

**РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ В РАЗРЯДНОМ ПРОМЕЖУТКЕ  
МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО РАЗРЯДА НА СФЕРИЧЕСКИЙ ВЫСТУП  
КОРПУСА ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ**

УДК 537.2.001.24

Д. В. Комнатный\*

*Статья посвящена рассмотрению некоторых вопросов моделирования воздействия электростатическая разрядов на электронные технические средство, в том числе и военного назначения. Решается задача о расчете конфигурации электростатического поля в системе разрядного электрода произвольной формы и бесконечной заземленной плоскости со сферическим выступом. Эта задача может служить моделью воздействия электростатического разряда на неоднородность в виде болтового соединения. Для ее решения используется метод эквивалентных электродов для трехмерного случая. Приведены результаты численных расчетов на ЭВМ, которые показывают, что рассмотренный метод позволяет определять характеристики электростатического поля в рассмотренной системе тел с достаточной точностью.*

*The article is dedicated to considering of some questions of electrostatic discharge exposure on electronic hardware components modeling, including military setting. The problem of electrostatic field configuration calculation in the system of charged electrode of arbitrary form and infinite grounded plate with spherical bulge is solved. This problem can be a model of electrostatic discharge exposure on discontinuity in the form of bolted connection. The method of equivalent electrodes for three-dimensional case is used for the solving of this problem. The results of computer calculations are shown, which proved that considered method gives the opportunity to calculate electrostatic field characteristics in the mentioned bodies system with sufficient accuracy.*

В современной военной технике и вооружениях широчайшее применение находят микроэлектронная и микропроцессорная аппаратура. В связи с этим остается актуальной проблема электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств военного назначения. Значение указанной проблемы в военном деле весьма велико еще и потому, что от ее успешного решения зависят боевые возможности армейской техники. Об этом свидетельствует целый ряд стандартов по электромагнитной совместимости, созданных военным ведомством США [1]. Среди них имеется и стандарт MIL-STD-1686C, которым регламентируются вопросы помехоустойчивости и защиты военной техники от электростатического разряда (ЭСР)[2].

Проблема устойчивости электронного оборудования к ЭСР существует для всех областей, где такое оборудование применяется - в промышленности, на транспорте, в быту [3]. Поэтому в настоящее время выполнено значительное число исследований, посвященных рассмотрению тех или иных аспектов указанной проблемы. Развитие и продолжение этих исследований, как видно из вышесказанного, необходимо и для оборонной отрасли.

В частности, неоднократно рассматривалась задача о расчете распределения электростатического поля непосредственно перед разрядом в системе «источник ЭСР - рецептор помех». Решение ее позволяет определить начальные условия разряда, а следовательно, протекание процесса разряда. Так, в работе [4] произведено вычисление методом эквивалентных зарядов начального электростатического поля в установке для исследования ЭСР. В работе [5] задача расчета начальных условий разряда решалась для двух плоских электродов конечных размеров методом сеток. В [6] выполнен анализ электростатического разряда между двумя электродами, один из которых плоский, а второй имеет круговой выступ. Поле в системе этих электродов принято плоскопараллельным. Расчет выполнялся методом резистивных сеток. В [7] изучались процессы разряда для электрода в форме эллипсоида вращения, размещенного над бесконечной проводящей плоскостью. На первом этапе решения задачи определялось начальное распределение заряда на эллипсоиде методом граничных элементов, на втором - распределение тока разряда по поверхности эллипсоида путем решения соответствующего интегрального уравнения.

Сравнительный анализ этих публикаций позволяет отметить, что в них остался нерассмотренным вариант разряда между электродом и сферическим выступом на бесконечной заземленной плоскости. Хотя рассмотрение условий ЭСР в такой системе может быть использовано для более адекватного моделирования воздействия ЭСР на реальные технические средства (ТС) при их испытаниях на устойчивость к ЭСР. По ГОСТ Р 51317.4.2-99, испытательные воздействия генератором-имитатором ЭСР производятся, в том числе и на болтовые и винтовые соединения в корпусе ТС. Эти детали могут быть смоделированы как полусферические выступы на проводящей плоскости. Их наличие на корпусе оказывает существенное влияние на начальное распределение электростатического поля в разрядном промежутке, а значит и на условия развития ЭСР. Это обстоятельство должно обязательно учитываться при моделировании воздействия разряда на микроэлектронные ТС. Поэтому в данной статье ставится задача разработки метода численного расчета электростатического поля и распределения заряда по электроду сложной, формы, находящемуся вблизи сферического выступа на заземленной плоскости.

В работе [7] вычисление распределения заряда по поверхности проводящего эллипсоида велось методом граничных элементов, при этом использовались кольцевидные равномерно заряженные граничные элементы. В целях сокращения размерности системы уравнений метода наличие проводящей плоскости учитывалось с помощью зеркальных изображений граничных элементов в этой плоскости. При наличии на плоскости сферического выступа зеркальные изображения можно выполнить только для точечных зарядов [8-10]. Поэтому для численного анализа поля в системе «заряженный электрод - плоскость с выступом» рационально применить метод эквивалентных электродов, так как в этом методе используются заряды простой формы: линейные и точечные [11]. Авторы метода в [11] разработали его для плоскопараллельных полей. В настоящей же статье осуществлено обобщение метода эквивалентных электродов для трехмерных электростатических полей.

В методе эквивалентных электродов на поверхности заданного электрода сложной формы вводится система прямоугольных граничных элементов (ГЭ). Предполагается, что потенциал поля ГЭ приближенно соответствует потенциалу поля равномерно заряженной сферы. Центр этой сферы совпадает с центром ГЭ, а заряд равен заряду элемента. Радиус сферы вычисляется по формуле, которая получена из условия равенства площади поверхностей описанной сферы и граничного элемента:

$$R = \sqrt{\frac{l_1 l_2}{4\pi}}, \quad (1)$$

где  $R$  - радиус сферы, м;  $l_1, l_2$  - размеры граничного элемента, м.

Данная сфера и называется эквивалентным электродом.

Для дальнейших расчетов предполагается, что поле эквивалентного электрода совпадает с полем точечного заряда, размещенного в центре электрода. Такое предположение допустимо, так как размеры эквивалентных электродов сравнительно невелики и уменьшаются вместе с размерами граничных элементов. Чтобы учесть наличие заземленной плоскости со сферическим выступом радиуса  $a$ , осуществляется зеркальное отображение этого заряда в плоскости и выступе. Таким способом для каждого эквивалентного электрода с координатами центра  $x_0, y_0, z_0$  и расстоянием от центра до начала координат  $b$  вводится система четырех точечных зарядов с координатами, указанными в скобках:  $q(x_0, y_0, z_0)$  - заряд эквивалентного электрода,  $-q(x_0, y_0, -z_0)$  - отражение заряда эквивалентного электрода в плоскости,

$-q\left(\frac{a^2}{b^2}x_0, \frac{a^2}{b^2}y_0, \frac{a^2}{b^2}z_0\right)$  - отражение заряда эквивалентного электрода в выступе,

$q\left(\frac{a^2}{b^2}x_0, \frac{a^2}{b^2}y_0, -\frac{a^2}{b^2}z_0\right)$  - зеркальное отражение в выступе второго заряда системы. Правило

зеркальных изображений для заземленной плоскости с полусферическим выступом получено на основании результатов из [8-10].

Неизвестные заряды эквивалентных электродов вычисляются путем решения системы линейных алгебраических уравнений, которая формируется на основе первой группы формул Максвелла [11]:

$$[\varphi] = [\alpha][q], \quad (2)$$

где  $[\varphi]$  - матрица-столбец известных потенциалов эквивалентных электродов,  $[\alpha]$  - квадратная матрица коэффициентов системы;  $[q]$  - матрица-столбец зарядов эквивалентных электродов.

Коэффициенты системы (2) (потенциальные коэффициенты) вычисляются следующим образом. При этом принимается, что начальное электростатическое поле при ЭСР на соединение в корпусе электронной аппаратуры распространяется в воздухе, диэлектрическая проницаемость которого равна единице.

Взаимный потенциальный коэффициент  $\alpha_{ij}$  связывает потенциал в центре эквивалентного электрода  $i$  с зарядами, соответствующими эквивалентному электроду  $j$ . Поэтому для этого коэффициента справедлива формула, полученная на основе принципа суперпозиции полей:

$$\alpha_{ij} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left\{ \frac{1}{\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2}} - \frac{1}{\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (-z_j - z_i)^2}} - \frac{a}{b_i} \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{a^2}{b_j^2} x_j - x_i\right)^2 + \left(\frac{a^2}{b_j^2} y_j - y_i\right)^2 + \left(\frac{a^2}{b_j^2} z_j - z_i\right)^2}} + \frac{a}{b_i} \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{a^2}{b_j^2} x_j - x_i\right)^2 + \left(\frac{a^2}{b_j^2} y_j - y_i\right)^2 + \left(-\frac{a^2}{b_j^2} z_j - z_i\right)^2}} \right\}, \quad (3)$$

где  $\epsilon_0$  - абсолютная диэлектрическая проницаемость, Ф/м;  $x_i, y_i, z_i$  - координаты центра граничного элемента  $i$ , м;  $b_i$  - расстояние от центра граничного элемента  $i$  до начала координат, м;  $x_j, y_j, z_j$  - координаты центра граничного элемента  $j$ , м.

Собственный потенциальный коэффициент  $\alpha_{ii}$  связывает потенциал эквивалентного электрода  $i$  с зарядами, соответствующими этому электроду. Он вычисляется по формуле

$$\alpha_{ii} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left\{ \frac{1}{R} - \frac{1}{2z_i} - \frac{a}{b_i} \frac{1}{\sqrt{x_i^2 \left(\frac{a^2}{b_j^2} - 1\right)^2 + y_i^2 \left(\frac{a^2}{b_j^2} - 1\right)^2 + z_i^2 \left(\frac{a^2}{b_j^2} - 1\right)^2}} + \frac{a}{b_i} \frac{1}{\sqrt{x_i^2 \left(\frac{a^2}{b_j^2} - 1\right)^2 + y_i^2 \left(\frac{a^2}{b_j^2} - 1\right)^2 + z_i^2 \left(\frac{a^2}{b_j^2} + 1\right)^2}} \right\}. \quad (4)$$

В формуле (4) потенциал электростатического поля заряда  $q$  вычисляется на поверхности эквивалентного электрода в целях исключения расходимости. Потенциалы полей остальных зарядов вычисляются по-прежнему в центре эквивалентного электрода [12].

Для проверки предлагаемого метода был осуществлен расчет распределения зарядов в системе ГЭ прямоугольной пластины, размещенной вблизи сферического выступа (рисунок 1). При этом выполнялось сравнение потенциала, заданного в контрольной точке на поверхности пластины, с потенциалом, вычисленным в той же точке по ранее найденным зарядам эквивалентных электродов. Расчеты проводились при увеличивающейся густоте сетки ГЭ. По результатам расчета построен график (рисунок 2).

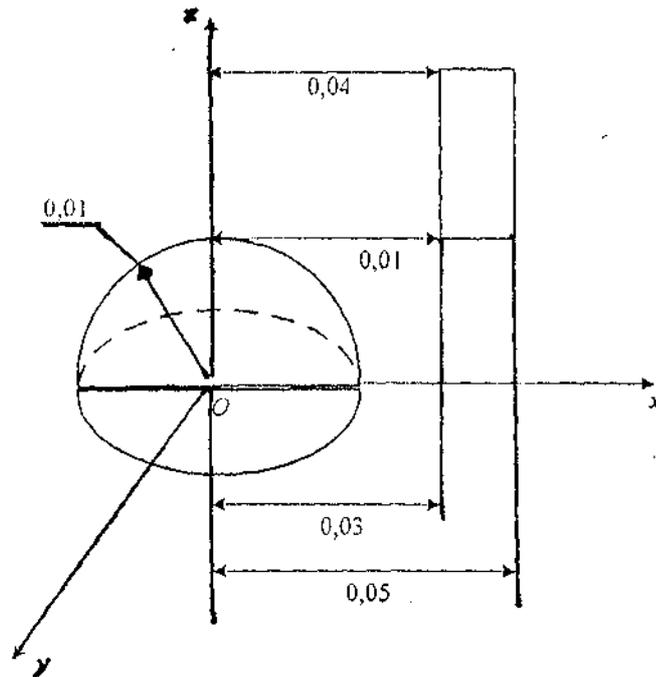


Рисунок 1 – Конфигурация модельной задачи

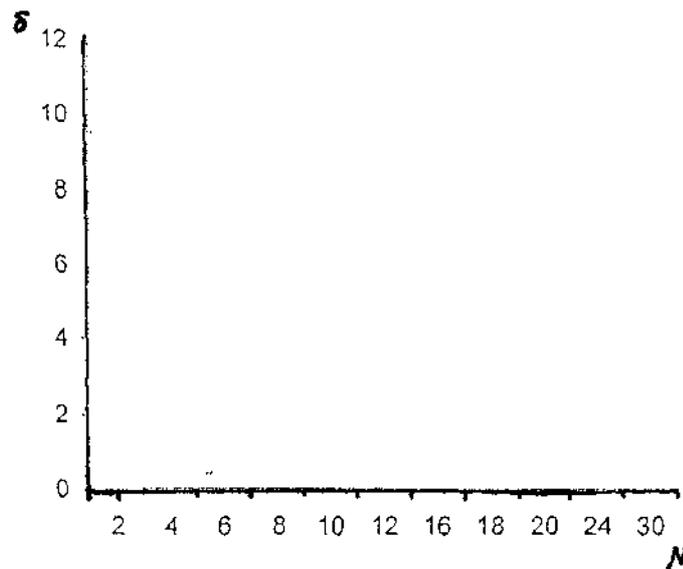


Рисунок 2 - График зависимости относительной погрешности расчета  $\delta$  от параметра густоты сетки  $N$

График показывает, что относительная погрешность расчета потенциала в контрольной точке снижается с увеличением густоты сетки ГЭ и достигает приемлемого для практики значения 4 %. Она может быть уменьшена путем дальнейшего увеличения густоты сетки. Следовательно, предлагаемым методом можно получить корректные решения для характеристик электростатического поля проводящего тела вблизи плоскости со сферическим выступом.

Результаты вычислительного эксперимента позволяют сделать следующие выводы:

1. Рассмотренный вариант метода эквивалентных электродов для расчета трехмерных электростатических полей в разрядном промежутке между сферическим выступом и электродом произвольной формы может применяться на практике для вычисления распределения заряда по электродам.

2. Принятый в рассмотренном методе способ исключения особенности при расчете собственных потенциальных коэффициентов не приводит к расходимости решения системы (2) или к недопустимому снижению точности решения.

3. С помощью зеркальных изображений в сфере можно правильно учесть наличие проводящей границы достаточно сложной формы и вычислить коэффициенты системы (2).

4. Рассмотренный метод позволяет, кроме того, построить адекватную модель начального электростатического поля в разрядном промежутке модели электростатического разряда между сферическим выступом на корпусе электронной аппаратуры и разрядным электродом.

К достоинствам предлагаемого метода можно отнести простоту выражений для коэффициентов системы уравнений (2) и несложный способ исключения особенности при расчете собственных потенциальных коэффициентов. Следовательно, облегчается разработка и отладка программно-математического обеспечения при реализации метода на ЭВМ.

Таким образом, допустимо заключить, что предлагаемый метод может применяться при моделировании процессов ЭСР на неоднородности корпусов микроэлектронной и микропроцессорной аппаратуры. Его использование повышает адекватность моделирования ЭСР и, следовательно, облегчает проектирование устойчивых к разрядам электронных ТС различного, в том числе и военного, назначения.

#### Литература

1. Уайт, Д. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и непреднамеренные помехи. Измерения электромагнитных помех и измерительная аппаратура / Д. Уайт. - М: Сов. радио, 1979. - Вып. 3. - 464 с.
2. Кечиев, Л. Н. Защита электронных средств от воздействия статического электричества/Л. Н. Кечиев, Е. Д. Пожидаев. - М.: Технологии, 2005. - 352 с.
3. Хабигер, Э. Электромагнитная совместимость. Основы ее применения в технике/ Э. Хабигер. - М.: Энергоатомиздат, 1995. - 304 с.
4. Ptashinski, L. Condition of the ESD Resrarch / L. Ptashinski, L. Turkewicz // 11 Intern. Wroclaw Symp. and Exhib. on Electromagnetic Compatibility / Wroclaw Politechnica. -Wroclaw. 1992. - P. 447-451.
5. Messier, M. Electorstatic discharge calculations using air chemistry models developed for EMP / M. Messier // Electromagnetic Environment and Consequences. Proceedings of EUROEM Intern. Symp. / EUROEM. - Bordeaux, 1994. - P. 480-488.
6. Gianetti, R Estimation of conducted disturbances characteristics of electrical discharges on resistive loads / R<sub>t</sub> Gianetti, B. Tellini // Intern. Symp. on Electromagnetic Compatibility / Univ. of Rome «LA Sapienza». - Milan, 1998. - P. 664-667.
7. Jobava, R. Computer simulation of ESD from voluminous objects compared to transient fields of human / R. Jobava [et al.] // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. - 2000. - Vol. 42. № 1. - P. 54-56.
8. Смайт, В. Электростатика и электродинамика / В. Смайт. - М., 1954. - 604 с.

9. Воинов, В. В. Расчет электрического поля зарядов изображения, создаваемых выпуклой поверхностью / В. В. Воинов, В. В. Мокринский // Вести. Воен. акад. Респ. Беларусь. - 2007. - № 2 (15). - С. 91-96.

10. Воинов, В. В. Возможности определения координат маловысотного летательного аппарата по параметрам электростатического поля / В. В. Воинов, В. В. Мокринский // Вести. Воен. акад. Респ. Беларусь. - 2008. - № 4 (12). - С. 30-37.

11. Velichkovich, D. M. Rectangular coax with axial slit and with rectangular or circular center conductor / D. M. Velichkovich, Z. J. Mancic; D. G. Zuklic // Intern. Symp. on Electromagnetic Compatibility/Univ. of Rome «La Sapienza». - Milan, 1998. -P. 384-389.

12. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле / Л. А. Бессонов. - М.: Высш. шк., 1979. - 231 с.

---

"Сведения об авторе:

Комнатный Дмитрий Викторович,  
Гомельский государственный  
политехнический университет им. П. О. Сухого.  
Статья поступила в редакцию 13.04.2011 г.