

ПОДСЕКЦИЯ 2.6

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ

*Председатель – Заболоцкий А.М., зав. каф. СВЧиКР, д.т.н.;
зам. председателя – Белоусов А.О., доцент каф. ТУ, к.т.н.*

УДК 621.396.677.83

АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКРАНИРОВАНИЯ МНОГОСЕКЦИОННЫХ ЭКРАНОВ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ С ПОМОЩЬЮ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ СХЕМ

А.В. Гнутов, магистрант;

А.А. Иванов, к.т.н., с.н.с. НИЛ «БЭМС РЭС»

г. Томск, ТУСУР, andrey.gnutow@ya.ru

Представлены результаты аналитической оценки эффективности экранирования многосекционных корпусов печатных плат на основе метода эквивалентной схемы корпуса. Показано, что результаты, рассчитанные аналитически и методом конечных разностей во временной области, согласуются. Для корпуса из двух секций отклонение составило в среднем 4,6 дБ, а для корпуса с тремя секциями – 5,6 дБ.

Ключевые слова: эффективность экранирования, корпус, печатная плата, многосекционный экран, аналитический метод, эквивалентная схема.

Для защиты печатных плат и электронных компонентов от воздействия электромагнитных помех применяются экранирующие корпуса [1]. Причем эти корпуса часто изготавливаются в виде нескольких связанных друг с другом секций, изолирующих компоненты одновременно от внешнего и взаимного воздействия. Как правило, для оценки эффективности экранирования (ЭЭ) многосекционных корпусов применяются численные методы [2]. Однако их использование обычно связано со значительными вычислительными затратами.

Для оценки ЭЭ корпуса с апертурой в [3] предложен экономичный аналитический метод, основанный на использовании эквивалентной электрической схемы. В этой схеме воздействующая на корпус плоская электромагнитная волна заменяется источником с напряжением V_0 и импедансом $Z_0 = 377$ Ом, апертура – импедансом Z_{ap} , а сам

корпус – короткозамкнутым отрезком волновода. ЭЭ вычисляется из напряжения в схеме после её преобразований в соответствии с теорией цепей. Метод [3] обладает приемлемой точностью и низкой вычислительной сложностью, однако ранее он не применялся для оценки ЭЭ многосекционных корпусов. Цель данной работы – оценить возможность применения [3] к аналитической оценке ЭЭ таких структур.

В первую очередь, проанализирована ЭЭ корпуса, состоящего из двух каскадно-соединенных секций (рис. 1, а). Секция 1 имела размеры $10 \times 4 \times 10$, а секция 2 – $10 \times 4 \times 5$ мм³. В лицевой стенке корпуса и в стенке между секциями располагались одинаковые апертуры 3×3 мм². ЭЭ оценивалась в точке наблюдения P , расположенной в центре секции 1. Для аналитической оценки ЭЭ была составлена эквивалентная схема, показанная на рис. 1, б. В отличие от [3] в схему добавлены дополнительный импеданс Z_{ap2} и второй короткозамкнутый отрезок волновода.

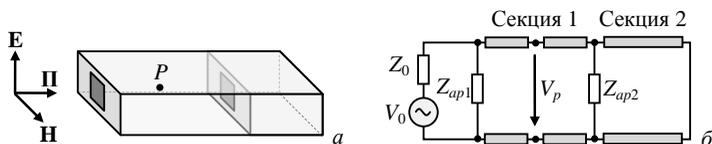


Рис. 1. Корпус из двух секций (а) и его эквивалентная схема (б)

Результаты аналитической оценки ЭЭ для двухсекционного корпуса в диапазоне частот 0–40 ГГц приведены на рис. 2. Для сравнения также приведена частотная зависимость ЭЭ этого корпуса, полученная численным методом конечных разностей во временной области (МКРВО). Из рис. 2 видно, что результаты, полученные аналитическим методом и МКРВО, хорошо согласуются. Среднее значение отклонения составило всего 4,6 дБ. Причем наибольшие различия наблюдаются на частотах до 5 ГГц.

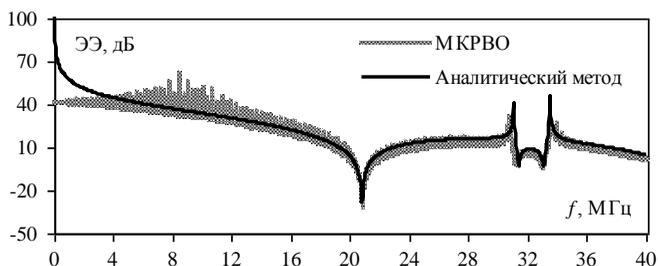


Рис. 2. Частотные зависимости ЭЭ двухсекционного корпуса, вычисленные аналитическим методом и по МКРВО

Далее оценивалась ЭЭ корпуса из трех секций, показанного на рис. 3, *а*. Как и ранее, все апертуры были 3×3 мм². При этом секция 1 имела размеры $20 \times 4 \times 20$ мм³, а секции 2 и 3 были одинаковыми (по $10 \times 4 \times 10$ мм³). Точка наблюдения *P* располагалась в центре секции 1. Эквивалентная схема этого корпуса для аналитической оценки ЭЭ показана на рис. 3, *б*. Для учета секций 2 и 3 к ней добавлены два короткозамкнутых волновода и два импеданса Z_{ap2} и Z_{ap3} . Частотные зависимости ЭЭ, вычисленные аналитическим методом и по МКРВО, приведены на рис. 4

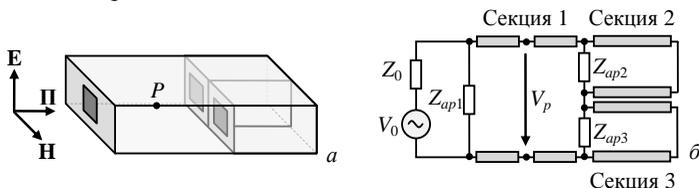


Рис. 3. Трехсекционный корпус (*а*) и его эквивалентная схема (*б*)

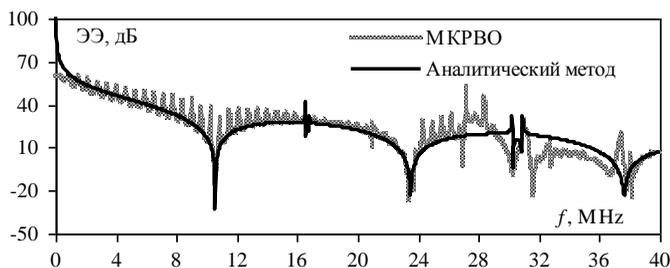


Рис. 4. Частотные зависимости ЭЭ трехсекционного корпуса, вычисленные аналитическим методом и по МКРВО

Из рис. 4 видно, что результаты аналитических расчетов и электродинамического моделирования хорошо совпадают. Наибольшие расхождения в ЭЭ наблюдаются до 2 ГГц и в диапазоне от 30 до 37 ГГц. Однако среднее отклонение составляет всего 5,6 дБ. Таким образом, полученные результаты доказывают, что аналитический метод на основе эквивалентных схем можно использовать для оценки ЭЭ многосекционных экранов с приемлемой точностью.

Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда 23-79-10165, <https://rscf.ru/project/23-79-10165/>.

ЛИТЕРАТУРА

1. Electromagnetic shielding: theory and applications / S. Celozzi, R. Araneo, P. Burghignoli, G. Lovat. – 2nd ed. – Hoboken, NJ, USA: Wiley-IEEE Press, 2022.

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-