

*Инж. А.С. Измайлов, инж. А.Н. Дорофеев, д-р техн. наук В.С. Саенко,  
д-р техн. наук Е.Д. Пожидаев  
МИЭМ, г. Москва  
д-р физ.-мат. наук А.П. Тютнев, инж. В.Т. Семенов  
ФГУП «НПП ВНИИЭМ»*

## **СТРУКТУРНАЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРИЗАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

Структурная электрофизическая модель (СЭМ) электризации космических аппаратов (КА), известная за рубежом как модель сосредоточенных элементов, использовалась первоначально для определения потенциалов участков внешней поверхности КА под воздействием потоков частиц из космической плазмы [1]. СЭМ, предназначенные для прогноза поверхностной зарядки КА, представляли собой электрические цепи, состоящие из емкостей, индуктивностей и активных сопротивлений. Кроме того, в состав этих СЭМ входили источники тока, моделирующие потоки как первичных частиц, так и вторично эмитированных с поверхностей КА электронов. Геометрическая форма КА в этих моделях определяла способ формирования линейной электрической цепи, как это принято при аналогичном моделировании тепловых процессов. Как показала практика применения подобных моделей, их основным недостатком является невозможность учета влияния зарядки одной поверхности на величины токов, поступающих из плазмы на другие поверхности, что приводит к явно завышенным величинам потенциалов. Этот существенный недостаток моделирования процессов общей и дифференциальной зарядки КА с помощью СЭМ стимулировал развитие других методов расчета потенциального рельефа внешней поверхности, таких как NASCAP в США [2] и аналогичного программного обеспечения в НИИЯФ МГУ [3].

Эти методы отслеживают движение отдельных частиц или их групп (метод макрочастиц) в поле КА с учетом динамики изменения данного поля. Методы обладают высокой точностью и достаточной устойчивостью, кроме того, при наличии соответствующих критериев возможно предсказание мест возникновения электростатических разрядов (ЭСР) как между отдельными поверхностями КА, так и между поверхностью КА и окружающим плазменным слоем.

Однако такой поворот событий привел не к закрытию, а к “перепрофилированию” СЭМ. И в настоящее время СЭМ электризации КА используется для получения картины растекания токов по конструкции КА от ЭСР на поверхности. Эта картина растекания токов служит в дальнейшем исходным материалом для расчета электромагнитных наводок во фрагментах бортовой кабельной сети (БКС), проложенных по внешней поверхности КА.

Построение СЭМ КА можно условно разбить на два этапа. В-первых, необходимо представить характерные элементы конструкции КА в виде модели из сосредоточенных элементов. При этом величина номиналов этих элементов рассчитывается как с учетом электрофизических свойств применяемых материалов, так и с учетом геометрии элементов конструкции КА.

Вторым этапом построения СЭМ КА произвольной конфигурации является составление эскизных чертежей мозаики внешней поверхности аппарата с указанием применяемых материалов. При необходимости проводится кусочно-линейная аппроксимация реальных поверхностей КА сложной формы. Затем корпус КА с навесными элементами разбивается на характерные геометрические фигуры (цилиндр, тор, плоскость, конус, стержень и т.п.). Каждый элемент представляется эквивалентной электрической схемой, номиналы которой рассчитываются с учетом геометрии данного элемента и его материала. Далее характерные элементы конструкции КА и, соответственно, их эквивалентные схемы объединяются в одну общую схему.

Зная возможные места возникновения ЭСР, можно рассчитать картину растекания переходных токов по корпусу и навесным элементам КА. ЭСР при этом представляется импульсным источником тока с заранее заданными характеристиками, соответствующими параметрам разряда. Данные источники подключаются к точкам, между которыми возможно возникновение ЭСР.

Для реализации предложенной методики разработана компьютерная диалоговая система (ДС), позволяющая в интерактивном режиме создать СЭМ КА и провести необходимое моделирование для расчета растекания токов по поверхности КА под действием любых видов ЭСР, включая выброс заряда в плазму. Диалоговая система реализована для персональных ЭВМ типа IBM PC, работающих под операционными средами Windows-98/2000/XP.

Как показали теоретические расчеты и проведенные экспериментальные исследования, имеется прямо пропорциональная зависимость между величиной наводки во фрагменте БКС, длиной этого фрагмента и уровнем тока, протекающего по участку внешней поверхности КА, на котором расположен этот фрагмент.

Отличительной особенностью разработанной СЭМ является наличие в ее программном обеспечении блока расчета электромагнитных наводок во фрагментах БКС. Для расчета величины помехового сигнала во фрагменте БКС необходимо указать трассу прокладки этого фрагмента по внешней поверхности КА и ответить на запрос диалоговой системы СЭМ о величине коэффициента трансформации тока, протекающего по поверхности КА в напряжении наводки в БКС. Этот коэффициент определяется экспериментально для данного фрагмента БКС с помощью разработанного в МИЭМ испытательного генератора помех ИГП-2 «Дуга».

Изложенный подход позволяет на этапе проектирования КА сформулировать технические условия на устойчивость электронных блоков, имеющих выход на внешнюю поверхность КА посредством БКС, к импульсным помехам на входах этих блоков.

Для численного решения задачи на ЭВМ необходимо разбить поверхность каждого базового элемента на конечное число полигонов (прямоугольников) или треугольников, которые затем представляются в виде простейшей электрической цепи, состоящей из сопротивлений, емкостей и индуктивностей.

Количество разбиений по каждому элементу определяется исходя из требуемой точности вычислений. Однако следует иметь в виду, что при увеличении степени дискретизации резко возрастает количество электрических элементов в эквивалентной электрической схеме, представляющей всю поверхность КА. Это может значительно увеличить время расчета ЭВМ переходных токов в схеме. Таким образом, следует соблюсти баланс между требуемой точностью вычислений и машинно-временными затратами.

Далее, для каждого базового элемента конструкции КА следует произвести процесс, обратный дискретизации, т.е. соединить простейшие электрические схемы участков поверхности базового элемента в единую схему. Параметры элементов схемы ( $r$ ,  $l$ ,  $c$ ) задаются исходя из электрофизических параметров проводящих материалов поверхности КА.

После дискретизации геометрической поверхности каждого базового элемента конструкции КА и представления ее в виде эквивалентной электрической схемы необходимо произвести стыковку базовых элементов КА таким образом, чтобы в результате была получена эквивалентная электрическая схема всей поверхности КА, с учетом всей сложной геометрии и электрофизических характеристик проводящих материалов поверхности спутника. Эта схема должна быть пригодна для расчета переходных токов, т.е. в ней не должно быть висящих или закороченных элементов.

Теперь, зная возможные места возникновения ЭСР, можно считать картину растекания переходных токов по корпусу и навесным элементам КА. При этом ЭСР представляются в виде импульсного источника тока с заранее заданными характеристиками, соответствующими параметрам разряда. Данные источники подключаются к точкам, между которыми возможно возникновение ЭСР. Затем с помощью модуля анализа электрических схем рассчитываются переходные токи.

Изложенный подход позволяет моделировать процессы, протекающие при ЭСР, и, таким образом, оптимизировать трассы прокладки БКС и степень экранирования бортовой кабельной сети КА. Весь описанный процесс является достаточно трудоемким и его алгоритмизация является нетривиальной задачей.

Для моделирования процесса электростатического заряжения КА, расчетов переходных токов, протекающих по его поверхности, было разработано специальное программное обеспечение (ПО), в основу которого был положен метод структурной электрофизической модели. Выделим и рассмотрим последовательные этапы по анализу картины растекания токов по поверхности спутника с помощью этого ПО.

*Построение трехмерной геометрической модели КА из базовых элементов.* Построение геометрической модели КА начинается с выбора базовых элементов, аппроксимирующих элементы конструкции корабля. Так, например, корпус корабля, имеющий форму куба, представляется в виде прямоугольной призмы, у которой все стороны равны. Панель солнечной батареи представляется также в виде прямоугольной призмы, у которой есть только две размерности – длина и ширина. Аналогично, любой стержень можно представить в виде прямоугольной призмы, у которой только одна размерность – длина.

При установке базовых примитивов в дизайнерском пространстве тут же в диалоговом окне можно задавать размеры примитивов, а так же степень дискретизации. Например можно указать, что каждая грань поверхности кубического корпуса состоит из 9 прямоугольников. Также в диалоговом окне можно задать электрофизические свойства материала, из которого сделан элемент конструкции корабля. Для этого существует специальная база данных материалов.

Отдельно следует остановиться на элементах, имеющих сферическую поверхность: параболических антеннах, обтекателях и др. Как показали предварительные результаты моделирования, если для аппроксимации сферы или полусферы использовать модель глобуса (т.е. поверхность сферы поделена меридианами и паралле-

лями), то картина растекания токов по такой поверхности будет сильно искажаться из-за наличия полюсов. В связи с этим предлагается использовать геометрическое тело, имеющее название геодезический купол. В этом случае поверхность, аппроксимирующая сферу или полусферу, состоит только из треугольников и является однородной, что и позволяет получить реальную картину растекания токов. Степень разбиения этой поверхности на треугольники можно также изменять с помощью диалогового окна.

При разработке способа создания геометрической модели КА были исследованы программные средства, предназначенные для создания объектов в трехмерном пространстве. Анализ этих пакетов показал, что наиболее удобное средство – это пакет “3D Studio Max”, так как в нем есть возможность сохранения графики в формате “DXF”, который является текстовым и удобным для считывания созданным нами программным комплексом. Создание геометрической модели показано на рис. 1.

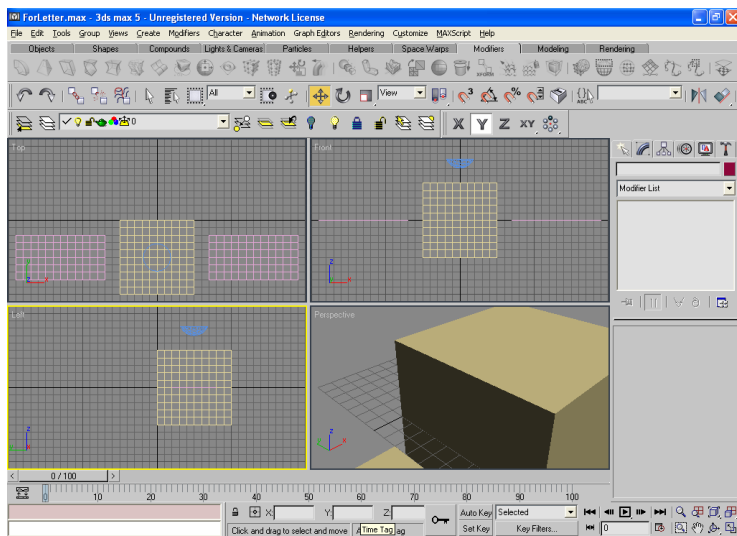


Рис. 1. Создание геометрической модели КА в пакете “3D Studio Max”

После выбора базовых геометрических примитивов, установки степени дискретизации их поверхности и задания их электрофизических свойств следует сориентировать их в пространстве, прежде чем переходить к одному из наиболее важных моментов – стыковке элементов.

Тут следует сделать важное замечание. Дело в том, что мы пошли по пути представления всей конструкции корабля в виде единой геометрической трехмерной сетки для дальнейшего преобразования в эквивалентную электрическую схему. Таким образом, задача стыковки сводится не к соединению эквивалентных электрических схем, описывающих каждый элемент КА, а к булевым объединениям геометрических поверхностей базовых примитивов и созданию единой трехмерной полигональной сетки, описывающей геометрическую форму КА и электрофизические свойства элементов его конструкции.

Полигональные сетки являются просто набором полигонов или граней, которые в совокупности формируют поверхность любого объекта. Таким образом, в итоге мы получили список граней или элементарных поверхностей с заданными размерами, пространственными координатами и электрофизическими свойствами, описывающими поверхность спутника [3]. Эта сетка является связанной, т.е. между любыми двумя вершинами существует непрерывный путь вдоль ребер полигона. Это значит, что при преобразовании единой сетки в эквивалентную электрическую схему нигде не будет разрывов цепи.

Для преобразования получившейся полигональной сетки в набор полигонов был использован пакет САПР “AutoCad” фирмы “Autodesk” (рис. 2). Пакет “3D Studio Max” не имеет возможности проводить такие преобразования и последующее считывание элементов геометрической модели при построении эквивалентной электрической схемы.

*Преобразование полигональной трехмерной сетки, описывающей поверхность КА, в эквивалентную электрическую схему происходит при помощи созданного программного средства (рис. 3). Запускается специальная процедура, которая создает модель сосредоточенных элементов. Эта процедура, последовательно перебирая грани в файле полигональной сетки, создает эквивалентную электрическую схему, представленную в виде списка элементов  $r$ ,  $l$ ,  $c$  и узлов схемы. Это описание схемы записывается в файл для последующего анализа переходных токов.*

*Расчет переходных токов и визуализация результатов расчетов на пространственной модели КА.* После получения файла эквивалентной электрической схемы производится установка источника тока, имитирующего ЭСР, и запускается процесс расчета переходных токов. Эти вычисления можно проводить с помощью программ типа PSPICE.

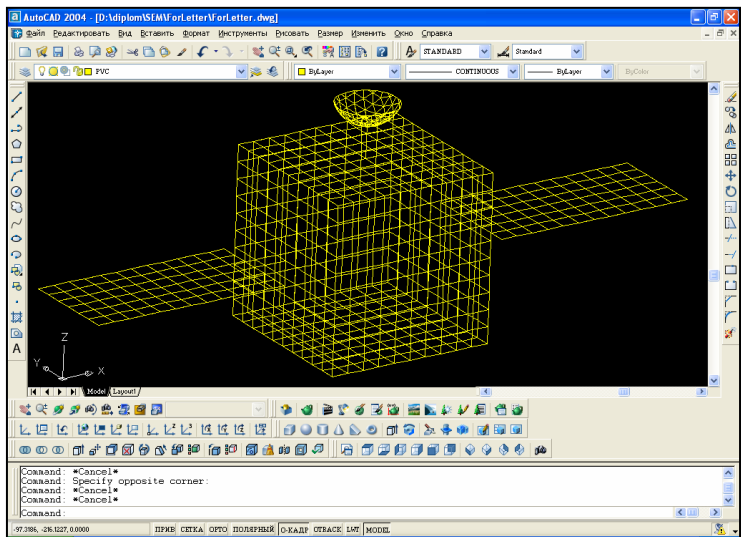


Рис. 2. Разбиение геометрической модели поверхности КА на полигоны в САПР "AutoCad"

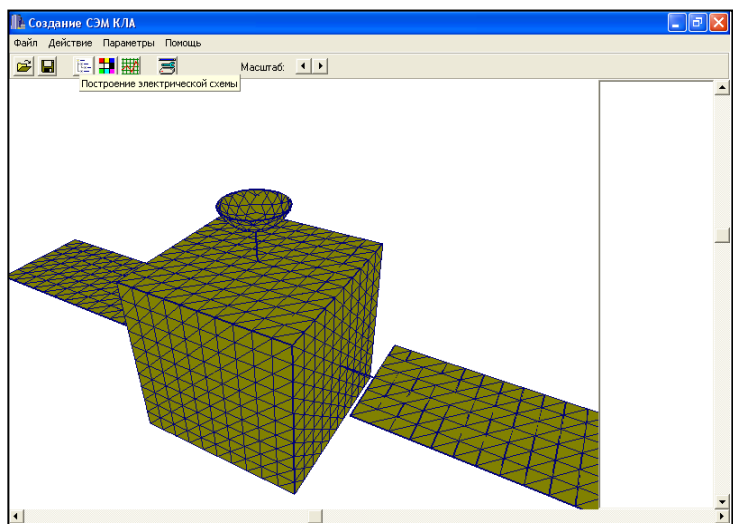
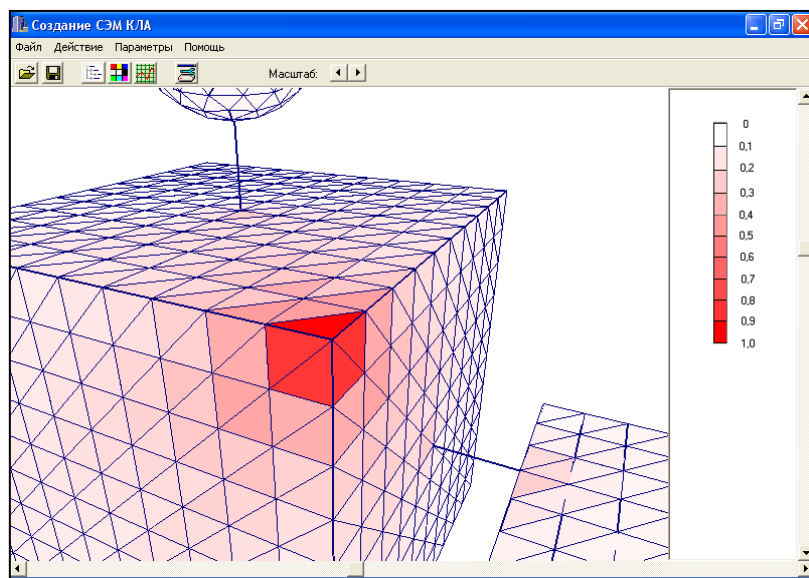


Рис. 3. Считывание геометрической модели поверхности КА в программу создания СЭМ КА и преобразование ее в эквивалентную электрическую схему

Далее необходимо выполнить визуализацию результатов расчета в виде картины растекания токов по поверхности КА. Для этого запускается специальная процедура, которая просматривает файл полигональной сетки, описывающей КА и файл результатов расчетов переходных токов в эквивалентной электрической схеме. Для каждой грани вычисляется результирующая нормированная величина тока, после чего грани присваивается цвет, соответствующий шкале распределения токов.

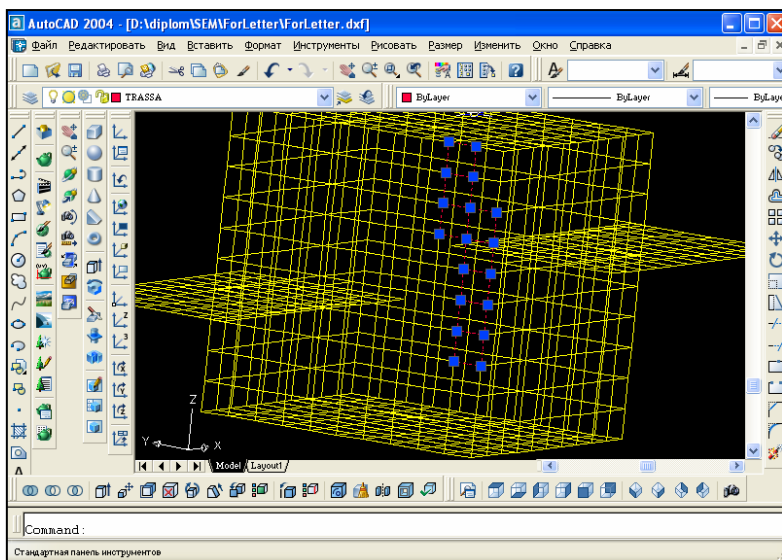
Таким образом, мы получаем список граней поверхности КА, где каждой грани присвоен цвет, соответствующий номиналу текущего в ней тока. Далее мы визуализируем трехмерную модель КА с картиной растекания токов по его поверхности (рис.4).



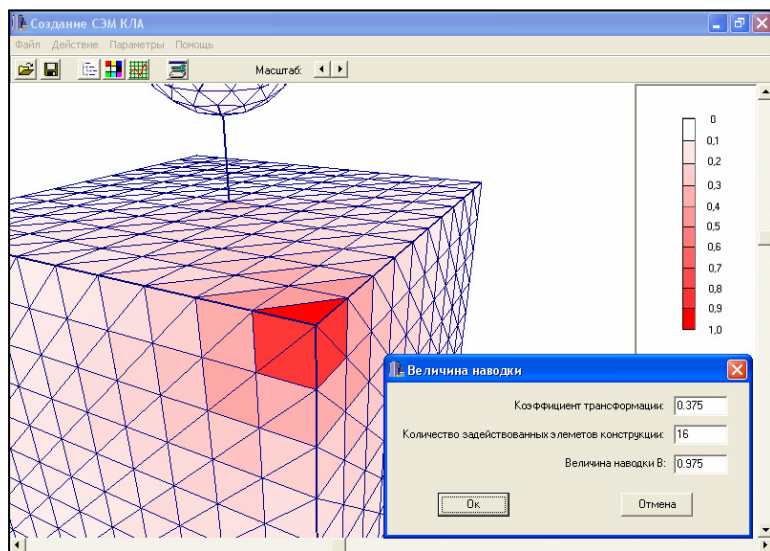
**Рис. 4. Считывание результатов расчета и визуализация картины растекания токов в программе создания СЭМ КА**

В результате мы можем определить величину наводок в элементах бортовой кабельной сети, проложенных по поверхности КА, и дать рекомендации по защите от этих наводок. Необходимо отредактировать "DXF" файл в САПР "AutoCad" следующим образом: полигоны корпуса КА, по которым проходит интересующий нас кабель, переносятся в отдельный слой "TRASSA", как показано на рис. 5.





**Рис. 5. Перенос полигонов, по которым проходит кабель в слой "TRASSA" в САПР "AutoCad"**



**Рис. 6. Результаты расчета наводок в кабеле**

Далее отредактированный файл снова загружается в программу создания СЭМ КА и вызывается процедура расчета наводок в кабеле. Для этого необходимо в диалоговом окне ввести коэффициент трансформации, определяемый экспериментально для конкретных типов кабелей по методике, разработанной в МИЭМ. Итог расчета наводки в кабеле представлен на рис. 6.

Расчитанная таким образом величина напряжения наводки во фрагменте БКС должна использоваться при выдаче ТУ на электронный блок, с которым соединен этот фрагмент. В дальнейшем, при выходном или входном контроле электронного блока на электростатическую чувствительность, необходимо проводить испытания этого блока при данной величине наводки.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Inouye G.T. Prog. Astronaut. Aeronaut. Vol. 42. 1976.
2. Rubin A.G. Prog. Astronaut. Aeronaut. Vol. 71. 1980.
3. Л.С. Новиков, Г.В. Бабкин, Е.П. Морозов, С.А. Колосов, К.К. Крупников, В.Н. Милеев, В.С. Саенко // Руководство для конструкторов. ЦНИИМАШ, г. Королев. 1995.