

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО РАЗРЯДА ПРИ ИСПЫТАНИЯХ СРЕДСТВ МЕДИЦИНСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

В.Ф. Алексеев, А.В. Бужинский, Г.А. Пискун, И.Н. Богатко

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
ул. П. Бровки, 6, БГУИР, каф. ПИКС, 220013, Минск, Беларусь, тел. +375 17 2932207
E-mail: alexvikt@bsuir.by*

Abstract. The possibility of using the finite element method for simulation of electrostatic discharge during trials of medical electronics.

Моделирование физических процессов в большинстве случаев основано на использовании методов численного моделирования. В частности для моделирования электростатического разряда используется метод конечных элементов (численный метод решения задач электростатики).

Основная идея метода конечных элементов (МКЭ) состоит в минимизации функционала вариационной задачи на множестве кусочно-непрерывных функций, каждая из которых определена на конечном числе подобластей. Кусочно-непрерывные функции определяются с помощью значений непрерывной величины в конечном числе точек рассматриваемой области [1, 2].

В общем случае непрерывная величина заранее не известна, и нужно определить значение этой величины в некоторых внутренних точках области. Однако дискретную модель можно построить, если предположить, что числовые значения этой величины в каждой внутренней точке области известны. Для непрерывной величины поступают следующим образом:

1. В рассматриваемой области фиксируется конечное число точек (эти точки называются узлами).

2. Значение непрерывной величины в каждой узловой точке считается переменной, которая должна быть определена.

3. Область определения непрерывной величины разбивается на конечное число подобластей, называемых элементами. Эти элементы имеют общие узловые точки и в совокупности аппроксимируют форму области.

4. Непрерывная величина аппроксимируется на каждом элементе полиномом, который определяется с помощью узловых значений этой величины. Для каждого элемента определяется свой полином, но полиномы подбираются таким образом, чтобы сохранялась непрерывность величины вдоль границ элемента.

Важной особенностью МКЭ является возможность выделить из набора элементов такой, использование которого позволило бы определять функцию элемента независимо от его положения в общей связной модели и от других функций элементов. Задание функции элемента через произвольное множество узловых значений и координат позволяет использовать функции элемента для аппроксимации геометрии области.

Наиболее важными преимуществами метода конечных элементов, благодаря которым он широко используется, являются следующее [1...4]:

1. Свойства материалов смежных элементов не должны быть обязательно одинаковыми, что позволяет применять метод к объектам, составленным из нескольких материалов.

2. Криволинейная область может быть аппроксимирована с помощью прямолинейных элементов или описана точно с помощью криволинейных элементов, следовательно, МКЭ можно использовать для областей с любой формой границ.

3. Размеры элементов могут быть переменными, что позволяет укрупнить или измельчить сеть разбиения области на элементы и задавать переменную плотность размещения элементов в сети.

4. МКЭ позволяет рассматривать граничные условия (ГУ) с разрывной поверхностной нагрузкой, а также смешанные ГУ.

К недостаткам МКЭ относят: искусственное ограничение области расчета, дискретизацию окружающего пространства, выполнение новой дискретизации при изменении положения элементов.

Среди существующего многообразия программных продуктов, предназначенных для решения задачи моделирования электростатического разряда в газовой среде методом конечных элементов, можно выделить три универсальных пакета: *ANSYS*, *COMSOL Multiphysics*, *Maxwell* [1, 2]. Все три программных пакета являются универсальными и позволяют решать линейные и нелинейные задачи и обладают примерно одинаковой точностью и возможностями.

Пакет *COMSOL Multiphysics* позволяет моделировать практически все физические процессы, которые описываются дифференциальными уравнениями в частных производных (*PDE*). В *COMSOL Multiphysics* достаточно задать необходимые уравнения, при этом не требуется менять программный код. Программа содержит множество решателей, с помощью которых можно производить численное моделирование сложных физических систем, взаимодействующих друг с другом. Численное моделирование проводится МКЭ. Взаимодействие с программой возможно через графический интерфейс пользователя (*GUI*), либо с помощью программирования скриптов на языке *COMSOL Script* или *MATLAB*. *COMSOL Script*, которая интегрируется с *COMSOL Multiphysics* может работать как самостоятельный пакет. Этот язык-интерпретатор включает более 600 команд для численных расчетов и визуализации в режиме командной строки, а также позволяет создавать скрипты (процедуры, записанные в текстовом формате). Программа позволяет соединять модели в разных геометриях и связывать между собой модели разных размерностей.

Преимущества пакета *COMSOL Multiphysics*:

- моделирование основано на дифференциальных уравнениях в частных производных и позволяет решать уравнения МКЭ;
- позволяет расширять стандартные модели, использующие одно дифференциальное уравнение, в мульти-физические модели для расчета связанных между собой физических явлений;
- коэффициенты уравнений в частных производных задаются в виде понятных физических свойств и условий;
- использование различных математических способов для задания систем;
- различные виды анализа (стационарный и переходный анализ, линейный и нелинейный анализ, модальный анализ и анализ собственных частот);
- применяется конечно-элементный анализ вместе с сеткой, учитывающей геометрическую конфигурацию тел и контролем ошибок с использованием разнообразных и дополнительных численных решателей;
- позволяет с помощью переменных связи соединять модели в разных геометриях и связывать между собой модели разных размерностей.

Основными факторами при выборе программного пакета являлись:

- необходимы и достаточный функционал – возможность решать взаимосвязанные задачи с определенным набором распределенных параметров модели, а также возможность внесения изменений в алгоритм расчета с учетом специфических физических эффектов;

– наличие библиотек материалов с необходимыми параметрами и характеристиками, а также возможность вносить свои экспериментальные и расчетные характеристики в свойства материалов, создание своих библиотек материалов;

– простота использования – интуитивно понятный интерфейс, гибкость настройки.

Наиболее удобным продуктом для решения поставленных задач является среда разработки *COMSOL Multiphysics*.

Для моделирования воздействия электростатического разряда на интегральные микросхемы была выбрана система электродов в неоднородном поле: сфера-прямая. Радиус сферы равен 4 мм, а расстояние между электродами 1 мм. Поле-слабо-неоднородное: отношение максимального поля к среднему в отсутствии объемного заряда равно двум – в такой системе невозможно появление коронного разряд.

В геометрической области рисунок 3.1 решается система уравнений в частных производных. Для каждого уравнения задаются граничные условия: уравнение Нернста-Планка для концентрации положительных ионов, уравнение Нернста-Планка для концентрации электронов и уравнение Пуассона для электрического поля [1, 2].

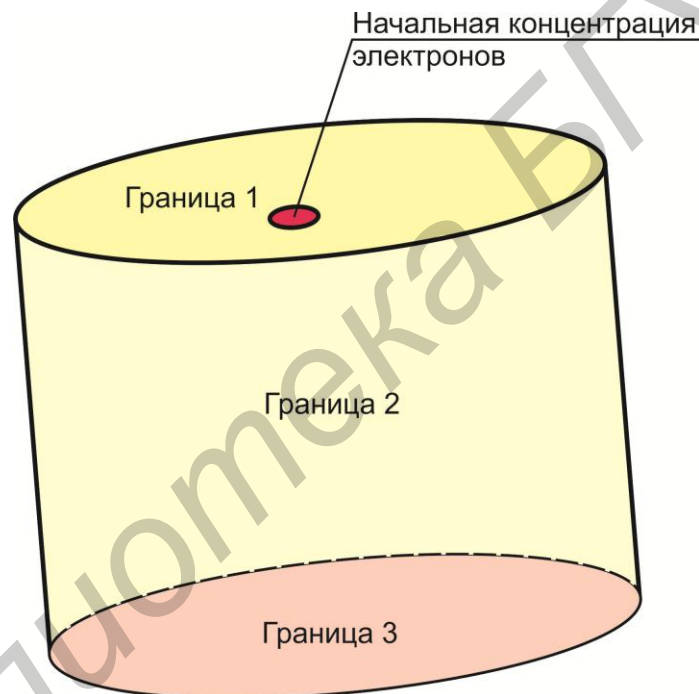


Рисунок 1 – Область моделирования

Граничные условия (ГУ) задаются для каждой границы (рисунок 3.1) отдельного уравнения [5]:

– Уравнение Нернста-Планка для положительных ионов. Для этого уравнения ГУ задаются либо как полный поток $n \cdot N = N_0$ для границы 1, где $N_0 = -ntflux_c_chekf$, либо как изоляция $n \cdot N = 0$ для границ 2 и 3.

– Уравнение Нернста-Планка для электронов. Здесь ГУ задаются как полный поток $n \cdot N = N_0$ для границы 3, где $N_0 = -ntflux_c2_chekf2$, и как изоляция $n \cdot N = 0$ для границ 1 и 2.

– Уравнение Пуассона. Для данного уравнения граница 1 (катод) определяется значением начального электрического потенциала $V = V_0$, граница 2 – как естественные ГУ $n \cdot D = 0$, а граница 3 (анод) – значением электрического потенциала равного нулю ($V = 0$).

В качестве начальных условий вблизи катода задано начальное облако электронов: начальная концентрация электронов в облаке задана на уровне 10^{16} 1/м³, в остальном пространстве начальная концентрация электронов задана равной нулю. Концентрация по-

ложительных ионов в начальный момент времени предполагается равной нулю. Начальный электрический потенциал на катоде равен 15 кВ.

Литература

1. **Пискун Г.А.**, Компьютерное моделирование процесса развития электростатического разряда в COMSOL MULTIPHYSICS / Г.А. Пискун, О.А. Кистень // Сборник материалов 4-ой международной научно-технической конференции «Приборостроение-2011». – Минск : БНТУ, 2011. – 3С. 378 – 379.
2. **Пискун Г.А.**, Математическое описание развития электростатического разряда в газовой среде в программном пакете COMSOL MULTIPHYSICS / Г.А. Пискун, О.А. Кистень // Сборник материалов 4-ой международной научно-технической конференции «Приборостроение-2011». – Минск : БНТУ. – С. 380 – 381.
3. **ESD** protected power amplifier design in CMOS for highly reliable RF ICs / A. Wang [et al.] // IEEE Journals & magazines. – 2011. – Vol. 58, № 7. – P. 2736–2743.
4. **Interaction** between electrostatic discharge and electromigration on copper interconnects for advanced CMOS technologies / D.K. Kontos [et al.] // Proc. of the Int. Reliability Physics Symp. – 2005. – P. 91–97.
5. **Алексеев, В. Ф.** Задание граничных условий в COMSOL Multiphysics при моделировании воздушного разряда / В. Ф. Алексеев, Г. А. Пискун, О. А. Кистень // Сборник материалов 5-ой Международной студенческой научно-технической конференции «Новые направления приборостроения». – Минск : БНТУ, 2012. – С. 306.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СРЕДСТВ МЕДИЦИНСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ МОЩНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИМПУЛЬСОВ

В.Ф. Алексеев, А.В. Бужинский, Г.А. Пискун, И.Н. Богатко

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
ул. П. Бровки, 6, БГУИР, каф. ПИКС, 220013, Минск, Беларусь, тел. +375 17 2932207
E-mail: alexvikt@bsuir.by*

Abstract. Approaches to ensure the functioning of the safety of medical electronics under the influence of powerful electromagnetic pulses.

Обеспечение функциональной безопасности средств медицинской электроники (СМЭ) требует решения следующих задач:

- разработки структурной электрофизической модели СМЭ для определения уровней электромагнитных помех на входах электронных блоков;
- создания новых эффективных методов оценки влияния мощных электромагнитных импульсов на основе применения параметрических макромоделей и методов приближенного расчета эквивалентных схем большой размерности для крупногабаритных СМЭ повышенной сложности;
- развития теории заряжения материалов СМЭ, учитывающей сток и перераспределения заряда за счет радиационной электропроводности полимерных материалов внешней поверхности медицинской аппаратуры;
- исследования и разработки методов и средств компьютерного моделирования процесса растекания токов по корпусу СМЭ;
- разработки методов и средств обеспечения функциональной безопасности СМЭ при воздействии мощных электромагнитных импульсов естественного и искусственного происхождения;