

15 позволит увеличить погонную ёмкость максимум в 4 раза, но при этом приведет к увеличению массы проводных отводов на 10%, что экономически невыгодно для КА.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 19-79-10162-П, <https://rscf.ru/project/19-79-10162/>.

ЛИТЕРАТУРА

1. Resonance issues and damping techniques for grid-connected inverters with long transmission cable / S. Zhang, S. Jiang, X. Lu, B. Ge, F.Z. Peng // IEEE Trans. Power Electron. – 2014. – Vol. 29, No. 1. – P. 110–120.

2. A survey on demand response in smart grids: Mathematical models and approaches / R. Deng, Z. Yang, M. Chow, J. Chen // IEEE Trans. Ind. Informat. – 2015. – Vol. 11, No. 3. – P. 570–582.

3. Clayton R.P. Introduction to Electromagnetic Compatibility. – John Wiley & Sons, 1992. – 983 p.

4. Провод БС 35-1298 – описание, характеристики, расшифровка – Кабель.РФ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://cable.ru/cable/group-bs_35_129_description.php, свободный (дата обращения: 23.01.2024).

5. Провод МС 26-15 – описание, характеристики, расшифровка – Кабель.РФ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://cable.ru/cable/group-ms_26_15_description.php, свободный (дата обращения: 23.01.2024).

6. Куксенко С.П. Новые возможности системы моделирования электромагнитной совместимости TALGAT / С.П. Куксенко, А.М. Заболоцкий, А.О. Мелкозеров // Доклады ТУСУР. – 2015. – Т. 36, № 4. – С. 45–50.

УДК 621.376.3

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ СИЛОВОЙ ШИНЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА НЕЁ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО РАЗРЯДА

И.С. Марков, магистрант; А.А. Дроздова, аспирант

*Научный руководитель М.Е. Комнатнов, доцент каф. ТУ, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, каф. ТУ, ilia.markov@tusur.ru*

Выполнен анализ влияния геометрической формы силовой шины электропитания (СШЭП) при воздействии электростатического разряда (ЭСР). В качестве основания СШЭП выбраны поперечные сечения на основе несимметричной, симметричной и коаксиальной линий передач. Показано, что ослабление амплитуды ЭСР для всех форм поперечных сечений не превышает 1,96 раза.

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

Силовая шина электропитания является одной из конструкций силовых цепей космического аппарата (КА), определяющей его

надёжность. В основном СШЭП не резервируется, но с её помощью осуществляется электропитание всех потребителей электроэнергии КА. Анализ статистики отказов КА [1] свидетельствует о том, что частыми внештатными ситуациями в ходе их эксплуатации являются отказы систем электропитания. При этом свыше 54% отказов вызваны воздействием электростатического разряда (ЭСР) [2]. В этой связи на этапе проектирования необходимо предотвращать её возможные дефекты. При этом важно исследовать конструктивные особенности взаимосвязи геометрии СШЭП с её электрофизическими параметрами. В [3] представлены результаты разработки моделей различных форм поперечного сечения СШЭП и их квазистатический анализ, а также приведены зависимости значений погонных параметров СШЭП от геометрической формы ее конструкции. При этом исследование влияния геометрической формы СШЭП при воздействии на неё ЭСР остается актуальным.

Цель работы – выполнить анализ влияния геометрической формы СШЭП при воздействии на неё ЭСР.

Известным конструкторским решением для основания СШЭП является слоистая структура в виде несимметричной (рис. 1, *а*) или симметричной (см. рис. 1, *б*, *в*) линий передач (ЛП), которые состоят из проводящих пластин 1, разделенных диэлектриком 2 с относительной диэлектрической проницаемостью (ϵ_r) [4]. Геометрическими параметрами основания СШЭП являются ширина (w), толщина (t) и длина электропроводящих пластин, а также толщина (h) диэлектрика. СШЭП с коаксиальной формой поперечного сечения основания (см. рис. 1, *з*), отличается от остальных отсутствием результирующего магнитного поля вокруг СШЭП, а также низкими значениями элементов матрицы индуктивности [5]. Геометрическими параметрами коаксиальной СШЭП являются диаметр (D) проводников, а также h диэлектрика. В результате для анализа влияния геометрической формы СШЭП при воздействии ЭСР выбраны поперечные сечения, созданные в программе TALGAT [6] (см. рис. 1). При этом для каждого полюса выбрана площадь поперечного сечения (S) 50 мм², а в качестве изолятора использовался диэлектрик толщиной $h = 2$ мм с $\epsilon_r = 1$. Потери в проводниках и диэлектриках на данном этапе не учитывались.

Выполнено моделирование воздействия ЭСР на СШЭП с разным поперечным сечением основания. На рис. 2, *а* представлена схема воздействия ЭСР на СШЭП, состоящая из проводников прямых (узлы V1, V2) и обратных (узлы V3, V4) токов. Начало и конец каждого проводника нагружены на сопротивления $R1 - R4 = 50$ Ом стандартного измерительного тракта. При этом слой земли располагался на

расстоянии 1 м для минимального его влияния. Форма напряжения ЭСР (см. рис. 2, б) выбрана по IV степени жёсткости согласно ГОСТ Р 51317.4.2–2010 [7].

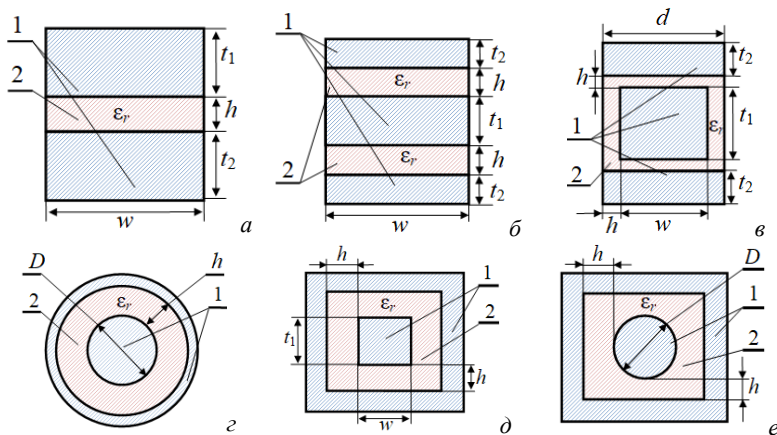


Рис. 1. Поперечные сечения СШЭП на основе ЛП: несимметричной (а), симметричной без изолятора по краям (б) и с ним (в), коаксиальной (з), прямоугольной (д) и круглой с прямоугольным обратным проводником (е)

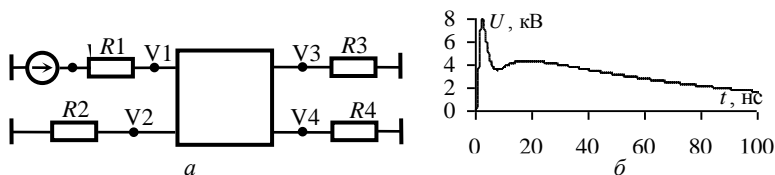


Рис. 2. Схема воздействия ЭСР на СШЭП – а; форма напряжения в узле V5 – б

Формы напряжения в начале (V1) и конце (V3) положительного проводника СШЭП с поперечным сечением в виде несимметричной ЛП (см. рис. 1, а) представлены на рис. 3, а. Из рис. 3, а видно, что амплитуда в начале линии не превышает 4,8 кВ, а в конце линии – 2,2 кВ. Ослабление (α) амплитуды ЭСР составило 1,91 раза. Стоит отметить, что формы напряжения в начале и конце линии для всех форм поперечных сечений СШЭП совпадали, отличались только значения максимальной амплитуды. В таблице сведены значения α амплитуды ЭСР для всех форм поперечных сечений, из которой видно, что значение α для всех форм поперечных сечений практически одинаковое. Максимальное значение α наблюдается для СШЭП с основанием в виде симметричной ЛП без диэлектрика по краям (см. рис. 1, б).

Ослабление амплитуды ЭСР

Рис. 1	<i>a</i>	<i>б</i>	<i>в</i>	<i>г</i>	<i>д</i>	<i>е</i>
α , разы	1,91	1,96	1,88	1,87	1,89	1,82

Далее выполнено моделирование воздействия ЭСР на СШЭП в виде несимметричной ЛП (см. рис. 1, *a*) при изменении отношения w/t , но с сохранением $S = 50 \text{ мм}^2$ (см. рис. 3, *б*).

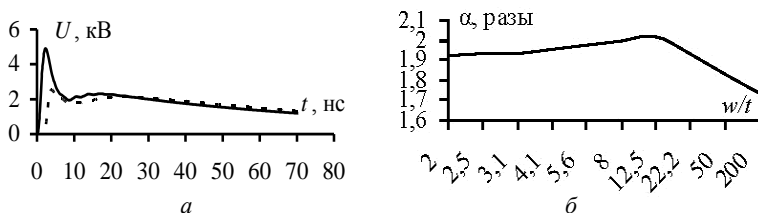


Рис. 3. Формы напряжения в узлах V1 (—) и V3(- -) (*a*) и зависимость значения α от w/t (*б*)

Из рис. 3, *б* видно, что увеличение отношения w/t до 12,5 ($w = 25 \text{ мм}$, $t = 2 \text{ мм}$) приводит к увеличению ослабления до 2 раз. Дальнейшее увеличение w/t до 200 ($w = 100 \text{ мм}$, $t = 0,5 \text{ мм}$) приводит к резкому уменьшению значения α до 1,7 раза. Такое поведение можно объяснить тем, что после значения $w/t = 12,5$ происходит резкое увеличение ёмкости и уменьшение индуктивности в 3,5 раза [3]. Таким образом, при проектировании СШЭП необходимо учитывать данные особенности конструкции СШЭП.

В результате выполнен анализ влияния геометрической формы СШЭП при воздействии ЭСР. Показано, что ослабление амплитуды ЭСР для всех форм поперечных сечений не превышает 1,96 раза. Проанализировано влияние отношения ширины проводника к её толщине. Показано, что увеличение отношения до $w/t = 12,5$ приводит к увеличению значения ослабления до 2 раз, а при $w/t = 200$ значение ослабления уменьшается до 1,7 раза.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 19-79-10162-П, <https://rscf.ru/project/19-79-10162/>.

ЛИТЕРАТУРА

- Соколов А.Б. Моделирование изменений радиационной электропроводности полимеров внешней поверхности космических аппаратов при воздействии факторов космического пространства / В.С. Саенко, А.Б. Соколов // Технологии электромагнитной совместимости. – 2008. – № 2(25). – С. 9–11.

2. Fenell J.F. Spacecraft charging: observations and relationship to satellite anomalies // Spacecraft charging technology, proceedings of the seventh international conference held. – 2001. – P. 279–285.

3. Ternov S. Influence of the cross-section form of the power bus bar on its parameters / S. Ternov, A.V. Demakov, M.E. Komnatnov // Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT). – Moscow, Russia, 14–16 March 2018. – P. 1–4.

4. Caponet M.C. Low stray inductance bus bar design and construction for good EMC performance in power electronic circuits / M.C. Caponet, F. Profumo, R.W. De Doncker // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2002. – Vol. 17, Iss. 2. – P. 916–921.

5. Ehrich M. Electrical properties and magnetic fields of a coaxial bus bar / M. Ehrich, L.O. Fichte, M. Luer // Proc. Asia-Pacific Conf. on Environmental Electromagnetics. – 2000. – P. 11–16.

6. Куксенко С.П. Новые возможности системы моделирования электромагнитной совместимости TALGAT / С.П. Куксенко, А.М. Заболоцкий, А.О. Мелкозеров // Доклады ТУСУР. – 2015. – Т. 36, № 4. – С. 45–50.

7. 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 621.396.6

**МОДАЛЬНЫЙ ФИЛЬТР НА ОСНОВЕ
МИКРОПОЛОСКОВОЙ ЛИНИИ С ДВУМЯ БОКОВЫМИ
ЗАЗЕМЛЕННЫМИ ПРОВОДНИКАМИ НА КОНЦАХ ПОД
ГРАНИЦЕЙ ВОЗДУХ–ПОДЛОЖКА**

И.Е. Сагиева, к.т.н., доцент каф. ТУ, с.н.с. НИЛ «ФИЭМС»;

И. Хелифати, студент каф. ЭМИС;

А.В. Путилин, магистрант каф. ТУ

г. Томск, ТУСУР, indira_sagieva@mail.ru

Впервые представлено исследование микрополосковой линии с двумя боковыми заземленными проводниками на концах под границей воздух–подложка в качестве модального фильтра. Выполнено моделирование в системе квазистатического анализа TALGAT. Выявлено, что исследуемая линия разложила воздействующий сверхкороткий импульс на два импульса, при этом их амплитуда уменьшилась в 2 раза.

Ключевые слова: радиоэлектронное устройство, микрополосковая линия, модальный фильтр.

На сегодняшний день многие радиоэлектронные устройства (РЭУ) (около 90%) используют микрополосковую линию (МПЛ) как основную линию, реализующуюся на печатных платах [1]. В этой свя-