

**ОЦЕНКА ВОСПРИИМЧИВОСТИ СИЛОВОЙ ШИНЫ  
ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ С РАЗНЫМИ ПОПЕРЕЧНЫМИ  
СЕЧЕНИЯМИ К ВОЗДЕЙСТВИЮ  
ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО РАЗРЯДА**

*А.А. Дроздова, магистрант каф. ТУ*

*Научный руководитель М.Е. Комнатнов, доцент каф. ТУ, к.т.н.  
г. Томск, ТУСУР, anasrasiya.drozdova.00@list.ru*

Выполнен квазистатический анализ восприимчивости силовой шины электропитания (СШЭП) с разными поперечными сечениями (прямоугольное, коаксиальное, спиральное) к воздействию электростатического разряда (ЭСР). Выявлено, что максимальное (21,4 дБ) и минимальное (0,86 дБ) ослабление наблюдается на СШЭП с коаксиальным и спиральным поперечными сечениями соответственно.

**Ключевые слова:** электромагнитная совместимость, силовая шина электропитания, электростатический разряд.

В настоящее время стремительно развивается освоение космического пространства. Повышение помехоустойчивости и надежности создаваемых космических аппаратов (КА) позволяет повысить срок их активного существования. Однако в результате взаимодействия КА с окружающей его средой происходит накопление заряда на его поверхности, что влечет за собой появление разности потенциалов между различными элементами конструкции и как следствие появление электростатических разрядов (ЭСР). Так, разность потенциалов на поверхностях КА достигает 20 кВ, а среднее значение энергии ЭСР составляет 6–200 мДж. При этом на поверхности корпуса КА протекают импульсные токи амплитудой до 100 А, которые приводят к возникновению электромагнитных помех (ЭМП), способных повредить радиоэлектронные средства (РЭС) КА [1].

Силовая шина электропитания (СШЭП) является одним из важных компонентов бортовой кабельной сети, от которой зависит существование КА, поскольку СШЭП не резервируется, но электрически связывает жизненно важные системы электропитания КА. Поэтому важно испытывать СШЭП на восприимчивость к воздействию ЭСР. СШЭП в основном изготавливают с прямоугольным поперечным сечением, так как это является наиболее простым и известным конструкторским решением. При этом СШЭП с коаксиальным поперечным сечением является более эффективной за счёт компенсации вихревых магнитных полей в окружении СШЭП [2]. Предложена конструкция СШЭП со спиральным поперечным сечением, которая имеет

ряд преимуществ по сравнению с другими видами поперечных сечений [3].

Цель работы – оценить восприимчивость СШЭП с прямоугольным, коаксиальным и спиральным поперечными сечениями к воздействию ЭСР.

В работе использовались система TALGAT и квазистатический анализ. Так, созданы модели СШЭП с прямоугольным, коаксиальным и спиральным поперечными сечениями. Модель с прямоугольным поперечным сечением (рис. 1, *а*) содержит проводники для прямых *1* и обратных *2* токов, выполненные в виде металлических пластин, и изоляторы: лак ЭП-730 ( $\epsilon_r = 4$ ) *3*; полиамидная пленка с односторонним липким слоем ( $\epsilon_r = 2,3$ ) *4* и стеклотекстолит ( $\epsilon_r = 4,3$ ) *5*. Снаружи СШЭП покрыта лентой из арамидных нитей с обмоткой из медной посеребренной проволоки (ЛМAMс) *6* для защиты её от ЭСР. Модель СШЭП с коаксиальным поперечным сечением представлена на рис. 1, *б* с параметрами: радиус  $r = 3,6$  мм, расстояние между цилиндрами  $w = 0,1$  мм, толщина стенок цилиндров  $t = 0,1$  мм. Параметры модели со спиральным поперечным сечением (рис. 1, *в*):  $r = 1$  мм,  $w = 0,1$  мм,  $t = 0,1$  мм, количество витков  $N = 7$ . Значение  $\epsilon_r$  для коаксиальной и спиральной СШЭП принято равным 1. Потери в проводниках и диэлектриках не учитывались. Во всех случаях площадь поперечного сечения проводников для прямых и обратных токов составляет  $50 \text{ мм}^2$ .

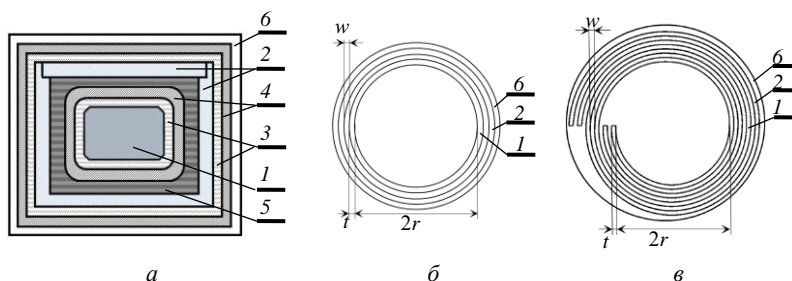


Рис. 1. Поперечные сечения прямоугольной (*а*), коаксиальной (*б*) и спиральной (*в*) СШЭП

На рис. 2 представлена схема воздействия ЭСР, состоящая из проводников для прямых (узлы *V1*, *V4*), обратных (узлы *V2*, *V5*) токов протекания и ЛМAMс (узлы *V3*, *V6*). Начало и конец каждого проводника нагружены на сопротивления  $R1-R6 = 50$  Ом для псевдосогласования с измерительным трактом. При моделировании высота СШЭП над плоскостью земли составляла  $h = 0,1$  м, а её длина  $l = 0,5$  м.

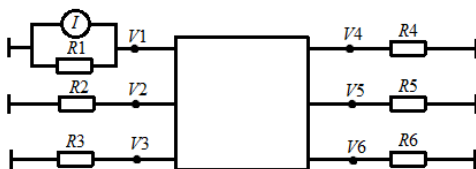


Рис. 2. Схема воздействия ЭСР

Для оценки воздействия ЭСР на СШЭП выполнено моделирование форм сигнала на «+» шине (V1, V4), «-» шине (V2, V5) и ЛМAMс (V3, V6). Для этого параллельно сопротивлениям R1–R3 поочередно подключался генератор тока, имитирующий воздействие ЭСР. Форма тока выбрана по четверной степени жесткости ( $\tau_1 = 1,1$  нс,  $\tau_2 = 2$  нс,  $\tau_3 = 12$  нс,  $\tau_4 = 37$  нс,  $I_1 = 30$  А,  $I_2 = 16$  А,  $n = 1,8$ ) согласно ГОСТ Р 51317.4.2–2010 [4]. В таблицу сведены полученные результаты ослабления амплитуды при воздействии ЭСР на СШЭП.

#### Результаты ослабления амплитуды ЭСР

Воздействие	СШЭП	«+» шина, дБ	«-» шина, дБ	ЛМAMс, дБ
«+» шина	Прямоугольная	1,36	9,2	9,2
	Коаксиальная	4,2	11,8	21,4
	Спиральная	5,4	6,4	18,8
«-» шина	Прямоугольная	9,2	4,6	11,4
	Коаксиальная	11,8	4,6	10,8
	Спиральная	6,5	5,8	17,5
ЛМAMс	Прямоугольная	9,2	11,4	6
	Коаксиальная	21,4	10,8	2,3
	Спиральная	18,9	17,5	0,82

Из таблицы видно, что при воздействии ЭСР на «+» шину минимальное (1,36 дБ) ослабление наблюдается для прямоугольной формы поперечного сечения. При воздействии ЭСР на «-» шину минимальное (4,6–5,8 дБ) ослабление наблюдается для всех форм поперечного сечения. При воздействии ЭСР на ЛМAMс минимальное (0,82–2,3 дБ) ослабление наблюдается для коаксиальной и спиральной форм поперечного сечения. Наибольшее ослабление (21,4 дБ) имеет СШЭП с коаксиальным поперечным сечением.

Таким образом, выполнена оценка воздействия ЭСР на СШЭП с прямоугольным, коаксиальным и спиральным поперечными сечениями. Показано, что максимальная амплитуда ЭСР во всех случаях наблюдается в начале СШЭП и ослабляется при ее прохождении. Минимальное (0,82 дБ) и максимальное (21,4 дБ) значения ослабления

наблюдаются при воздействии ЭСР на ЛМAMc при использовании СШЭП с коаксиальным и спиральным поперечными сечениями соответственно.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований проект № 19-37-51017.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Соколов А.В. Обеспечение стойкости бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов к воздействию электростатических разрядов: дис. ...д-ра техн. наук. – М., 2009. – 238 с.
2. Ehrich M. Electrical properties and magnetic fields of a coaxial bus bar // Proc. Asia-Pacific conf. on environmental electromagnetics, Shanghai, China. – 2000. – P. 11–16.
3. Komnatnov M.E. Electrical modeling of the spiral bus bar / M.E. Komnatnov, T.R. Gazizov // IEEE 21th international conference on micro/nanotechnologies and electron devices EDM 2020, Chemal, Russia. – 29 June. – 3 July 2020. – 5 p.
4. ГОСТ Р 51317.4.2–2010 (МЭК 61000-4-2:2008). Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электростатическим разрядам. Требования и методы испытаний, 2010. – 26 с.

УДК 621.37

#### **АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕАНДРОВОЙ МИКРОПОЛОСКОВОЙ ЛИНИИ ИЗ ДВУХ ВИТКОВ, СОЕДИНЕННЫХ КАСКАДНО**

***А.Ю. Фидирко, магистрант; А.В. Носов, к.т.н., ст. преп.**  
г. Томск, ТУСУР, каф. ТУ, fidirko94@mail.ru*

Выполнен анализ влияния изменения температуры от –150 до 150 °С на характеристики меандровой микрополосковой линии из двух витков соединенных каскадно. Выявлено, что ее изменение оказывает слабое влияние на изменение элементов матриц **C**, **L**, **Z** и погонные задержки мод (не более 0,21%), а также амплитуды импульсов в конце линии (не более 4,79%).

**Ключевые слова:** меандровая микрополосковая линия, температурное воздействие, сверхкороткий импульс, электромагнитная совместимость.

В зависимости от сферы эксплуатации радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) проводятся климатические испытания в соответствующей среде и производится выбор материалов, удовлетворяющих техническим требованиям [1]. Так, изменение температуры окружающей среды может приводить к изменению химико-физических и механических свойств материалов [2]. Проведение натуральных климатических