

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ЗАЩИТЫ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ ФАКТОРОВ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО РАЗРЯДА

© 2011 А. В. Костин

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва
(национальный исследовательский университет)

Рассмотрены классические методы защиты бортовой аппаратуры космических аппаратов от воздействия факторов электростатических разрядов путём создания однородного экрана. Отмечены их достоинства и недостатки. Найдены спектры помех, излучаемых при электростатическом разряде. Предложены альтернативные методы защиты бортовой аппаратуры космических аппаратов от воздействия факторов электростатических разрядов, лишённые недостатков, присущих классическому методу. Приведены рекомендации по выбору того или иного метода защиты.

Бортовая аппаратура, космический аппарат, электростатический разряд, электромагнитная помеха, электромагнитное поле, спектр, частота, длина волны, напряжённость, магнитный поток, ЭДС, сила тока.

Бортовая аппаратура (БА) космических аппаратов (КА) развивается в сторону внедрения цифровых технологий, повышения тактовых частот обработки информации, расширения спектра обрабатываемых сигналов. Одновременно минимизируются массогабаритные параметры аппаратуры, увеличивается плотность ее компоновки в объеме КА. Все это создает сложную обстановку с позиций электромагнитной совместимости (ЭМС) приборов и узлов БА. Особую роль при этом играют процессы электризации поверхности КА, вызывающие электростатические разряды (ЭСР) на поверхности блоков и кабельных систем. ЭСР, возникающие вследствие дифференциальной зарядки КА, являются источниками электромагнитных помех (ЭМП), воздействующих на отдельные элементы и устройства и (или) бортовые системы в целом.

Из-за высокой сложности реальных конструкций КА задача определения места разряда и его уровня достаточно сложна и на сегодняшний день не отработана. Это затрудняет разработку методов и средств предотвращения ЭСР и, соответственно, защиты аппаратуры от его воздействия. Классическим методом предотвращения ЭСР является исключение разности потенциалов между элементами конструкции путём их электрического соединения (металлизации) между собой и с корпусом КА. Детали КА, изготов-

ленные из изоляционных материалов, металлизуются нанесением электропроводящего покрытия как по всей поверхности, так и частично, в зависимости от требований к физическим свойствам этих деталей.

Однако не все детали можно металлизировать ввиду технических требований, предъявляемых к ним. Например, общие шины приборов изолируются от корпуса КА, изоляторы нельзя покрывать электропроводящим покрытием, так как это может привести к снижению сопротивления изоляции, есть ограничения на покрытие радиопрозрачных деталей, так как электропроводящее покрытие может снизить радиопрозрачность. Примеров можно привести множество. Кроме того, ЭСР могут возникать между окружающей КА плазмой и корпусом самого КА. Другими словами, можно только снизить вероятность возникновения ЭСР, но исключить его полностью нельзя.

Корпуса БА КА как правило металлические и играют роль экранов для ЭМП, вызванных ЭСР. ЭМП могут проникать сквозь экран и через его неоднородности (щели и отверстия). Даже если конструкцией корпуса БА не предусмотрено неоднородностей, они имеются в местах разборных соединений элементов конструкции корпуса. Это связано с тем, что электрическое соединение обеспечивается не по всем плоскостям сопряжения

деталей ввиду наличия допусков формы. ЭМП, проникшие через экран, вызывают наводки в проводах и печатных проводниках, расположенных внутри БА. Эти наводки могут вызвать сбои БА или даже отказы.

Классическим методом защиты БА от электромагнитного поля, вызванного ЭСР, является создание однородного экрана. Такие методы обеспечивают наилучшую защиту, но имеют ряд недостатков. Рассмотрим самые распространённые методы создания однородного экрана:

- сварка и пайка сопрягаемых деталей;
- электропроводящие прокладки;
- электропроводящие клейкие ленты;
- электропроводящие клеи.

Сварка и пайка сопрягаемых элементов конструкции БА приводит к снижению ремонтпригодности и технологичности. Чтобы сварить или спаять детали корпуса из алюминиевых сплавов (в основном применяется этот материал как наиболее лёгкий, дешёвый и достаточно прочный), необходимо специальное оборудование, флюсы, припой и т.д. Кроме того, нагрев корпуса БА при этих операциях может вызвать отказ электрорадиоизделий (ЭРИ), чувствительных к температурным воздействиям. А если ЭРИ не откажут, то и показатели надёжности могут снизиться.

Применение прокладок из упругих электропроводящих материалов позволяет сохранить ремонтпригодность и исключить температурное воздействие на БА. Такой вариант позволяет обеспечить нормальный электрический контакт по всей поверхности сопрягаемых деталей, а значит и исключить щели и отверстия, вызванные допусками на сопрягаемые поверхности. Тем не менее, технологичность такой БА тоже невысокая, ввиду необходимости изготовления прокладок и канавок в сопрягаемых деталях для её размещения. Необходимость изготовления канавок зачастую приводит к увеличению габаритов и масс, так как требует увеличения площади сопряжения.

Существуют такие материалы, как электропроводящие клейкие ленты. Они представляют собой диэлектрический материал с нанесённым на него металлическим напылением с одной стороны и клейкой мас-

сой с другой стороны. Заклеив такой плёнкой отверстия, необходимо электрически соединить металлическое напыление плёнки с корпусом БА. Кроме того, необходимо предупредить отслаивание плёнки от корпуса. Последнее характерно и для электропроводящих клеев, что ограничивает их применение. Отслаивание может происходить ввиду снижения адгезии из-за нарушения технологии подготовки поверхности к склеиванию. К сожалению, на отечественных предприятиях такое случается. Отделение электропроводящего материала на этапе выведения и орбитального полёта может привести к короткому замыканию жизненноважных электрических цепей, снижению сопротивления изоляции и, как следствие, даже потере КА. Ремонтпригодность БА при применении таких методов защиты средняя, масса почти не увеличивается или увеличивается незначительно.

Если отверстия необходимы и закрывать их нельзя (например, отверстия для оттока воздуха), то они выполняются в виде лабиринтов. ЭМП, пройдя через такой лабиринт, многократно отражается и её энергия уменьшается. Ремонтпригодность корпусов с лабиринтами обеспечивается, но технологичность невысока. Кроме того, отверстие даже с лабиринтом нарушает однородность экрана. В ряде случаев полностью однородный экран создать вообще невозможно.

Прежде чем сделать выбор того или иного метода создания однородного экрана, необходимо определиться с необходимостью применения однородного экрана для защиты БА. Рассмотрим источник помех, то есть ЭСР и конструкцию прибора. Известно, что сила тока разрядного импульса имеет вид

$$i_p(t) = I \cdot (e^{p_1 t} - e^{p_2 t}), \quad (1)$$

где t – время, I , p_1 , p_2 можно найти по известным значениям амплитуды импульса, длительности импульса по уровню 0,5 и длительностью фронта по уровням 0,1...0,9. На рис. 1 представлены временные диаграммы импульсов разрядной силы тока при минимальной (а) и максимальной (б) значениях длительности фронта импульса, максимальной амплитуде и минимальной длительности фронта импульса. Максимальная амплитуда и минимальная длительность выбраны как

худший случай. При максимальной амплитуде энергия импульса максимальна, а при минимальной длительности фронта спектр будет самым широким.

Выражение (1) подвергнем преобразованию Фурье и найдём спектральную плотность тока разрядного импульса:

$$\begin{aligned} \dot{I}_P(j\omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} i_P(t) e^{-j\omega t} dt = \\ &= I \frac{p_1 - p_2}{\sqrt{p_1^2 + \omega^2} \sqrt{p_2^2 + \omega^2}} e^{j \left[\arctg \left(\frac{\omega}{p_1} \right) + \arctg \left(\frac{\omega}{p_2} \right) \right]}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $j = \sqrt{-1}$ - мнимая единица, ω - угловая частота. Амплитудный спектр (выражение, которое стоит перед экспонентой) монотонно убывает с ростом частоты. На рис. 2 представлены амплитудные спектры импульсов с самой большой длительностью (сплошная линия) и самой маленькой длительностью (пунктирная линия).

Найдём эффективную ширину спектра разрядного импульса по уровню 99% энергии. Задав такую границу, можно точно сказать, что энергия спектральных составляющих, не вошедших в эффективную ширину спектра, много меньше энергии эффективной ширины спектра (на два порядка). Для этого решим уравнение относительно максимальной частоты эффективной ширины спектра разрядного импульса ω_{MAX} :

$$\frac{1}{\pi} \int_0^{\omega_{MAX}} |\dot{I}_P(j\omega)|^2 d\omega = \frac{0,99}{\pi} \int_0^{\infty} |\dot{I}_P(j\omega)|^2 d\omega. \quad (3)$$

Расчёты показывают, что $f_{MAX} = \omega_{MAX}/2\pi = 6,92$ МГц для импульса самой большой длительности и $f_{MAX} = 168,3$ МГц для импульса самой маленькой длительности. Поскольку рассматриваемые импульсы являются видеоимпульсами, то минимальная частота эффективной ширины спектра $f_{MIN} = 0$. Ширина спектра импульса с самой маленькой длительностью значительно больше, чем ширина спектра импульса с самой большой длительностью, однако энергия этого импульса значительно меньше. На рис. 3 представлены энергетические спектры импульсов с самой большой длительностью (сплошная

линия) и самой маленькой длительностью (пунктирная линия). Из-за большей энергии самым худшим вариантом является импульс с максимальной длительностью.

ЭСР можно представить в виде элементарного электрического излучателя (диполя Герца). Поскольку размеры КА соизмеримы с длиной волны даже для $f_{MAX} = 168,3$ МГц ($\lambda = 1,78$ м), то можно сказать, что БА будет расположена в ближней зоне диполя Герца. Амплитуда напряжённости магнитного поля \vec{H} в ближней зоне не зависят от частоты [1]. Амплитуда напряжённости электрического поля \vec{E} в ближней зоне обратно пропорциональна частоте [1]. Поэтому найденные значения f_{MIN} и f_{MAX} справедливы как для импульса силы тока, так и для напряжённостей \vec{E} и \vec{H} .

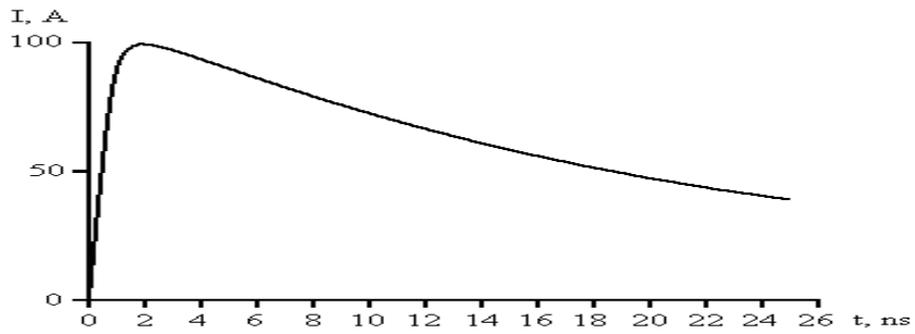
Если размеры неоднородностей корпуса прибора много меньше длины волны, соответствующей f_{MAX} , то экран можно считать однородным и расчёт его эффективности вести по методике расчёта однородного экрана [2]. Если эффективности экрана недостаточно, так как в спектре имеются составляющие и низкочастотные и высокочастотные, то экраны целесообразно делать многослойными [3].

Рассмотрим приёмники помех. В приборах основными приёмниками помех являются провода и печатные проводники. Представим контур, образованный источником сигнала, нагрузкой, сигнальным и общим проводом (рис. 4). Поверхность, ограниченную контуром, линии напряжённости магнитного поля \vec{H} пересекают под произвольным углом.

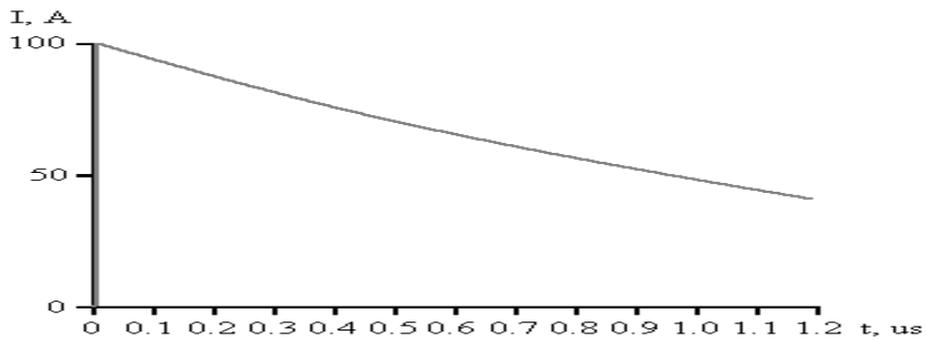
В соответствии с законом Фарадея и учитывая выражение для потока вектора магнитной индукции \vec{B} (магнитного потока), можно записать формулу для ЭДС, наводимой в контуре

$$e(t) = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} d\vec{S} = -\mu_0 \frac{d}{dt} \int_S \mu \vec{H} d\vec{S}, \quad (4)$$

где μ_0 - магнитная постоянная, μ - относительная магнитная проницаемость (для вакуума и воздуха равна единице).



а)



б)

Рис. 1. Временные диаграммы импульсов разрядной силы тока:
а) при минимальной длительности импульса;
б) при максимальной длительности импульса

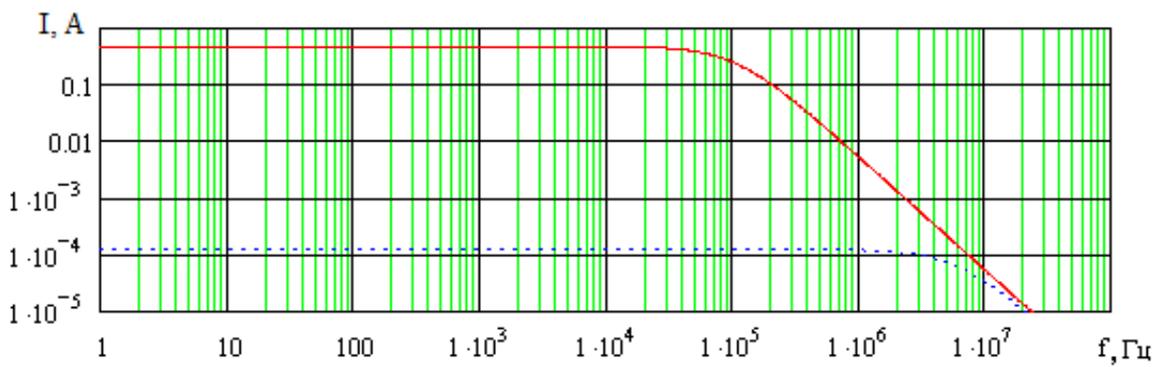


Рис. 2. Амплитудные спектры импульсов

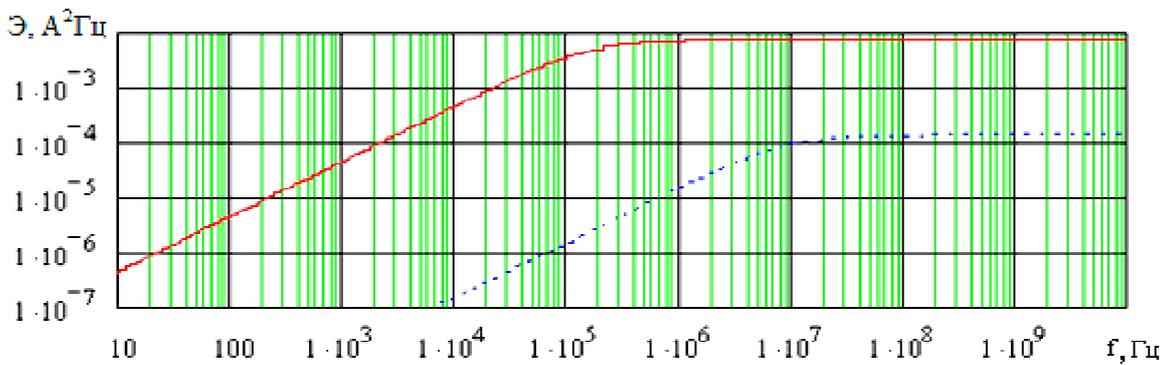


Рис. 3. Энергетические спектры импульсов

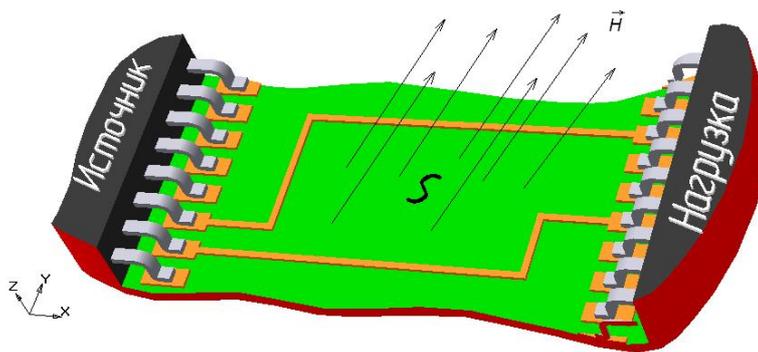


Рис. 4. Приёмник помехи

Если раскрыть поверхностный интеграл, то окажется, что он обращается в ноль, если проекция вектора \vec{H} на ось Z равна нулю. Иначе силовые линии \vec{H} не пересекают площадку S , а расположены параллельно. При этом $e(t)$ тоже обращается в ноль. Таким образом, одним из вариантов защиты БА КА от факторов ЭСР является ориентация контуров проводов и печатных проводников вдоль силовых линий магнитного поля. Для этого необходимо знать структуру поля внутри БА. Структуру поля можно найти приближённо, если представить БА в виде полового металлического резонатора, возбуждаемого щелью или отверстием, по граничным условиям на стенках резонатора. Поле резонатора будет неоднородным, будут наблюдаться узлы и пучности поля. Особо чувствительные к помехам цепи целесообразно располагать в узлах поля. Метод защиты, связанный с ориентацией чувствительных к помехам цепей, практически полностью лишён недостатков, присущих рассмотренным в начале настоящей статьи методам.

Другой способ снижения помех - это уменьшение площади поверхности S . Он тоже следует из выражения (4). Необходимо исключить возможность пересечения поверхности S конструктивными элементами и магнитопроводами из ферромагнитного материала, у которого μ значительно больше единицы. И это следует из выражения (4). Поскольку полости большинства БА являются полым металлическим резонатором, то на резонансных частотах может произойти резкое возрастание уровней напряжённостей

поля, а значит и уровня помех. Очевидно, что БА с меньшими геометрическими размерами полостей будет более устойчива к факторам ЭСР, так как уменьшение размеров резонатора приводит к смещению резонансных частот в область более высоких частот, а на более высоких частотах, как было показано ранее, амплитуда излучаемых гармоник ниже. Перечисленные выше методы являются альтернативой однородного экранирования. Они не ухудшают технологичность, ремонтпригодность, не увеличивают массу и размеры, не ухудшают надёжность БА КА.

Итак, перед тем как сделать из корпусов БА КА однородный экран, необходимо провести анализ, который бы показал необходимость принятия каких-либо мер защиты (возможно, что корпус БА, который является неоднородным экраном, обеспечивает требуемую защиту). Если требуемая защита не обеспечивается, то необходимо рассмотреть варианты защиты, не снижающие технологичности, надёжности и не ухудшающие массогабаритные характеристики. К таким методам защиты относятся альтернативные методы, некоторые из них описаны в настоящей статье. Если этих мер недостаточно, то необходимо локальное экранирование узлов, чувствительных к помехам. Наконец, если вся БА состоит из таких узлов, а другими методами обеспечить требуемую защиту не удалось, то необходимо создавать однородный экран, несмотря на недостатки этого метода. Но последний следует применять только в самых необходимых случаях.

Библиографический список

1. Фёдоров, Н. Н. Основы электродинамики: Учебное пособие для вузов [Текст] / Н. Н. Фёдоров. - М.: Высшая школа, 1980.- 399 с.

2. Полонский, Н. Б. Конструирование электромагнитных экранов для радиоэлектронной аппаратуры [Текст] / Н. Б. Полонский.-М.: Сов. радио, 1979.-216 с.

3. Сафонов, А. Л. Прямоугольные электрические соединители. Защита от электромагнитных помех с помощью экранов и встроенных фильтров [Текст] / А. Л. Сафонов, Л. И. Сафонов // Технологии в электронной промышленности.- №8(44), 2010. – С. 38-45.

**THE ANALYSIS OF METHODS OF PROTECTION OF ONBOARD EQUIPMENT
OF SPACE VEHICLES FROM INFLUENCE OF FACTORS OF THE
ELECTROSTATIC DISCHARGE**

© 2011 A. V. Kostin

Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov
(National Research University)

This article describes classical methods of protection onboard equipment space vehicles from influence of factors electrostatic discharges by making the homogeneous screen, their merits and demerits. Spectrums of noises which are radiated at the electrostatic discharge are discovered. Researcher have offered are alternative methods of protection onboard equipment space vehicles from influence of factors electrostatic discharges deprived lacks inherent in a classical method. It results are recommendations for choice method of protection.

Onboard equipment, the space vehicle, electrostatic discharge, electromagnetic noise, electromagnetic field, spectrum, frequency, wavelength, intensity, magnetic flow, EMF, current strength.

Информация об авторе

Костин Алексей Владимирович, аспирант, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: xpehbam27@yandex.ru. Область научных интересов: повышение устойчивости бортовой аппаратуры космических аппаратов к внешним воздействующим факторам.

Kostin Aleksey Vladimirovitch, post-graduate student, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: xpehbam27@yandex.ru. Area of research: increase of stability of onboard equipment of space vehicles to external influencing factors.