



УДК 629.7.05

Д. В. Почебут, П. В. Киселев

ОАО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М. Ф. Решетнева»,
г. Железногорск, Красноярский край, Россия
МБК «Прикладная физика и космические технологии» СФУ,
г. Железногорск, Красноярский край, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СХЕМЫ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ РАСЧЕТОВ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО РАЗРЯДА

Проведено моделирование работы электрической схемы системы электропитания космического аппарата (КА) при воздействии электростатического разряда (ЭСР) в неэкранированную шину «плюс» кабеля солнечной батареи (БС) и в корпус КА через магнитосферную плазму. На основании данной модели определены уровни воздействий по току и напряжению на точки электрической схемы, представляющие наибольший интерес (входные и выходные соединители энергопреобразующего комплекса (КЭП), узлы КЭП, развязывающие диоды БС). Сформулированы рекомендации и предложения по дальнейшему аналитическому и экспериментальному исследованию для уточнения моделей ЭСР и СЭП КА.

Ключевые слова: моделирование, система электропитания космического аппарата, переходные процессы, электростатический разряд.

D. V. Pochebut, P. V. Kiselev

JSC «Academician M. F. Reshetnev «Information Satellite Systems»,
Zheleznogorsk, Russia
IBC «Applied Physics and Space Technology» SibFU, Zheleznogorsk, Russia

MODELING OF SPACECRAFT ELECTRICAL POWER SUPPLY FOR TRANSIENTS CURRENTS AND VOLTAGES CALCULATIONS AFTER ELECTROSTATIC DISCHARGE IMPACT

Modeling of spacecraft electrical power supply (EPS) after electrostatic discharge (ESD) impact on unshielded bus «plus» of solar array (SA) electrical interface and on spacecraft (SC) case through the magnetospheric plasma was carried out. On the basis of this model levels for current and voltage impacts on the most interesting electrical circuit points (energy convert complex (ECC) inputs and outputs, ECC units, decoupler SA equipment) were determined. Recommendations and proposals for further analytical and experimental research were formulated to clarify the ESD and SC EPS models.

Keywords: modeling, spacecraft electrical power supply, transients, electrostatic discharge.

Под действием потоков плазмы космический аппарат (КА) приобретает некоторый электрический заряд и обусловленный им электрический потенциал относительно окружающей плазмы.

Разные участки поверхности КА могут заряжаться неодинаково: из-за различных условий воздействия внешних факторов на эти участки, из-за различий в электрофизических свойствах находящихся на них материалов. Происходит так называемое дифференциальное заряджение, при котором между отдельными участками поверхности КА появляются электрические напряжения. В некоторых случаях возникающие на КА потенциалы могут измеряться киловольтами и могут приводить к электрическим разрядам на поверхности КА и солнечной батареи (БС) [1].

Солнечная батарея представляет собой планарную конструкцию. Плюсовые и минусовые выводы генераторов пространственно разнесены. При выполнении монтажа электрического интерфейса существенная его часть остается неэкранированной. Развязывающее устройство генераторов БС находится в непосредственной близости от неэкранированной части кабельной сети. От выходных соединителей створок БС до поворотного устройства БС и далее до входных соединителей энергопреобразующего комплекса (КЭП) кабельная сеть имеет сплошное экранирование.

С этой точки зрения данные неэкранированные участки кабельной сети БС, находящиеся в непосредственной близости от диэлектрической поверхности защитных стекол фотопреобразователей (ФП), являются наиболее вероятными объектами воздействия электростатического разряда. Данное воздействие может привести к деградации или выходу из строя электрорадиоизделий, входящих в состав элементов системы электропитания (СЭП) КА.

Таким образом, необходимо оценить влияние переходных процессов по току и напряжению, возникающих в системе электропитания КА от воздействия электростатического разряда, на неэкранированные участки электрического интерфейса БС.

В процессе исследования нужно оценить влияние электростатического разряда на различные точки электрической схемы СЭП. При этом наибольший интерес представляют процессы на входе и выходе КЭП. На основа-

нии данной оценки будет приниматься решение о целесообразности введения схем парирования воздействий ЭСР.

Объектом исследования является СЭП КА «Экспресс-АМ5».

Моделирование электрической схемы системы электропитания

Упрощенный вид СЭП КА отображен на блок-схеме, показанной на рис. 1 [2].

Для определения амплитуды переходных процессов по току и напряжению в различных точках схемы и уровня воздействий на ЭРИ

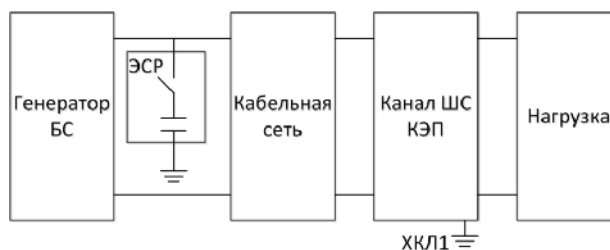


Рис. 1. Блок-схема СЭП КА: ЭСР – схема имитации электростатического разряда; ХКЛ1 – клемма для связи шины «минус» КЭП с корпусом КА

бортовой аппаратуры СЭП и кабельную сеть необходимо провести математическое имитационное моделирование воздействия ЭСР на схему СЭП.

Для достижения данной цели нужно решить следующие задачи:

- определить эквивалентные электрические схемы составляющих СЭП согласно рис. 1;
- смоделировать работу эквивалентных электрических схем каждой из составляющих блок-схемы рис. 1 в системе динамической симуляции;
- определить уровни воздействия на точки электрической схемы, представляющие наибольший интерес (входные и выходные соединители КЭП, узлы КЭП, развязывающие диоды БС).

Идеализированная эквивалентная электрическая цепь солнечного элемента имеет вид, показанный на рис. 2 [3].

Чтобы определить влияние ФП на переходные процессы от воздействия ЭСР, в эквивалентную схему были включены:

- емкость перехода и индуктивная составляющая ФП;

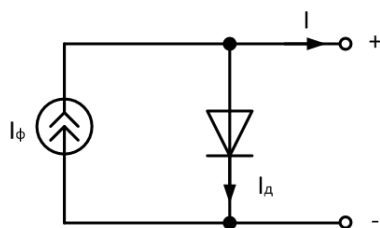


Рис. 2. Идеализированная модель солнечного элемента

- байпасный диод с напряжением смещения 0,6 В;
- емкость ФП относительно корпуса КА.

Используемая эквивалентная схема ФП показана на рис. 3.

Для упрощения модели трехкаскадного солнечного элемента, напряжение холостого хода которого составляет 2,669 В, трехкаскадный солнечный элемент был симитирован с помощью одного перехода напряжением 2,669 В.

Для упрощения модели генератора БС, имеющего выходной ток 5 А, было принято, что он состоит из одиночной цепочки солнечных элементов, каждый из которых также имеет выходной ток 5 А.

Определенные расчетным путем параметры элементов эквивалентной схемы ФП приведены в табл. 1.

Далее определим эквивалентную схему электростатического разряда. Электростатический разряд имеет следующие характеристики:

- ток в разрядном импульсе 100 А;
- длительность разрядного импульса 10^{-7} – 10^{-6} с;
- длительность фронтов разрядного импульса 10^{-9} – 10^{-7} с;
- энергия в разрядном импульсе 0,2 Дж;
- частота разрядов 10 Гц;
- напряжение разрядного импульса 20 кВ.

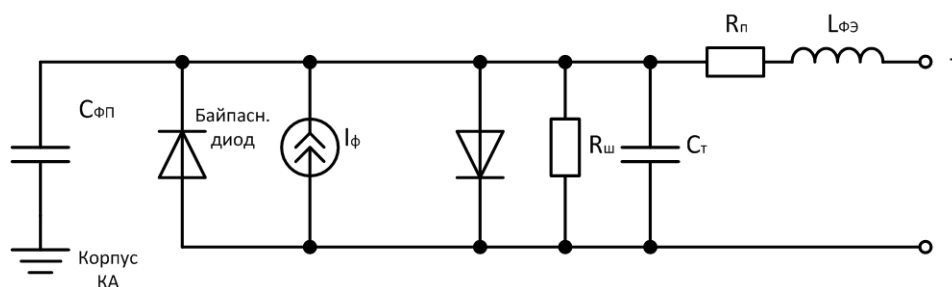


Рис. 3. Эквивалентная схема ФП: $C_{фп}$ – емкость ФП относительно корпуса КА; $I_{ф}$ – выходной ток ФП; $R_{ш}$ – шунтовое сопротивление солнечного элемента; $C_{т}$ – емкость перехода ФП; $R_{п}$ – последовательное сопротивление ФП; $L_{фэ}$ – индуктивная составляющая ФП

Таблица 1

Результаты расчета эквивалентных параметров солнечного элемента

Наименование	Значение
Выходной ток ФП, $I_{ф}$	5 А
Напряжение холостого хода солнечного элемента, U_{xx}	2,669 В
Последовательное сопротивление ФП, $R_{п}$	0,105 Ом
Шунтовое сопротивление ФП, $R_{ш}$	10 Ом
Емкость перехода ФП, $C_{т}$	27,5 мкФ
Индуктивная составляющая ФП, $L_{фэ}$	0,321 мкГн
Напряжение смещения байпасного диода, $U_{см}$	0,6 В
Емкость ФП относительно плазмы	0,409 нФ

Анализ параметров импульса ЭСР позволяет предложить следующую эквивалентную электрическую схему ЭСР, показанную на рис. 4.

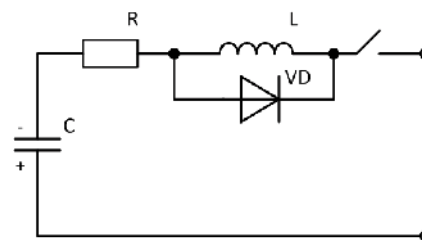


Рис. 4. Эквивалентная электрическая схема имитации ЭСР

При реальном ЭСР электроны, покидая диэлектрик, создают определенное направление тока до момента снижения энергии электростатического заряда, который не может обеспечить дальнейшее протекание тока в ЭСР. При этом направление тока меняться не может.

Для исключения возможности протекания обратного тока индуктивность в эквивалентной электрической схеме шунтируем диодом.

Определенные расчетным путем параметры элементов эквивалентной электрической схемы имитации ЭСР показаны в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчета эквивалентных параметров солнечного элемента

Наименование	Значение
Емкость	1 нФ
Омическое сопротивление	97,7 Ом
Индуктивность	9,54 мкГн
Напряжение открытия диода VD	0,7 В

Перейдем к определению эквивалентной модели кабельной сети БС – ШС КЭП. Для оценки влияния ЭСР на элементы электрической схемы СЭП и расчета переходных процессов, занимающих время от сотен наносекунд до единиц микросекунд, необходимо:

- чтобы эквивалентная модель кабеля была симметричной как по «+» и «-», так и по входу и выходу;
- ввести емкость между проводниками кабеля и экраном кабеля.

Эквивалентная модель кабеля показана на рис. 5.

Характеристики кабелей кабельной сети БС – ШС КЭП определены расчетным путем и показаны в табл. 3.

Электрическая схема канала ШС КЭП определена на основе анализа конструкторской и программно-методической документации на КА. Данная схема показана на рис. 6.

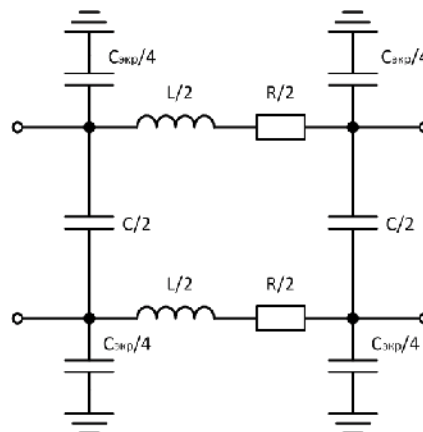


Рис. 5. Эквивалентная модель кабеля: $C_{экв}$ – емкость между токопроводящими жилами и экраном кабеля; C – емкость между плюсом и минусом; R – омическое сопротивление кабеля; L – индуктивность кабеля

Для упрощения расчетов примем электронные ключи ШС (VT) постоянно разомкнутыми.

Так как мы приняли электронные ключи постоянно разомкнутыми, определим такое омическое сопротивление нагрузки, чтобы напряжение на нагрузке было 100 В. Для обеспечения данного напряжения омическое сопротивление нагрузки равно 21 Ом.

На этом определение эквивалентных электрических схем составляющих СЭП согласно рис. 1 завершено.

Таблица 3

Характеристики кабельной сети БС – ШС КЭП

Наименование	Последовательно соединенные кабели 1 и 2	Кабель 3
Емкость между плюсом и минусом	144,2 пФ	20,6 пФ
Емкость между токопроводящими жилами и экраном кабеля	157,8 пФ	22,8 пФ
Омическое сопротивление кабеля	0,291 Ом	0,044 Ом
Индуктивность кабеля	6,39 мкГн	0,944 мкГн

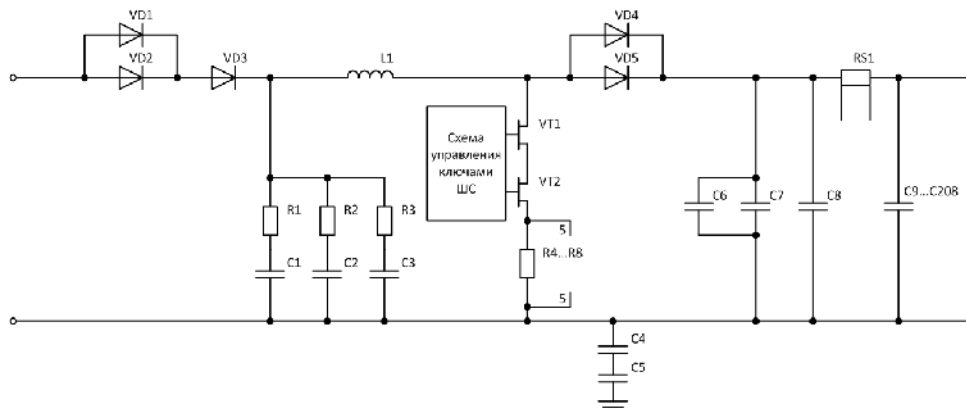


Рис. 6. Электрическая схема канала ШС КЭП

Путем анализа в качестве наиболее вероятных точек воздействия ЭСР были выбраны электропроводящие элементы КА.

Отрицательный заряд на поверхности КА развивается в 43 раза быстрее положительного [4]. Этот заряд, скопившийся на поверхности защитного стекла ФП БС, может вызвать электростатическое воздействие на следующие электропроводящие элементы КА:

- в неэкранированную шину «плюс» или шину «минус» кабеля БС;
- в корпус КА через магнитосферную плазму.

Моделирование переходных процессов

Для моделирования переходных процессов по току и напряжению на элементах схемы СЭП от воздействия ЭСР была использована система динамической симуляции Simulink программного пакета MATLAB 7.10.

Анализ полученных результатов моделирования показал превышение допустимых значений напряжений и токов на ЭРИ КЭП. Максимальные переходные процессы имеют место при воздействии ЭСР на неэкранированную плюсовую шину кабеля БС. В этом случае напряжение на выходе БС изменяется в диапазоне от минус 2400 В до плюс 1210 В, ток достигает значения 118 А. На входе в шунтовой стабилизатор (ШС) КЭП напряжение изменяется в диапазоне от минус 1880 В до плюс 200 В. Наиболее значительную часть воздействия на вход КЭП принимают на себя входные диоды ШС КЭП. Напряжение на входных диодах достигает 655 В в обратном направлении, что может привести к пробое диода.

Для снижения воздействий на ЭРИ бортовой аппаратуры СЭП и кабельную сеть были предложены следующие варианты протестированных схем защиты:

- установка на входе ШС КЭП диода между плюсовой шиной кабельной сети БС и корпусом КА по направлению к плюсовой шине;
- установка на входе ШС КЭП диода между минусовой шиной кабельной сети БС и корпусом. При этом для минусовой шины были рассмотрены варианты установки диода как в прямой, так и в обратной полярности;
- введение в схему на входе ШС КЭП элементов, изменяющих магнитную связь между плюсовой и минусовой шинами (трансформатора).

Также оценивалось влияние от введения магнитной связи вместе с диодами схемы защиты на уровень воздействия на ЭРИ от воздействия ЭСР.

Анализ полученных результатов влияния схем защиты для снижения амплитуды переходных процессов при воздействии ЭСР на неэкранированную шину кабеля БС показал следующее:

- практически во всех случаях применения схем защиты происходит снижение амплитуды воздействий на кабельную сеть БС и на вход ШС КЭП;
- наилучшие результаты по снижению амплитуды переходных процессов были достигнуты при введении в схему магнитной связи вместе с диодами. Полярность установки диода между минусовой шиной и корпусом КА значения не имела;
- влияние схем защиты на диапазоны изменения напряжений остальных участков незначительно.

Выводы и рекомендации

Первый опыт математического моделирования воздействия ЭСР в силовые цепи контура БС кабельная сеть – КЭП привёл к неожиданным результатам. С одной стороны, реальные технические образцы демонстрируют в полёте работу без сбоев и деградации. С другой стороны, моделирование показало наличие воздействия на элементы силовых цепей по току и особенно по напряжению, значения которого существенно превышают допустимые пределы для обеспечения их нормальной работоспособности.

Такое несоответствие может быть вызвано комбинацией следующих факторов:

- математическое описание элементов не полностью соответствует физическим характеристикам объектов контура БС – кабельная сеть – КЭП;
- заданные уровни воздействия от ЭСР существенно превышают реально существующие уровни воздействия;
- фактические уровни воздействия от ЭСР не приводят к необратимым отказам элементов за счёт их конструктивных запасов;
- элементы силового контура теряют работоспособность во время воздействия ЭСР и восстанавливают её после воздействия. При этом сбоев в работе бортовой аппаратуры не наблюдается из-за фильтрующих свойств КЭП и кратковременности воздействия.

В данной ситуации представляется целесообразным выполнить дальнейшее аналитическое и экспериментальное исследование этого явления. Данное исследование необходимо провести по следующим направлениям предварительного плана.

1. Аналитическое исследование:

- совместный анализ параметров и структуры математических моделей элементов;
- совместный анализ параметров и уровней математических моделей ЭСР;
- формирование предложений по уточнению параметров и структуры математических моделей и повторные вычислительные эксперименты.

Результатом работ должно быть формирование исходных данных для эксперимента и уточнённая модель.

2. Экспериментальное исследование.

В наличии имеется необходимая материальная часть:

- представительная для эксперимента тестовая панель БС;
- макет входных цепей КЭП;
- силовая кабельная сеть;
- аппаратура генерации ЭСР и измерения помех.

При необходимости могут быть собраны макеты схем защиты. Испытания предлагает-

ся провести на базе лаборатории отдела бортовых СЭП КА ОАО «ИСС».

Результатами экспериментального этапа должны быть:

- измеренные параметры помех;
- уточнённая и верифицированная модель;
- предложения по введению при необходимости средств защиты от помех.

В случае принятия решения о необходимости введения средств защиты представляется целесообразным определить место размещения устройства защиты.

Библиографические ссылки

1. Акишин А. И., Новиков Л. С. Электризация космических аппаратов. М. : Знание, 1985. 64 с., ил.
2. Чеботарев В. Е., Косенко В. Е. Основы проектирования космических аппаратов информационного обеспечения : учеб. пособие / Сиб. гос. аэрокосм. ун-т. Красноярск, 2011. 488 с., [24] с., ил.
3. Раушенбах Ю. А. Справочник по проектированию солнечных батарей : пер. с англ. М. : Энергоатомиздат, 1983. 360 с.
4. Space technology course: spacecraft techniques and technology : в 3 т. Т. 3 / Alain Bardoux, Jean-Pierre Catani, Bernard Ehster [и др.]. 2005. 840 с.

*Статья поступила в редакцию
06.06.2014 г.*