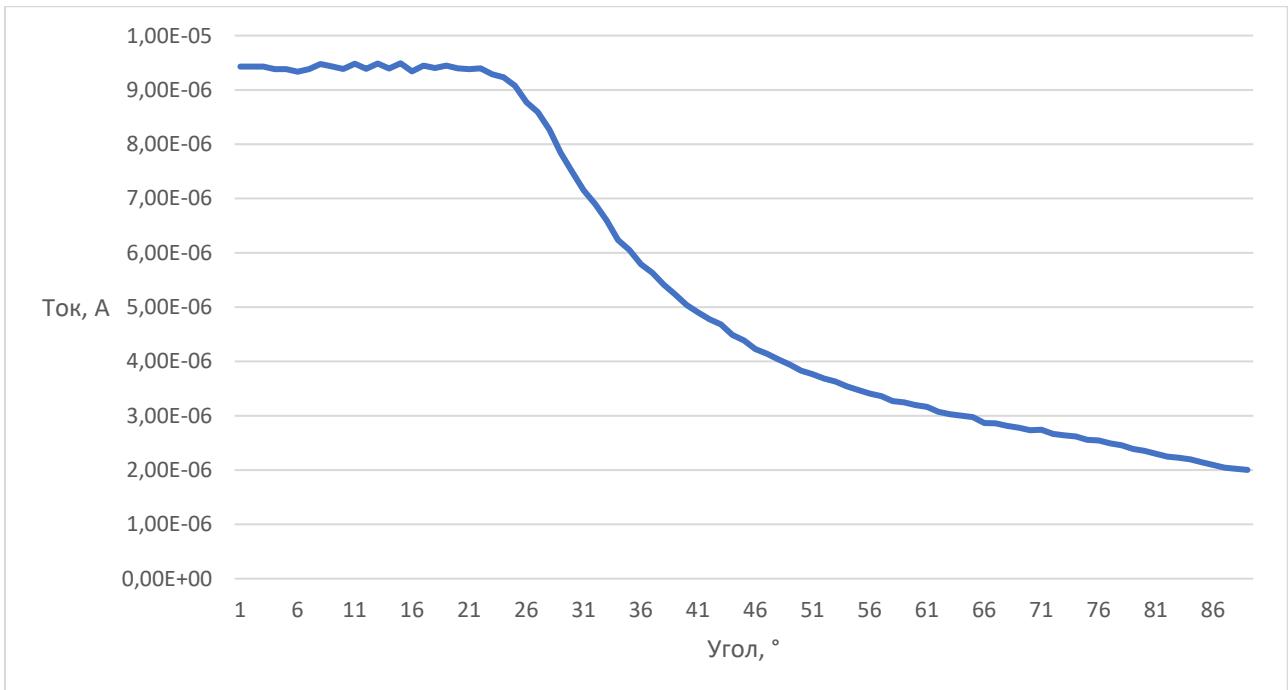


Рисунок 2.9.

График зависимости протекающего через микросистему с плоской топологией тока от угла внедрения иона неона с энергией 10 МэВ

В случае, когда необходимо быстро произвести моделирование для предварительной оценки устойчивости микросистем различной конструкции к различным типам тяжёлых заряженных частиц такие временные затраты являются неприемлемыми. Для снижения временных затрат на моделирование предлагается использовать упрощённые цифровые двойники микросистем.

Идея упрощённого цифрового двойника МЭМС заключается в использовании параметрического моделирования совместно с аппроксимационным подходом. При использовании упрощённых цифровых двойников полноценное моделирование внедрения иона в материал микросистемы производится только для некоторых углов в зависимости от заданного шага. Значения изменения протекающего через МЭМС тока для промежуточных углов могут быть получены путём аппроксимации данных, полученных в результате моделирования с использованием модели Кинчина-Пиза и полнокаскадной модели. Такой подход позволяет снизить временные

затраты прямо пропорционально размеру шага между углами внедрения иона, для которых производится полный цикл моделирования.

Ключевыми параметрами для такого упрощённого цифрового двойника микросистемы являются шаг между «ключевыми» углами и функция аппроксимации. С увеличением шага между «ключевыми» углами уменьшаются временные затраты на получение зависимости протекающего через МЭМС тока от угла внедрения ТЗЧ, но также снижается и точность модели упрощённого цифрового двойника.

Выводы по главе 2

Sentaurus TCAD является мощным средством приборно-технического моделирования, однако в ряде случаев требует использования сторонних инструментов для расчёта различных параметров, задаваемых в конфигурационных файлах. Для полной автоматизации процесса моделирования изменений характеристик ЭФМЭМС под воздействием тяжёлых ионов был разработан алгоритм компьютерного моделирования воздействия тяжёлых заряженных частиц на электростатические микросистемы, показанный на Рисунке 2.2. Помимо использования встроенных инструментов САПР, в алгоритме предлагается разработка программных модулей для расчёта характеристик ионов и вычисления их векторов, что позволит выполнять запуск расчётов для различных ионов без применения стороннего ПО и ручных операций.

К достоинствам разработанного алгоритма следует отнести распараллеливание не зависящих друг от друга вычислений, а также гибкость конфигурации входных параметров, позволяющих не производить вычисления по всему алгоритму заново при изменении таких параметров, как тип, энергия и вектор иона.

Была описана физическая модель внедрения ионов в материалы электростатических микросистем, используемая при вычислениях по алгоритму Монте-Карло ВСА (бинарная аппроксимация коллизий). Моделирование

смещений и точечных дефектов, влияющих на характеристики МЭМС, может осуществляться с использованием упрощённой модели Кинчина-Пиза или с использованием модели полнокаскадной симуляции. Преимуществом модели Кинчина-Пиза является простота, а недостатком — низкая точность при внедрении ионов в многоатомные материалы. Модель полнокаскадной симуляции является более точной, но и более сложной в реализации и более затратной с точки зрения времени вычислений.

Были предложены алгоритмы, реализующие вычисления по модели Кинчина-Пиза и по модели полнокаскадной симуляции в качестве программного модуля для Sentaurus TCAD.

Для снижения временных затрат при параметрическом моделировании влияния ТЗЧ на электростатические микросистемы предложено использование упрощённых цифровых двойников МЭМС, использующих аппроксимационный подход для вычисления электрических характеристик устройств наряду с традиционным подходом к моделированию с использованием алгоритма Монте-Карло ВСА.

Глава 3. Алгоритмы моделирования электростатических фрактальных микроелектромеханических систем при учете технологических погрешностей

3.1 Технологическое моделирование электростатических микроелектромеханических систем

Моделирование в TCAD Sentaurus осуществляется по маршруту «снизу вверх» путём использования различных встроенных инструментов, расположенных в главном окне по порядку справа налево. Для моделирования длительных процессов (таких, как прохождение тяжёлой заряженной частицы через полупроводниковую структуру), сначала требуется создать её компьютерную модель путём описания шагов технологического процесса производства микросистемы в модуле sprocess (см. Рисунок 3.1 и Рисунок 3.2). Также необходимо выполнить ряд промежуточных действий, включая разбиение модели на расчётную сетку, получение конечно-элементной модели в модуле snmesh и подключение контактов к электродам [75].

Инструмент sdevice (Sentaurus Device) является инструментом для компьютерной симуляции общего назначения, конкретный результат работы которого определяется текстовыми конфигурационными файлами с описанием свойств материалов и целей моделирования. Например, описание характеристик моделируемой тяжёлой заряженной частицы осуществляется в подсекции HeavyIon секции Physics конфигурационного файла sdevice. Данная подсекция включает следующие параметры:

- Direction — направление ТЗЧ, задаваемое в виде вектора;
- Location — расположение начальной точки вектора;
- Time — время внедрения ТЗЧ относительно начала моделирования;
- Wt_hi — характеристический радиус ТЗЧ;
- LET_f — значение функции энергетических потерь.

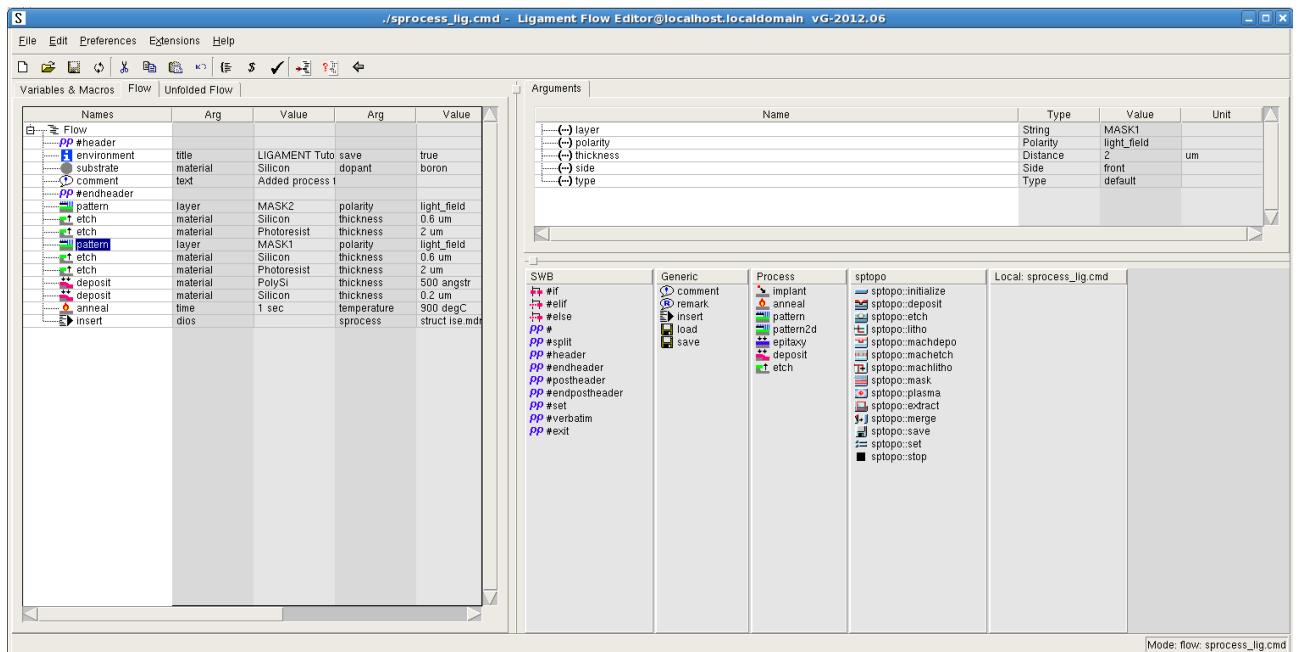


Рисунок 3.1.

Описание технологического процесса производства ёмкостного элемента

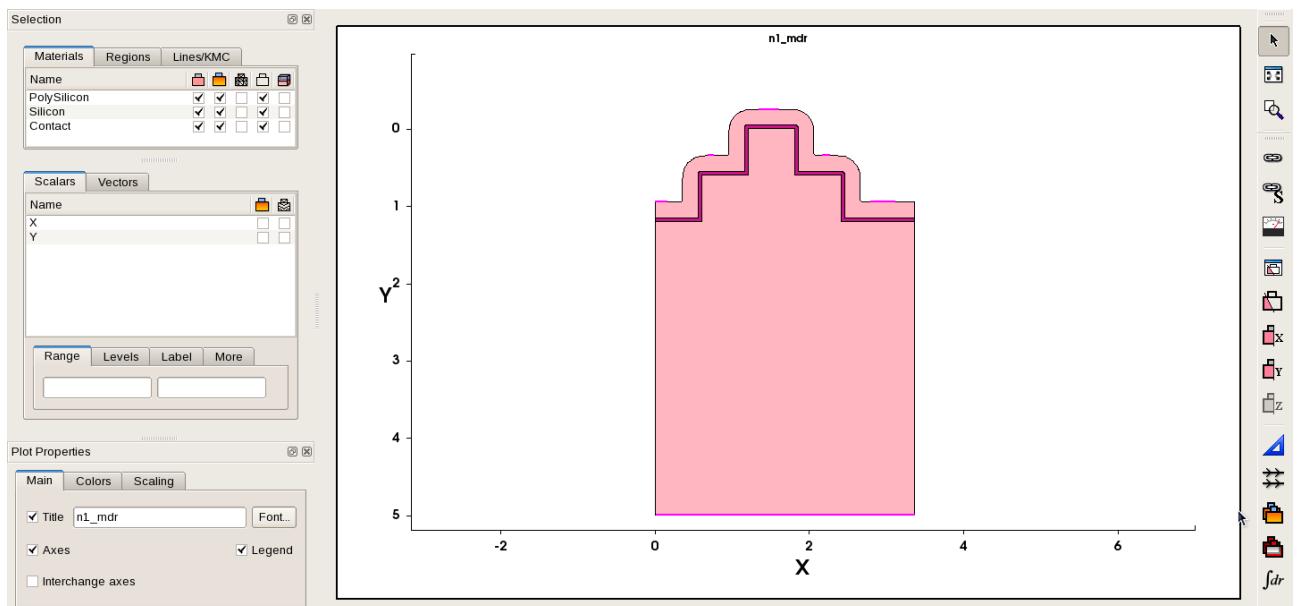


Рисунок 3.2.

Компьютерная модель ёмкостного элемента с параллельной фрактальной формой

3.2 Технологический процесс производства микроэлектромеханических систем

В настоящее время микроэлектромеханические системы создаются с помощью двух основных технологий: объемной и поверхностной обработки [76, 77, 78, 79]. Объемная технология производства трёхмерных МЭМС на кремниевой подложке с помощью анизотропного травления является более сложным процессом, которое в качестве масок использует пленки из диоксида кремния, нитрида кремния, хрома и золота. К минусам метода относится тот факт, что геометрия результирующей микроструктуры зависит от характеристик кристаллической структуры подложки. Этот недостаток может быть устранён путём применения сухого глубокого анизотропного травления, либо благодаря соединению двух подложек с МЭМС-структурами и/или микросхемами, что позволяет создавать сложные трёхмерные элементы микросистем. К настоящему времени современные модификации объемной технологии позволяют применять двухкристальные и трёхкристальные конструкции, позволяющие значительно упростить производство и обеспечить возможность быстрого внесения изменений в конструкцию [80, 81].

Создание сложных интегрированных МЭМС-структур осуществляется с помощью поверхностной микрообработки путём использования слоёв материала-донора. Важную роль механической основы слоёв материала-донора и структурного материала выполняет подложка [82]. Жертвенный материал, используемый для создания структуры, удаляется химическим растворителем, что позволяет освободить подвижный элемент. Для формирования структуры широко применяется поликремний, а для жертвенного материала — диоксид кремния, поскольку поликремний может быть подвергнут отжигу при высокой температуре для создания механически напряженных или безнапряженных слоев. Контроль механических напряжений в двуокиси кремния является сложным, поэтому SiO_2 используется в качестве жертвенного материала. После создания МЭМС-структуры с помощью стандартных полупроводниковых

методов могут быть добавлены электронные устройства. Описанные шаги позволяют сформировать микроэлектромеханическую структуру в центре кристалла, а электронные компоненты микросхем — по его периферии, после чего защитить микросистему кристаллом-колпачком.

Однако данный метод является достаточно трудоёмким [83]. Если процесс изготовления начинается с МЭМС-структур, то может быть нарушена правильность геометрии подложки, что повлияет на дальнейшее формирование КМОП-элементов. Если же начать производство с КМОП-схемы, то при дальнейшем создании структуры МЭМС электронные компоненты могут не выдержать воздействия высоких температур.

Одним из вариантов преодоления проблемы является изготовление элементов микросистем в канавках, которые предварительно вытравливаются на поверхности подложки. Затем на неё наносится слой диоксида кремния и производится механо-химическая полировка. На финальном этапе осуществляется изготовление микросхемы по классической КМОП-технологии, после чего МЭМС-структуры освобождаются [84].

Альтернативой является модульный подход, при котором металлизация КМОП-схемы осуществляется не алюминием, а вольфрамом. Благодаря этому схема становится способна выдержать высокие температуры, необходимые при изготовлении структур МЭМС [85]. Другой способ, не требующий изготовления канавок путём травления — использование технологии микролитья. Данная технология позволяет сформировать микроструктуры с помощью литейных форм только в тех местах, где они нужны. Преимуществом данного метода является отсутствие необходимости в операции травления [86], а после удаления формы может быть получен готовый подвижный элемент структуры МЭМС.

К наиболее современных технологиям формирования структур микросистем относится LIGA, включающая операции литографии, гальванопокрытия и микролитья. Использование данной технологии позволяет создавать сложные трёхмерные структуры с применением разнородных материалов, включая металлы, керамику, стекло и различные полимеры [87].

В рассматриваемом технологическом процессе производства МЭМС используются два основных метода формирования конечного изделия: осаждение и травление. На Рисунке 3.3 представлена структурная схема упрощённого технологического процесса изготовления микроконденсатора, используемого при моделировании.

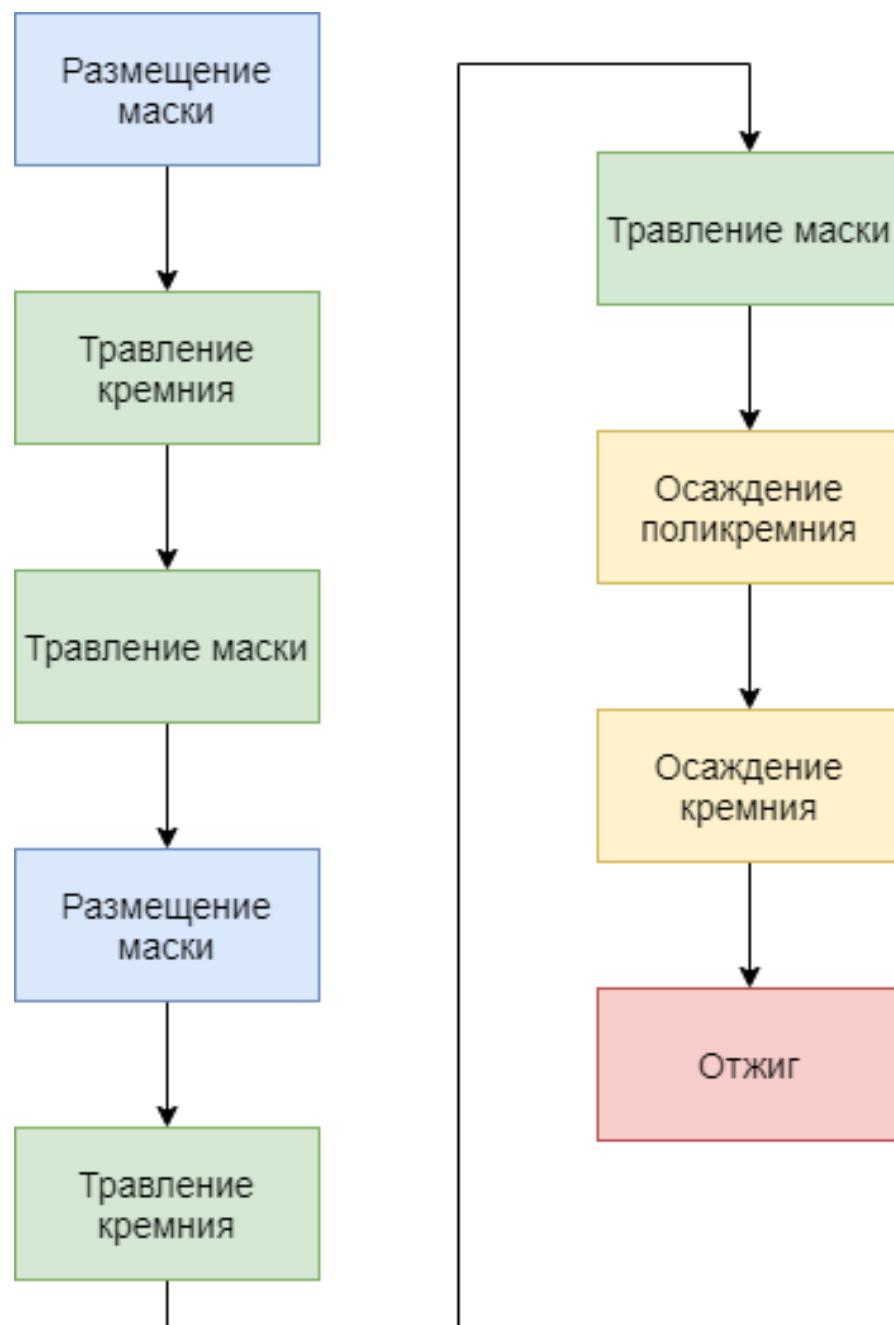


Рисунок 3.3.

Упрощённый технологический процесс производства микроконденсатора фрактальной формы, используемый при моделировании

Операции размещения маски, травления и осаждения в производстве могут привести к появлению различных технологических погрешностей. Так, размещение маски должно осуществляться максимально точно, поскольку при использовании нескольких фотошаблонов в одном технологическом процессе ошибки размещения будут накапливаться. Однако, поскольку точность размещения маски не влияет на характеристики материала микросистемы, можно считать, что ошибки размещения маски не вносят заметных изменений в радиационную стойкость микросистем.

Качество операций травления характеризуется, в основном, двумя параметрами: селективностью и изотропностью [88]. На Рисунке 3.4 показана разница травления низкой селективности и высокой селективности. При высокой селективности травления процесс никак не затрагивает материал, который не должен быть удалён.

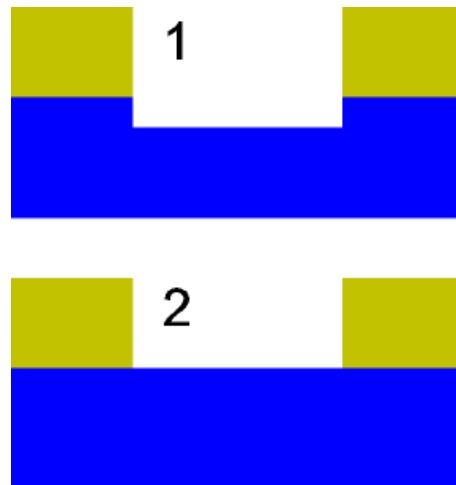


Рисунок 3.4.

Травление с низкой селективностью (1) и с высокой селективностью (2)

Изотропность травления характеризует количество удаляемого материала во всех направлениях. При идеальном изотропном травлении количество удаляемого материала во всех направлениях является одинаковым. При идеальном анизотропном травлении материал удаляется строго в одном направлении, формируя вертикальные «стенки» (см. Рисунок 3.5). Для

производства микроэлектроники предпочтительным является травление с высокой степенью анизотропности, что позволяет формировать более точные структуры.

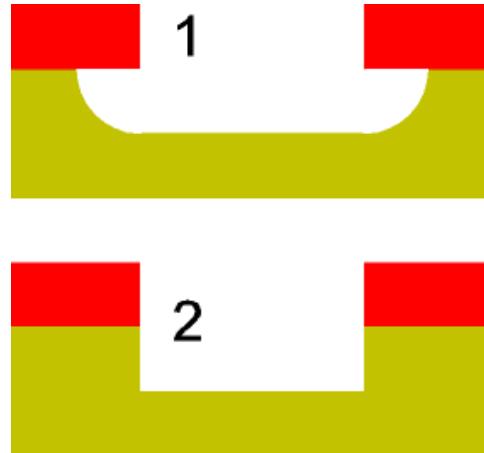


Рисунок 3.5.

Идеальное изотропное (1) и идеальное анизотропное (2) травление

Операция осаждения также характеризуется изотропностью. На Рисунке 3.6 схематично показаны примеры изотропного и анизотропного осаждения материала на неровную поверхность.

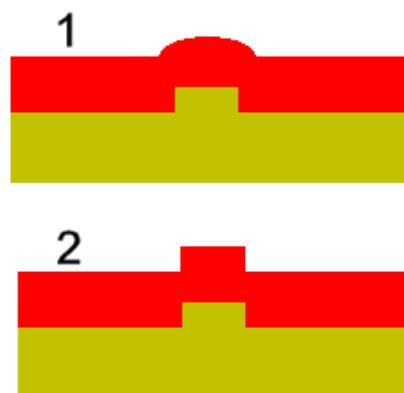


Рисунок 3.6.

Изотропное (1) и анизотропное (2) осаждение

Как видно из Рисунка 3.6, анизотропное осаждение позволяет формировать более резкие и точные переходы при осаждении на неровную поверхность.

3.3 Технологические погрешности при производстве микроэлектромеханических систем

Погрешность при осаждении и травлении зависит от многих факторов, в первую очередь от метода травления, который определяет рабочее давление и показатели селективности и анизотропности. Технологические погрешности при производстве МЭМС могут привести к различным нежелательным эффектам, ведущим к невозможности использования микросистем, например, к изменениям в показаниях датчика. Поскольку данная работа посвящена моделированию характеристик микросистем при спец воздействиях, в дальнейшем будут рассматриваться только нежелательные эффекты, влияющие на радиационную стойкость МЭМС.

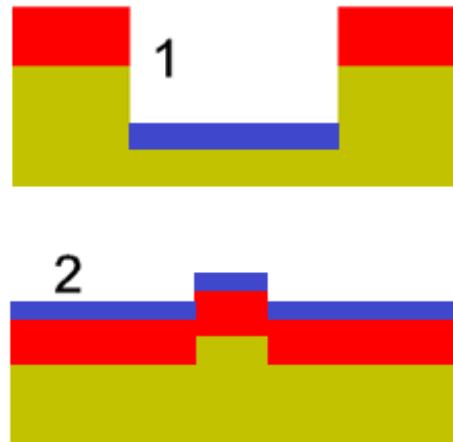


Рисунок 3.7.

Избыточное травление при анизотропном травлении (1) и недостаточное осаждение при анизотропном осаждении (2) показаны синим цветом

При травлении или осаждении материала с заданной толщиной, погрешность может привести как более интенсивному, так и к недостаточному травлению или осаждению. Поскольку увеличение толщины материала всегда приводит к повышению защищённости всей микросистемы к воздействию одиночных заряженных частиц, в работе рассматриваются случаи только чрезмерно интенсивного травления и недостаточного осаждения, которые

приводят к получению более тонкого материала, чем было запланировано. Это, в свою очередь, ухудшает радиационную стойкость конечного прибора. На Рисунке 3.7 показаны погрешности анизотропного травления и осаждения, негативно влияющие на стойкость МЭМС к воздействию ТЗЧ.

Согласно [89], одним из распространённых методов изготовления элементов сенсоров относится анизотропное травление с электрохимической остановкой процесса, при котором толщина слоя составляет от единиц до десятков микрометров, а абсолютная погрешность — порядка 10%. Примем это значение погрешности как максимально возможное при производстве рассматриваемых микросистем.

3.4 Модификация алгоритма компьютерного моделирования воздействия тяжёлых заряженных частиц на электростатические микросистемы с использованием систем приборно-технологического моделирования

На Рисунке 3.8 приведён модифицированный алгоритм компьютерного моделирования воздействия тяжёлых ионов на электростатические микросистемы с учётом технологических погрешностей.

Модифицированный алгоритм отличается от оригинального алгоритма, представленного на Рисунке 2.2, наличием двух проходов: с учётом технологических погрешностей и без неё. После сохранения результатов воздействия ТЗЧ на микросистему алгоритм вносит изменения в топологию с учётом заданного значения технологической погрешности в 10% и начинает работу заново. По завершении второго прохода алгоритм анализирует полученные за два прохода результаты и выполняет сохранение отчёта.

Данные алгоритм обладает высокой временной сложностью, а результат выполнения первого алгоритма не всегда необходим, так как покажет заведомо лучшие результаты (характеризующие более высокую стойкость микросистем к воздействию тяжёлых заряженных частиц). Временная сложность алгоритма составляет $O(N^2 \log_2 N)$, где N — количество конечных элементов модели.

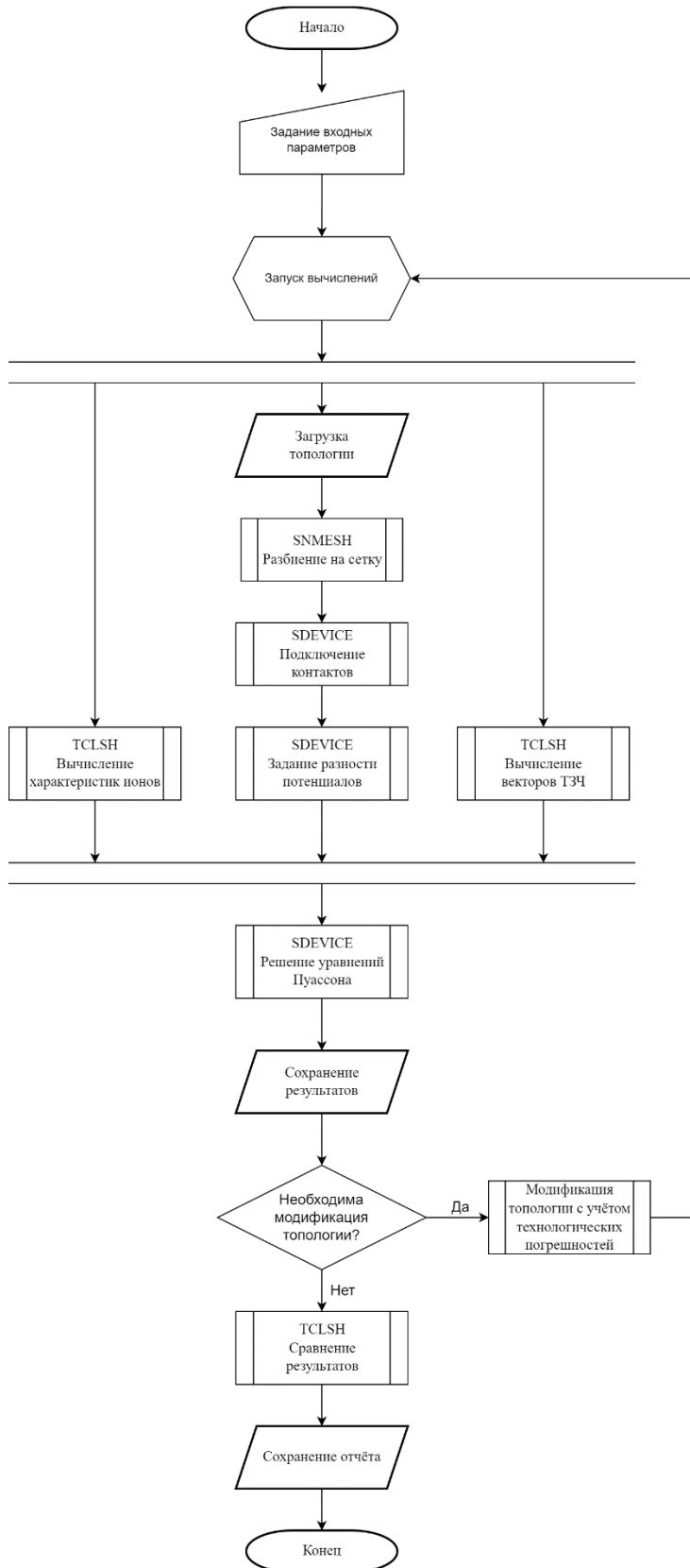


Рисунок 3.8.

Модифицированный алгоритм компьютерного моделирования воздействия тяжёлых заряженных частиц на электростатические микросистемы с учётом технологических погрешностей

Однако, пользователь может модифицировать алгоритм таким образом, чтобы расчёт выполнялся за один проход с учётом только модифицированной с учётом технологических погрешностей топологии, что позволит значительно сократить временные затраты на моделирование.

Таким образом, разработчик получит верхнюю оценку влияния ТЗЧ на электрические характеристики микросистемы или её отдельного элемента и сможет принять решение о том, будет ли МЭМС иметь достаточную защищённость при заданных топологии и характеристиках тяжёлых заряженных частиц.

3.4 Алгоритм оценки изменений механических характеристик электростатических фрактальных микроэлектромеханических систем

При изменении геометрии микросистем важно оценивать различные наборы характеристик МЭМС и конечных устройств, чтобы не допустить ухудшение одних свойств за счёт улучшения других. Для оценки изменений механических характеристик микросистем был разработан следующий алгоритм (см. Рисунок 3.9).

В основе идеи алгоритма лежит тот факт, что при изменении формы ёмкостных элементов микросистемы фактически изменяется лишь часть модели. Например, для акселерометра гребенчатого типа при любой форме обкладок микроконденсаторов остаётся неизменной форма пружин, подвесов и грузика [90].

Это позволило упростить моделирование путём разделения модели на общую (неизменную) часть и модель ёмкостных элементов, что снизило затраты на ручное моделирование МЭМС. На Рисунке 3.10 показана модель неизменной части рассматриваемого акселерометра, а на Рисунке 3.11 показан набор параметрических моделей обкладок микроконденсаторов.

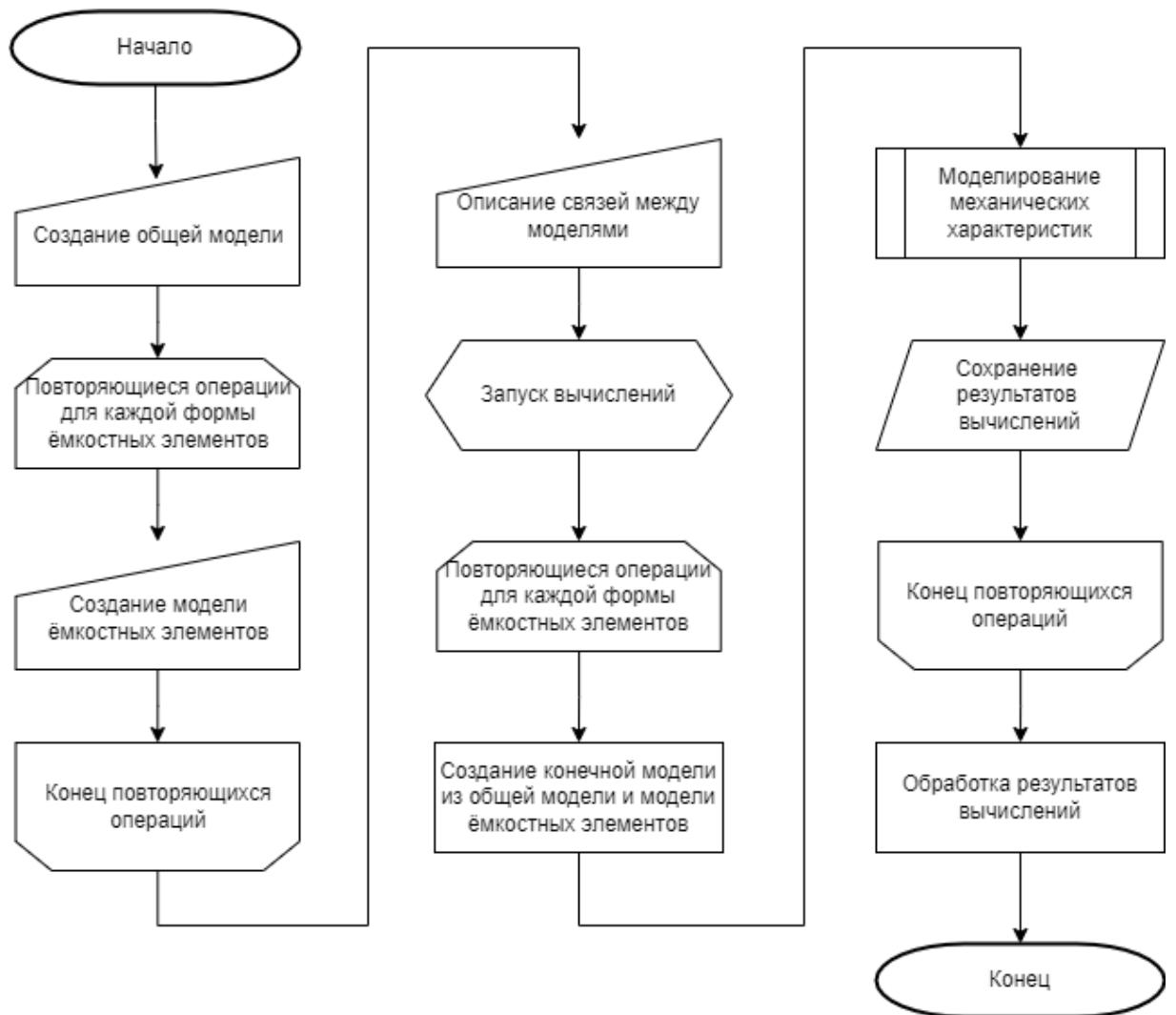


Рисунок 3.9.

Алгоритм оценки изменений механических характеристик микросистем

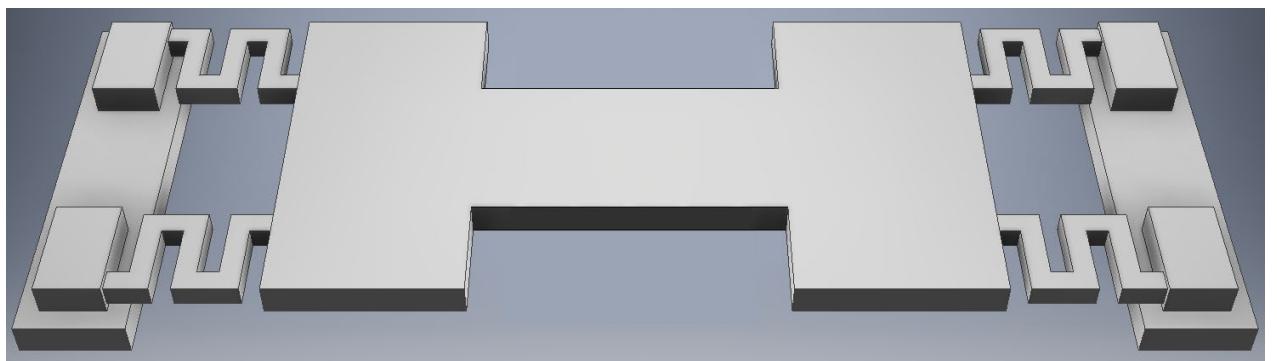


Рисунок 3.10.

Модель неизменной части акселерометра

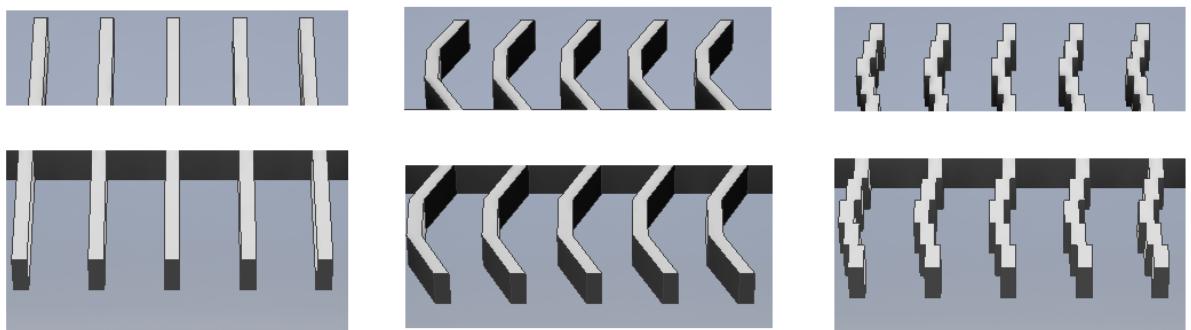


Рисунок 3.11.

Наборы параметрических моделей микроконденсаторов

Операции «Создание общей модели», «Создание модели ёмкостных элементов» (создание наборов параметрических моделей) и «Описание связей между моделями» являются ручными и не могут быть автоматизированы по своей сути, поскольку создание моделей и их параметризация является задачей инженера.

В алгоритме предусмотрена автоматизация получения конечной модели из описанных составных частей: количество моделей, полученное по результатам автоматической обработки выходных данных, составит $N + 1$, где N — количество наборов параметрических моделей.

После получения готовой модели из входных данных алгоритмом предусмотрен запуск заранее заданных вычислений механических характеристик, например, модального анализа конструкции, позволяющего определить собственные частоты рассматриваемой микросистемы.

Результаты вычислений сохраняются в виде готовых моделей, специфичных для используемой САПР. Впоследствии из этих моделей могут быть получены численные результаты моделирования, либо визуальные образы для дальнейшего анализа пользователем.

Данный алгоритм предназначен для реализации в качестве расширения (плагина) существующих САПР для моделирования механических устройств и/или микросистем, таких как Autodesk Inventor, PTC Creo или ANSYS.

Возможные варианты комбинированных моделей акселерометров на основе ёмкостных МЭМС показаны на Рисунке 3.12.

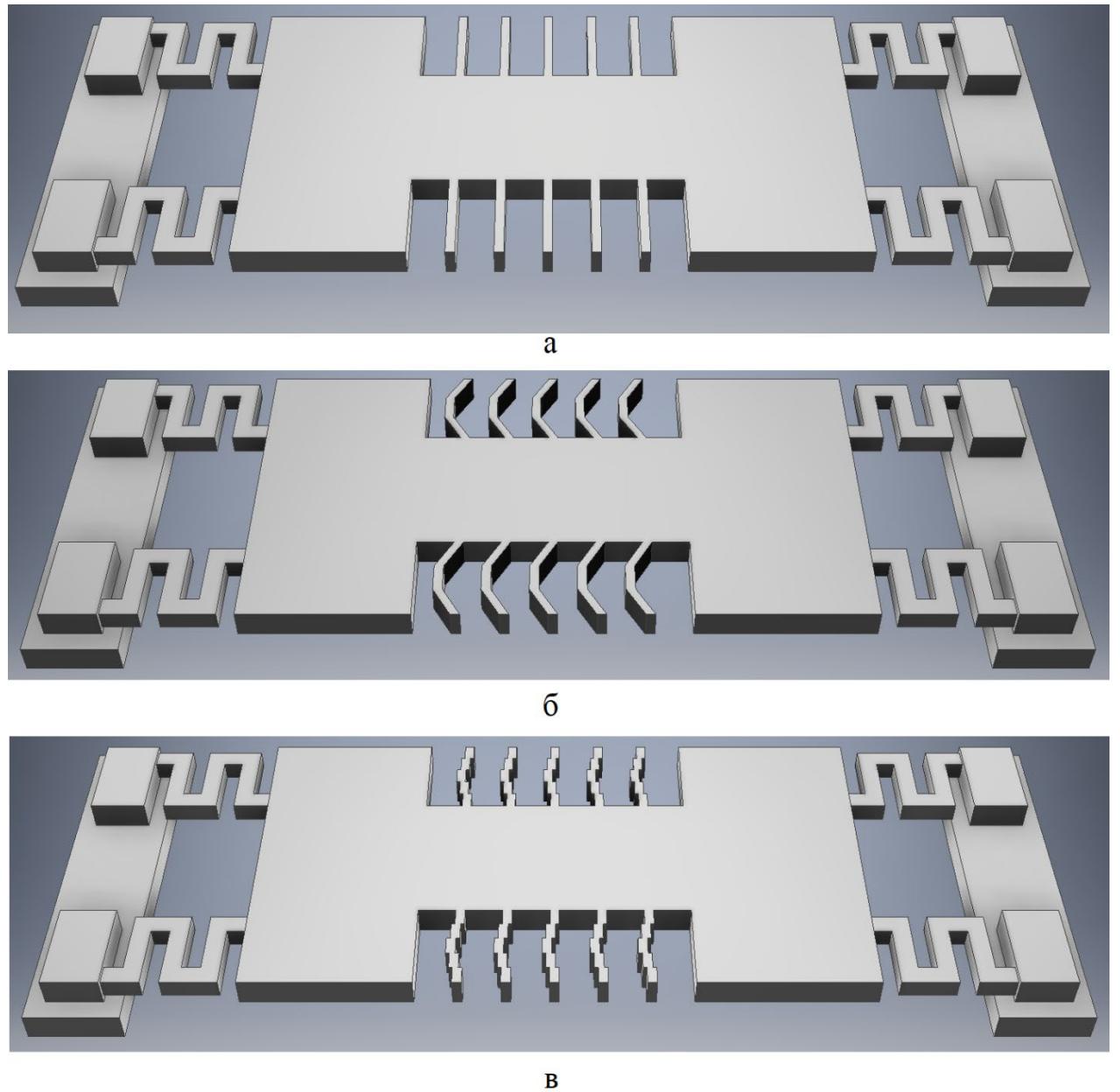


Рисунок 3.12.

Модели подвижных частей акселерометров гребенчатого типа с плоскими обкладками (а), обкладками с фрактальной формой на основе снежинки Коха с усечёнными углами (б) и обкладками с фрактальной формой на основе множества Кантора (в)

3.5 Алгоритм генерации топологии электростатических фрактальных микрэлектромеханических систем с заданными электрическими характеристиками

Переход от плоской топологии элементов ёмкостных микросистем к фрактальной может сопровождаться изменением электрических характеристик МЭМС. Для формирования топологии фрактальных микросистем по заданным характеристикам разработан алгоритм (см. Рисунок 3.13).

Входными данными алгоритма являются параметрические модели микросистем с плоской и фрактальной топологией, а входными параметрами алгоритма — анализируемая характеристика (X), направление модификации топологии, модифицируемый параметр топологии, шаг изменения топологии, а также допустимая разница между анализируемой характеристикой для элемента с плоской топологией и элемента с фрактальной топологией (δ).

При работе алгоритма выполняется моделирование электрических характеристик элемента с плоской топологией, которое даёт референсное значение анализируемой характеристики X_0 . Затем алгоритм запускает цикл моделирования электрических характеристик микросистемы с фрактальной топологией, целью которого является достижение соблюдения неравенства $|X - X_0| < \delta$. В таком случае алгоритм выполняет сохранение результатов вычислений и завершает свою работу. Если неравенство не выполняется, алгоритм выполняет модификацию топологии согласно входным параметрам, при необходимости уменьшая в два раза шаг модификации топологии (если в процессе работы алгоритма неравенство $X > X_0$ сменилось неравенством $X < X_0$).

Сложность разработанного алгоритма определяется сложностью алгоритма бинарного поиска, т. е. данный алгоритм имеет среднюю и худшую сложность $O(\log n)$, а также лучшую сложность $O(1)$.

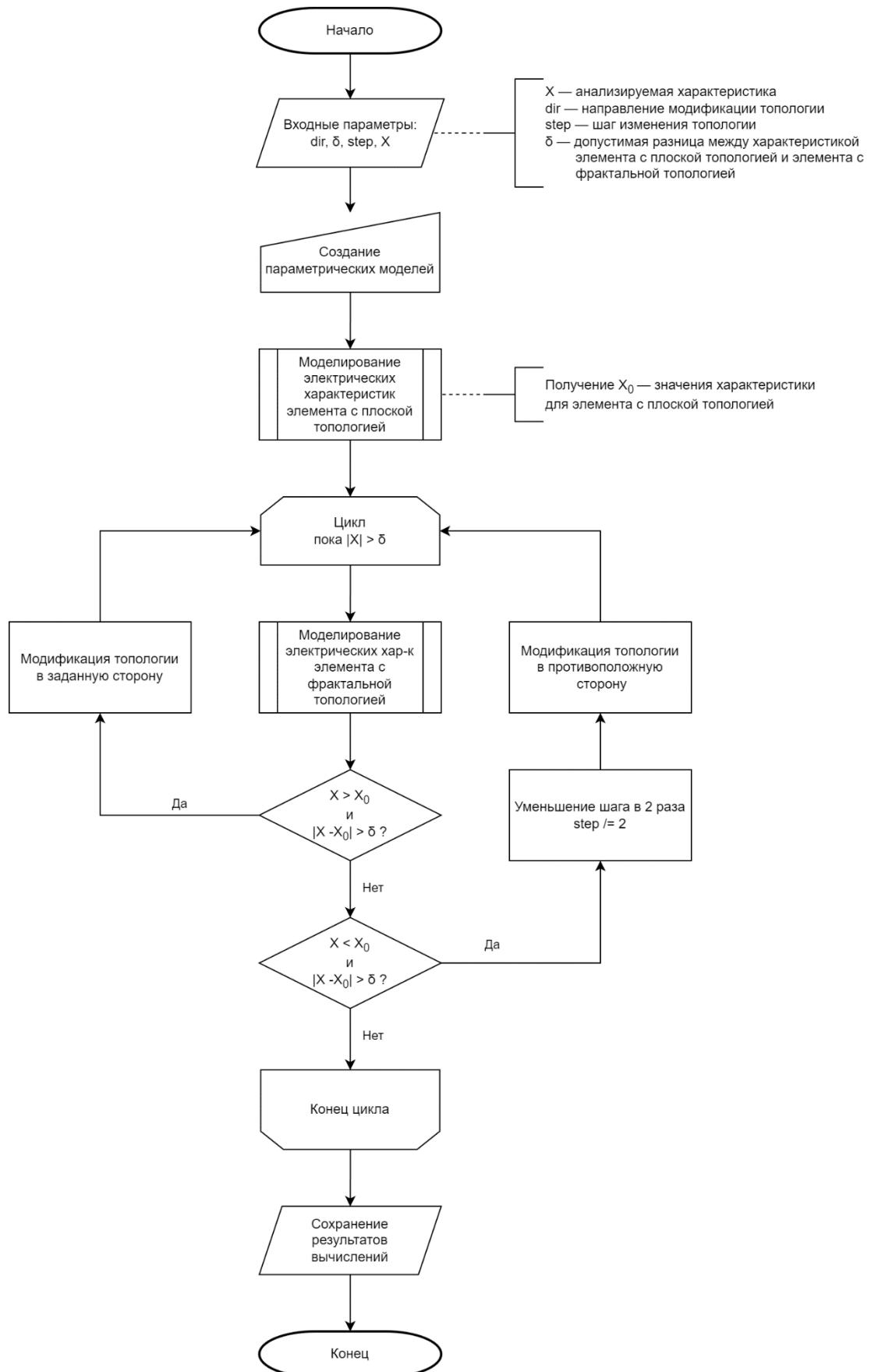


Рисунок 3.13.

Алгоритм формирования топологии фрактальных микросистем по заданным
электрическим характеристикам

Выводы по главе 3

Технологические погрешности при производстве микроэлектромеханических систем возникают, преимущественно, во время процессов осаждения и травления материала, поскольку ни один технологический процесс в данное время не способен обеспечить идеальную изотропность или идеальную анизотропность травления и осаждения, в то время как существующие САПР, напротив, поддерживают только идеальное изотропное или идеальное анизотропное травление и осаждение.

Для учёта технологических погрешностей производства при компьютерном моделировании МЭМС был разработан модифицированный алгоритм компьютерного моделирования воздействия ТЗЧ на электростатические микросистемы с учётом технологических погрешностей. Ключевой особенностью алгоритма является возможность автоматического запуска нескольких итераций компьютерного моделирования, между которыми происходит изменение топологии микросистемы по заранее заданным правилам. Полученные на каждой итерации результаты сохраняются в отдельные файлы для дальнейшего анализа.

Для целей всестороннего анализа фрактальных МЭМС был разработан алгоритм оценки изменений механических характеристик микросистем, который позволяет производить параметрическое моделирование микросистем из набора моделей частей этих микросистем путём составления общей модели из частичных моделей. Данный алгоритм позволяет упростить и снизить количество ручных операций при моделировании и сравнении механических характеристик МЭМС с различной топологией.

Поскольку изменение топологии микроэлектромеханических систем ведёт к нежелательным изменениям электрических характеристик микросистемы, был разработан алгоритм формирования топологии фрактальных микросистем по заданным электрическим характеристикам. Данный алгоритм способен самостоятельно подобрать значение заданного параметра топологии X

(например, толщину диэлектрика), по заданным электрическим характеристикам X_0 (как правило — значение для МЭМС с плоской топологией) в пределах некоторого допустимого диапазона δ , вариация в пределах которого не окажет заметного влияния на функционирование готовой микросистемы.

Глава 4. Программное обеспечение и результаты

4.1 Обзор разработанного программного обеспечения

Программное обеспечение, реализующее алгоритм компьютерного моделирования воздействия тяжёлых заряженных частиц на электростатические микросистемы, а также модифицированный алгоритм компьютерного моделирования воздействия тяжёлых ионов на электростатические микросистемы с учётом технологических погрешностей, реализовано в виде стороннего модуля для САПР Sentaurus TCAD и разработано на языке программирования Python [91]. Разработанный программный модуль позволяет использовать результаты вычислений в качестве входных параметров в конфигурационных файлах других инструментов.

Программное обеспечение, реализующее параллельный алгоритм моделирования изменений электрических параметров электростатических МЭМС под воздействием ТЗЧ выполнено с использованием клиент-серверной архитектуры. Общая архитектура разработанного программного обеспечения представлена на Рисунке 4.1.

Мультиплатформенное графическое приложение-клиент для рабочей станции MEMS Parallel Modeling, предназначенное для запуска заданий и преобразования полученных данных, разработано на языке программирования C++20 [92] с использованием графического фреймворка Qt 6 [93]. Внешний вид приложения представлен на Рисунке 4.2.

Мультиплатформенное консольное приложение для управляющего сервера, предназначенное для автоматического сбора данных с вычислительных узлов, разработано на языке программирования Python 3. ПО, выполняемое на управляющем сервере, позволяет управлять работой разработанных алгоритмов вне зависимости от того, есть ли связь с рабочей станцией, а также поддерживать связь с неограниченным количеством вычислительных узлов. Кроме того,

существует возможность локального запуска приложения на рабочей станции в случае невозможности использования дополнительного сервера.

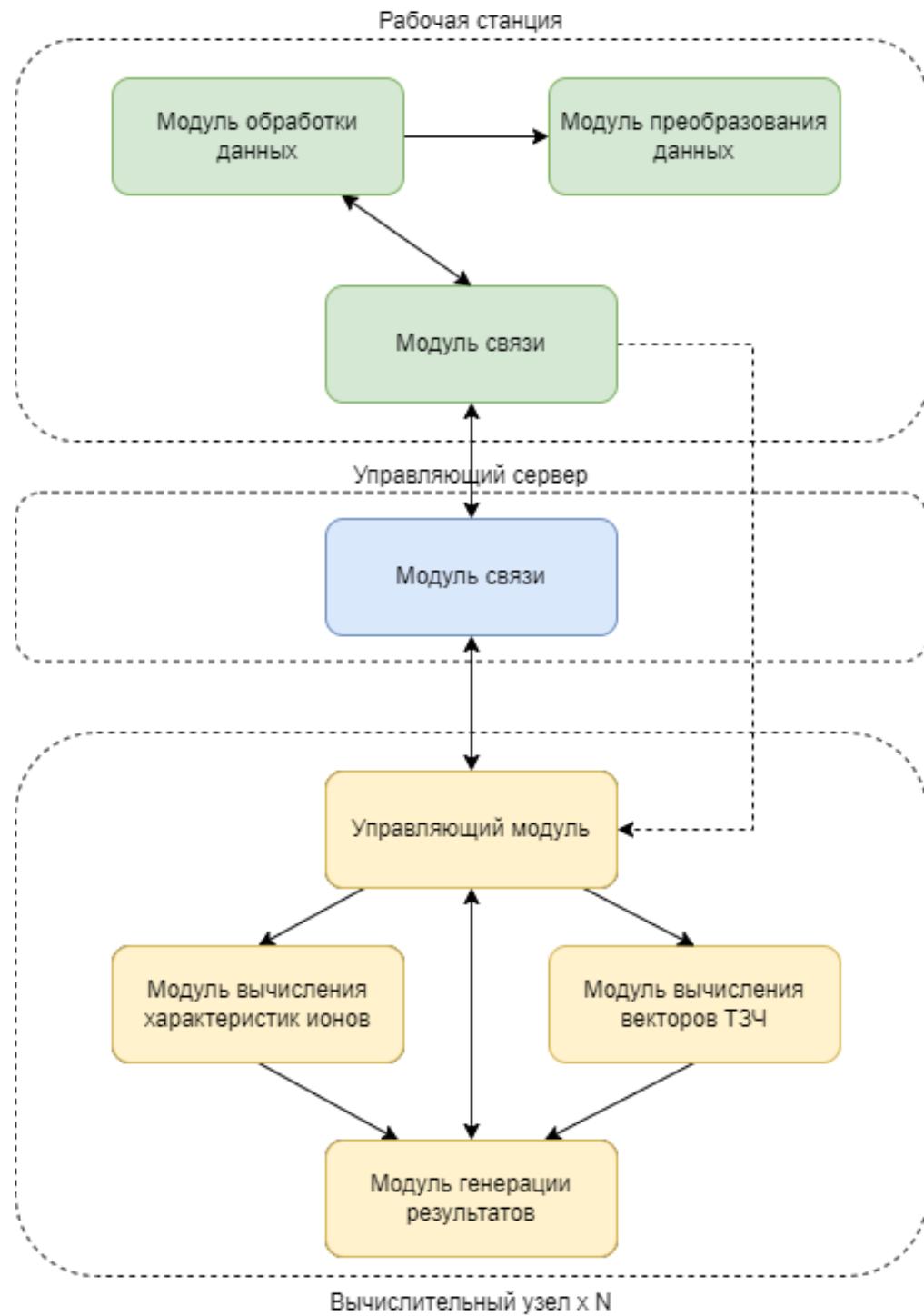


Рисунок 4.1.

Архитектура разработанного ПО

Linux-приложение для Sentaurs TCAD, предназначенное для запуска заданий на вычислительных узлах, разработано на языке программирования Python 3.

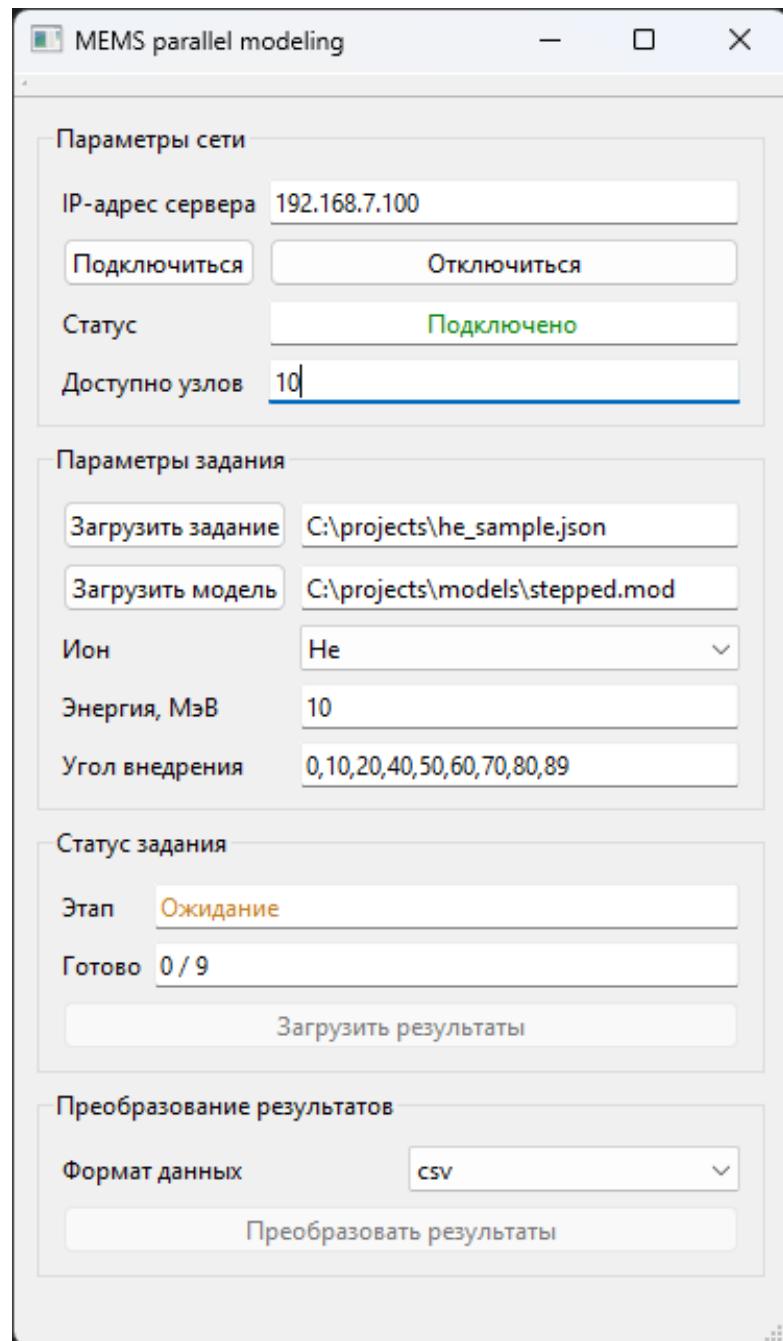


Рисунок 4.2.

Разработанное программное обеспечение MEMS Parallel Modeling

Наличие управляющего сервера не обязательно для работы алгоритмов, однако его использование необходимо в случае, если не предполагается бесперебойная работа рабочей станции в течение длительного времени. Модуль ПО для рабочей станции служит для загрузки результатов моделирования через управляющий сервер или напрямую с вычислительных узлов. Благодаря модульной архитектуре ПО может служить как для самостоятельной обработки

полученных данных, так и для генерации входных файлов для других программных пакетов, например, MATLAB.

4.2 Оценка результатов работы программного обеспечения

4.2.1 Исследование алгоритмов компьютерного моделирования электрических характеристик микроэлектромеханических систем под воздействием тяжёлых заряженных частиц

Исследования показали высокую эффективность разработанных алгоритмов. На Рисунке 4.3 показаны диаграммы распределения скоростей генерации свободных носителей заряда для элемента МЭМС с плоской топологией (а), параллельной фрактальной топологией (б) и фрактальной топологией на основе снежинки Коха (в), полученные по результатам компьютерного моделирования воздействия ТЗЧ на электростатические микросистемы (см. Рисунок 2.2) [100]. Для построения диаграмм были применены когнитивные технологии визуализации информации [94]. На диаграммах синий цвет соответствует низкой скорости генерации свободных носителей заряда, зелёный и жёлтый — средней скорости, красный — высокой скорости.

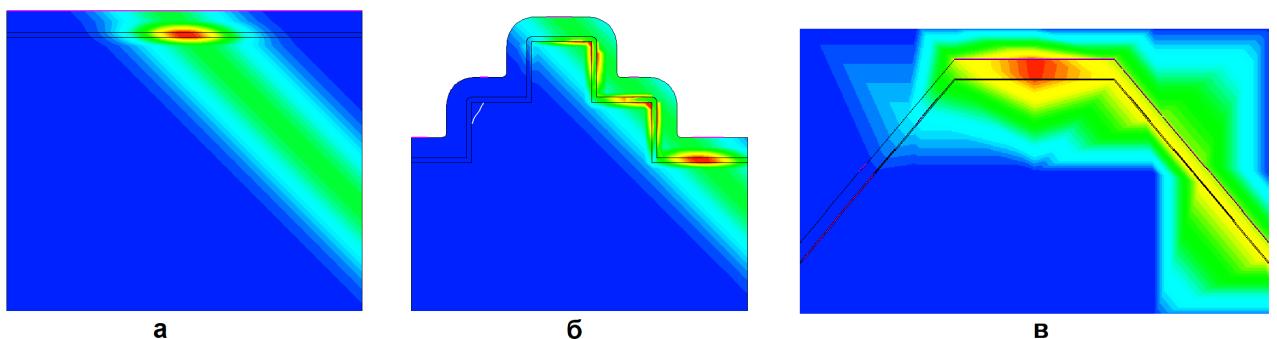


Рисунок 4.3.

Диаграммы распределения скоростей генерации свободных носителей заряда для элементов ёмкостных микросистем различных топологий

Также был проведен анализ радиационной стойкости различных ёмкостных элементов тяжелым заряженным частицам с высокой проникающей способностью и большим радиусом действия (который больше физических размеров ёмкостного элемента) на примере иона водорода (протона) с энергией 100 МэВ и иона неона с энергией 10 МэВ.

Численные результаты моделирования внедрения иона водорода и неона в ёмкостные элементы под углом $\varphi = 0^\circ$ приведены в Таблицах 3 и 4. В Таблицах I_{max} – максимальная значение тока, вызванное внедрением иона; V_{max} – максимальное значение напряжение, вызванное внедрением иона.

Таблица 3.

Численные результаты моделирования внедрения иона водорода в ёмкостные элементы

Параметр	Топология ёмкостного элемента		
	Плоская	Параллельная фрактальная	Фрактальная «Снежинка Коха»
I_{max}	3 нА	3 нА	0,26 пА
V_{max}	3 мкВ	3 мкВ	н/д

Видно, что I_{max} для ёмкостных элементов с плоской и параллельной фрактальной топологией равны, но I_{max} для ёмкостного элемента с фрактальной топологией на основе снежинки Коха намного меньше, чем для других конструкций. Следовательно, структура, подобная снежинке Коха, более предпочтительна для ФМЭМС.

По результатам моделирования видно, что плоский ёмкостной элемент показал худшие результаты во всех тестовых примерах. При малых углах результаты моделирования проникновения ионов в плоские и ступенчатые ёмкостные элементы схожи (тем не менее, результаты ступенчатого ёмкостного элемента немного превосходят результат плоского элемента), но при больших углах результаты ступенчатого ёмкостного элемента примерно в десять раз лучше.

Таблица 4.

Численные результаты моделирования внедрения иона неона в ёмкостные элементы

Топология ёмкостного элемента						
Угол ϕ	Плоская		Параллельная фрактальная		Фрактальная «Снежинка Коха»	
	I_{max} , мкА	V_{max} , мВ	I_{max} , мкА	V_{max} , мВ	I_{max} , мкА	V_{max} , мВ
0°	9,2	9,2	9	8,9	2,2	2,2
20°	8,4	8,5	8,4	8,6	2,5	2,4
45°	3,4	3,4	3,2	3,2	2,8	2,8
70°	2,25	2,3	0,26	0,34	1,8	1,56
85°	2	1,9	0,22	0,25	1,5	1,4

Однако, ёмкостный элемент с топологией на основе снежинки Коха показывает лучшие результаты при малых углах (до четырех раз более устойчив к излучению по сравнению с плоским ёмкостным элементом). При больших углах разница между ёмкостным элементом с топологией на основе снежинки Коха и плоским ёмкостным элементом уменьшается, но по-прежнему остаётся значительной.

На Рисунке 4.4, Рисунке 4.5 и Рисунке 4.6 приведены графики зависимости тока, протекающего через микросистему, от времени в момент внедрения тяжёлой заряженной частицы для элементов МЭМС с плоской топологией (см. Рисунок 4.4), параллельной фрактальной топологией (см. Рисунок 4.5) и фрактальной топологией на основе снежинки Коха (см. Рисунок 4.6).

Графики были построены для углов внедрения ТЗЧ 0° (максимальный пик тока, тяжёлая заряженная частица проникает в микросистему почти вертикально), 25°, 45°, 70°, 85° (минимальный пик тока, тяжёлый ион задевает микросистему по касательной).

Представленные графики иллюстрируют численные значения, представленные в Таблице 4. Значения тока на вертикальных осях всех графиков указаны в амперах, значения времени на горизонтальных осях — в секундах.

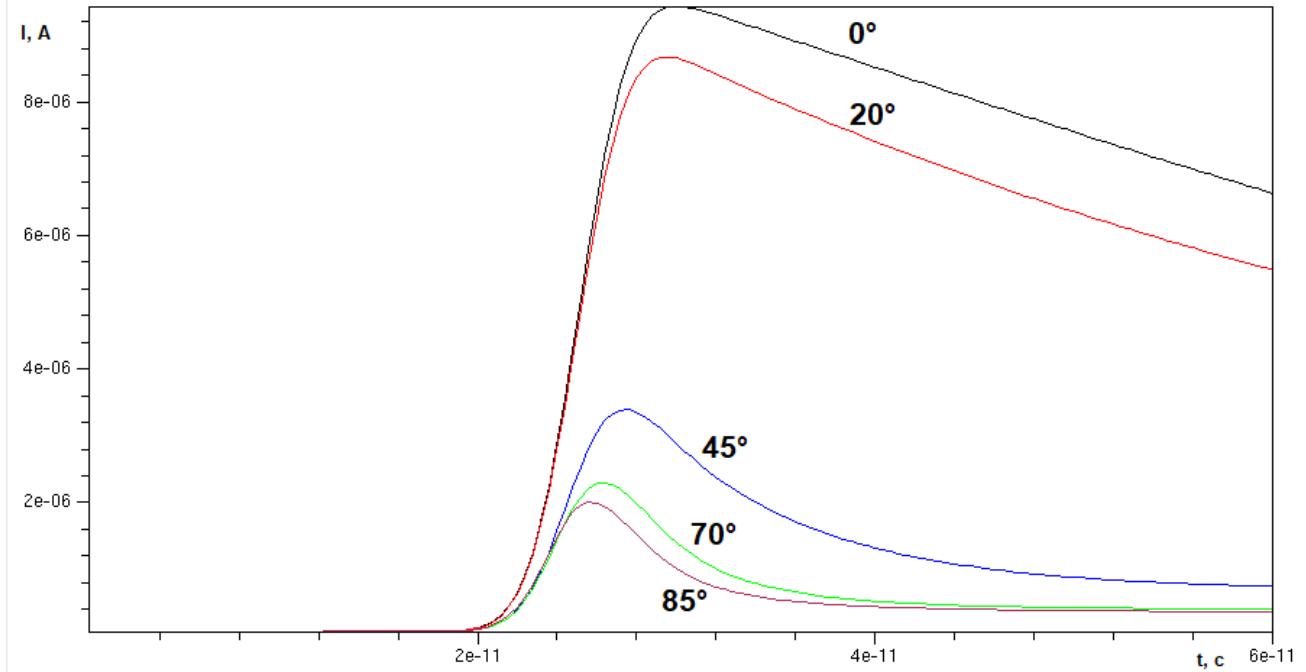


Рисунок 4.4.

Графики зависимости тока, протекающего через МЭМС с плоской топологией
для различных углов внедрения ТЗЧ

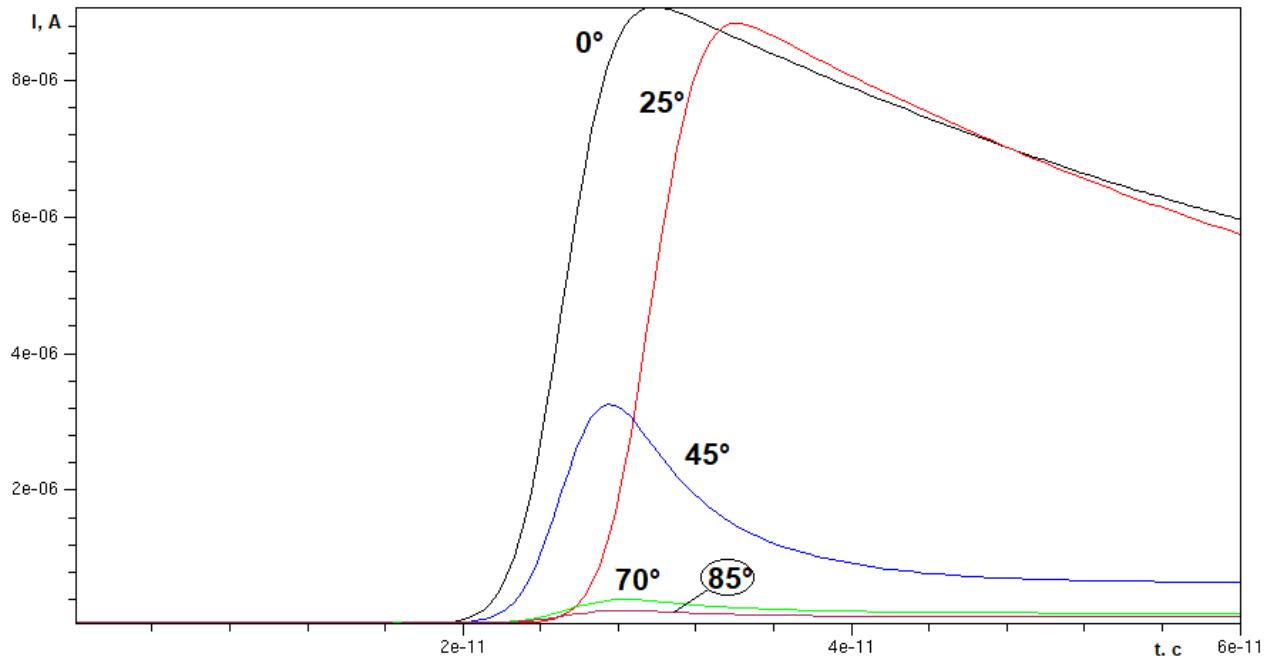


Рисунок 4.5.

Графики зависимости тока, протекающего через МЭМС с параллельной
фрактальной топологией для различных углов внедрения ТЗЧ

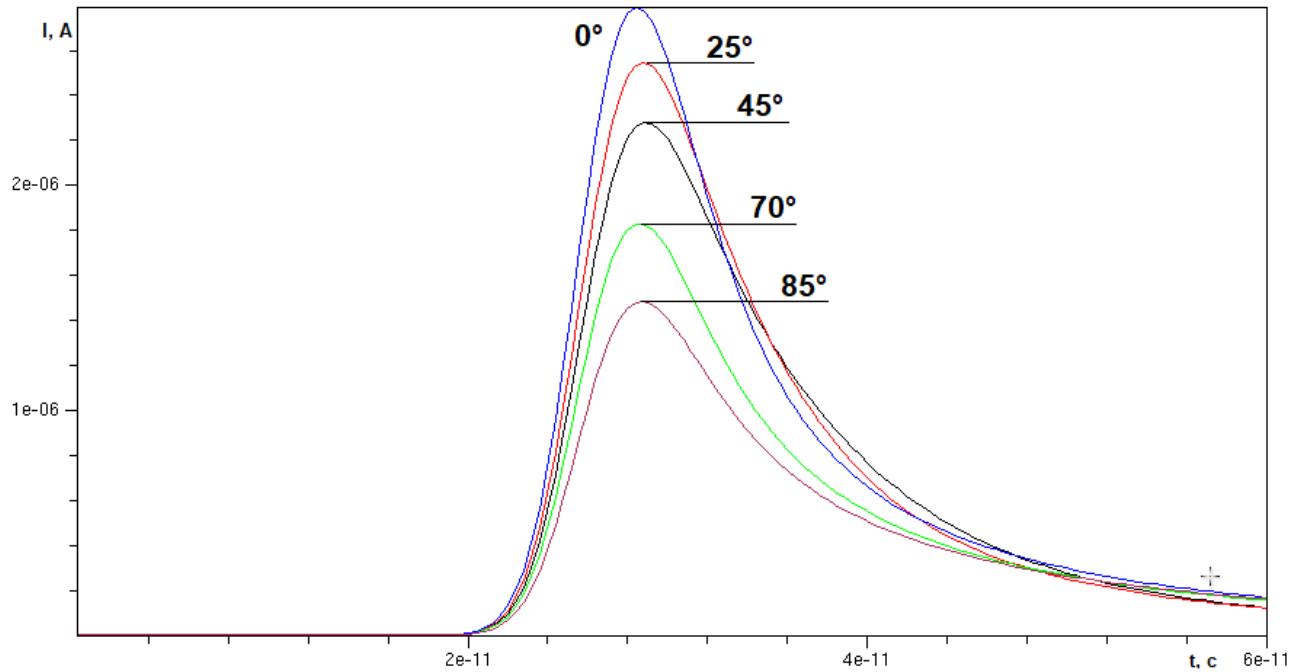


Рисунок 4.6.

Графики зависимости тока, протекающего через МЭМС с фрактальной топологией на основе снежинки Коха для различных углов внедрения ТЗЧ

На Рисунке 4.7 показано сравнение времени моделирования с использованием параллельного алгоритма компьютерного моделирования изменений электрических характеристик электростатических микросистем под воздействием тяжёлых заряженных частиц (см. Рисунок 2.3) и без использования указанного алгоритма (ручной поочерёдный запуск задач на моделирование для каждого из наборов входных данных).

Использование параллельного алгоритма компьютерного моделирования позволяет значительно уменьшить затраты времени на моделирование изменений электрических характеристик электростатических фрактальных микросистем под воздействием тяжёлых ионов. Как следует из представленных на Рисунке 4.7 данных, для 90 наборов входных данных и 10 вычислительных узлов использование алгоритма позволило сократить временные затраты примерно в 10 раз.

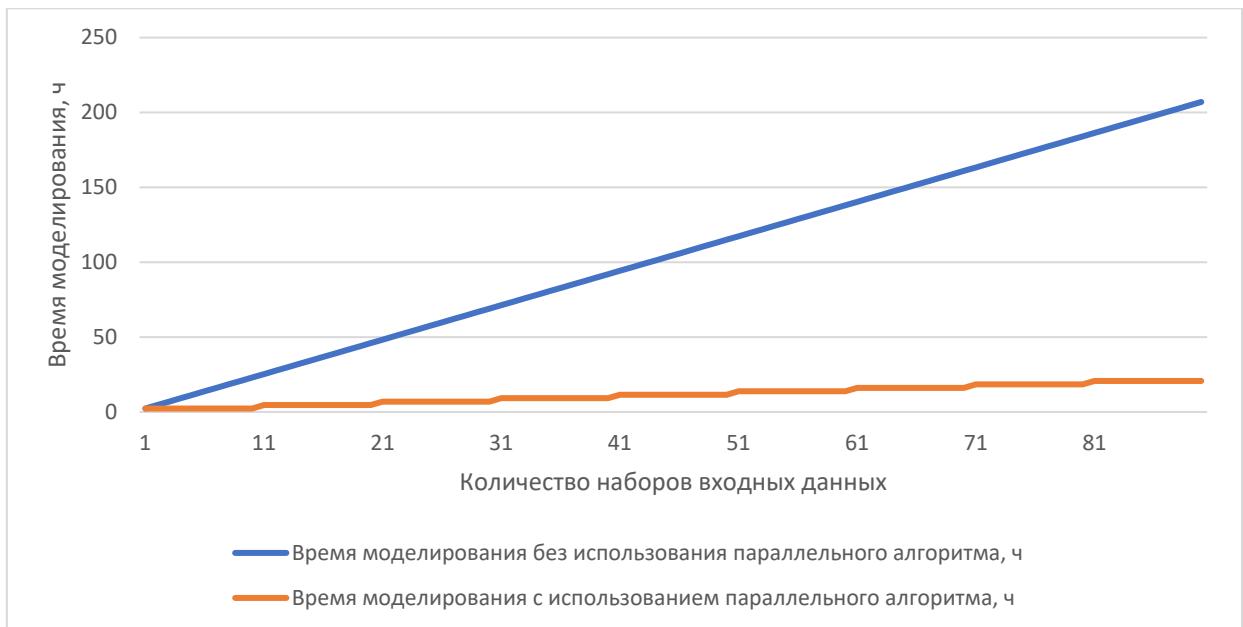


Рисунок 4.7.

Сравнение времени моделирования электрических характеристик электростатических МЭМС под воздействием ТЗЧ при использовании параллельного алгоритма и без использования параллельного алгоритма

4.2.2 Исследование модифицированного алгоритма компьютерного моделирования воздействия тяжёлых заряженных частиц на электростатические микросистемы с учётом технологических погрешностей

Работа алгоритма компьютерного моделирования воздействия тяжёлых заряженных частиц на электростатические микросистемы с учётом технологических погрешностей (см. Рисунок 3.8) была протестирована на МЭМС с плоской топологией (см. Рисунок 4.8), параллельной фрактальной топологией (см. Рисунок 4.9) и фрактальной топологией на основе снежинки Коха (см. Рисунок 4.11). Графики показывают зависимости тока I от угла φ внедрения тяжёлой заряженной частицы и технологической погрешности Δ (указана волях). В качестве входного параметра алгоритма были заданы технологические погрешности $\pm 10\%$ на толщину осаждения кремния и

поликремния. Полученные графики показали разницу изменения тока в 5–9% от изначальной модели.

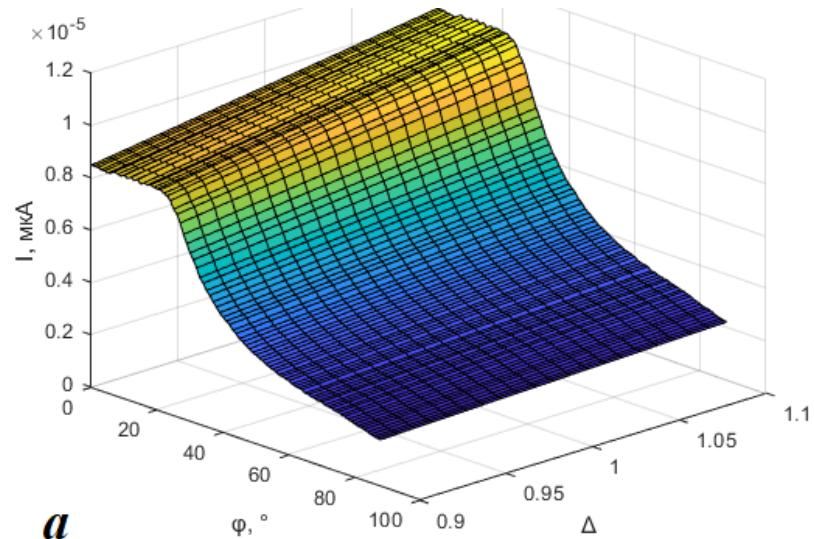


Рисунок 4.8.

График зависимости тока I от угла φ внедрения ТЗЧ в ёмкостный элемент МЭМС с учётом технологических погрешностей Δ для элемента с плоской топологией

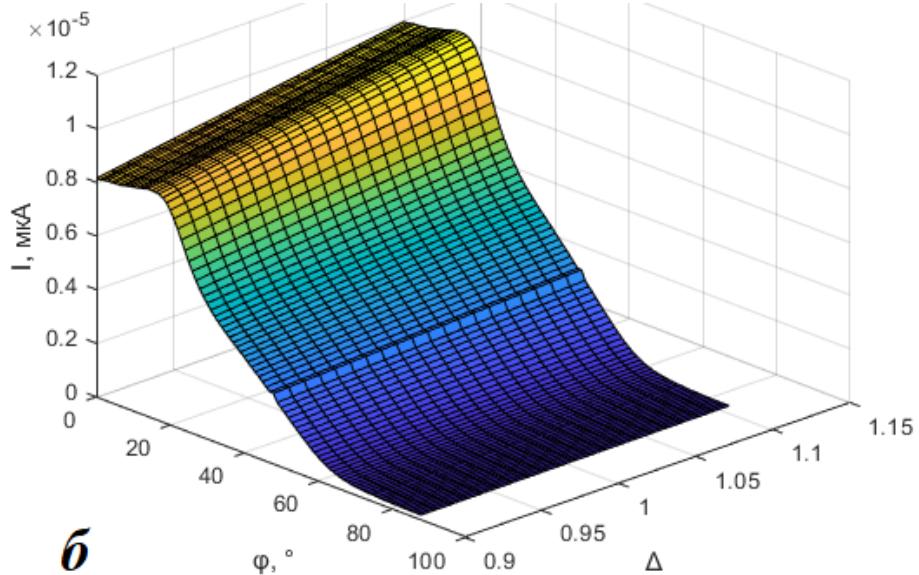


Рисунок 4.9.

График зависимости тока I от угла φ внедрения ТЗЧ в ёмкостный элемент МЭМС с учётом технологических погрешностей Δ для элемента с фрактальной топологией на основе Канторова множества

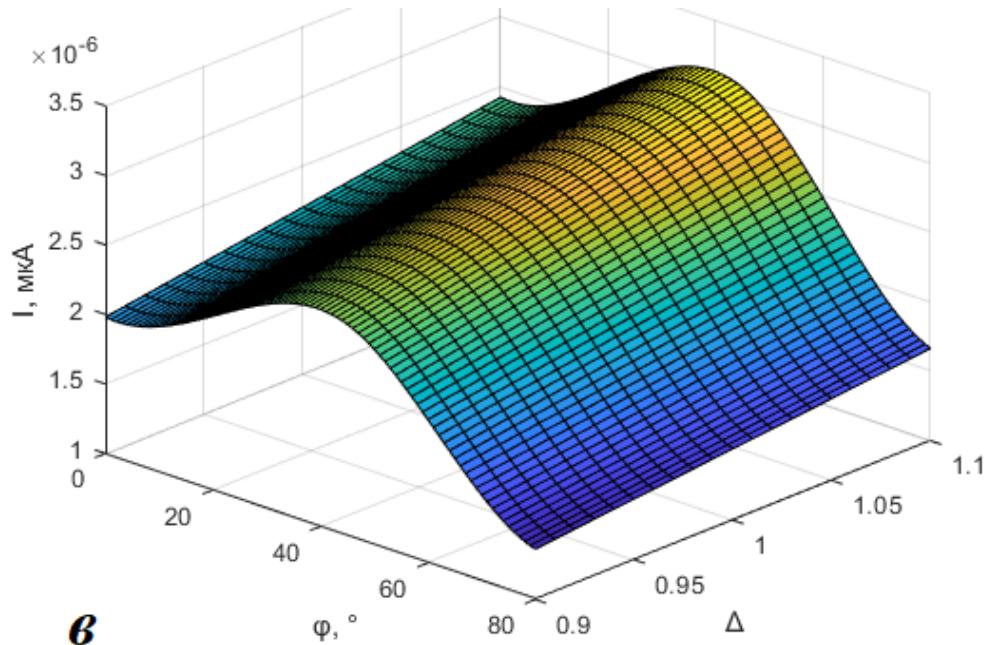


Рисунок 4.10.

График зависимости тока I от угла φ внедрения ТЗЧ в ёмкостный элемент МЭМС с учётом технологических погрешностей Δ для элемента с фрактальной топологией на основе снежинки Коха

Наименьшие изменения тока с учётом технологических погрешностей показала конструкция ёмкостного элемента ФМЭМС с фрактальной топологией на основе Снежинки Коха.

4.2.3 Исследование алгоритма с использованием упрощенного цифрового двойника

Для дополнительного снижения вычислительных затрат в работе предложено использование упрощённой модели фрактальных МЭМС, идея которой заключается в использовании аппроксимационных моделей [95, 96]. Разработанные модели также могут быть использованы как часть для цифрового двойника микросистем. Ключевыми параметрами для такой модели микросистемы являются шаг между «ключевыми» углами (т. е. такими углами внедрения ТЗЧ в микросистему, для которых осуществляется моделирование в САПР с решением уравнений Пуассона) и функция аппроксимации. С

увеличением шага между «ключевыми» углами уменьшаются временные затраты на получение зависимости протекающего через ФМЭМС тока от угла внедрения ТЗЧ, но также снижается и точность модели упрощённой модели. Например, при задании шага в 10° временные затраты на моделирование снижаются примерно в 9 раз, но при этом всё ещё обеспечивает достаточную точность моделирования (см. Рисунок 4.11).

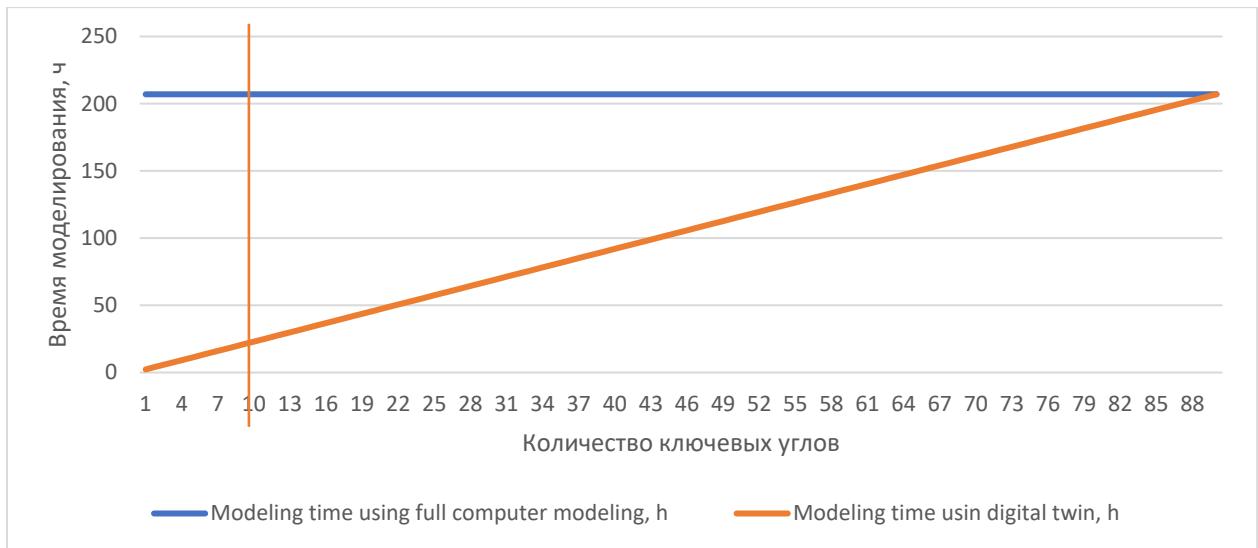


Рисунок 4.11.

Сравнение времени моделирования электрических характеристик электростатических МЭМС под воздействием ТЗЧ при использовании классической и упрощённой моделей

Для выбора функции аппроксимации было проведено сравнение линейной, квадратичной и кубической функций, полиномиальной функции четвёртой степени, а также тригонометрических и синусоидальных функций первого, второго и третьего порядка. Функции более высоких степеней не рассматривались, поскольку они имеют более высокую вычислительную сложность, не могут быть аналитически вычислены в общем виде, а также имеют большое количество экстремумов, что также осложняет дальнейший анализ. Кроме того, не рассматривались экспоненциальные и логарифмические функции как заведомо непригодные для аппроксимации исходной зависимости.

Сравнительная визуализация полиномиальных функций аппроксимации, а также «ключевых» точек показана на Рисунке 4.12.

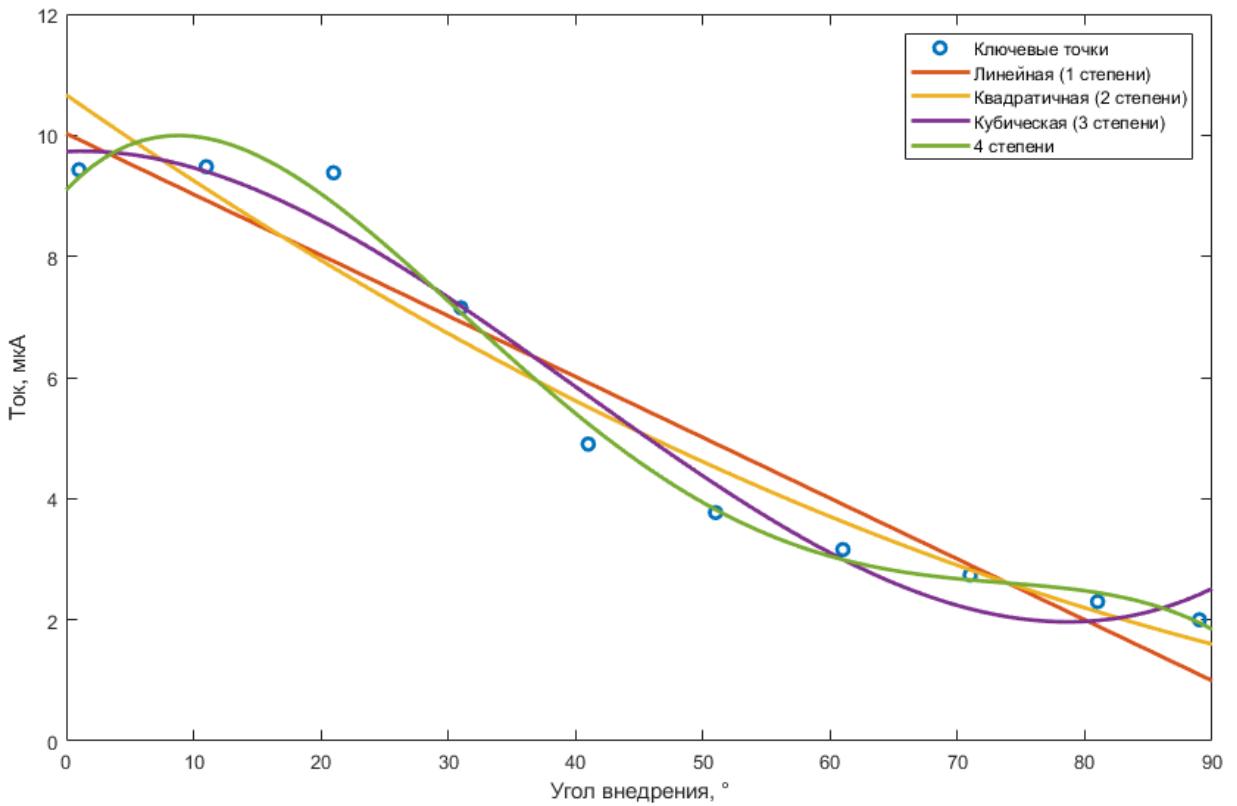


Рисунок 4.12.

Визуализация аппроксимационных кривых для полиномиальных функций с первого по четвёртый порядок включительно

Представленная визуализация предоставляет возможности для быстрого анализа пригодности использования полиномиальных функций для построения упрощённых цифровых двойников. В данной работе рассматриваются полиномиальные функции вплоть до четвёртого порядка (степени) включительно, поскольку полиномиальные функции более высоких порядков не могут быть решены аналитически в общем случае, что накладывает ограничения на их применимость и повысило бы вычислительную сложность и отрицательно повлияло на точность результатов.

На Рисунке 4.13 показана сравнительная визуализация аппроксимационных функций тригонометрических рядов Фурье.

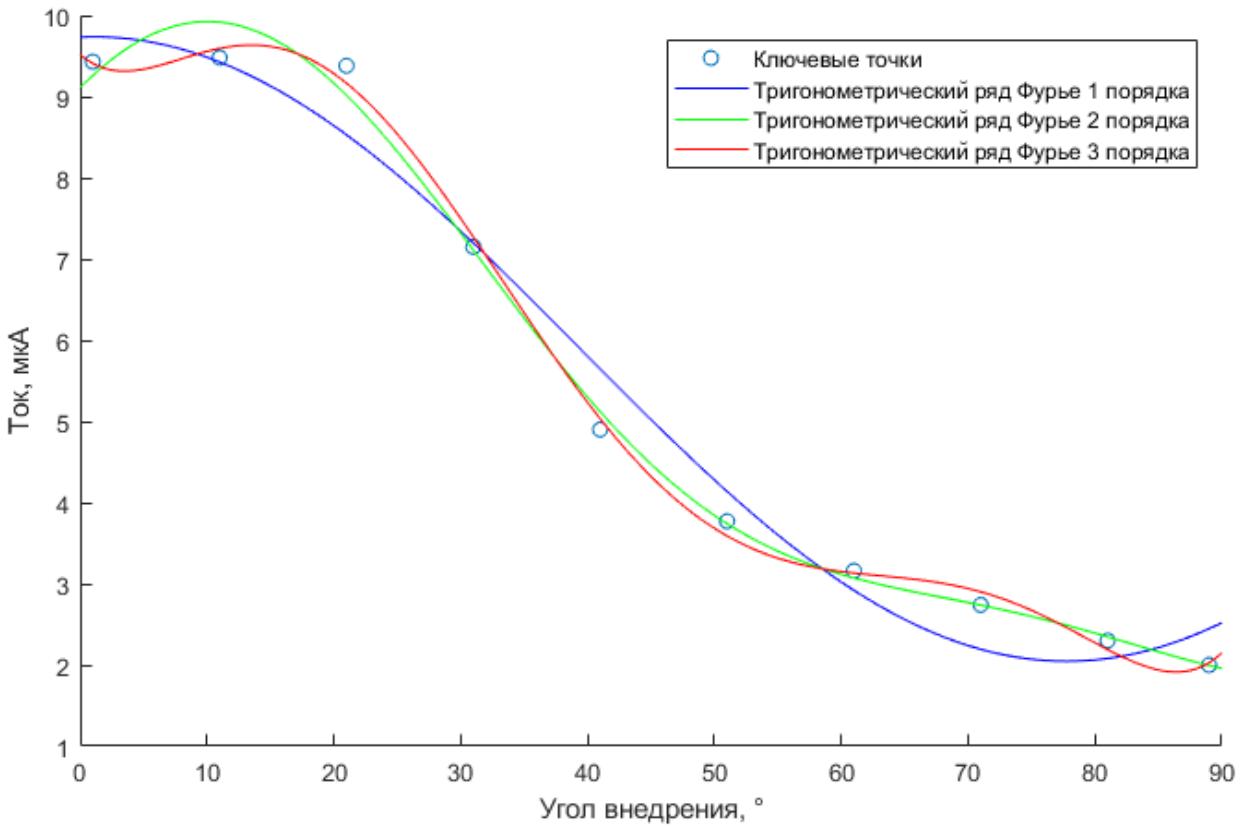


Рисунок 4.13.

Визуализация аппроксимационных кривых для тригонометрических рядов Фурье

Тригонометрический ряд Фурье — это представление произвольной функции f в виде бесконечного ряда:

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nx + b_n \sin nx) \quad (4.1)$$

При этом коэффициенты ряда принимаются равными:

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) dx \quad (4.2)$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos nx dx \quad (4.3)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sin nx dx \quad (4.4)$$

На приведённых графиках «порядок» тригонометрического ряда Фурье — это количество слагаемых вида $a_n \cos nx + b_n \sin nx$.

На Рисунке 4.14 показана сравнительная визуализация аппроксимационных синусоидальных функций.

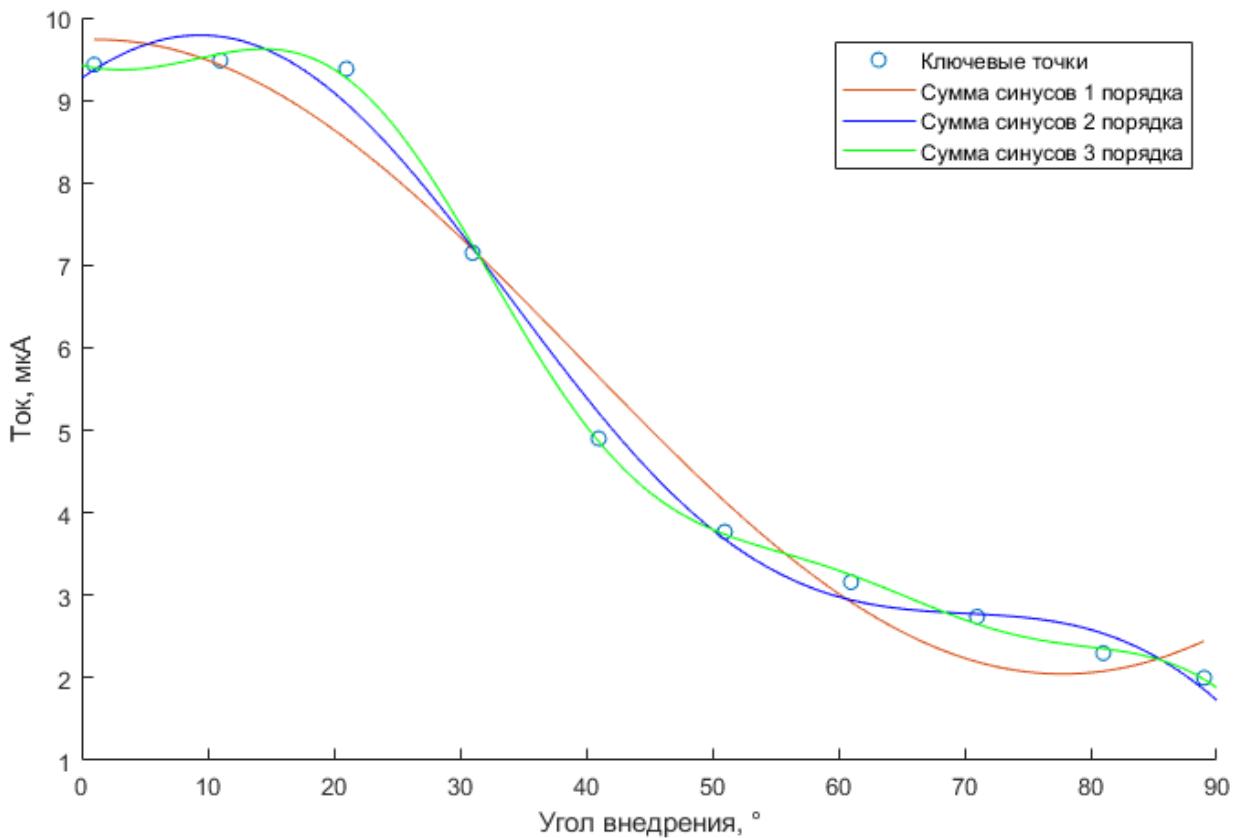


Рисунок 4.14.

Визуализация аппроксимационных кривых для синусоидальных функций

Для анализа полиномиальных функций аппроксимации были рассчитаны информационный критерий Акаике (AIC) и Байесовский информационный критерий (BIC), а также максимальное отклонение. Максимальное отклонение характеризует наибольшую разницу между значением определённой функции и значением, сохранённым в базе данных. Этот критерий важен, поскольку наличие у функции непредвиденного экстремума может привести к ложным выводам о радиационной стойкости микросистемы и дальнейшим отказам во время натурных испытаний. Сводные результаты анализа представлены в Таблице 5.

Абсолютные значения информационного критерия Акаике и Байесовского информационного критерия не могут использоваться в качестве независимого индикатора качества аппроксимирующей функции, но полезны при сравнении различных функций [99].

Таблица 5.

Анализ информационных критериев упрощённого цифрового двойника

Функция аппроксимации	AIC	BIC	Максимальное отклонение, мкА
Линейная (1 степени)	30,5	31,4	1,5
Квадратичная (2 степени)	30,72	32,93	1,6
Кубическая (3 степени)	25,12	26,63	0,9
4 степени	15,27	17,09	0,5

Из Таблицы 5 видно, что аппроксимирующая функция 4 степени обладает наименьшими значениями AIC и BIC, что говорит о её наибольшем соответствии набору исходных данных. Кроме того, максимальное отклонение функции 4 степени составляет всего 0,5 мкА или всего около 5,5% от максимального значения тока, полученного в результате моделирования (~9,5 мкА).

Для каждой рассмотренной функции аппроксимации, лежащей в основе упрощённого цифрового двойника, были вычислены остаточная сумма квадратов, коэффициент детерминации (т. е. доля дисперсии зависимой переменной) и среднеквадратичное отклонение. Минимальные значения среднеквадратичного отклонения и остаточной суммы квадратов (должны стремиться к нулю) и максимальное значение коэффициента детерминации (должен стремиться к единице) позволяет говорить о максимальном уровне приближения конкретной модели к реальной зависимости среди остальных рассмотренных моделей. Модель, обладающая указанными характеристиками, обладает высокой адекватностью и является пригодной для построения упрощённого цифрового двойника.

Результаты анализа представлены в Таблице 6. Термин «порядок функции» используется для характеристики степени полиномиальных функций и количества слагаемых тригонометрических функций.

Таблица 6.

Анализ упрощённого цифрового двойника

Функция аппроксимации	Остаточная сумма квадратов	Коэффициент детерминации	Среднеквадратичное отклонение
Полиномиальная 1 порядка	6,628	0,9246	0,9102
Полиномиальная 2 порядка	5,364	0,939	0,8754
Полиномиальная 3 порядка	2,376	0,973	0,6293
Полиномиальная 4 порядка	0,6696	0,9924	0,366
Тригонометрический ряд Фурье 1 порядка	2,12	0,9759	0,5944
Тригонометрический ряд Фурье 2 порядка	0,4139	0,9953	0,3217
Тригонометрический ряд Фурье 3 порядка	0,1632	0,9981	0,2856
Сумма синусов 1 порядка	2,12	0,9759	0,5944
Сумма синусов 2 порядка	0,4985	0,9943	0,353
Сумма синусов 3 порядка	0,05	0,9994	0,2237

Коэффициент детерминации в Таблице 6 приведён в качестве показателя доли дисперсии зависимой переменной. Близкие к единице значения коэффициента детерминации позволяют говорить о высокой степени совпадения реальных данных и рассматриваемой модели, лежащей в основе упрощённого цифрового двойника.

Наиболее простыми для аналитических вычислений являются полиномиальные функции, однако их характеристики (в частности, среднеквадратичное отклонение) являются неудовлетворительными даже для многочлена четвёртого порядка. Более высокую точность, одновременно с более высокой вычислительной сложностью, обеспечивают тригонометрические функции — ряды Фурье и суммы синусов.

И точность, и вычислительная сложность данных функций возрастают одновременно с увеличением количества слагаемых, поэтому важной характеристикой становится порядок функций, который должен быть оптимальным для достижения баланса между указанными характеристиками.

В работе проанализированы тригонометрический ряд Фурье и сумма синусов вплоть до третьего порядка (обладающие тремя слагаемыми) включительно. Оптимальными характеристиками среди рассмотренных функций обладают тригонометрический ряд Фурье и сумма синусов третьего порядка.

Однако при одинаковом количестве слагаемых сумма синусов требует для вычисления меньшее количество тригонометрических функций — три функции против девяти функций для ряда Фурье. Количество коэффициентов, вычисление которых требуется для расчётов, при этом, сравнимо: девять коэффициентов для суммы синусов и восемь коэффициентов для ряда Фурье. Всё это делает сумму синусов с тремя слагаемыми наиболее подходящей функцией для построения упрощённого цифрового двойника — функция имеет низкие остаточную сумму квадратов и среднеквадратичное отклонение, высокий коэффициент детерминации, а также обладает сравнительно небольшой вычислительной сложностью.

4.2.4 Исследование алгоритма компьютерного моделирования электрических характеристик распределённых микроэлектромеханических систем под воздействием тяжёлых заряженных частиц

Алгоритм компьютерного моделирования распределённых МЭМС к воздействиям тяжёлых заряженных частиц был реализован в ПО MEMS Analyzer, написанном на языке программирования C++ с использованием графического фреймворка Qt [93]. На Рисунке 4.15 и Рисунке 4.16 показан внешний вид интерфейса разработанного приложения.

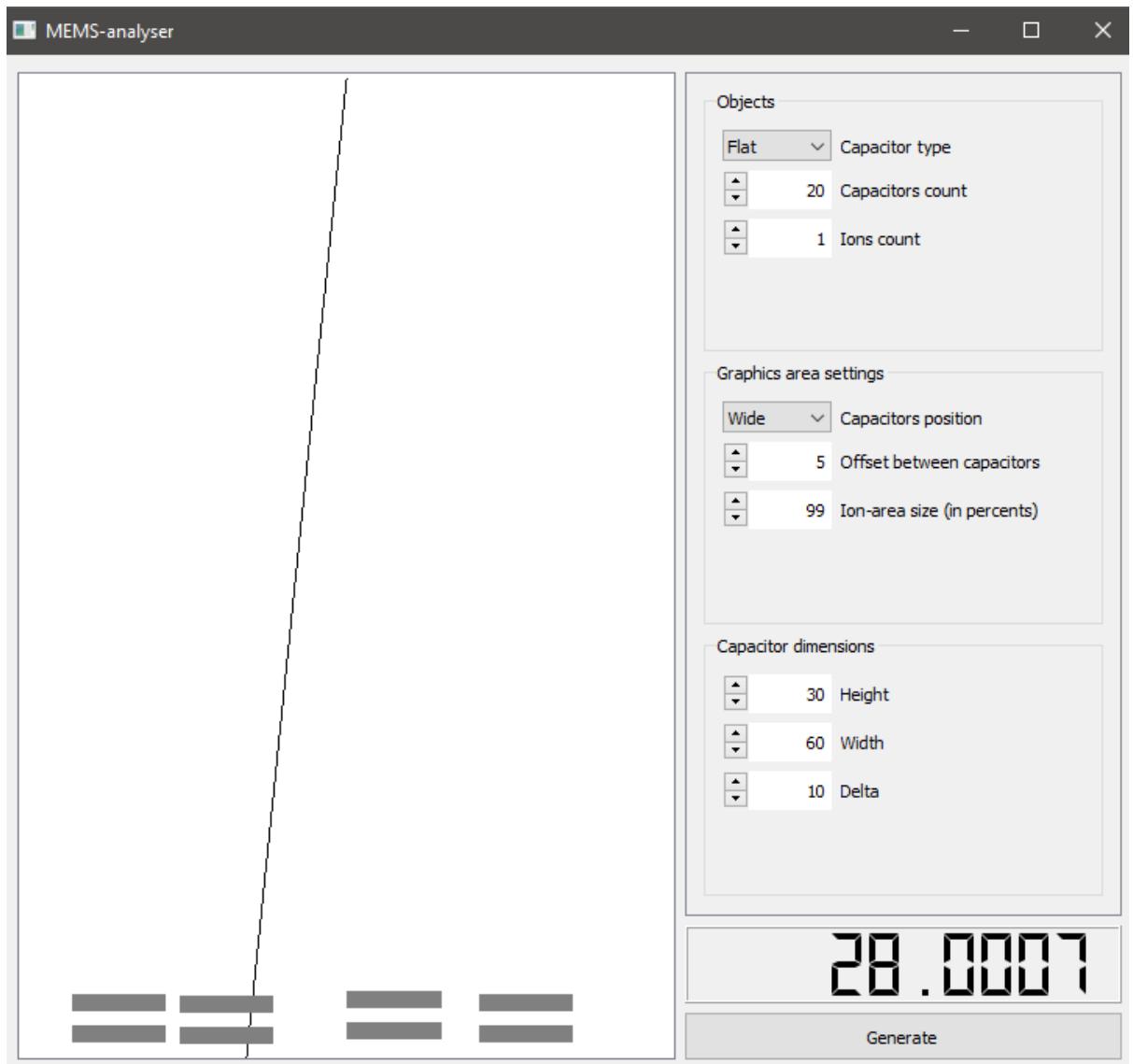


Рисунок 4.15.
Скриншот главного окна приложения

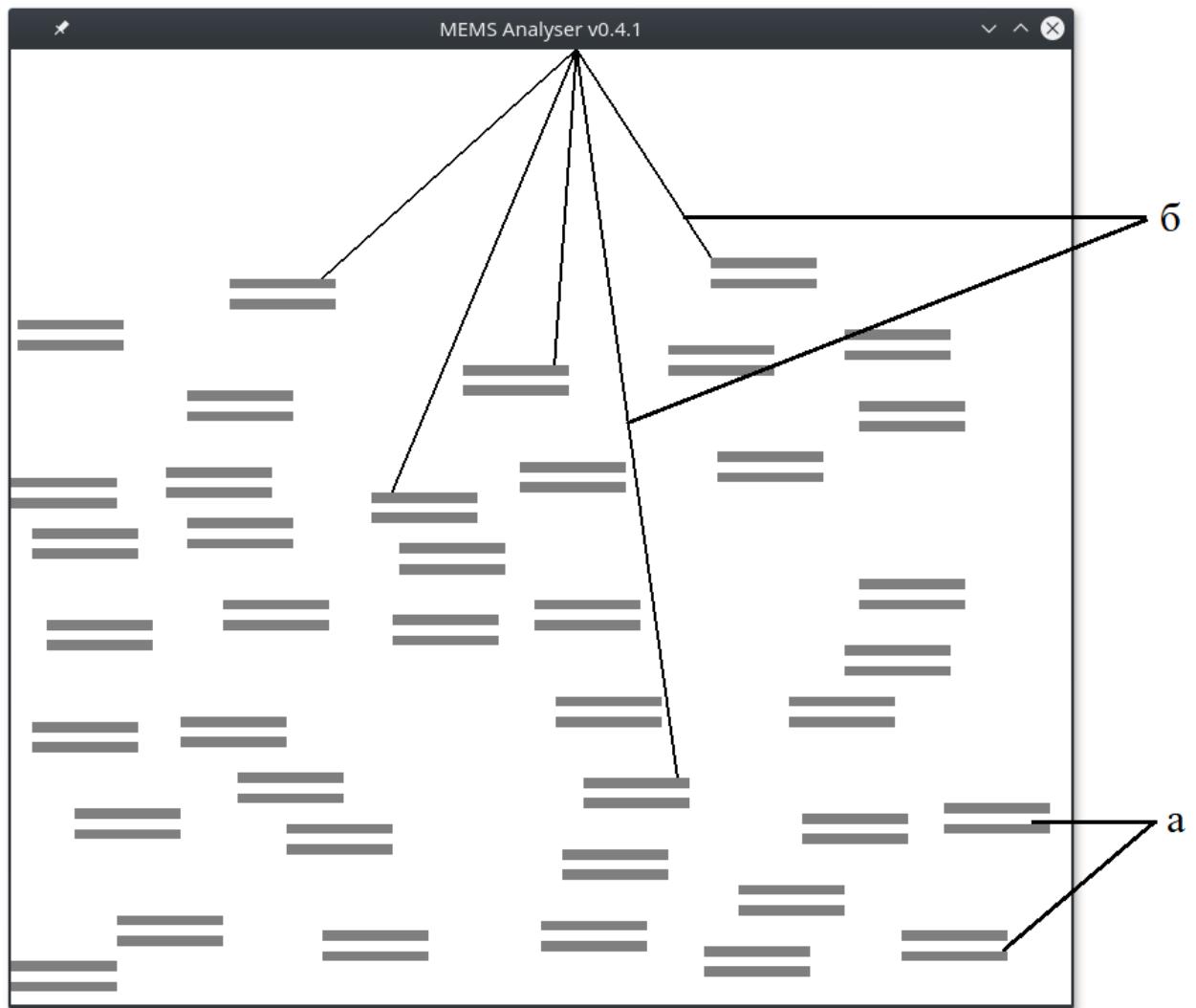


Рисунок 4.16.

Скриншот результатов моделирования, (а) — микроконденсаторы, (б) — траектории ионов, проникших в микроконденсаторы

На Рисунке 4.17 показана диаграмма классов приложения. Диаграмма классов была разработана с использованием нотации UML (Unified Modeling Language, унифицированный язык моделирования). Данный язык графического описания для объектного моделирования включает множество видов диаграмм, предназначенных для различных целей и областей применений (например, диаграмма компонентов, диаграмма пакетов, диаграмма развёртывания и т. д.). Для иллюстрации архитектуры разработанного программно обеспечения была использована одна из наиболее популярных диаграмм UML — диаграмма классов, отражающая основные методы классов и их взаимосвязи.

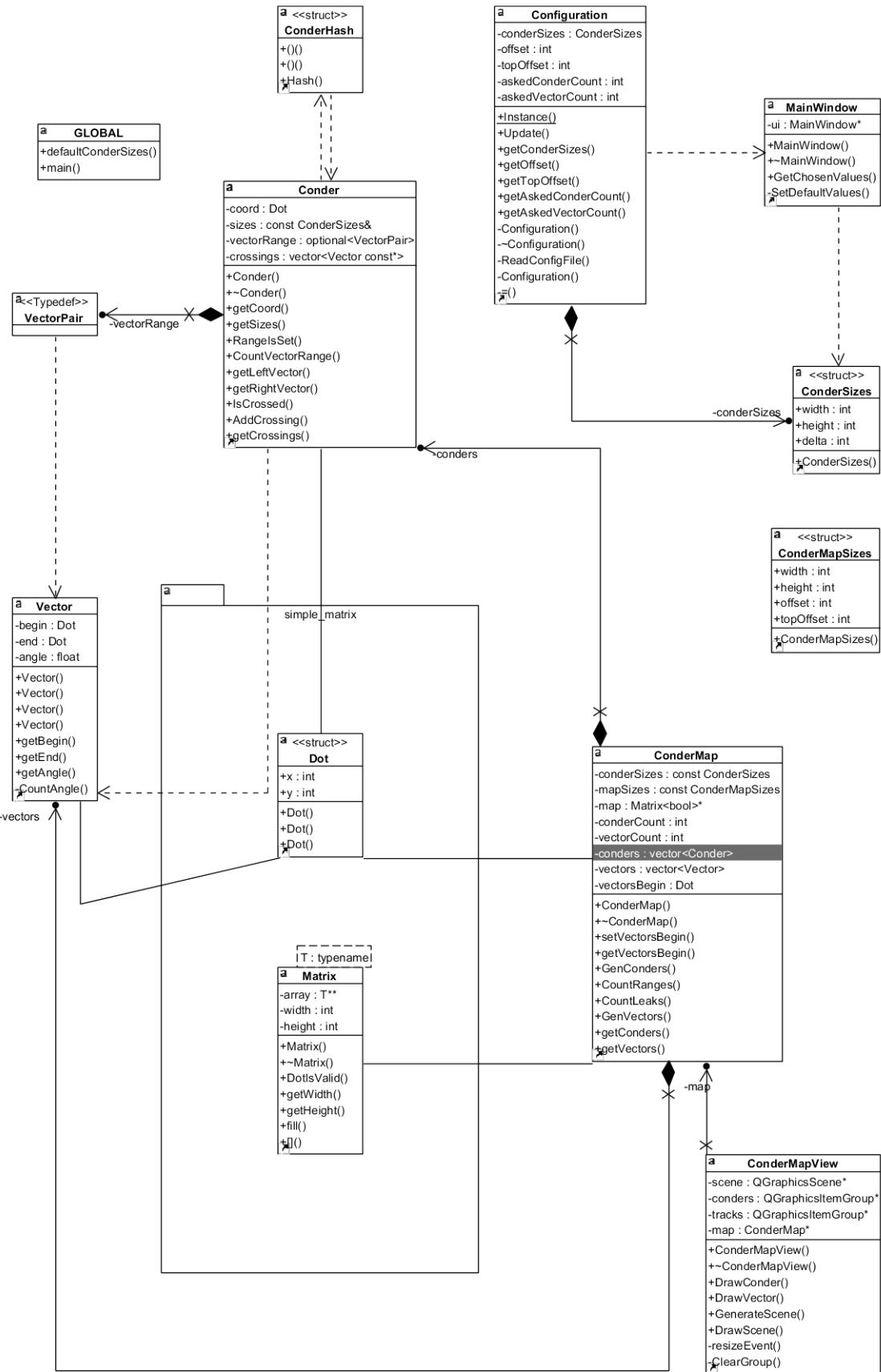


Рисунок 4.17.
Диаграмма классов приложения

При выполнении численного эксперимента было выполнено 10 тысяч итераций алгоритма. В каждой из итераций угол падения ТЗЧ был сгенерирован случайным образом для получения дискретного равномерного распределения, а полученные его значения были сопоставлены с соответствующими величинами максимального изменения тока, взятыми из базы данных. После этого значения тока были записаны в текстовый файл в совместимом с MATLAB формате.

Результаты вычислений в разработанном ПО показали, что среднее изменение тока при многократных моделях попадания ТЗЧ в МЭМС ниже для микросистем с фрактальной топологией.

В ходе эксперимента исследуется поведение плоской и параллельной фрактальной топологии распределенных МЭМС. На Рисунке 4.18, Рисунке 4.19 и Рисунке 4.20 представлены результаты, полученные после 10000 итераций алгоритма. Очевидно, что значение максимумов (экстремумов) тока выше для двумерной плоской топологии распределенных МЭМС.

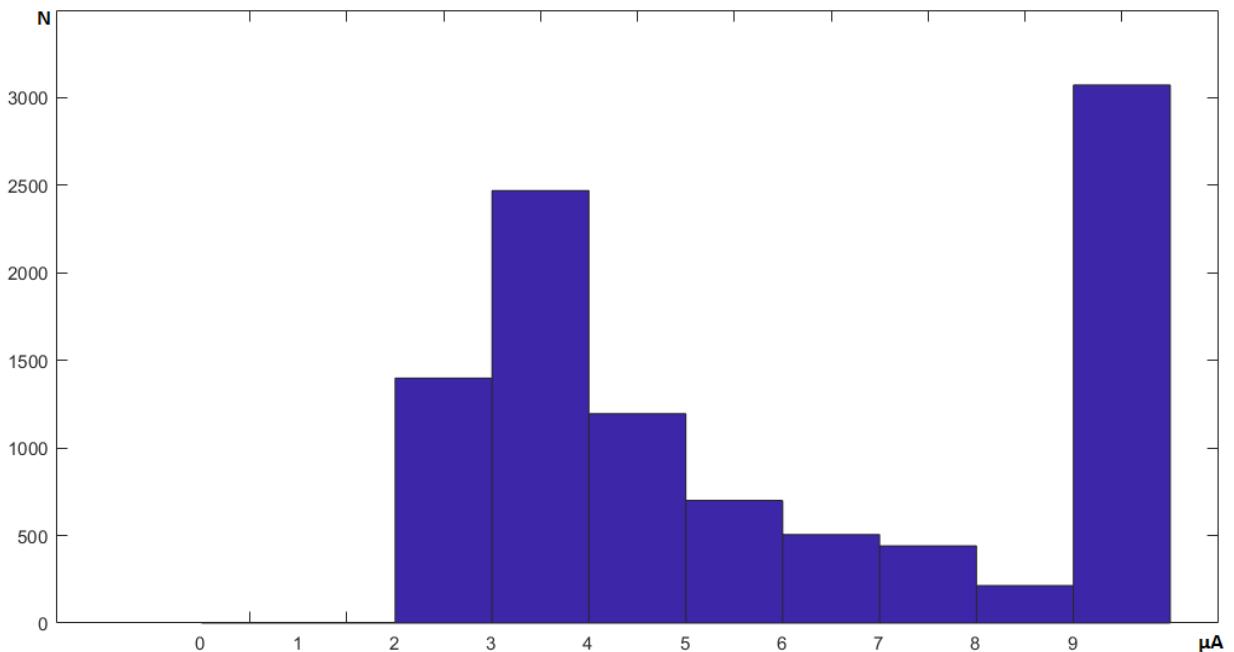


Рисунок 4.18.

Гистограмма максимумов (экстремумов) тока для двумерных параллельных распределенных МЭМС

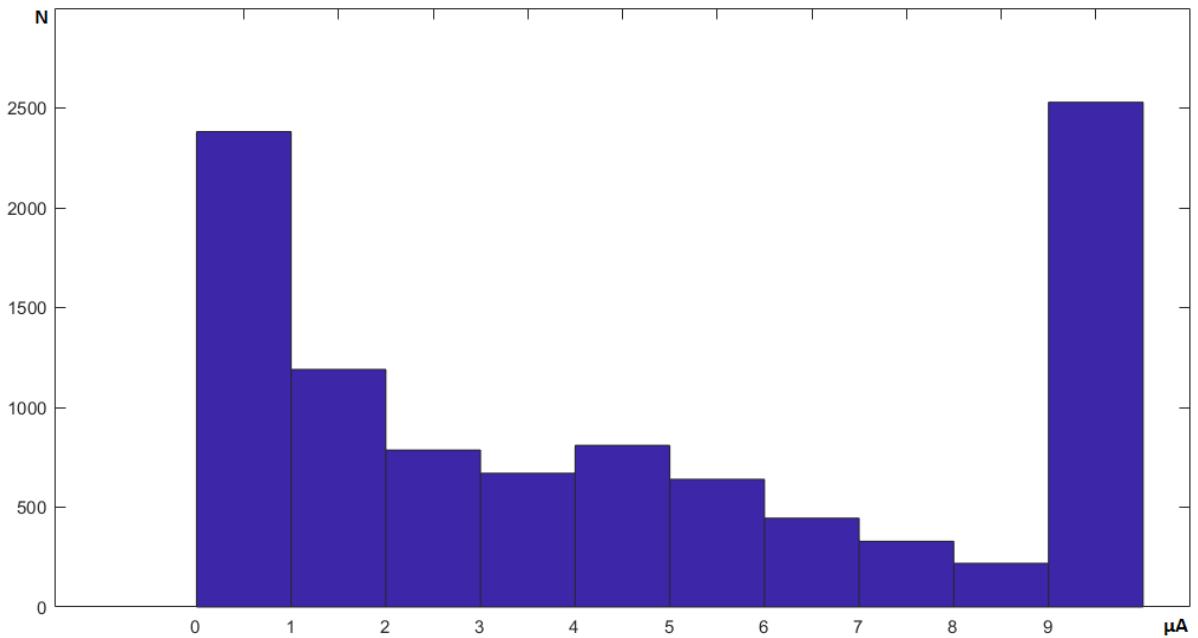


Рисунок 4.19.

Гистограмма максимумов (экстремумов) тока для двумерных распределенных МЭМС с параллельной фрактальной топологией

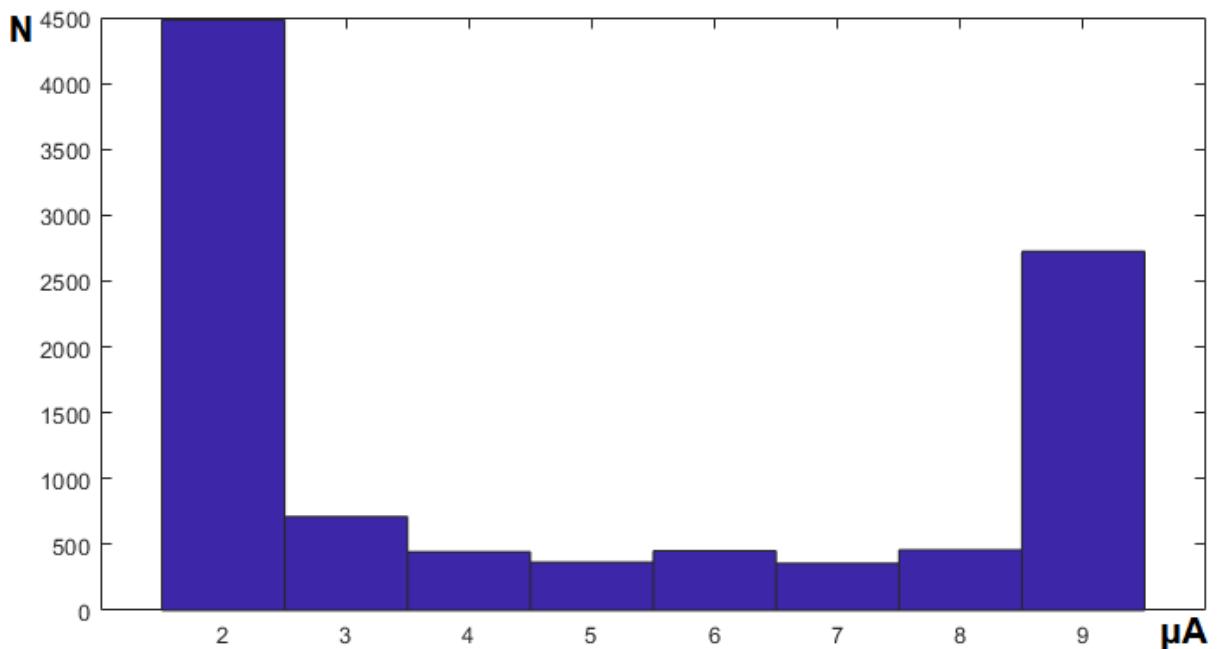


Рисунок 4.20.

Гистограмма максимумов (экстремумов) тока для двумерных распределенных МЭМС с фрактальной топологией на основе Снежинки Коха

В Таблице 7 приведены соответствующие средние значения μ и стандартное отклонение σ максимумов (экстремумов) тока для двумерных параллельных и фрактальных ёмкостных распределенных МЭМС [97].

Таблица 7.
Сравнение стандартного отклонения и экстремумов тока для двумерных распределённых МЭМС с различной топологией

Параметр	Топология распределённых МЭМС		
	плоская	параллельная фрактальная	фрактальная основе Снежинки Коха
μ , мкА	5,52	4,18	4,71
σ , мкА	4,18	3,54	3,15

Очевидно, что максимумы тока двумерных фрактальных ёмкостных распределенных МЭМС имеют более низкое среднее значение и более низкое стандартное отклонение.

4.2.5 Исследование алгоритма оценки механических характеристик микроэлектромеханических систем

Алгоритм оценки механических характеристик МЭМС при изменении формы ёмкостных элементов (см. Рисунок 3.9) был протестирован на примере анализа вибрационной устойчивости акселерометра гребенчатого типа [90]. Результаты моделирования собственных форм показаны для неподвижных частей акселерометра с обкладками плоской формы (см. Рисунок 4.21), с обкладками фрактальной формы на основе Канторова множества (см. Рисунок 4.22) и с обкладками фрактальной формы на основе снежинки Коха с усечёнными углами (см. Рисунок 4.23). Синим цветом на рисунках показан минимальный уровень смещения относительно нормального состояния, зелёным — средний уровень смещения, красным — максимальный уровень смещения.

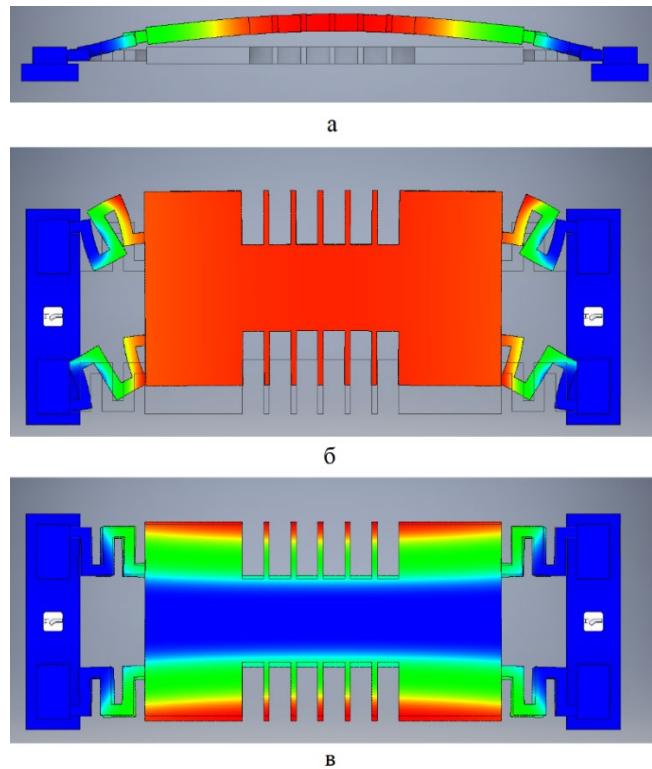


Рисунок 4.21.

Собственные формы подвижной части акселерометра с плоскими обкладками для первой (а), второй (б) и третьей (в) мод

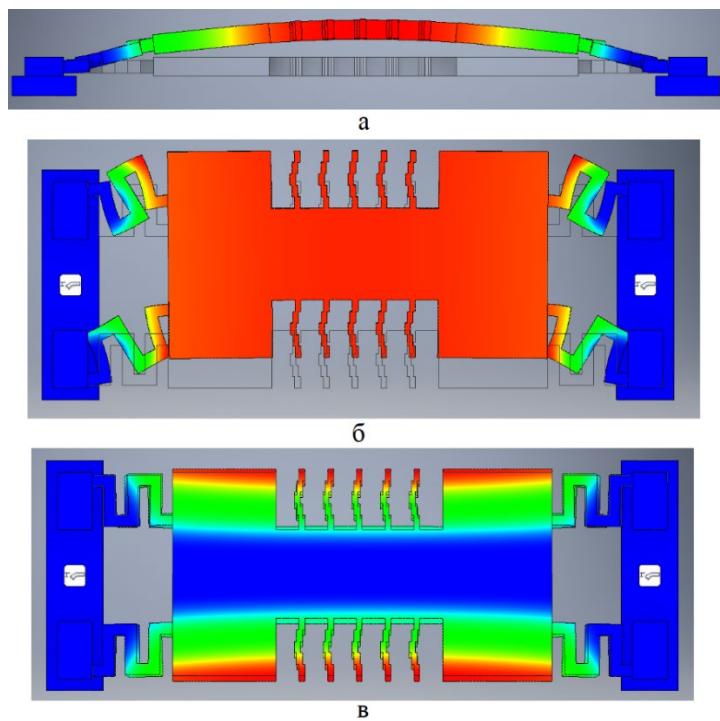


Рисунок 4.22.

Собственные формы подвижной части акселерометра с обкладками с фрактальной формой на основе Канторова множества для первой (а), второй (б) и третьей (в) мод

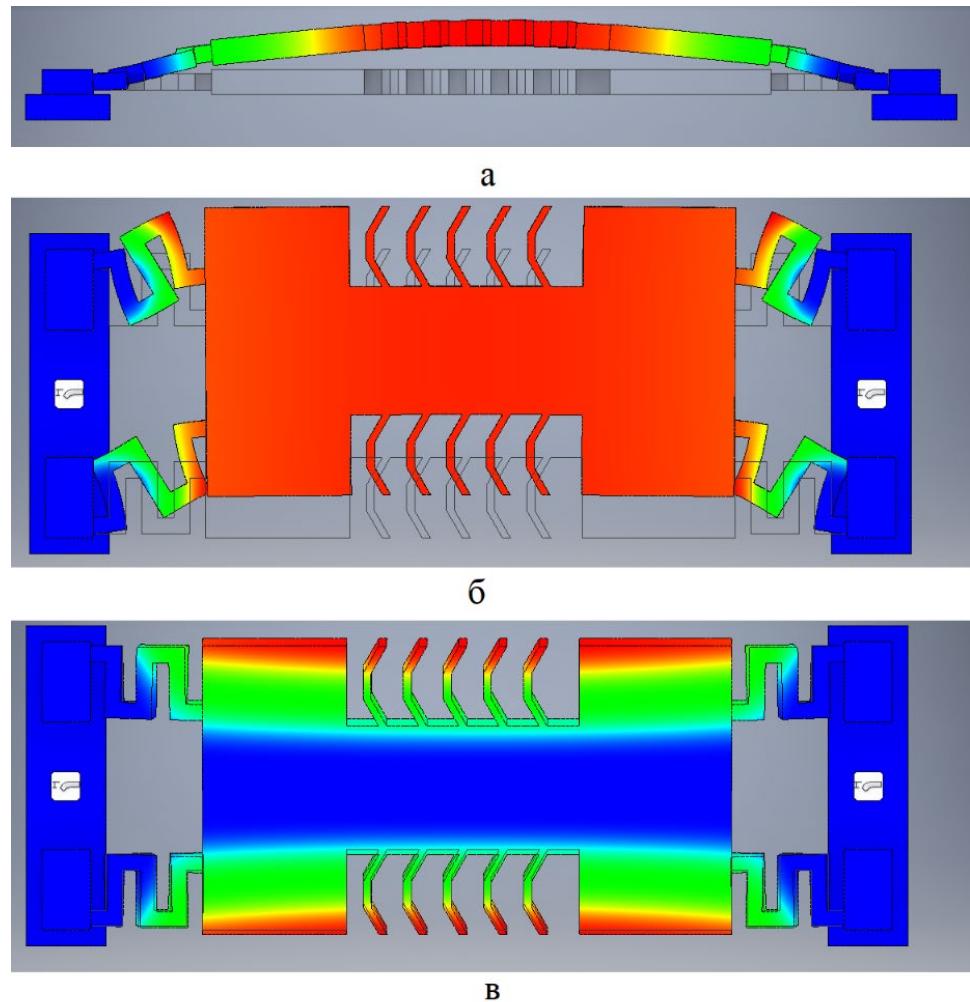


Рисунок 4.23.

Собственные формы подвижной части акселерометра с обкладками с фрактальной формой на основе снежинки Коха с усечёнными углами для первой (а), второй (б) и третьей (в) мод

Численные результаты модального анализа подвижных частей акселерометров гребенчатого типа с обкладками различной формы приведены в Таблице 8.

Результаты оценки изменений собственных частот подвижных частей акселерометров с обкладками фрактальной формы по сравнению с собственными частотами подвижной части акселерометра с обкладками плоской формы представлены в Таблице 9.

Таблица 8.

Результаты модального анализа подвижных частей акселерометров
гребенчатого типа

Форма обкладок	Плоская	На основе Канторова множества	На основе снежинки Коха
Собственная частота (1 мода), Гц	2 255 957	2 255 938	2 256 167
Собственная частота (2 мода), Гц	3 919 938	3 920 099	3 920 815
Собственная частота (3 мода), Гц	4 088 079	4 087 829	4 087 899

Таблица 9.

Оценки изменения собственных частот подвижных частей
акселерометров с обкладками фрактальной формы

Мода	Разница в собственных частотах для плоской формы и фрактальной формы на основе Канторова множества	Разница в собственных частотах для плоской формы и фрактальной формы на основе снежинки Коха
1	0,01%	0,01%
2	0,01%	0,02%
3	0,01%	0,01%

Анализ приведённых результатов позволяет сделать вывод, что разница в собственных частотах подвижных частей акселерометров гребенчатого типа, выполненных из одного и того же материала, но имеющими различную форму обкладок конденсаторов, не превышает 0,02% для каждой из трёх проанализированных мод. Максимальное отклонение конструкции подвижной части акселерометра во всех девяти случаях составило 2,93 мкм. Таким образом, из вышесказанного следует, что форма обкладок конденсаторов не оказывает заметного влияния на собственные частоты МЭМС-акселерометров гребенчатой формы, и, следовательно, не влияет на их чувствительность к вибрационным воздействиям.

4.2.6 Исследование алгоритма формирования топологии фрактальных микроелектромеханических систем

Для анализа электрических характеристик фрактальных МЭМС был проведён анализ вольт-фарадных характеристик ФМЭМС с параллельной фрактальной топологией и фрактальной топологией на основе снежинки Коха, а также сравнение полученных вольт-фарадных характеристик с характеристикой МЭМС с плоской топологией (см. Рисунок 4.24).

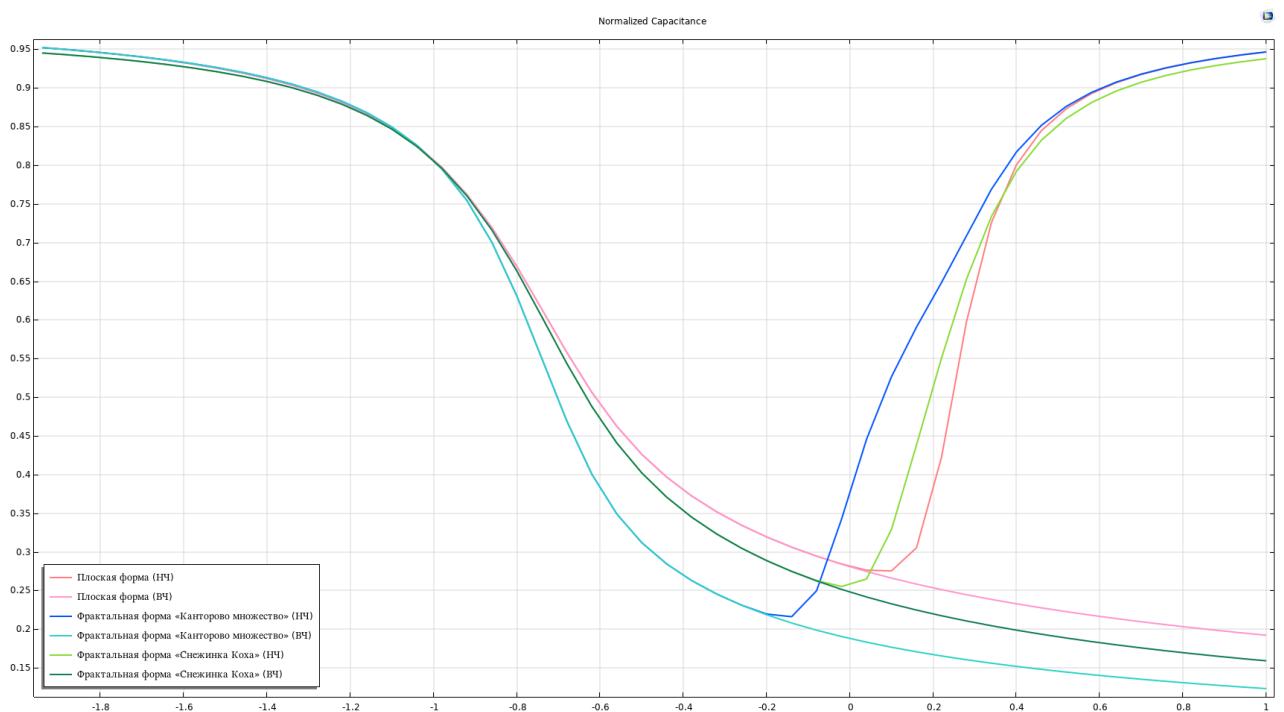


Рисунок 4.24.

Вольт-фарадные характеристики МЭМС различных типов

Оценка показала, что вольт-фарадные характеристики ёмкостных элементов с фрактальной топологией имеют такую же форму, как и характеристика ёмкостного элемента с плоской топологией, однако подчиняются зависимости, которую бы имели вольт-фарадные характеристики аналогичных ёмкостных элементов с плоской топологией и меньшей толщиной диэлектрика [98].

Для поиска толщины диэлектрика ёмкостных элементов с фрактальной топологией, с которой их вольт-фарадные характеристики совпали бы с характеристикой элемента с плоской топологией, был использован алгоритм формирования топологии фрактальных микросистем по заданным электрическим характеристикам (см. Рисунок 3.13). Полученные с применением алгоритма вольт-фарадные характеристики показаны на Рисунке 4.25.

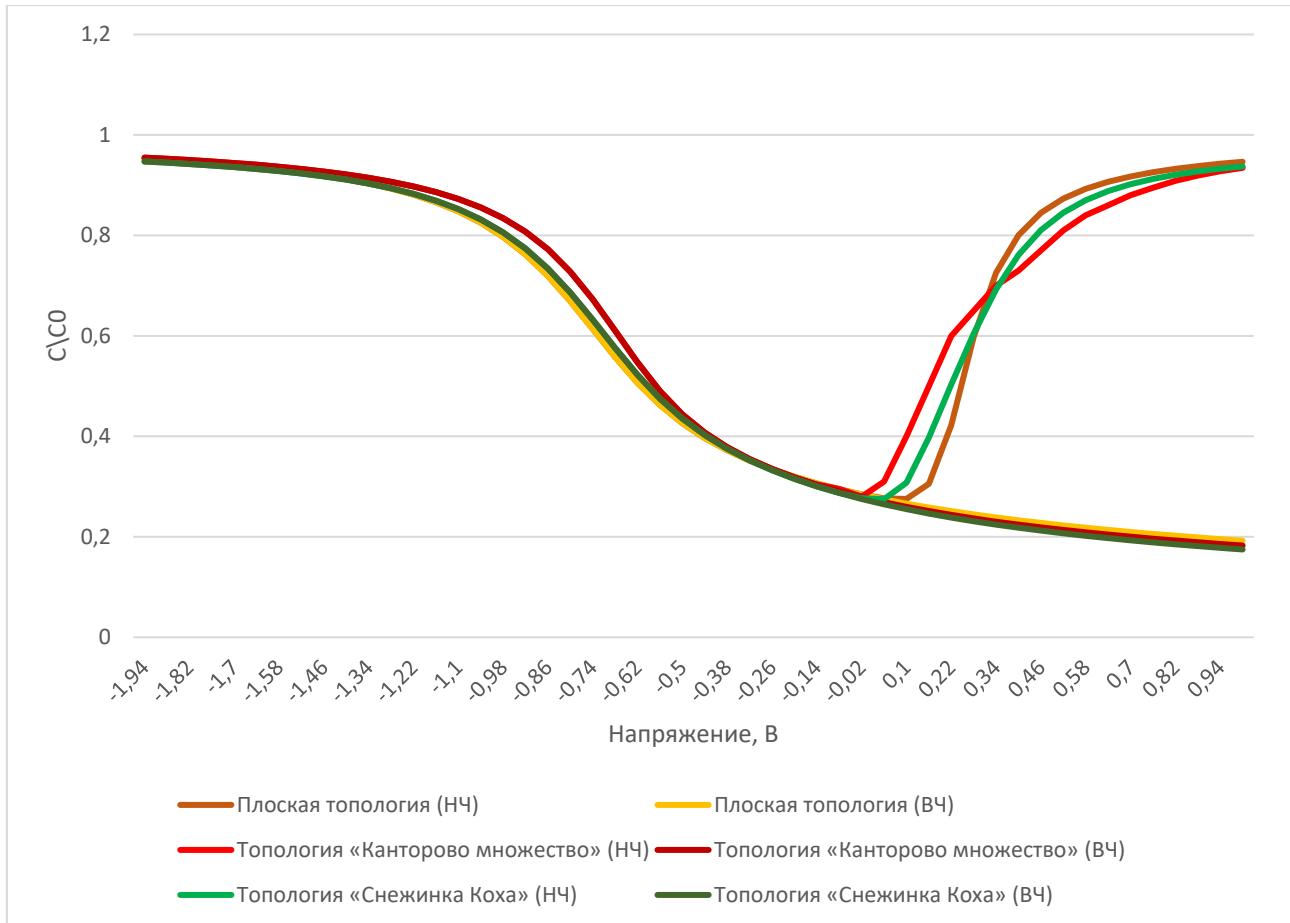


Рисунок 4.25.

Сравнение вольт-фарадных характеристик ёмкостных элементов МЭМС с различной топологией (ВЧ — высокие частоты, НЧ — низкие частоты)

Результаты моделирования показали, что при толщине диэлектрика 0,1 мкм для элемента с плоской топологией, 0,15 мкм для элемента с параллельной фрактальной топологией и 0,11 мкм для элемента с фрактальной топологией на основе снежинки Коха вольт-фарадные характеристики совпадают с разницей не более 5% в области высоких частот.

Выводы по главе 4

Исследование алгоритма компьютерного моделирования электрических характеристик микроэлектромеханических систем под воздействием тяжёлых заряжённых частиц показало, что полученный график зависимости изменения тока, протекающего через МЭМС, от угла внедрения ТЗЧ соответствует ожидаемым результатам. В то же время использование параллельного алгоритма компьютерного моделирования электрических характеристик микроэлектромеханических систем под воздействием тяжёлых заряжённых частиц позволяет значительно (в зависимости от количества используемых вычислительных узлов) сократить временные затраты на моделирование (до 10 раз в проведённом эксперименте).

При исследовании алгоритма с использованием упрощённого цифрового двойника было показано, что использование функции аппроксимации 4 степени даёт высокую точность с отклонением не больше 5,5% от исходных данных. С учётом сравнительно небольшой вычислительной сложностью таких функций, аппроксимационный подход к построению упрощённых цифровых двойников МЭМС позволяет многократно снизить временные затраты на моделирование радиационной стойкости микросистем при незначительном влиянии на точность получаемых в результате моделирования результатов.

Исследование алгоритма компьютерного моделирования электрических характеристик распределённых МЭМС под воздействием ТЗЧ показало, что фрактальная топология микросистем имеет преимущества перед плоской топологией при многократных попаданиях тяжёлых заряженных частиц в распределённые микросистемы. По результатам десяти тысяч итераций алгоритма ФМЭМС с параллельной фрактальной формой показали меньшие средние значения и стандартные отклонения экстремумов тока.

По результатам исследования алгоритма оценки механических характеристик МЭМС показано, что топология микроконденсаторов, используемых в акселерометрах гребенчатого типа, не оказывает существенного

влияния на собственные частоты акселерометров, следовательно, не оказывает влияния на их вибрационную чувствительность, и, в конечном итоге, не должна оказывать влияния на показания приборов, построенных на основе таких акселерометров.

Исследование алгоритма формирования топологии фрактальных МЭМС показало, что для получения фрактальных МЭМС с электрическими характеристиками, совпадающими с МЭМС с плоской топологией, требуется изменение физических характеристик ФМЭМС, например, толщины диэлектрика. Разработанный алгоритм подтвердил эффективность в поиске топологии фрактальных МЭМС, обеспечивающей разницу электрических характеристик не более 5% по сравнению с МЭМС с плоской параллельной топологией.

Общие выводы и заключение

При выполнении диссертационной работы в рамках решения поставленных задач по разработке алгоритмов и методов моделирования радиационной стойкости фрактальных электростатических МЭМС были достигнуты следующие результаты:

1. В результате проведенного аналитического обзора литературных источников было установлено, что на данный момент нет разработанных методов компьютерного моделирования радиационной стойкости, электрических и механических характеристик электростатических фрактальных МЭМС.

2. Впервые разработан и реализован алгоритм компьютерного моделирования воздействия тяжёлых заряженных частиц на электростатические ФМЭМС. Тестирование алгоритма показало, что МЭМС с фрактальной топологией имеют большую стойкость при одиночных попаданиях тяжёлых заряженных частиц по сравнению с МЭМС с плоской топологией.

3. Впервые разработан параллельный алгоритм компьютерного моделирования воздействия тяжёлых заряженных частиц на электростатические ФМЭМС. Тестирование алгоритма показало, что, в зависимости от количества используемых вычислительных узлов в кластере, возможно сокращение временных затрат по сравнению с алгоритмом компьютерного моделирования воздействия тяжёлых заряженных частиц на электростатические ФМЭМС в ~9 раз и более. Разработано программное обеспечение, реализующее указанный алгоритм.

4. Впервые разработан и реализован алгоритм компьютерного моделирования стойкости распределённых электростатических МЭМС к воздействиям тяжёлых заряженных частиц. Тестирование алгоритма показало, что МЭМС с фрактальной топологией имеют большую стойкость при

множественных попадания тяжёлых заряженных частиц по сравнению с МЭМС с плоской топологией. Разработано программное обеспечение, реализующее указанный алгоритм.

5. Исследованы вопросы построения упрощённых цифровых двойников электростатических ФМЭМС для моделирования воздействия тяжёлых заряженных частиц. Исследование показало, что использование упрощённых цифровых двойников позволяет сократить время на моделирования воздействий ТЗЧ на электростатические ФМЭМС в ~10 раз без существенной потери точности.

6. Впервые разработан и реализован алгоритм компьютерного моделирования воздействия тяжёлых заряженных частиц на электростатические микросистемы с учётом технологических погрешностей. Тестирование алгоритма показало, что важно учитывать технологические погрешности при принятии решения о применимости ФМЭМС в конечных устройствах.

7. Впервые разработан и реализован алгоритм оценки изменений механических характеристик электростатических ФМЭМС. Исследование алгоритма показало, что фрактальная топология электростатических МЭМС не оказывает существенного влияния на механические характеристики.

8. Впервые разработан и реализован алгоритм генерации топологии электростатических ФМЭМС по заданным электрическим характеристикам. Тестирование алгоритма показало, что фрактальная топология МЭМС оказывает существенное влияние на электрические характеристики (на примере вольт-фарадных характеристик) электростатических МЭМС, однако, при необходимости, эти изменения могут быть нивелированы с использованием разработанного алгоритма.

Список использованной литературы

1. Конструкция микросистемы с повышенной радиационной стойкостью к воздействию одиночных заряженных частиц: патент 2659623 С1 РФ / Терехов В. В. [и др.]; заявл. 06.03.2017; опубл. 03.07.2018, Бюлл. №19.
2. Shea H. R. Effects of Radiation on MEMS // MEMS- MOEMS: SPIE 7928 Proceedings. San Francisco, 2011. Vol. 7928. P. 96-108.
3. Зинченко Л. А. САПР Наносистем. М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. 222 с.
4. Радиационная стойкость микроэлектромеханических систем / В. В. Терехов [и др.] // Наноинженерия, 2015. № 9(51). С. 13–17.
5. Ануров А. Е. Методы формирования объёмных микроструктур устройств микроэлектроники и микросистемной техники космического назначения: дис. ... канд. техн. наук. Москва. 2018. 149 с.
6. Косолапов И. А. Маршрут автоматизации системного проектирования микрооптоэлектромеханических систем: дис. ... канд. техн. наук. Москва. 2015. 104 с.
7. Kosolapov I. A. Simulation of Distributed MOEMS for Smart Environments / Shakhnov V. A., Zinchenko L. A., Kosolapov I. A. // The Tenth International Conference on Advanced Semiconductor Devices and Microsystems. Smolenice, 2014. P. 1-4.
8. Liao W. Total-Ionizing-Dose Effects on Al/SiO₂ Bimorph Electrothermal Microscanners / W. Liao, E. X. Zhang, M. L. Alles // IEEE Transactions on Nuclear Science, 2018. Vol. 65(8). P. 2260-2267.
9. Hailong C. Probing heavy ion radiation effects in silicon carbide (SiC) via 3D integrated multimode vibrating diaphragms / C. Hailong, J. Hao, L. Wenjun // Applied Physics Letters, 2019. Vol. 114(10). P. 101901.
10. Nano-crystalline graphite for reliability improvement in MEM relay contacts / S. Rana [et. al.] // Carbon, 2018. Vol. 133. P. 193-199.

11. Dopant-Type and Concentration Dependence of Total-Ionizing-Dose Response in Piezoresistive Micromachined Cantilevers / C. N. Arutt [et. al.] // IEEE Transactions on Nuclear Science, 2018. Vol. 66, No. 1. P. 397-404.
12. Reliability assessment and failure mode analysis of MEMS accelerometers for space applications / I. Marozau [et. al.] // Microelectronics Reliability, 2018. Vol. 88. P. 846-854.
13. Effects of gamma radiation on suspended silicon nanogauges bridge used for MEMS transduction / P. Janioud [et. al.] // Microelectronics Reliability, 2020. Vol. 114. P. 113736.
14. Radiation resistance of nanolayered silicon nitride capacitors / M. Romanova [et. al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2020. Vol. 471. P. 17-23.
15. Humidity sensors for high energy physics applications: A review / A. Kapic [et. al.] // IEEE Sensors Journal, 2020. Vol. 20, No. 18. P. 10335-10344.
16. Глушко А. А. Методы моделирования элементов КНИ КМОП СБИС с субмикронными проектными нормами: дис. ... канд. техн. наук. Москва. 2011. 128 с.
17. Khadilkar S. Optimizing open-source FPGA CAD tools / S. Khadilkar, M. Margala // IEEE High Performance Extreme Computing Conference (HPEC). Waltham, 2022. P. 1-4.
18. Соловьев А. А. Моделирование микроэлектромеханических систем в среде CoventorMP / А. А. Соловьев, Е. Ф. Певцов // Оптические технологии, материалы и системы (Оптотех - 2020): сб. тр. V науч.-техн. конф. Москва, 2020. С. 312-316.
19. Modular Measurement System for System-Efficient ESD Design on System and Component Level / L. Speckbacher [et. al.] // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2022. Vol. 64, No. 6. P. 1812-1819.
20. Li T. Using requirement-functional-logical-physical models to support early assembly process planning for complex aircraft systems integration / T. Li, H.

Lockett, C. Lawson // Journal of Manufacturing Systems, 2020. Vol. 54. P. 242-257.

21. Energy-cost-aware resource-constrained project scheduling for complex product system with activity splitting and recombining / B. Du [et. al.] // Expert Systems with Applications, 2021. Vol. 173. P. 114754.
22. Расчет несущей способности металлической решетчатой опоры контактной сети при кручении верхней части методом конечных элементов в САПР FEMAP / В. П. Ступицкий [и др.] // Транспорт Урала, 2021. № 1 (68). С. 99-102.
23. Газаров А. Р. Анализ и обработка информации, полученных с использованием метода конечных элементов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2021. № 5. С. 241-243.
24. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы. М.: Мир, 1984. 428 с.
25. Efficient exascale discretizations: High-order finite element methods / T. Kolev [et. al.] // The International Journal of High-Performance Computing Applications, 2021. Vol. 35(6). P. 527-552.
26. Донева О. В. Использование численных методов при решении инженерных задач / О. В. Донева, Е. С. Нигорожина // Университетская наука, 2020. №. 2. С. 171-173.
27. Logan D. L. A first course in the finite element method. Cengage Learning, 2011. 954 p.
28. Сукиасов В. Г. Анализ напряженного состояния звеньев базового механизма технологической машины / В. Г. Сукиасов, С. В. Федоров // Известия КГТУ, 2023. № 68. С. 80-94.
29. Metropolis N. The Monte Carlo method / N. Metropolis, S. Ulam // Journal of the American statistical association, 1949. Vol. 44, No. 247. P. 335-341.
30. Why the Monte Carlo method is so important today / D. P. Kroese [et. al.] // WIREs Comput Stat, 2014. Vol. 6, No. 6. P. 386-392.

31. Smith R. Atomic & ion collisions in solids and at surfaces: theory, simulation and applications. Cambridge: Cambridge University Press, 1997. 309 p.
32. Robinson M. Computer simulation studies of high-energy collision cascades // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B, 1992. No. 67. P. 396-400.
33. The Stopping and Range of Ions in Matter / URL: <http://www.srim.org> (дата обращения: 11.04.2023).
34. Simulation of heavy charged particles damage on MEMS / V. V. Terekhov [et al.] // Micro- and Nanoelectronics: Proceedings SPIE 10224 of International Conference. Zvenigorod, 2016. P. 102241C. (SCOPUS 2-s2.0-85011599354, Web of Science WOS: 000393152900048)
35. Ziegler J. F SRIM - The Stopping and Range of Ions in Matter. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research / J. F. Ziegler, J. P. Biersack, M. D. Ziegler. 2010. P. 1818-1823
36. Компьютерное моделирование защиты микроэлектромеханических систем от потоков протонов / В. В. Терехов [и др.] // Будущее машиностроения России: сб. тр. IX Всеросс. конф. молодых ученых и специалистов. М.: Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, 2016. С. 794–798.
37. Программный модуль автоматизированного расчета параметров экранов защиты бортовой электронной аппаратуры от радиационного воздействия / Л. А. Зинченко [и др.] // Программные продукты и системы, 2020. № 2. С. 236-242.
38. Shulga V.I. A Comment on the Computer Simulation Program SRIM // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2019. Vol. 13. P. 562–565.
39. Kerdijk L. Simulating Sn Ion Collisions on 4dn Targets. Doctoral dissertation. University of Groningen. 2020. 66 p.
40. High resolution and in situ investigation of defects in Bi-irradiated Si / M. O. Ruault [et. al.] // Philosophical Magazine, 2011. Vol. 50, No. 5. P. 667-675.

41. Amirkhani M. A. Evaluation of the radiation damage effect on mechanical properties in Tehran research reactor (TRR) clad / M. A. Amirkhani, F. Khoshahval // Nuclear Engineering and Technology, 2020. Vol. 52, No. 12. P. 2975-2981.
42. Technology Computer Aided Design // Synopsys. URL: <https://www.synopsys.com/silicon/tcad.htm> (дата обращения: 11.04.2023).
43. Бабанов Д. Т. Полупроводниковые слойные технологии производства и его применение / Д. Т. Бабанов, Ю. А. Иняминов // Символ науки: международный научный журнал, 2020. № 11. С. 9-13.
44. Жалнин В. П. Современные тенденции развития полупроводниковых технологий / В. П. Жалнин, А. С. Семенов, А. Д. Вандюков // Технологии инженерных и информационных систем, 2022. № 1. С. 95-103.
45. Recent development of SERS technology: Semiconductor-based study / B. Yang [et. al.] // Acs Omega, 2019. Vol. 4, No. 23. P. 20101-20108.
46. Глушко А. А. Моделирование воздействия тяжёлых заряженных частиц на характеристики полевых транзисторов структуры «кремний на изоляторе» / А. А. Глушко, Л. А. Зинченко, В. А. Шахнов // Радиотехника и электроника, 2015. № 60. С. 1134-1140.
47. Exergy analysis and energy output improvement of the micro-thermophotovoltaic system via investigating the fractal angles of secondary Y-shaped fins in the micro combustor / X. Zongguo [et. al.] // Fuel, 2023. Volume 334, Part 1. ISSN 0016-2361
48. Simulation of Radiation Characteristics of Sierpinski Fractal Geometry for Multiband Applications / P. S. R. Chowdary [et. al.] // International Journal of Information and Electronics Engineering, 2013. Vol. 3, No. 6. P. 618-621.
49. Muthuramalingam K. Design and analysis of Minkowski fractal antenna for wideband THz frequency tuning/multiband operation in a MIMO antenna system / K. Muthuramalingam, W.-C. Wang // Journal of Applied Physics, 2023. Vol. 133, No. 20. P. 204902

50. Басараб М. А. Развитие и обобщение теорий R-функций и атомарных функций в задачах электродинамики: дис. ... докт. физ.-мат. наук. Москва. 2004. 289 с.
51. Microwave characteristics of liquid-crystal tunable capacitors / Yeh, Jun-Jun [et. al.] // Electron Device Letters, IEEE, 2005. Vol. 26(7). P. 451-453.
52. Computer Simulation of Heavy Charged Particles Damage on Distributed Microsystems / V. V. Terekhov [et. al.] // Micro- and Nanoelectronics: International Conference. Moscow-Zvenigorod, 2018. P. 126.
53. Компьютерное моделирование воздействия тяжелых заряженных частиц на элементы распределённых микросистем / В. В. Терехов [и др.] // Информационные системы и технологии (ИСТ-2016): сб. тр. XXII межд. научн.-техн. конф. Нижний Новгород: Нижегородский Государственный Технический Университет им. Р. Е. Алексеева, 2016. С. 23.
54. Fe-based alloys and their shielding properties against directly and indirectly ionizing radiation by using FLUKA simulations / M. S. Al-Buraihi [et. al.] // Physica Scripta, 2021. Vol. 96, No. 4. P. 45303.
55. OPAL a versatile tool for charged particle accelerator simulations / A. Adelmann [et. al.] // 2019. URL: <https://arxiv.org/pdf/1905.06654.pdf> (дата обращения: 11.04.2023).
56. Терехов В. В. Алгоритм параллельных вычислений изменений электрических характеристик микросистем под воздействием тяжёлых заряженных частиц / В. В. Терехов, А. С. Ильин, Ю. С. Невзорова // Радиолокация и связь - перспективные технологии: сб. тр. XIX Молодежной науч.-техн. конф. М.: ООО "Издательство "Мир науки", 2022. С. 38–42.
57. Kurmendra A review on RF micro-electro-mechanical-systems (MEMS) switch for radio frequency applications / Kurmendra, R. Kumar // Microsystem Technologies, 2021. Vol. 27, No. 7. P. 2525-2542.

58. Development of a test plan and a testbed for performance analysis of MEMS-based IMUs under vibration conditions / D. Capriglione [et. al.] // Measurement, 2020. Vol. 158. P. 107734.
59. Метод снижения вычислительных затрат при анализе радиационной стойкости ёмкостных элементов распределенных МЭМС / В. В. Терехов [и др.] // Энергосбережение и эффективность в технических системах: сб. тр. V Межд. Науч.-техн. конф. студентов, молодых учёных и специалистов. Тамбов: Першина Р. В., 2018. С. 117–118.
60. Computer Simulation of Heavy Charged Particles Radiation Damage on Distributed Microsystems / V. V. Terekhov [et al.] // Micro- and Nanoelectronics – 2018 (ICMNE-2018): Proceedings of The International Conference. M.: MAKS Press, 2018. P. 126.
61. Компьютерное моделирование стойкости распределённых микросистем к воздействию тяжёлых заряженных частиц / В. В. Терехов [и др.] // Автоматизация. Современные технологии, 2020. Т. 74, № 11. С. 483–486.
62. Волкова Е. И. Особенности разработки чувствительного элемента МЭМС-вакуумметра / Е. И. Волкова, С. А. Попков // Наноиндустрия, 2020. Т. 13, № S4 (99). С. 527–528.
63. Multi-physical models of bending characteristics on the double-clamped beam switch for flexible electronic devices application / L. Han [et. al.] // Sensors, 2020. Vol. 20, No. 24. P. 7074.
64. Industry application of digital twin: From concept to implementation / X. Fang [et. al.] // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022. Vol. 121, No. 7-8. P. 4289-4312.
65. Conceptual digital twin modeling based on an integrated five-dimensional framework and TRIZ function model / C. Wu [et. al.] // Journal of manufacturing systems, 2021. Vol. 58. P. 79-93.
66. VanDerHorn E. Digital Twin: Generalization, characterization and implementation / E. VanDerHorn, S. Mahadevan // Decision support systems, 2021. Vol. 145. P. 113524.

67. Разработка 2D-моделей магнитного поля для реализации технологии цифровых двойников и порождающего проектирования силовых трансформаторов / А. И. Тихонов [и др.] // Вестник Ивановского государственного энергетического университета, 2020. № 3. С. 32-43.
68. Применение методологии уровней готовности для бережливой разработки цифровых двойников сложных инженерных систем / А. В. Сартори [и др.] // Экономика науки, 2020. Т. 6, № 1-2. С. 62-74.
69. Мирошниченко А. Д. Цифровые двойники: понятие, сущность, применение в мировой практике / А. Д. Мирошниченко, Е. В. Серикова // Мировая экономика: проблемы безопасности, 2020. № 2. С. 66-69.
70. Шиболденков В. Анализ применения концепций цифровых двойников в научноемком производстве / В. Шиболденков, О. А. Калинина // Десятые Чарновские чтения: сб. тр. X Всеросс. науч. конф. по организации производства. 2021. С. 216-222.
71. Aliyev A.G. Issues of application of digital twin technologies in the organization and management of the activities of innovative enterprises / A. G. Aliyev, R. O. Shahverdiyeva // Information Technologies, 2023. Vol. 29, No. 3. P. 162-168.
72. Костромин Р. О. Сравнительный обзор средств управления конфигурациями ресурсов вычислительной среды функционирования цифровых двойников // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2021. № 1 (21). С. 132-145.
73. Зырянов Д. А. Цифровые двойники в управление жизненным циклом изделий и технологий / Д. А. Зырянов, Е. М. Бадика, С. Г. Бабчинецкий // Chronos, 2022. Т. 7, № 6 (68). С. 28-33.
74. Серебрянский С. А. Цифровой двойник в едином информационном пространстве жизненного цикла как инструмент обеспечения конкурентоспособности изделия авиационной техники / С. А. Серебрянский, Д. Ю. Стрелец, М. В. Шкурин // Автоматизация в промышленности, 2021. № 1. С. 20-26.

75. Соловьев А. А. Современные решения для моделирования и проектирования МЭМС в среде CoventorMP / А. А. Соловьев, С. А. Курдюков // Электроника: Наука, технология, бизнес, 2021. № 3 (204). С. 66–71.
76. Recent advances in the development of the Texas Instruments phase-only microelectromechanical systems (MEMS) spatial light modulator / T. A. Bartlett [et. al.] // Emerging Digital Micromirror Device Based Systems and Applications XIII, 2021. Vol. 11698. P. 103-116.
77. De Pasquale G. Additive manufacturing of micro-electro-mechanical systems (MEMS) // Micromachines, 2021. Vol. 12, No. 11. P. 1374.
78. Additive manufacturing as an emerging technology for fabrication of microelectromechanical systems (MEMS) / S. Kumar [et. al.] // Journal of Micromanufacturing, 2019. Vol. 2, No. 2. P. 175-197.
79. Faudzi A. A. M. Application of micro-electro-mechanical systems (MEMS) as sensors: a review / A. A. M. Faudzi, Y. Sabzehmeidani, K. Suzumori // Journal of Robotics and Mechatronics, 2020. Vol. 32, No. 2. P. 281-288.
80. Фетисов М. С. Интеллектуальные системы управления вентиляцией на МЭМС датчиках дифференциального давления / М. С. Фетисов, В. Н. Репинский // Инновации. Наука. Образование, 2021. № 27. С. 1106-1118.
81. Sotnik S. Nano Devices and Microsystem Technologies: Brief Overview / S. Sotnik, V. Lyashenko, T. Shakurova // International Journal of Engineering and Information Systems (IJE AIS), 2021. Vol. 5(11). P. 74-82.
82. A versatile sacrificial layer for transfer printing of wide bandgap materials for implantable and stretchable bioelectronics / T. A. Pham [et. al.] // Advanced Functional Materials, 2020. Vol. 30, No. 43. P. 2004655.
83. Study on fusion mechanisms for sensitivity improvement and measurable pressure limit extension of Pirani vacuum gauges with multi heat sinks / J. Lai [et. al.] // Journal of Microelectromechanical Systems, 2019. Vol. 29, No. 1. P. 100-108.

84. Enhancing Performance of a MEMS-Based Piezoresistive Pressure Sensor by Groove: Investigation of Groove Design Using Finite Element Method / P. Thawornsathit [et. al.] // *Micromachines*, 2022. Vol. 13, No. 12. P. 2247.
85. Modular probecard-Measurement Equipment for Automated Wafer-Level Characterization of High Precision MEMS Gyroscopes / S. Weidlich [et. al.] // *Inertial Sensors and Systems (INERTIAL): 2022 IEEE International Symposium*. 2022. P. 1-4.
86. Silicon-chip based electromagnetic vibration energy harvesters rapidly fabricated by wafer-level molten metal micro-casting technique / R. Han [et. al.] // *Micro Electro Mechanical Systems (MEMS): IEEE 33rd International Conference*. 2020. P. 275-278.
87. Hajare R. MEMS based sensors—a comprehensive review of commonly used fabrication techniques / R. Hajare, V. Reddy, R. Srikanth // *Materials Today: Proceedings*, 2022. Vol. 49. P. 720-730.
88. Ситников А. В. Высокочастотные магнитные и электрические свойства пленок и функциональных структур на основе нанокомпозита (Co40Fe40B20) X (SiO₂) 100-X: дис... канд. физ.-мат. наук. Воронеж. 2022. 144 с.
89. Иващенко Е. И. Метод размерного стоп-травления кремния в производстве изделий микромеханики / Е. И. Иващенко, Ю. Б. Цветков // *Микросистемная техника*, 2000. № 1. С. 6.
90. Анализ вибрационной устойчивости фрактальных микросистем / В. В. Терехов [и др.] // *IS&IT'17: тр. конгресса по интеллектуальным системам и информационным технологиям*. Дивноморское: Южный федеральный университет, 2017. С. 154–158.
91. Python / URL: <https://www.python.org> (дата обращения: 11.04.2023).
92. C++20 / URL: <https://en.cppreference.com/w/cpp/20> (дата обращения: 11.04.2023).
93. Qt 6 / URL: <https://www.qt.io/product/qt6> (дата обращения: 11.04.2023).

94. TCAD and Cognitive Visualization in Electronic Engineering Education: BMSTU Case Study / V. V. Terekhov [et al.] // Inforino: Proceedings: 5 of 5th International Conference on Information Technologies in Engineering Education. Moscow, 2020. P. 1–4. (SCOPUS 2-s2.0-85086895922)
95. Модель связи параметров тяжёлых заряженных частиц с характеристиками микросистем / В. В. Терехов [и др.] // сб. тр. XI Ежегодной конф. Нанотехнологического общества России. М.: Общероссийская общественная организация «Нанотехнологическое общество России», 2020. С. 31–32.
96. Терехов В. В. Выбор модели аппроксимации для исследования электрических характеристик микросистем под влиянием тяжелых ионов // Будущее машиностроения России: сб. тр. XIV Всеросс. конф. молодых ученых и специалистов (с международным участием). М.: Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, 2022. Т. 2. С. 247–253.
97. Методика компьютерного моделирования воздействия тяжёлых заряженных частиц на распределённые микросистемы / В. В. Терехов [и др.] // Радиолокация и связь - перспективные технологии: сб. тр. XV Молодежной науч.-техн. конф. М.: ООО "Издательство "Мир науки", 2017. С. 84–86.
98. Анализ электрических характеристик ёмкостных элементов микросистем с фрактальной формой / В. В. Терехов [и др.] // сб. тр. XII Ежегодной конф. Нанотехнологического общества России. М.: Общероссийская общественная организация «Нанотехнологическое общество России», 2021. С. 20–21.
99. Compact modeling and digital twins of capacitive fractal microsystems: characteristics variations caused by heavy charged particles / V. V. Terekhov [et al.] // Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE): 5th International Youth Conference. Moscow, 2023. P. 1–5. (SCOPUS 2-s2.0-85154584867)

100. Computer Simulation of Heavy Charged Particles Radiation Damage on Microsystems / V. V. Terekhov [et al.] // Micro- and Nanoelectronics – 2016 (ICMNE-2016): Proceedings of The International Conference. M.: MAKS Press, 2016. P. 159.
101. Железников Д. А. Исследование и разработка методов автоматизации топологического проектирования для реконфигурируемых систем на кристалле: дис. ... канд. техн. наук. Москва. 2019. 136 с.
102. Верстов В. А. Параллельный алгоритм трансформации топологического слоя цифровой схемы при наличии ограничений технологии двойного шаблона: дис. ... канд. техн. наук. Москва. 2016. 129 с.