

2. Montrose M.I. Printed circuit board design techniques for EMC compliance: a handbook for designers. – 2nd ed. – Hoboken, NJ, USA: Wiley-IEEE Press, 2000.

3. Shielding effectiveness of a rectangular enclosure with a rectangular aperture / M.P. Robinson, J.D. Turner, D.W.P. Thomas et al. // Electronics Letters. – 1996. – No. 17 (32). – P. 1559–1560.

УДК 621.372.211

АНАЛИЗ ПОГОННОЙ ЁМКОСТИ И МАССЫ ПРОВОДНЫХ ОТВОДОВ ТИПА БС 35-1298 И МС 26-15

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*

Рассмотрены проводные отводы силовой шины электропитания, использующиеся в космических аппаратах. Рассчитаны погонные ёмкости и масса проводных отводов, состоящие из проводов типа БС 32-1298 и МС 26-15. Выявлено, что использование провода типа МС 26-15 приводит к увеличению погонной ёмкости в 4 раза, а использование провода типа БС 35-1298 позволит уменьшить массу проводных отводов на 10%.

Ключевые слова: силовая шина электропитания, космический аппарат, проводные отводы, погонная ёмкость, масса проводов.

Проводные отводы присутствуют во многих системах силовой электроники, включая электрические распределительные сети [1, 2]. При этом для обеспечения целостности системы и минимизации габаритов зачастую провода группируют в жгуты, что приводит к увеличению емкостных и индуктивных электромагнитных связей между проводами. Вследствие этого может повыситься уровень кондуктивных и излучаемых электромагнитных помех (ЭМП), что приведет к возникновению необратимых и катастрофических отказов [3]. При создании летной бортовой техники необходимо решение множества задач, связанных с её массой и надежностью при нахождении в космическом пространстве. Провода типа БС 32-1298 и МС 26-15 предназначены для фиксированного монтажа бортовой электрической сети авиационной и космической техники. В результате целесообразно оценить погонные параметры и массу провода для монтажа силовых цепей. Цель работы – оценить погонную ёмкость, а также массу проводов типа БС 32-1298 и МС 26-15.

Конструкция провода БС 32-1298 [4] (рис. 1, а) состоит из токопроводящей жилы из скученных медных лужёных проволок I , изоля-

ции с диэлектрической проницаемостью ($\epsilon_r = 2,1$) в виде двух сплошных слоёв из фторопласта 2. Провод типа МС 26-15 [5] (рис. 1, б) состоит из токопроводящей жилы 1 из медной посеребрённой проволоки марки БМС или МСр и изоляции 2 из электроизоляционного полиимидного лака марки АД-9103 с $\epsilon_r = 3,1$. Для защиты от электростатического разряда провода в жгуте покрывают лентой из арамидных нитей с обмоткой из медной посеребрённой проволоки (ЛМММс).



Рис. 1. Структура проводов БС 35-1298 (а) и МС 26-15 (б)

Созданы геометрические модели проводных жгутов (рис. 2), состоящих из проводов типа БС 35-1298 и МС 26-15, предназначенные для их применения в качестве проводных отводов силовой шины электропитания (СШЭП) космического аппарата (КА). Данные проводные отводы необходимы для соединения СШЭП с устройствами, входящими в состав системы электропитания КА. Площадь поперечного сечения (S) каждого полюса СШЭП выбрана 50 мм^2 из расчета протекания максимального тока 200 А . Согласно технической документации (ТД) [3, 4], провод БС 35-1298 имеет максимальную $S = 5 \text{ мм}^2$, а МС 26-15 – $0,5 \text{ мм}^2$. При этом погонные ёмкость и индуктивность для провода БС 35-1298 составляют $390,5 \text{ пФ/м}$ и $59,7 \text{ нГн/м}$, а для МС 26-15 – $465,1 \text{ пФ/м}$ и $73,4 \text{ нГн/м}$. В результате каждый проводной отвод СШЭП выполняется из 10 проводов типа БС 35-1298 или 100 проводов типа МС 26-15, что в сумме составляет 50 мм^2 для каждого полюса.

Вблизи СШЭП поперечное сечение (рис. 2, а) представляет собой набор из 10 проводов типа БС 35-1298 (100 проводов типа МС 26-15) длиной $20\text{--}30 \text{ мм}$, расположенных друг над другом на расстоянии $w_1 = k_1 = 4 \text{ мм}$ с единым экраном в виде экранирующей ленты (ЛМММс). Провода расположены таким образом, что сверху имеют положительную полярность провода 1, а снизу отрицательную 2, вокруг которых экранирующая лента 3. Подобное расположение проводов необходимо для того, чтобы соединить провода каждого полюса с жесткой конструкцией СШЭП. Далее проводные отводы вдоль длины собираются в жгут (рис. 2, б) длиной 350 мм и возле соединителей разветвляются по полюсам соответствующей полярности: положительной и отрицательной (рис. 3, в) длиной 100 мм .

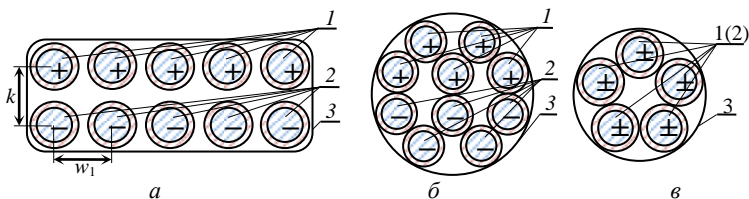


Рис. 2. Геометрические модели проводных отводов СШЭП, состоящих из проводов типа БС 35-1298

На основе созданных геометрических моделей в программе TALGAT [6] вычислены матрицы коэффициентов электростатической индукции для проводов проводных отводов типа БС 35-1298 и МС 26-15, а погонные ёмкости (C) для данных моделей вычислены как

$$C = \sum_{i=1}^N C_{ii} + \sum_{i=1}^N C_{ij}, i \neq j, \quad (1)$$

где C_{ii} и C_{ij} – собственные и взаимные коэффициенты матрицы электростатической индукции соответственно; N – число проводов в жгуте. В таблицу сведены результаты расчета погонных C , а также массы (m) проводных отводов, состоящих из проводов типа БС 35-1298 и МС 26-15. Масса рассчитывалась относительно данных, представленных в ТД. Масса провода типа БС 35-1298 с $S = 5 \text{ мм}^2$ составляет 47 кг/км, а для МС 26-15 с $S = 0,5 \text{ мм}^2$ – 5,17 кг/км.

Значения погонной C и m для проводных отводов

| N | БС 35-1298 | | N | МС 26-15 | |
|----------------|------------|---------|-----|------------|---------|
| | C , пФ/м | m , г | | C , пФ/м | m , г |
| 10 (рис. 2, а) | 683,3 | 14 | 100 | 2 563,6 | 15,51 |
| 10 (рис. 2, б) | 601,4 | 164,5 | 100 | 2 428,7 | 180,95 |
| 5 (рис. 2, в) | 512,5 | 23 | 50 | 1 567,4 | 25,85 |

Из таблицы видно, что использование провода МС 26-15 приводит к увеличению погонной C в 3,75 раза для проводного отвода, расположенного близи основания СШЭП, в 3 раза – вблизи соединителей и в 4 раза – вдоль длины. Также преимуществом провода МС 26-15 является более высокая гибкость проводного отвода. Тогда как использование провода типа БС 35-1298 позволит уменьшить массу проводных отводов примерно на 10%, что является экономически более выгодным.

В результате выполнен анализ погонной ёмкости и массы проводных отводов СШЭП, состоящих из проводов типа БС 35-1298 и МС 26-15. Анализ показал, что использование проводов типа МС 26-

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