

Полоса пропускания схемы для общей моды равна 4,4 кГц, частота среза $f_{cp} = 4,4$ кГц, максимальное затухание 40 дБ/дек. В схеме для дифференциальной моды полоса пропускания 8,2 кГц, $f_{cp} = 8,2$ кГц, максимальное затухание составляет 40 дБ/дек.

РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКРАНИРОВАНИЯ КОРПУСОМ С АПЕРТУРОЙ

А.А. Иванов, магистрант

Научный руководитель М.Е. Комнатнов, к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, каф. ТУ, anton.ivvv@gmail.com

Экранирование металлическим корпусом широко используется как конструкторское средство обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронной аппаратуры (РЭА). На ранних этапах проектирования РЭА целесообразно вычисление значения эффективности экранирования (ЭЭ) с помощью аналитических методов [1, 2]. Существенное влияние на ЭЭ корпусом оказывают апертуры, находящиеся в его стенках, что требует введения выражений, учитывающих расположение и геометрические параметры апертуры, в алгоритм расчета. Так, в работе [3] апертура во фронтальной стенке корпуса рассматривается как щелевая линия передачи (ЛП). Влияние апертуры учитывается путем введения импеданса фронтальной стенки Z_{ap} , полученного как произведение сопротивления двух короткозамкнутых отрезков ЛП и корректирующего коэффициента l/a , полученного геометрически и вводимого для согласования между корпусом и апертурой:

$$Z_{ap} = \frac{1}{2} \frac{l}{a} jZ_0 \operatorname{tg} \frac{k_0 l}{2}.$$

При этом положение апертуры оказывается ограничено центром фронтальной стенки корпуса. В работе [4] аналогичный подход расширен для обеспечения возможности смещения апертуры из центра фронтальной стенки, путем введения коэффициента связи C_m , полученного из электродинамического описания поля в корпусе и апертуре. В работе [5] предложен альтернативный подход представления фронтальной стенки корпуса с апертурой в качестве комбинации несимметричных емкостной и индуктивной диафрагм (рис. 1). Сопротивление стенки с апертурой может быть найдено как

$$Z_{ap} = \frac{1}{Y_C + Y_L + Y_1 + Y_2}, \quad (1)$$

где Y_C и Y_L – проводимости емкостной и индуктивной диафрагм; Y_1 и Y_2 – проводимости, соответствующие изменению площади поперечного сечения фронтальной стенки корпуса с полным раскрытием путем

помещения вертикальных и горизонтальных диафрагм при условии отсутствия их наложения. Существенным преимуществом данного метода является отсутствие необходимости численного интегрирования для расчета Z_{ap} при сохранении возможности смещения апертуры, расположенной на фронтальной стенке корпуса, из центрального положения.

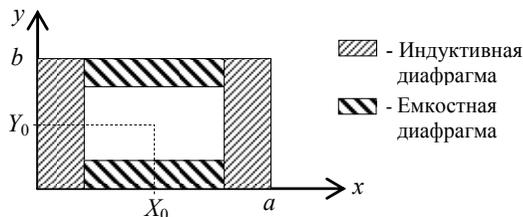


Рис. 1. Модель апертуры корпуса в виде комбинации волноводных диафрагм

Цель данной работы – реализация метода оценки ЭЭ корпусом с апертурой, использующего комбинацию емкостной и индуктивной диафрагм.

В ходе работы выполнены тригонометрические преобразования аналитических формул из [5] для вычисления проводимостей Y_C и Y_L , при условии режима распространения электромагнитной волны (ЭМВ) основного типа TE_{10} :

$$Y_C = j \frac{b}{\mu_0 \cdot f} \left(4 \cdot f^2 - \frac{1}{l^2} \right) \ln \left[\frac{1}{\sin(\pi Y_0/b) \cdot \sin(\pi w/2b)} \right], \quad (2)$$

$$Y_L = -j \frac{1}{a \cdot \mu_0 \cdot f} \left[\frac{1}{\sin^2(\pi X_0/a) \cdot \sin^2(\pi l/2a)} - 1 \right]. \quad (3)$$

Далее произведена оценка ЭЭ на примере корпуса с геометрическими размерами $a = d = 300$ мм, $b = 120$ мм и квадратной апертурой $w = l = 80$ мм расположенной в центре фронтальной стенки (рис. 2).

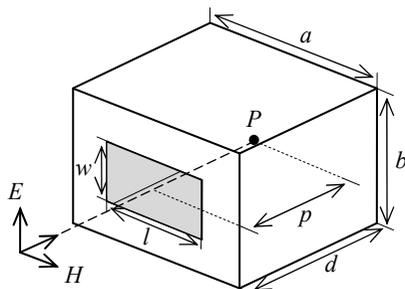


Рис. 2. Модель корпуса с апертурой при падении с ее стороны плоской ЭМВ

Толщина стенок корпуса $t = 1$ мм. Положение точки наблюдения P – в центре корпуса ($p = 150$ мм). Диапазоны частот источника излучения: от 1 МГц до 100 МГц и от 1 МГц до 1 ГГц, при условии распространения ЭМВ основного типа TE_{10} .

Также для выбранного корпуса выполнен расчет частотных зависимостей ЭЭ: при помощи модуля SE_Box системы TALGAT, использующей метод [3], аналитическим методом [4] и численным методом (электродинамическое моделирование). При аналитических расчетах потери в стенках корпуса не учитывались.

На рис. 3–4 приведены полученные зависимости.

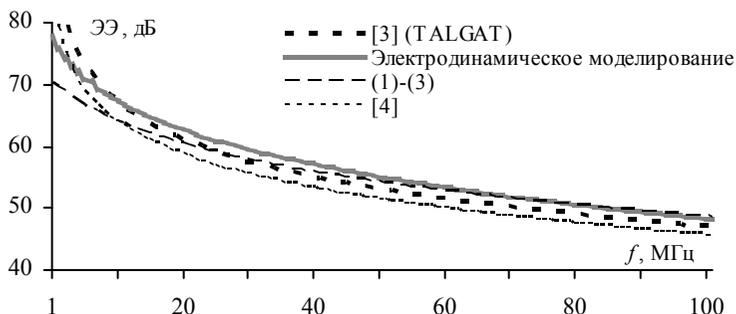


Рис. 3. Частотные зависимости ЭЭ корпусом в диапазоне 1–100 МГц

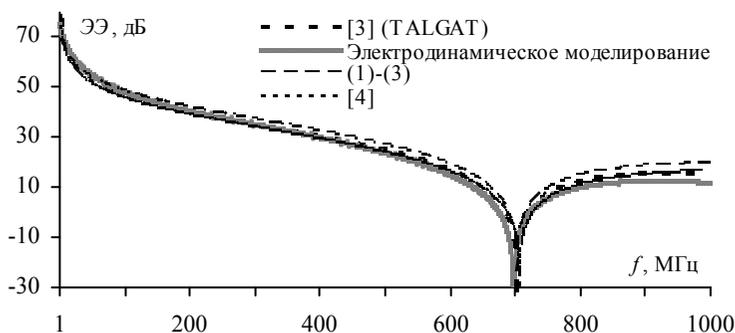


Рис. 4. Частотные зависимости ЭЭ корпусом в диапазоне 1–1000 МГц

Видно, что они согласуются между собой, а максимальное расхождение составляет не более 10 дБ, что объясняется отличием методов оценки влияния апертуры в рассмотренных методах, отсутствием учета толщины стенок корпуса в реализованном методе (1)–(3), а также влиянием проводящих свойств материала при электродинамиче-

ском моделировании. Средняя величина абсолютной погрешности характеристик, рассчитанных аналитическими методами, относительно численного составила для метода [3] – 1,7 дБ; [4] – 1,9 дБ; (1)–(3) – 3,2 дБ.

Рассчитанные погрешности демонстрируют меньшую точность метода (1)–(3) для рассмотренного в работе примера. Время вычисления ряда значений ЭЭ (1000 точек) в соответствии с (1)–(3) составляет 0,46 с, а методом [4], также позволяющим смещать апертуру, – 1,37 с (ПК Intel Core i5, 8 Гб ОЗУ). Таким образом, реализованный метод оценки ЭЭ требует меньшего объема вычислительных затрат, а отсутствие необходимости численного интегрирования упрощает его программную реализацию.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по проекту RFMEFI57417 X0172.

ЛИТЕРАТУРА

1. Комнатнов М.Е. Оценка эффективности экранирования корпуса соединителя бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата / М.Е. Комнатнов, Т.Р. Газизов // Авиакосмическое приборостроение. – 2013. – №4. – С. 37–42.
2. Комнатнов М.Е. Эффективность экранирования унифицированных электронных модулей / М.Е. Комнатнов, Т.Р. Газизов, А.С. Дементьев // Известия вузов. Физика. – 2012. – Т. 55, № 7/2. – С. 89–92.
3. Robinson M.P., Benson T.M., Christopoulos C. Analytical formulation for the shielding effectiveness of enclosures with apertures // IEEE Trans. Electromagn. Compat. Aug. – 1998. – Vol. 40, No. 3. – P. 240–248.
4. Shi D., Shen Y., Gao Y. 3 high-order mode transmission line model of enclosure with off-center aperture // IEEE Int. Symp. Electromagn. Compat. – 2007. – P. 361–364.
5. Nie B.L., Du P.A. An efficient and reliable circuit model for the shielding effectiveness prediction of an enclosure with an aperture // IEEE Trans. Electromagn. Compat. June – 2015. – Vol. 57, No. 3 – P. 357–364.

РЕЗУЛЬТАТЫ АПРОБАЦИИ МОДАЛЬНЫХ ФИЛЬТРОВ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА МЧС РОССИИ

*Д.С. Смирнова, магистрант; О.С. Каймонов, аспирант
Научный руководитель О.С. Каймонов, ассистент каф. ТУ.
г. Томск, ТУСУР, каф. ТУ, d.s_smirnova@mail.ru*

С развитием и широким распространением автоматизированных систем управления (АСУ) различного назначения возникла необходи-