

# МОДЕЛИРОВАНИЕ СХЕМОТЕХНИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ЗАЩИТЫ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ОТ ПОМЕХ, ВЫЗВАННЫХ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИМИ РАЗРЯДАМИ

А.В. Костин, В.С. Бозриков, М.Н. Пиганов

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет) (СГАУ), Самара, Россия

В статье рассматриваются результаты моделирования RC фильтра и диодного ограничителя в условиях воздействия помехи в бортовых кабельных сетях космического аппарата, вызванной воздействием электростатического разряда и полезного сигнала. Предложены основные методы повышения стойкости бортовой аппаратуры космических аппаратов к факторам электростатического разряда. Делаются выводы о возможности применения цепей с частотными фильтрами и диодными ограничителями для защиты входов бортовой аппаратуры космического аппарата от воздействия помех, вызванных электростатическим разрядом и необходимости и достаточности принятых мер по защите бортовой аппаратуры космических аппаратов от факторов электростатического разряда на этапе проектирования.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, подавление помех, обработка сигналов

## Введение

В процессе эксплуатации космического аппарата происходит дифференциальная зарядка его поверхности под действием заряженных частиц космического излучения [1,2]. Начало исследований проблемы внутренней и внешней электризации КА за рубежом относится к середине семидесятых годов XX века [3]. В конце XX – начале XXI века эти исследования стали носить полномасштабный характер [4-8]. Вследствие зарядки возникают электростатические разряды [9]. Их можно классифицировать следующим образом [10]:

- 1) разряды на поверхности КА, создающие импульсные помехи в бортовой кабельной сети (БКС), антеннах и датчиках, расположенных на внешней поверхности КА. Эти помехи поступают на входы электронных блоков и приводят к обратимым и необратимым отказам в работе электроники;
- 2) разряды непосредственно в кабели, соединяющие между собой электронные блоки, антенны, датчики и панели солнечных батарей;
- 3) разряды в печатные проводники блоков электроники (выводы интегральных схем, транзисторов, диодов и др.);
- 4) разряды непосредственно в кристаллы полупроводниковых электрорадиоизделий (ЭРИ) из их диэлектрических корпусов.

Во многих случаях влияние ЭСР сводится не просто к вопросу электромагнитной совместимости [11], а относится к сфере функциональной безопасности БА [12].

Вопросам расчета помех и защиты БКС от них посвящены работы [13-15]. На этапе наземной отработки бортовая аппаратура проходит испытания на устойчивость к воздей-

ствию факторов ЭСР [16,17]. Однако отрицательный результат испытаний может потребовать доработки БА или даже всего КА, а это дополнительные затраты средств и времени. Поэтому научно-обоснованные меры, принятые на этапе концептуальной и технической проработки КА и БА, экономически целесообразнее, чем их доработка на этапе испытаний. Принятию таких мер способствует моделирование помех, вызванных ЭСР, и средств защиты от них.

Пагубное влияние наводок в БКС, вызванных ЭСР, можно ослабить, а в некоторых случаях исключить полностью. Для этого целесообразно использовать специальные электрические цепи, моделированию которых посвящена настоящая статья.

Было установлено, что наводки в БКС напоминают затухающее гармоническое колебание. Форма ЭДС наводки в кабеле представлена на рис. 1. Для проведения анализа использовалось специализированное программное обеспечение. Для анализа используем незащищённую двухпроводную линию, так как уровень наведённых помех в ней самый большой, это тоже было установлено экспериментально. Характеристики этой помехи следующие:

- длительность переднего фронта огибающей по уровням 0,1 и 0,9 – 100 нс ;
- длительность огибающей по уровню 0,1 – 1000 нс;
- амплитуда сигнала – 280 В;
- частота заполнения – 20...250МГц.

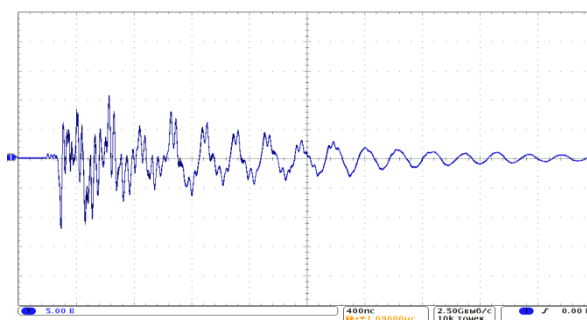


Рис. 1. Осциллограмма помехи в кабеле

На основании изложенных выше данных был сформирован сигнал с такими же параметрами (см. рис. 2). Заполнение формировалось путём модуляции по частоте. Частота несущего колебания составляла 135 МГц. Девиация частоты равна 115 МГц. Закон изменения частоты гармонический. Индекс частотной модуляции составлял 57,5. Установлено, что для описания сигнала можно использовать следующее математическое выражение:

$$u(t) = U_0 (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \sin(\omega(t)t + \varphi), \quad (1)$$

где  $U_0$  – амплитуда помехи;  $\alpha$  и  $\beta$  – коэффициенты, характеризующие время нарастания и спада огибающей помехи;  $\omega(t)$  – угловая частота гармонического колебания, как функция времени,  $\varphi$  – начальная фаза гармонического колебания.

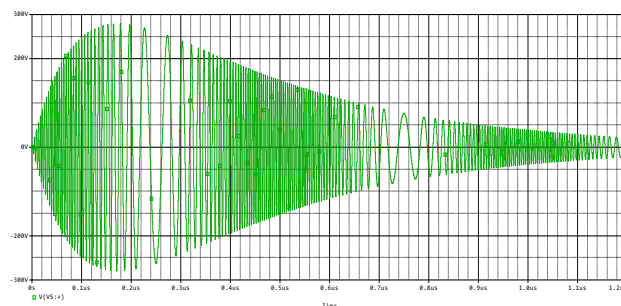


Рис. 2. Временная диаграмма сигнала имитирующего, помеху в БКС

Был получен спектр помехи (см. рис. 3). Из рис. 3 видно, что спектр помехи и спектр полезного сигнала перекрываются, если речь идёт о высокоскоростной линии передачи информации. Так, например, если речь идёт о сигнале с длительностью фронта 3 нс (частотная полоса от 0 до 333 МГц), фильтрация помехи частотными фильтрами невозможна. Ситуацию усложняет тот факт, что амплитуда помехи значительно превышает амплитуду полезного сигнала.

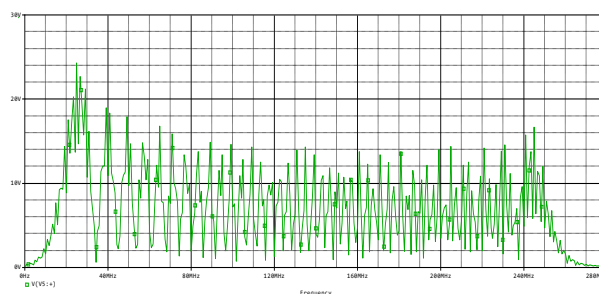


Рис. 3. Амплитудный спектр сигнал, а имитирующего помеху в БКС

Проведём моделирование простейшего RC фильтра с сопротивлением 1 кОм и ёмкостью 5,1 нФ. Значения ёмкости и сопротивления были подобраны таким образом, чтобы эффективно подавлять помеху. Схема фильтра приведена на рис. 4. При таких параметрах цепи длительность переднего фронта полезного сигнала по уровню 0,1 и 0,9 не может быть меньше 12 мкс. При моделировании RC фильтра в качестве входного сигнала использовали сумму полезного сигнала и помехи. Под полезным сигналом будем понимать периодическую последовательность импульсов в форме трапеции со скважностью, равной двум. Под результатами моделирования будем понимать выходное напряжение. Последнее справедливо для всех исследуемых цепей. Нагрузку фильтра не моделируем. Считаем, что функциональный узел, ко входу которого подключен фильтр, имеет вход с большим сопротивлением, и им можно пренебречь.

На рис. 5 представлены результаты моделирования. Как видно, помеха весьма эффективно подавлена несмотря на то, что значение её амплитуды достигает 280 В, а полезного сигнала всего 5 В. Таким образом, применение частотных фильтров в данном случае возможно. Но их целесообразно использовать при обработке медленно меняющихся сигналов. При передаче таких сигналов экранированные кабели можно не применять. Это уменьшит массу БКС и трудоёмкость её изготовления.

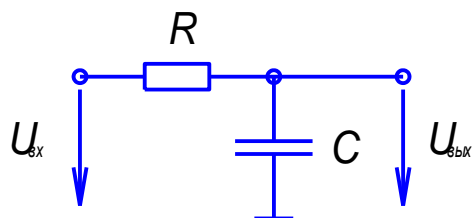


Рис. 4. Схема RC фильтр нижних частот

Другим вариантом может служить LC фильтр. Фильтры нижних частот подходят для подавления помех по цепям питания, но не подходят для высокоскоростных линий. Для последних возможно использование ограничителей с целью предотвращения перенапряжения БА. Схема такого диодного ограничителя приведена на рис. 6. Результаты моделирования диодного ограничителя представлены на рис. 7.

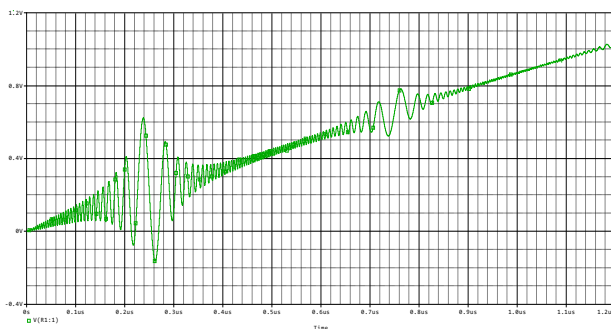


Рис. 5. Результаты моделирования RC фильтра

Как видно из рис. 7 работать с сигналом при воздействии помех невозможно. Поэтому необходимо принимать меры для защиты БКС (применение экранированных линий, витых пар), прокладывать БКС в местах, где ЭСР не будут происходить или их воздействие будет более слабым.

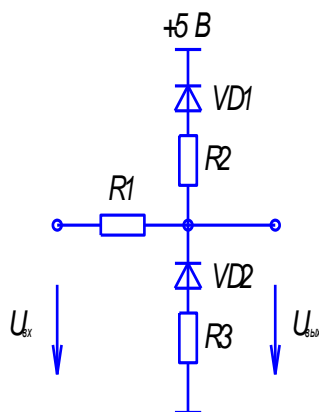


Рис. 6. Схема диодного ограничителя

На первый взгляд, вопрос можно решить, если использовать волоконно-оптические кабели. Однако, оптоволокно – это изоляционный материал и в нём могут накапливаться заряды. Такие кабели нужно защищать от потока частиц. Экраны из алюминиевого сплава, защищающие от потока частиц могут достигать нескольких миллиметров [1]. У коаксиального кабеля экраном, как правило, служит плетёнка. Плетёнка значительно легче

упомянутого экрана. А уровень помехи в БКС она снижает до единиц вольт (это тоже было установлено экспериментально). Поэтому, необходимо проводить глубокий анализ методов защиты от ЭСР которые будут применяться при проектировании КА, причём это желательно делать при проработке внешнего облика.

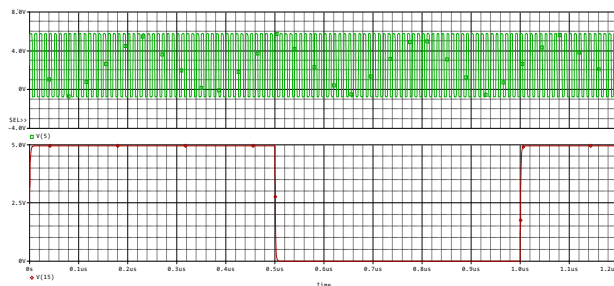


Рис. 7. Результаты моделирования диодного ограничителя: сверху – при воздействии помех, снизу – без помехи

Другим способом является применение программных и аппаратных методов защиты внутри БА (кроме фильтров и ограничителей). То есть, если пришла помеха, то сбой в работе БА не должен приводить к катастрофическим последствиям, ведь ЭСР происходят не очень часто. Или применять помехоустойчивые коды (с избыточностью информации). Стоит рассмотреть возможность применения корреляционных или цифровых фильтров.

## Заключение

Проведенные экспериментальные исследования генератора внеэлектродной плазмы с полым катодом показали, что в течение трех лет при эксплуатации в режимах:  $U = 1200$  В,  $I_{\text{л}} = 0,1-1$  А катод заменялся в среднем через каждые  $t_{\text{ср}} = 120$  ч. Полученные результаты свидетельствуют об увеличении срока службы генератора в 2 раза, благодаря снижению температуры катода, что является целью настоящей работы.

Проведено моделирование схемотехнических методов защиты БА от помех, наведенных в БКС при воздействии ЭСР. Получены осциллограммы помехи, амплитудного спектра и полезного сигнала. По результатам моделирования сформулированы следующие рекомендации по применению рассмотренных методов защиты в БКС КА:

1. БКС, по которым передаются медленноменяющиеся сигналы, можно не защищать экранами, а достаточно применить фильтр нижних частот на входе в прибор. Это же распространяется на цепи питания.
2. Высокоскоростные цифровые линии передачи информации и высокочастотные (ВЧ) аналоговые сигналы необходимо защищать экранами и повышать в них напряжение, использовать коды с избыточной информацией или волоконно-оптические линии передачи.
3. Для защиты входов функциональных узлов БА КА от перенапряжения, вызванного помехами в БКС. Целесообразно применять диодные ограничители.

Вопрос обеспечения устойчивости БА к электромагнитным полям ЭСР необходимо решать уже на этапе компоновки КА. При этом необходимо задавать реальные, а не предельные требования по устойчивости БА КА к факторам ЭСР.

## Литература

1. NASA-HDBK-4002A Mitigating in-space charging effects guideline, NASA, 2011.
2. Новиков Л.С. Взаимодействие космических аппаратов с окружающей плазмой. Учебное пособие. – М.: Университетская книга, 2006. – 120 с.
3. Frederickson A.R. (1974) Radiation Induced Electrical Current and Voltage in Dielectric Structures. AFRL-TR-74 – 0583, 41 p.
4. Frederickson A.R. Electric Discharge Pulses in Irradiated Solid Dielectric in Space. – IEEE Transactions on Electrical Insulation. – 1983. – Vol. 18. – P. 337–349.
5. Frederickson A.R., Cotts D.B., Wall J.A., Bouquet F.L. Spacecraft Dielectric Material Properties and Spacecraft Charging. – AIAA Progress in Astronautics and Aeronautics. – 1986. –Vol. 107. – P. 95–100.
6. Frederickson A.R., Holeman E.G., Mullen E.G. Characteristics of Spontaneous Electrical Discharging of Various Insulators in Space Radiations. – IEEE Transactions on Nuclear Science. – 1992. – Vol. 39. – n. 6. – P. 1773–1782.
7. Frederickson A.R., Mullen E.G., Brautigam D.H., Kerns K.J., Robinson P.A., Holeman E.G. Radiation-induced Insulator Pulses in the CRRES Internal Discharge Monitor Satellite Experiment. – IEEE Transactions on Nuclear Science. – 1991. – V. 38. – P. 1614–1621.
8. Bodeau M. High Energy Electron Climatology that Supports Deep Charging Risk Assessment in GEO. – AIAA 2010-1608. – 48th AIAA Aerospace Science Meeting, 2010. – Orlando FL. – 13 p.
9. Соколов А.Б. Обеспечение стойкости бортовой аппаратуры космических аппаратов к воздействию электростатических разрядов. Диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Москва: МИЭМ, 2009. – 236 с.
10. Тютнев А.П., Саенко В.С., Пожидаев Е.Д., Костюков Н.С. Диэлектрические свойства полимеров в полях ионизирующих излучений. М.: Наука, 2005. – 456 с. ил.
11. Кириллов В.Ю. Электромагнитная совместимость элементов и устройств бортовых систем летательных аппаратов при воздействии электростатических разрядов. Диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. – Москва: МАИ, 2002. – 293 с. ил.
12. Абрамешин А.Е., Кечиев Л.Н. Функциональная безопасность бортовых систем летательных аппаратов при ЭСР//Технологии электромагнитной совместимости. – 2012. - №3(42). – С. 33-43.
13. Востриков А.В., Абрамешин А.Е., Борисов Н.И. Расчет наводок в бортовой кабельной сети космических аппаратов с помощью макро моделирования на основе методов Эйлера // Технологии электромагнитной совместимости. – 2012. - №1(40). – С. 19-24.
14. Костин А.В., Пиганов М.Н. Расчет помех в цепях бортовой аппаратуры космических аппаратов, вызванных электростатическими разрядами // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2012.Т.14. - №4(5). – С.1376-1379.
15. Востриков А.В. Методы расчёта картины растекания тока по конструкции космического аппарата от электростатических разрядов на основе макро моделирования. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Москва: МИЭМ, 2012. – 21 с. ил.
16. Кириллов В.Ю., Малистин А.И., Марченко М.В. Испытания бортовой системы управления космического аппарата KazSat-2 на помехоустойчивость к электростатическим разрядам // Технологии электромагнитной совместимости. – 2012. - №1(40). – С. 3-9.
17. Пиганов М.Н., Костин А.В., Бозриков В.С. Экспериментальное исследование, измерение и анализ помех в цепях бортовой аппаратуры космических аппаратов, вызванных электромагнитным полем электростатического разряда // Надежность и качество сложных систем. – 2015. – №4(12). – С.46-55.