

*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

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва, 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетом образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н. Э. Баумана).

**Научный руководитель:**

**Зинченко Людмила Анатольевна** — доктор технических наук, профессор.

**Официальные оппоненты:**

**Ушаков Пётр Архипович** — доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова», профессор кафедры «Конструирование радиоэлектронной аппаратуры».

**Козлов Дмитрий Владимирович** — кандидат технических наук, акционерное общество «Российская корпорация ракетно-космического приборостроения и информационных систем», начальник сектора микромеханики.

**Ведущая организация:** федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Защита диссертации состоится «15» февраля 2024 г. в \_\_:\_\_ на заседании диссертационного совета 24.2.331.19 при МГТУ им. Н. Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, зал Учёного совета ГУК МГТУ им. Н. Э. Баумана.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте МГТУ им. Н. Э. Баумана <https://bmstu.ru>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, Учёному секретарю диссертационного совета 24.2.331.19, кафедра ИУ-3.

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» 2023 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Сакулин Сергей Александрович

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Актуальность.** Микроэлектромеханические системы (МЭМС) в последние десятилетия нашли применение в различных отраслях. В связи с широким распространением МЭМС исследование вопросов надежности МЭМС является одной из актуальных проблем. 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.

Важнейшим методом исследования при этом становится приборно-технологическое моделирование, которое, в конечном счете, позволяет снизить стоимость разработки за счет уменьшения материальных затрат на проведение экспериментальных исследований, а также повысить процент выхода годных МЭМС в серийном производстве. Этот метод основан на решении фундаментальных уравнений физики, описывающих процессы, протекающие в металлах, окислах и полупроводниках, и реализован в виде многомодульной технологической САПР (TCAD), которая позволяет исследовать поведение элементов МЭМС и технологические процессы их изготовления.

Перспективной разновидностью электростатических МЭМС являются фрактальные микросистемы (ФМЭМС) электростатического типа, поскольку последние обладают повышенной стойкостью к радиационным воздействиям. В данной работе рассматриваются ФМЭМС, основанные на фрактале «Канторово множество» (фрактальные микросистемы с параллельной фрактальной топологией) и основанные на фрактале «Снежинка Коха» с усечёнными углами. Поскольку идеальные фракталы недостижимы в реальности, в работе вместо них используются соответствующие предфракталы.

Однако существующие САПР в своём базовом варианте не могут быть использованы для построения полного интегрального маршрута моделирования влияния тяжёлых заряженных частиц на электростатические ФМЭМС, требуя использования нескольких САПР, вспомогательных программ и/или проведения дополнительных расчётов.

**Состояние проблемы.** Основной проблемой при создании электростатических ФМЭМС (ЭФМЭМС) является отсутствие универсальной методики компьютерного моделирования радиационной стойкости, электрических и механических характеристик ФМЭМС. Поскольку ФМЭМС могут базироваться на использовании различных физических принципов и использовать различные материалы, разработка такой методики становится невозможной из-за отсутствия и сложности в разработке универсальных инструментов моделирования. Так, существующие методики и модели физических процессов, используемые в САПР TCAD Sentaurus, не позволяют реализовать интегрированный маршрут моделирования влияния тяжёлых ионов на электрические характеристики ЭФМЭМС. Тем не менее, возможна разработка методов компьютерного моделирования отдельных типов ФМЭМС, прежде всего, основывающихся на одних и тех же физических принципах. Данная работа посвящена моделированию фрактальных МЭМС электростатического типа.

Модели физических процессов, заложенные в системе TCAD Sentaurus, являются результатом работ многих зарубежных исследователей. Наиболее известны

работы Антониадиса Д., Даттона Р., Оулдхема У., Ферри Д., Эйкерса Л., Гринича Э. В России с решением подобных задач связаны работы Киреева В. Ю., Королева М. А., Зебрева Г. И. Непосредственно с моделированием в системах TCAD связаны работы коллективов, возглавляемых Крупкиной Т. Ю., Петросянцем К. О., а также работы Виноградова Р. Н., Дроздова В. Г., Корнеева С. В., Седова А. В. и др.

**Цель работы** заключается в разработке и исследовании методов и алгоритмов компьютерного моделирования радиационной стойкости, электрических и механических характеристик ФМЭМС электростатического типа и их программной реализации.

**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 компьютерного моделирования стойкости одиночных и распределённых ФМЭМС электростатического типа, к воздействию тяжёлых заряженных частиц (ТЗЧ).
3. Разработка и исследование алгоритмов компьютерного моделирования механических характеристик фрактальных МЭМС электростатического типа.
4. Разработка и исследование алгоритма генерации 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 достижения поставленных целей и задач в работе использованы методы математического и компьютерного моделирования, численные методы, методы аппроксимации и обработки результатов экспериментов.

**Соответствие паспорту специальности.** Содержание диссертации соответствует пункту 1 паспорта специальности 2.3.7. «Компьютерное моделирование и автоматизация проектирования: «Методология компьютерного моделирования и автоматизированного проектирования в технике и технологиях, включая постановку, формализацию и типизацию проектных и технологических процедур, алгоритмов и процессов проектирования».

**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.
2. Разработаны и исследованы алгоритмы компьютерного моделирования стойкости ёмкостных элементов фрактальных МЭМС электростатического типа к воздействиям ТЗЧ, в том числе с учётом технологических погрешностей при производстве.
3. Разработан алгоритм оценки механических характеристик фрактальных МЭМС электростатического типа.
4. Разработан алгоритм формирования топологии электростатических фрактальных МЭМС по заданным электрическим характеристикам.

5. Предложен способ 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.

**Личный вклад.** В рамках проводимого исследования автором были самостоятельно разработаны оригинальные алгоритмы компьютерного моделирования стойкости одиночных фрактальных МЭМС электростатического типа к одиночным попаданиям тяжёлых заряженных частиц, а также программное обеспечение, позволяющее автоматизировать процедуру оценки стойкости ФМЭМС электростатического типа к воздействию ТЗЧ.

**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.** Разработан маршрут компьютерного моделирования одиночных ёмкостных элементов ФМЭМС электростатического типа. На основании разработанного маршрута разработано алгоритмическое и программное обеспечение для автоматизации исследования стойкости электростатических микросистем к воздействиям тяжёлых заряженных частиц.

Предложенные в диссертации алгоритмы и разработанное программное обеспечение были использованы при выполнении научно-исследовательских работ в рамках грантов РФФИ 16-07-00676 А и 18-29-18043 мк, а также внедрены в работу АО «Научно-исследовательский институт электронной техники». Результаты работы используются в учебном процессе МГТУ им. Н. Э. Баумана и ВГЛТУ им. Г. Ф. Морозова.

**Апробация работы.** Основные теоретические и практические результаты работы были представлены и обсуждались на международной конференции «Микро- и наноэлектроника – 2016» (Звенигород, 2016); IX и XIV всероссийских конференциях молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (Москва, 2016, 2021); XXII международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии (ИСТ-2016)» (Нижний Новгород, 2016); конгрессе по интеллектуальным системам и информационным технологиям «IS&IT'17» (Дивногорское, 2017); XV молодежной научно-технической

конференции «Радиолокация и связь — перспективные технологии» (Москва, 2017); международной конференции «Микро- и наноэлектроника – 2018» (Звенигород, 2018); V международной научно-технической конференции студентов, молодых учёных и специалистов «Энергосбережение и эффективность в технических системах» (Тамбов, 2018); XI ежегодной конференции нанотехнологического общества России (Москва, 2020); V международной научно-практической конференции «Информатизация инженерного образования (INFORINO 2020)» (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 диссертации изложены в 17 научных работах, из них: 2 работы в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ; 3 публикации в изданиях, индексируемых в базах Scopus и Web of Science; патент РФ на конструкцию микросистемы с повышенной радиационной стойкостью к воздействию одиночных заряженных частиц.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, общих выводов и заключения, списка литературы. Общий объем диссертации 140 страниц, работа содержит 65 рисунков, 9 таблиц и список литературы из 102 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и определены задачи исследования, изложена структура диссертации.

**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. Анализ показал, что: (1) современные подходы к моделированию полупроводниковых приборов основываются на различных маршрутах (восходящем и нисходящем) и типах (компонентный и междисциплинарный) моделирования; (2) для моделирования ФМЭМС, устойчивых к ТЗЧ, могут быть использованы программный пакет SRIM (моделирование свойств материалов под воздействием ТЗЧ), САПР Sentaurus TCAD (временной анализ электрических характеристик под воздействием ТЗЧ) и САПР Ansys (анализ механических характеристик); (3) несмотря на существующие методы автоматизации моделирования кремниевых ИС, эти подходы не могут использоваться для ФМЭМС, поскольку последние могут состоять из различных материалах и основываться на различных физических принципах; (4) исходя из вышесказанного, моделирование ФМЭМС в рассмотренных пакетах связано с большим количеством ручных операций, в том числе предполагающих преобразование выходных данных одного ПО во входные данные другого.

Так, для оценки изменения электрических характеристик ФМЭМС под воздействием ТЗЧ на первом этапе необходимо провести моделирование по методу бинарной аппроксимации коллизий (ВСА), который основывается на методе Монте-Карло. В ВСА движение иона в материале аппроксимируется как серия независимых

столкновений с ядрами атомов, между которыми частица движется по прямой траектории, подвергается останавливающей силе электронов, но не теряет энергию при коллизиях с ядрами атомов. Более простая версия ВСА (Монте-Карло ВСА) используется в известном программном обеспечении, в т. ч. SRIM, и не учитывает последствия, вызванные смещением ядер атомов в кристаллической решётке после столкновения с ионом. С помощью метода ВСА можно рассчитать такие параметры, как глубина проникновения иона, боковой разброс, распределение энергии ядерного и электронного осаждения в пространстве, а также оценить ущерб, причиняемый материалу попаданиями множества тяжёлых заряженных частиц. При использовании указанного метода столкновения между ТЗЧ и ядрами атомов обрабатываются путём решения классического интеграла рассеяния в барицентрических координатах:

$$\Theta = \pi - 2I \int_A^\infty dr (r^2 g(r))^{-1}, \quad (1)$$

где  $\Theta$  — угол рассеяния;  $r$  — межатомное расстояние;  $I$  — импульс,  $g(r)$  — радиальная функция распределения;  $A$  —periцентр столкновения, определённый как  $g(A) = 0$ .

Численные методы, в частности метод конечных элементов (МКЭ) применяются для решения различных дифференциальных уравнений, в т. ч. уравнения Пуассона (2). Входными параметрами служат результаты, полученные при моделировании по методу ВСА.

$$\operatorname{div}(\varepsilon_0 \varepsilon \operatorname{grad} \psi) = -q(p - n + N_{D+} - N_{A-}), \quad (2)$$

где  $\varepsilon_0$  — электрическая постоянная;  $\varepsilon$  — диэлектрическая проницаемость;  $q$  — заряд электрона;  $N_{D+}$  и  $N_{A-}$  — концентрации ионизированных атомов донорной и акцепторной примесей соответственно;  $\psi$  — электростатический потенциал.

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

$$G(l, w, t) = G_{pot}(l) R(w, l) T(t), \quad (5)$$

где  $l$  — длина пробега электрона в полупроводнике;  $w$  — расстояние между траекторией иона и рассматриваемой точкой;  $t$  — время;  $G_{pot}(l)$  — 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:

$$G_{pot}(l) = \frac{1}{\pi w_t^2(l)} \operatorname{LET}_f(l), \quad (6)$$

где  $\operatorname{LET}_f(l)$  — функция энергетических потерь;  $w_t(l)$  — характеристический радиус, зависящий от энергетических потерь иона и его глубины проникновения.

Функция пространственного распределения генерации носителей заряда определяется следующим образом:

$$R(w, l) = \exp \left( - \left( \frac{w}{w_t(l)} \right)^2 \right). \quad (7)$$

Функция временного распределения генерации носителей заряда определяется следующим образом:

$$T(t) = \frac{2 \exp\left(-\left(\frac{t - t_0}{T_0}\right)^2\right)}{T_0 \sqrt{\pi} \left(1 + \operatorname{erf}\left(\frac{t - t_0}{T_0}\right)\right)}, \quad (8)$$

где  $t_0$  — момент времени проникновения иона в материал;  $T_0$  — константа, значение которой принята за  $2 \cdot 10^{-12}$ ;  $\operatorname{erf}$  — функция ошибок.

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

$$LET_f \approx \frac{\left(\frac{dE}{dx}\right)_{electron}}{100}, \quad (9)$$

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

В конце главы дана постановка задачи на разработку маршрута автоматизации моделирования электрических и механических свойства фрактальных электростатических микросистем, устойчивых к воздействию тяжёлых заряженных частиц, предусматривающего снижение количества ручных операций и временных затрат по сравнению с существующими подходами.

**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.

Для компьютерного моделирования воздействия тяжёлых заряженных частиц на микросистемы в САПР Sentaurus TCAD были разработаны модели ёмкостных элементов ФМЭМС (см. Рис. 1). 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  $0^\circ$  до  $89^\circ$ .

Для автоматизации многократных вычислений при компьютерном моделировании с изменением параметров моделирования (например, типа ТЗЧ или угла внедрения иона), в работе был предложен алгоритм компьютерного моделирования воздействия тяжёлых заряженных частиц на электростатические микросистемы. Временная сложность алгоритма:  $O(N^2 \log_2 N)$ , где  $N$  — количество конечных элементов модели. Алгоритм использует архитектуру параллелизации OpenMP (потоки запускаются на различных ядрах ЦПУ и имеют общий доступ к памяти).

Операции подготовки модели (задание топологии, построение конечно-элементной сетки) выполняются с использованием встроенных в Sentaurus TCAD инструментов, которые требуют только предварительного задания ряда параметров, не требующего вычислений. Однако непосредственно моделирование, связанное с решением 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, либо разработки сторонних модулей для САПР.

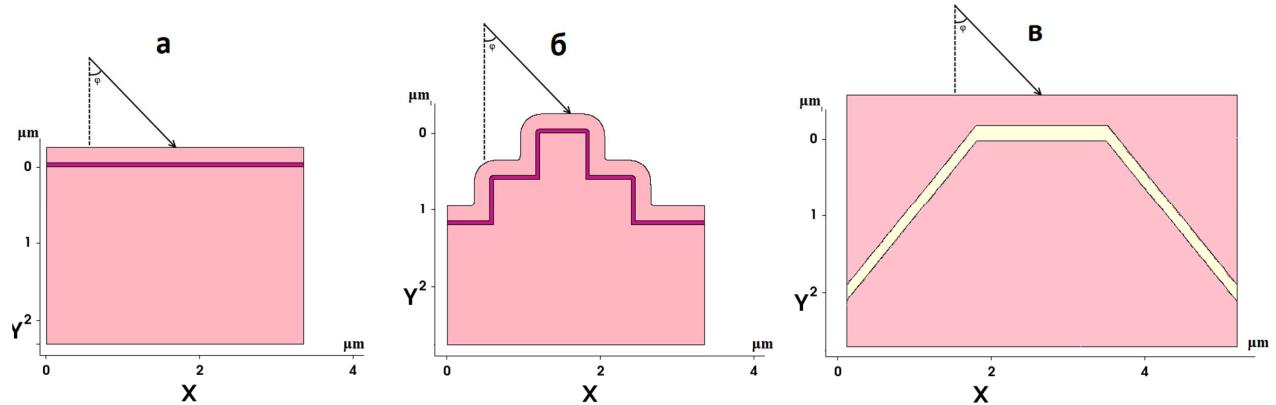


Рис. 1. Модели ёмкостных элементов МЭМС с плоской топологией (а), параллельной фрактальной топологией (б), фрактальной топологией «Снежинка Коха» (в)

Разработанный алгоритм включает два дополнительных этапа (вычисление характеристик ионов и вычисление векторов ТЗЧ), выполняющихся параллельно с основным рабочим процессом моделирования и не зависящих от него. Эти этапы позволяет реализовать маршрут интегрированного моделирования стойкости ёмкостных элементов МЭМС к воздействиям тяжёлых заряженных частиц. На шаге вычисления характеристик ионов алгоритм на основании заданных характеристик ионов и материала микросистемы выполняет расчёт характеристик внедрения тяжёлых заряженных частиц. Рассчитанные значения затем могут быть использованы на шаге решения уравнений Пуассона благодаря предварительному заданию правил подстановок результатов вычислений в конфигурационный файл TCAD.

Для снижения вычислительных затрат при моделировании изменений электрических характеристик ёмкостных МЭМС под воздействием ТЗЧ предложен параллельный алгоритм вычислений, использующий для моделирования кластер из вычислительных узлов. Временная сложность алгоритма при соблюдении условия  $N \geq M$ :  $O\left(\left[\frac{N}{M}\right]\right)$ , где  $N$  — количество наборов входных данных,  $M$  — количество вычислительных узлов.

В основе идеи алгоритма лежит возможность распараллеливания процесса моделирования на различных вычислительных узлах, каждый из которых получает разные входные данные, например угол внедрения иона. 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). Использование разработанного алгоритма позволяет сократить вычислительные затраты на моделирование изменений электрических характеристик ёмкостных микросистем под воздействием тяжёлых заряженных частиц. Например, для 90 наборов входных данных и 10 вычислительных узлов использование алгоритма позволило уменьшить временные затраты примерно в 10 раз (см. Рис. 3).

Для дополнительного снижения вычислительных затрат в работе предложено использование упрощённой модели ЭФМЭМС, идея которой заключается в

использовании аппроксимационных моделей. 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 ЭФМЭМС тока от угла внедрения ТЗЧ, но также снижается и точность модели упрощённой модели. Например, при задании шага в  $10^\circ$  временные затраты на моделирование снижаются примерно в 9 раз, но при этом всё ещё обеспечивается достаточную точность моделирования (см. Рис. 4).

В работе показано, что использование в качестве функции аппроксимации полинома четвёртой степени даёт высокую точность с отклонением не больше 5,5% от исходных данных. С учётом сравнительно небольшой вычислительной сложности таких функций предлагаемый подход к построению упрощённых моделей фрактальных МЭМС позволяет многократно (см. Рис. 3) снизить временные затраты на моделирование радиационной стойкости микросистем при незначительном влиянии на точность получаемых в результате моделирования результатов.

Для компьютерного моделирования стойкости распределённых микросистем к воздействиям тяжёлых заряженных частиц был разработан алгоритм (см. Рис. 2). Временная сложность алгоритма:  $O(N)$ , где  $N$  — количество векторов ТЗЧ.

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. Используя готовые зависимости, алгоритм случайным образом генерирует расположение заданного количества ёмкостных элементов микросистем, а также векторы падения тяжёлых заряженных частиц. Затем алгоритм анализирует попадания ионов в микроконденсаторы и извлекает из базы

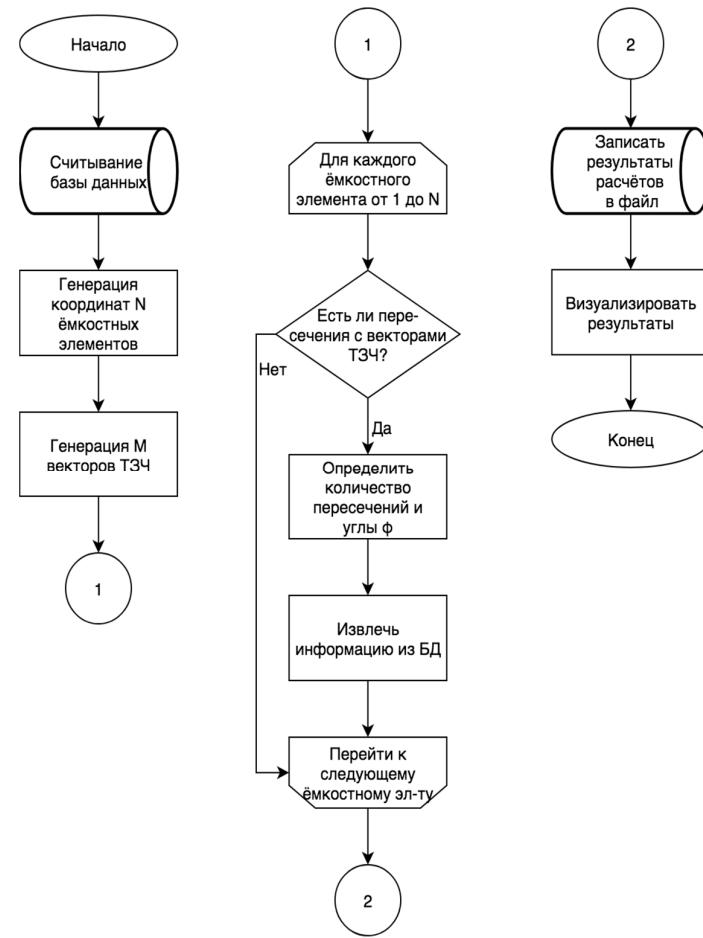


Рис. 2. Алгоритм компьютерного моделирования стойкости распределённых МЭМС к воздействиям ТЗЧ

данных значения тока, соответствующее конкретному углу падения ТЗЧ и их количеству. Полученные данные сохраняются в файл. Описанный алгоритм пригоден при анализе устойчивости распределённых МЭМС к попаданиям ТЗЧ с использованием метода Монте-Карло, поскольку при большом числе итераций алгоритма (тысячи и десятки тысяч) случайные входные данные приобретают вид дискретного равномерного распределения.

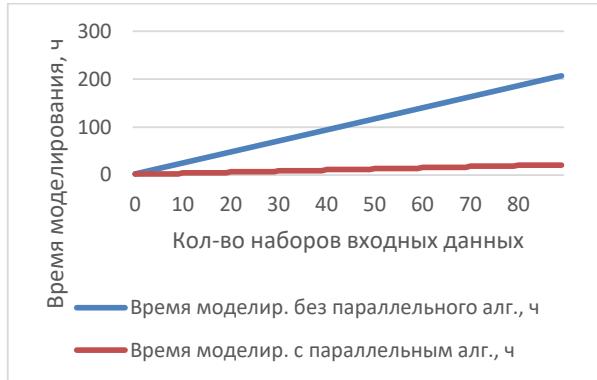


Рис. 3. Сравнение времени моделирования электрических характеристик электростатических МЭМС под воздействием ТЗЧ при использовании различных алгоритмов

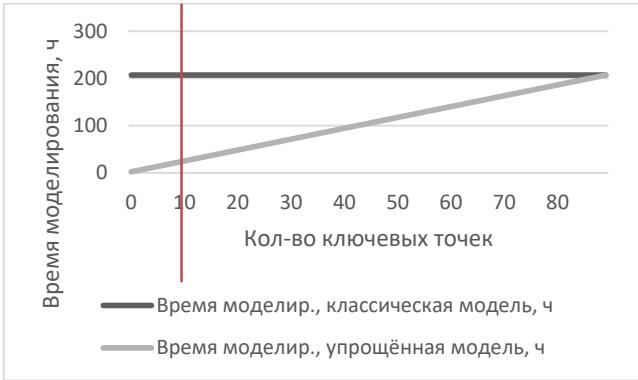


Рис. 4. Сравнение времени моделирования электрических характеристик электростатических МЭМС под воздействием ТЗЧ при использовании различных моделей

В третьей главе рассматривается методология 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.

Для компьютерного моделирования воздействия тяжёлых заряженных частиц на электростатические микросистемы с учётом технологических погрешностей был модифицирован алгоритм компьютерного моделирования воздействия тяжёлых заряженных частиц на электростатические микросистемы (см. Рис. 5). Временная сложность алгоритма:  $O(N^2 \log_2 N)$ , где  $N$  — количество конечных элементов модели.

Модифицированный алгоритм после сохранения результатов воздействия ТЗЧ на микросистему вносит изменения в топологию с учётом заданных в качестве входного параметра значений технологической погрешности и выполняется моделирование для модифицированной топологии. По завершении второго прохода алгоритм анализирует полученные за несколько проходов результаты и выполняет сохранение отчёта. Поскольку алгоритм обладает высокой ресурсоёмкостью, а результат выполнения первого алгоритма не всегда необходим, так как покажет заведомо лучшие результаты (характеризующие более высокую стойкость микросистем к воздействию тяжёлых заряженных частиц), пользователь может изменить входные параметры алгоритма таким образом, чтобы расчёт выполнялся

только с учётом технологических погрешностей топологии, что позволяет уменьшить количество проходов алгоритма.

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 алгоритм.

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. Это позволило упростить моделирование путём разделения модели на общую (неизменную) часть и модель ёмкостных элементов. Таким образом, был получен набор моделей, состоящий из модели неизменной части акселерометра и набор параметрическим моделей обкладок микроконденсаторов

акселерометра, что снизило затраты на ручное моделирование МЭМС. В алгоритме предусмотрена автоматизация получения конечной модели из описанных составных частей, а также автоматизация вычислений с сохранением результатов для каждой возможной комбинации исходных моделей. Полученные с использованием алгоритма модели можно анализировать различными способами: оценить нагрузочную

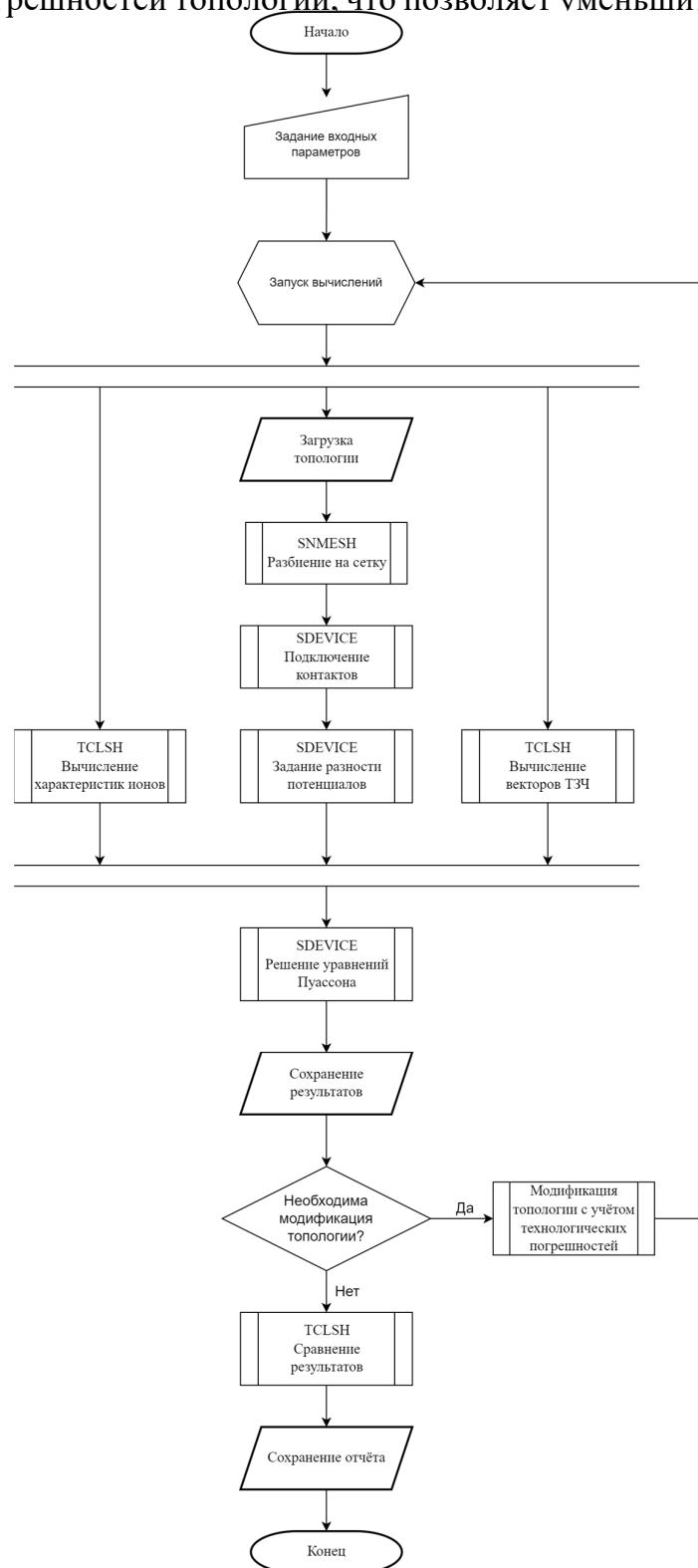


Рис. 5. Алгоритм компьютерного моделирования воздействия ТЗЧ на электростатические МЭМС с учётом технологических погрешностей

способность, исследовать собственные формы, резонансные частоты и т. д.

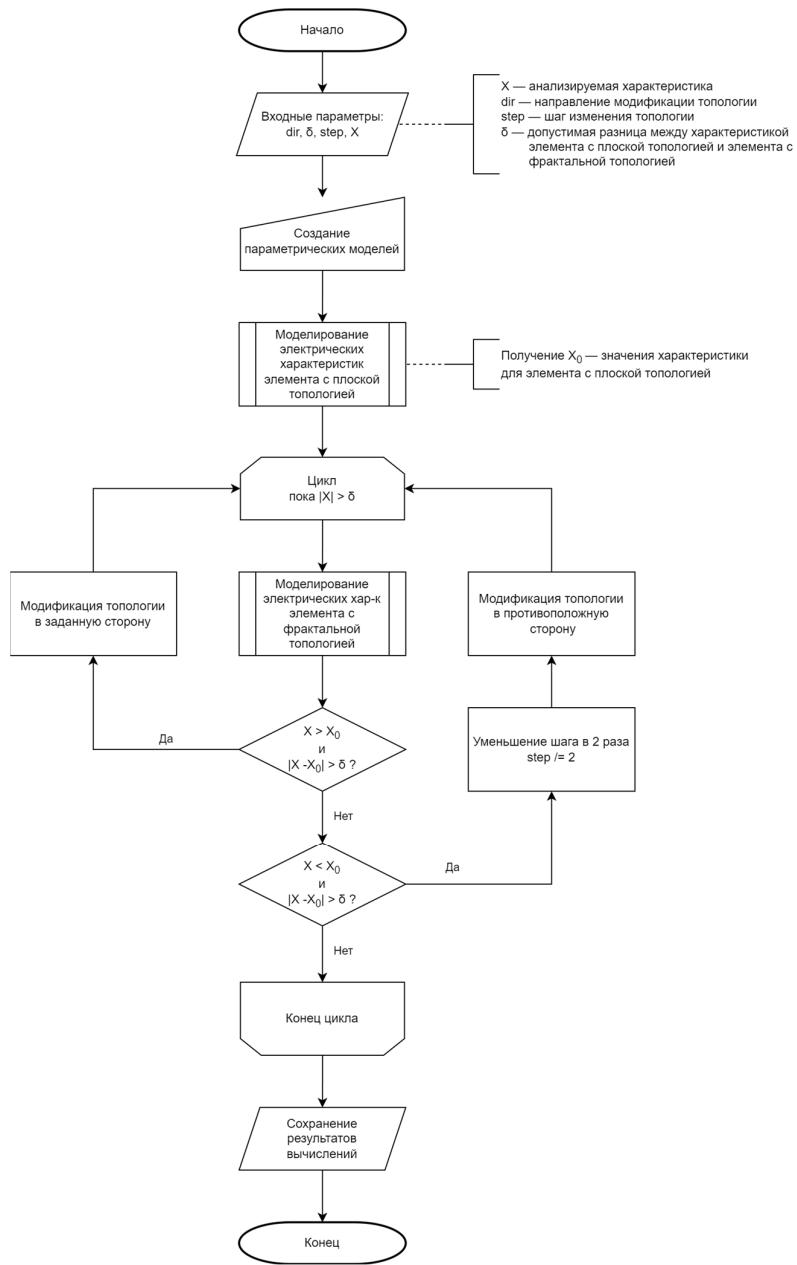


Рис. 6. Алгоритм генерации топологии фрактальных микросистем по заданным электрическим характеристикам

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  $X < X_0$ ).

Переход от плоской топологии ёмкостных микросистем к фрактальной может сопровождаться изменением электрических характеристик МЭМС. Для формирования топологии фрактальных микросистем по заданным характеристикам разработан алгоритм (см. Рис. 6). Временная сложность алгоритма определяется времененной сложностью алгоритма бинарного поиска.

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 ( $\delta$ ). При работе алгоритма выполняется моделирование электрических характеристик элемента с

**В четвёртой главе** рассматривается программное обеспечение, реализующее алгоритмы, предложенные во второй и третьей главах. 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, реализовано в виде стороннего модуля для САПР Sentaurus TCAD и разработано на языке программирования Python. Разработанный программный модуль позволяет использовать результаты вычислений в качестве входных параметров в конфигурационных файлах других инструментов.

Программное обеспечение, реализующее параллельный алгоритм моделирования изменений электрических характеристик электростатических МЭМС под воздействием ТЗЧ выполнено с использованием клиент-серверной архитектуры. Клиентская и серверная часть ПО разработаны на языке программирования Python.

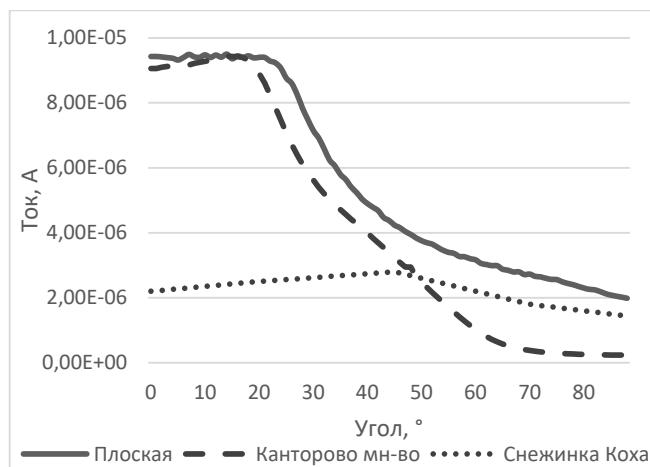


Рис. 7. График зависимости тока от угла внедрения ТЗЧ в ёмкостный элемент МЭМС с различной топологией

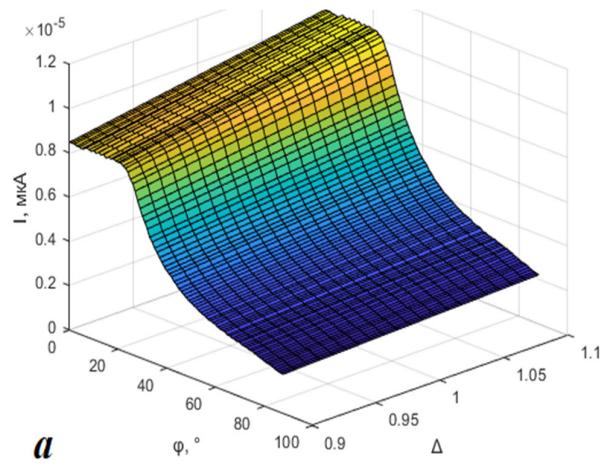


Рис. 8. График зависимости тока  $I$  от угла  $\varphi$  внедрения ТЗЧ в ёмкостный элемент МЭМС с учётом технологических погрешностей  $\Delta$  для элемента с плоской топологией

Программное обеспечение предназначено для работы на устройствах трёх типов: вычислительных узлах, управляющем сервере и рабочей станции. ПО, выполняемое на вычислительных узлах, представлено в виде программных модулей для САПР Sentaurus TCAD, а также автономного приложения, осуществляющего связь между вычислительным узлом и управляющим сервером. 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. 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.

Экспериментальные исследования показали высокую эффективность разработанных алгоритмов. На Рис. 7 показан график зависимости тока, проходящего через ёмкостный элемент МЭМС, от угла внедрения тяжёлой заряженной частицы, полученный по результатам компьютерного моделирования с использованием алгоритма компьютерного моделирования ТЗЧ на электростатические микросистемы и параллельного алгоритма моделирования изменений электрических характеристик электростатических ФМЭМС под воздействием ТЗЧ.

Работа алгоритма компьютерного моделирования воздействия ТЗЧ на электростатические МЭМС с учётом технологических погрешностей (см. Рис. 5) была протестирована аналогичным образом. В качестве входного параметра алгоритма были заданы технологические погрешности  $\pm 10\%$  на толщину осаждения кремния и поликремния. Полученные графики (см. Рис. 8–10) показали разницу изменения тока в 8–9% от изначальной модели для плоской и параллельной фрактальной топологии, 5–7% для топологии на основе Снежинки Коха.

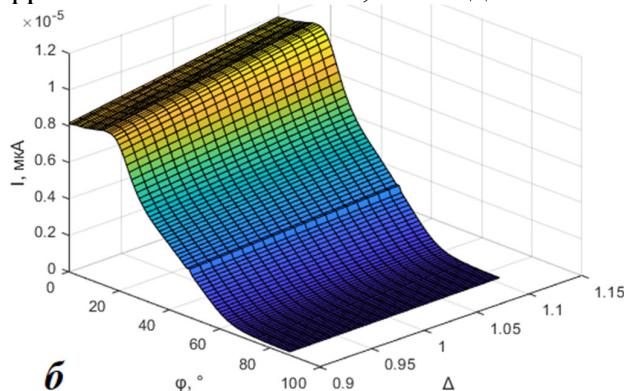


Рис. 9. График зависимости тока  $I$  от угла  $\varphi$  внедрения ТЗЧ в ёмкостный элемент МЭМС с учётом технологических погрешностей  $\Delta$  для элемента с фрактальной топологией на основе Канторова множества

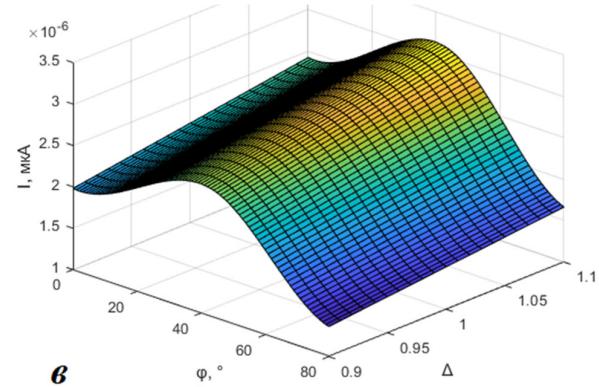


Рис. 10. График зависимости тока  $I$  от угла  $\varphi$  внедрения ТЗЧ в ёмкостный элемент МЭМС с учётом технологических погрешностей  $\Delta$  для элемента с фрактальной топологией на основе снежинки Коха

Алгоритм компьютерного моделирования распределённых МЭМС к воздействиям тяжёлых заряженных частиц был реализован в ПО MEMS Analyzer, написанном на языке программирования C++. 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.

Алгоритм оценки механических характеристик МЭМС при изменении формы ёмкостных элементов был протестирован на примере анализа вибрационной

устойчивости акселерометра гребенчатого типа. Анализ показал, что собственные частоты электростатических МЭМС с фрактальной топологией на первых трёх модах отличаются от собственных частот МЭМС с плоской топологией обкладок ёмкостных элементов не более, чем на 0,02%.

Была проведена оценка изменения вольт-фарадных характеристик ёмкостных элементов МЭМС с различной топологией. 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.

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 характеристикам. Результаты моделирования (см. Рис. 11) 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.

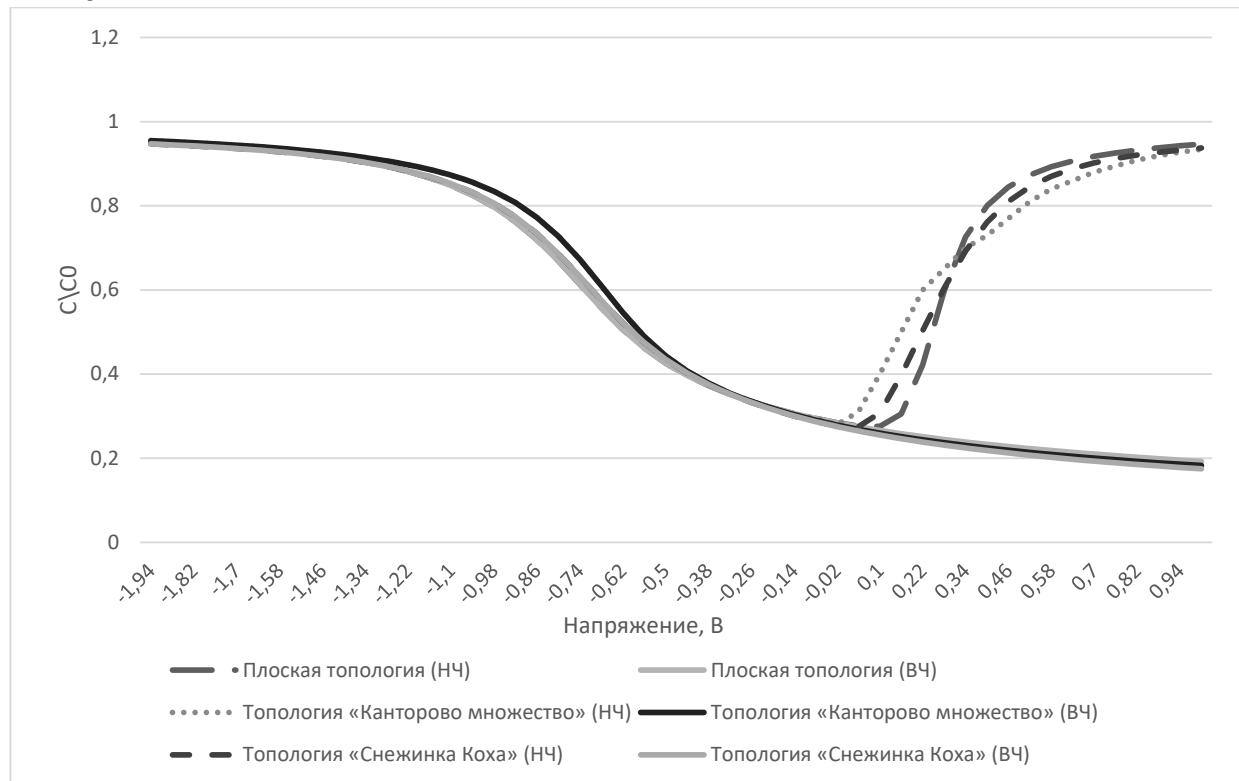


Рис. 11. Сравнение вольт-фарадных характеристик ёмкостных элементов МЭМС с различной топологией

**В общих выводах и заключении** представлены основные результаты работы.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

1. Проведён обзор и анализ существующего программного обеспечения, методов, алгоритмов и математических моделей для компьютерного моделирования воздействия тяжёлых заряженных частиц на электростатические МЭМС. 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. 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.

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

6. Разработан и реализован алгоритм компьютерного моделирования воздействия тяжёлых заряженных частиц на электростатические микросистемы с учётом технологических погрешностей. Тестирование алгоритма показало, что ЭФМЭМС с топологией на основе Снежинки Коха показывают наименьшее влияние технологических погрешностей на изменение тока.

7. 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. 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) ЭФМЭМС, однако, при необходимости, эти изменения могут быть нивелированы с использованием разработанного алгоритма.

## **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

*Публикации в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ:*

1. Радиационная стойкость микроэлектромеханических систем / В. В. Терехов [и др.] // Наноинженерия, 2015. № 9(51). С. 13–17.

2. 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.

*Публикации в изданиях, входящих в международные базы цитирования Scopus и Web of Science:*

3. 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)

4. 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)

5. 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)

*Патенты:*

6. 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.

*Прочие публикации:*

7. 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.

8. 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.

9. 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.

10. 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.

11. 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. 84–87.

12. 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.

13. 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.

14. 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.

15. 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.

16. 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.

17. 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.