

А. Секенова, А.А. Иванов

Моделирование эффективности экранирования многослойных экранов на основе металлов и полимерных композитных материалов

Выполнены программная реализация и тестирование аналитических математических моделей для вычисления эффективности экранирования (ЭЭ) экранов из металлов и полимерных композитных материалов. В диапазоне частот 0–5 ГГц вычислены частотные зависимости ЭЭ многослойных электромагнитных экранов из тонких пленок меди и алюминия, нанесенных на основания из ферритового композита и стеклотекстолита. Показано, что изменение материала основания экрана со стеклотекстолита на композит позволяет увеличить его ЭЭ на 32 дБ.

Ключевые слова: эффективность экранирования, многослойный экран, металлы, композитные материалы.

Электромагнитное экранирование широко применяется для защиты радиоэлектронных средств (РЭС) от воздействия излучаемых электромагнитных помех. Как правило, проектирование электромагнитных экранов сводится к оценке их эффективности экранирования (ЭЭ) [1]. При этом на ранних стадиях проектирования РЭС для получения ЭЭ наиболее целесообразно использовать аналитические модели, поскольку они требуют минимальных вычислительных затрат [2].

В последние годы металлы и их сплавы, традиционно используемые для изготовления экранирующих конструкций РЭС, заменяются на полимерные композитные материалы, обладающие значительно меньшим весом, но менее высокой ЭЭ. Одним из возможных вариантов преодоления этих недостатков является создание многослойных электромагнитных экранов на основе различных сочетаний композитов и металлов. Цель данной работы – выполнить оценку ЭЭ таких экранов.

Выбор аналитической модели

Большая часть существующих аналитических моделей предназначена для вычислений ЭЭ плоских экранов, выполненных либо из металлов, либо из композитов [3–9]. Однако известны модели, которые могут быть объединены и использованы для оценки ЭЭ многослойного экрана, состоящего одновременно из металлов и композитов [10, 11].

Согласно [10, 11], плоский однородный экран толщиной t при воздействии на него плоской электромагнитной волны (ПЭМВ) может быть представлен в виде отрезка двухпроводной линии передачи (ЛП) длиной t , характеризующейся волновым сопротивлением Z и продольным волновым числом γ . При этом, исходя из эквивалентности телеграфных уравнений и уравнений Максвелла для гармонических колебаний, для вычисления ЭЭ в [10, 11] используются токи и напряжения в ЛП. Если экран состоит из n слоев, то он заменяется каскадным соединением n отрезков ЛП (рис. 1). В этом случае для расчета токов и напряжений используется A -форма записи параметров четырехполюсников.

Для набора из n отрезков ЛП матрица A -параметров определяется как [10, 11]

$$[A] = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} = \prod_{i=1}^n \begin{bmatrix} \cosh \gamma_i t_i & \sinh \gamma_i t_i \\ \frac{\sinh \gamma_i t_i}{Z_i} & \cosh \gamma_i t_i \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Если n -й слой экрана выполнен из металла или сплава, то Z и γ могут быть вычислены как [10]

$$Z = \sqrt{\frac{j\omega\mu_0\mu_r}{\sigma + j\omega\epsilon_0\epsilon_r}}, \quad (2)$$

$$\gamma = \sqrt{j\omega\mu_0\mu_r(\sigma + j\omega\epsilon_0\epsilon_r)}, \quad (3)$$

где μ_0 и ϵ_0 – магнитная и электрическая постоянные, ω – частота источника ПЭМВ, μ_r и ϵ_r – относительные магнитная и диэлектрическая проницаемости материала, σ – удельная проводимость материала.

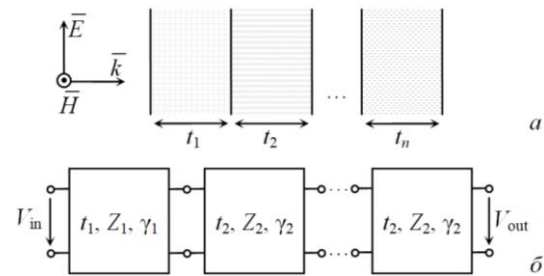


Рис. 1. Многослойный экран (а) и его эквивалентная схема для вычисления ЭЭ (б)

Для n -го слоя экрана, выполненного из композитного материала, Z и γ определяются как [11]

$$Z = (1 + j) \sqrt{\frac{\omega\mu_0\mu_r}{\sigma}}, \quad (4)$$

$$\gamma = j \sqrt{\omega\mu_0\mu_r(\sigma + j\omega\epsilon_0\epsilon')}, \quad (5)$$

где ϵ' – реальная часть относительной комплексной диэлектрической проницаемости материала. ЭЭ рассчитывается как коэффициент передачи между входом и выходом эквивалентной схемы экрана из n отрезков ЛП как

$$\text{ЭЭ} = 20 \lg \left| \frac{V_{\text{in}}}{V_{\text{out}}} \right| = 20 \lg \left| \frac{a_{21} Z_0^2 + a_{22} Z_0 + a_{11} Z_0 + a_{12}}{2 Z_0} \right|, \quad (6)$$

где Z_0 – волновое сопротивление свободного пространства, V_{in} , V_{out} – входное и выходное напряжения в эквивалентной схеме.

Тестирование модели

Выполнена программная реализация моделей из [10, 11] в среде GNU Octave. Для тестирования модели из [10] в диапазоне частот от 10 МГц до 1 ГГц вычислена ЭЭ двухслойного экрана из меди ($\sigma = 56,6$ МСм/м, $\mu_r = \epsilon_r = 1$) и стали ($\sigma = 10,3$ МСм/м, $\mu_r = \epsilon_r = 1$) при $t_1 = t_2 = 1$ мм. Сравнивались результаты вычислений с помощью [10] и модели из [12]. Полученные частотные зависимости ЭЭ приведены на рис. 2. Видно, что они согласуются, а отличие не превышает 3%.

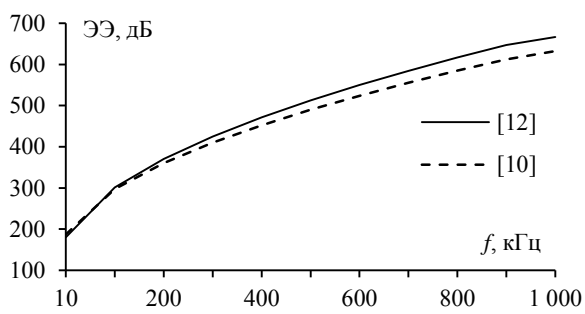


Рис. 2. Частотные зависимости ЭЭ двухслойного экрана из стали и меди

Выполнено тестирование реализованной модели из [11]. Для этого в диапазоне частот 0–5 ГГц вычислены частотные зависимости ЭЭ для двухслойного экрана из полимерных композитов с $t_1 = t_2 = 2$ мм, $\mu_{r1} = 20$, $\epsilon_{r1} = 1$, $\mu_{r2} = 1$ и $\epsilon_{r2} = 20$. При тестировании сравнивались результаты, полученные реализованной моделью и с помощью численного метода конечных разностей во временной области (МКРВО). При вычислениях по МКРВО использовалась электродинамическая модель коаксиальной камеры с конструкцией из рис. 3, соответствующей стандартам ASTM ES7 и ASTM B4935. Вычисленные частотные зависимости ЭЭ представлены на рис. 4. Видно, что они хорошо согласуются, при этом отличие не превышает 0,2 дБ.

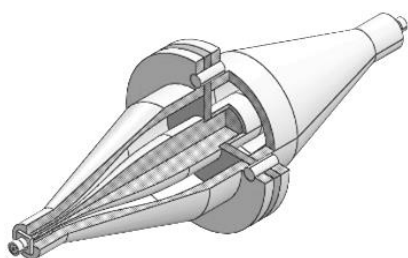


Рис. 3. Электродинамическая модель коаксиальной камеры для измерения ЭЭ композитных материалов

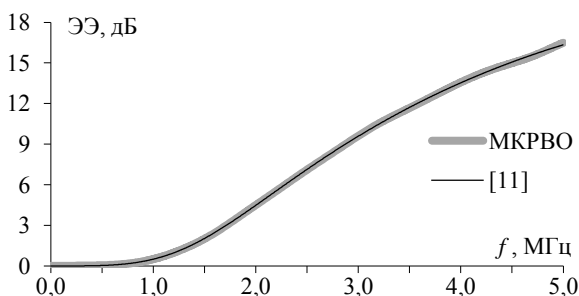


Рис. 4. Частотные зависимости ЭЭ двухслойного композитного экрана

Полученные результаты подтверждают, что модели из [10, 11] являются корректными и пригодны для оценки ЭЭ многослойных электромагнитных экранов с приемлемой точностью.

Вычисление ЭЭ многослойных экранов

Объединив модели из [9, 10], в диапазоне частот 0–5 ГГц выполнено моделирование ЭЭ многослойных экранов из тонких металлических пленок (18 мкм), нанесенных на композитные основания. В качестве материалов для пленок использовались медь (М) и алюминий (А) с $\sigma = 37$ МСм/м, $\mu_r = \epsilon_r = 1$. Для оснований использовались листы толщиной 1 мм, выполненные из стеклотекстолита (С) с $\epsilon_r = 4,3 + 0,086j$ и $\mu_r = 1$ и полимерного композита (К) с ферритовыми частицами с $\epsilon_r = 9,1 + 0,4j$ и $\mu_r = 0,8 + 0,9j$. Вычисленные частотные зависимости ЭЭ для различных сочетаний материалов представлены на рис. 5.

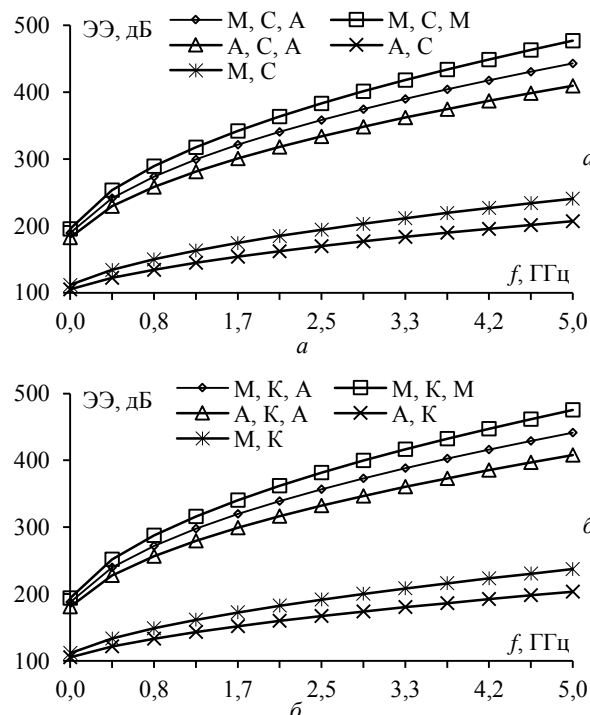


Рис. 5. Частотные зависимости ЭЭ многослойных экранов из тонких пленок меди и алюминия, нанесенных на основания из стеклотекстолита (а) и полимерного композита (б)

Из рис. 6 видно, что ЭЭ увеличивается с ростом частоты для всех рассмотренных экранов.

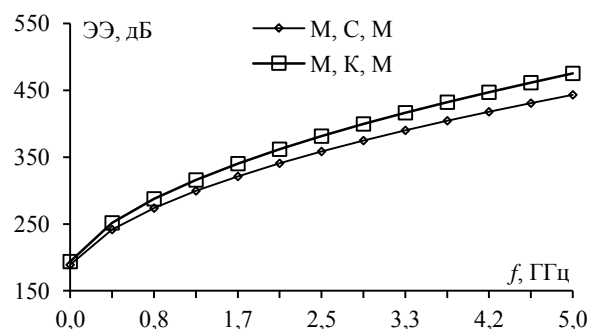


Рис. 6. Сравнение частотных зависимостей ЭЭ многослойных экранов с разными материалами основания

При этом наилучшую ЭЭ (свыше 440 дБ на частоте 500 МГц) имеют экраны с конструкциями М, К, М и М, С, М. Для наглядности на рис. 6 приведено сравнение частотных зависимостей ЭЭ этих конструкций. Видно, что изменение материала основания экрана со стеклотекстолита на композит позволяет увеличить ЭЭ многослойного экрана на 32 дБ.

Заключение

Выполнены программная реализация и тестирование аналитических математических моделей для оценки ЭЭ электромагнитных экранов из металлов и композитных материалов. Вычислены частотные зависимости ЭЭ многослойных экранов из тонких алюминиевых и медных пленок, нанесенных на основания из стеклотекстолита и полимерного композита с ферритовыми частицами. Выявлены конструкции экранов, обладающие наибольшей ЭЭ. Показано, что изменение материала основания многослойного экрана со стеклотекстолита на композит позволяет увеличить его ЭЭ на 32 дБ.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-79-10162) в ТУСУРе.

Литература

1. Кечиев Л.Н. Экранирование радиоэлектронной аппаратуры. Инженерное пособие. – М.: Грифон, 2019. – 720 с.
2. Комнатнов М.Е. Анализ эффективности экранирования бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата и создание устройств для испытаний на электромагнитную совместимость: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.07, 05.12.04. – Томск, 2016. – 216 с.
3. A Multi-stage model for the electromagnetic shielding effectiveness prediction of an infinite conductor plane with periodic apertures / B. Wanxin, G. Anqi, T. Li et al. // IEEE Access. – 2019. – Vol. 7. – P. 61896–61903.
4. Park H.H. Low-frequency magnetic shielding analysis of a metal plate without and with a slot / H.H. Park, H.J. Know // Proceeding of IEEE International symposium on electromagnetic compatibility (EMC EUROPE). – Barcelona, Spain, 2–6 Sept. 2019.
5. Measurements and power balance calculations of the shielding effectiveness of partitioned equipment enclosures / A.C. Marvin, S.L. Parker, J.F. Dawson et al. // Proceeding of IEEE International symposium on electromagnetic compatibility. – Barcelona, Spain, 2–6 Sept. 2019. – P. 158–162.

6. Shielding effectiveness assessment of a coaxial cable design with a combination of numerical and analytical solutions / P. Clement, P.V. Tan, X. Pascal et al. // Proceeding of IEEE International symposium on electromagnetic compatibility. – Barcelona, Spain, 2–6 Sept. 2019. – P. 1061–1065.

7. Harberts D.W. LF scattering of a cylindrical shield in an alternating magnetic field / D.W. Harberts, P. Geran, M. van Helvoort // Proceeding of IEEE International symposium on electromagnetic compatibility. – Barcelona, Spain, 2–6 Sept. 2019. – P. 456–461.

8. Shielding characterization of metallic enclosures with multiple slots and a thin-wire antenna loaded: multiple oblique EMP incidences with arbitrary polarizations / Q.F. Liu, W.Y. Yin, M.F. Xue et al. // Proceeding of IEEE International symposium on electromagnetic compatibility. – Barcelona, Spain, 2–6 Sept. 2019. – P. 284–292.

9. Modified Shielding Effectiveness Equation for Novel Multilayered Waveguide-Below-Cutoff Array / Hwang Jung-hwan, Park Hyun-ho, Kwak Sang-il et al. // Proceeding of IEEE International symposium on electromagnetic compatibility and Asia-Pacific symposium on electromagnetic compatibility. – Singapore, Singapore, 14–18 May 2018.

10. Dan S. Low thermal-resistance silicon-based substrate for light-emitting diode packaging / S. Dan, G. Yougang, S. Yougang // IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology. – 2015. – Vol. 5, No. 10. – P. 1–6.

11. Analytical model and software for evaluating the shielding materials properties / A.A. Ivanov, A.A. Kvasnikov, I.A. Onishchenko et al. // Proceeding of IEEE International conference of young professionals on electron devices and materials. – Gorno-Altaysk, Russia, 30 June–4 July 2021. – P. 1–6.

12. Schulz R.B. Shielding theory and practice / R.B. Schulz, V.C. Plantz, D.R. Brush // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 1988. – Vol. 30, No. 3. – P. 187–201.

Секенова Айтгул

Магистрант каф. телевидения и управления (ТУ) ТУСУРа
Эл. почта: aitowaas@mail.ru

Иванов Антон Андреевич

М.н.с. НИЛ «БЭМС РЭС», ассистент каф. ТУ ТУСУРа
Эл. почта: anton.ivvv@gmail.com