

**ПРОГРАММНЫЙ МОДУЛЬ
ДЛЯ АНАЛИТИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ЭКРАНИРОВАНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ СТРУКТУР
ИЗ МЕТАЛЛОВ И КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

С.В. Смирнов, магистрант

*Научный руководитель А.А. Иванов, к.т.н., с.н.с. НИЛ «БЭМС РЭС»
г. Томск, ТУСУР, seroga64-30@yandex.ru*

Разработаны универсальный вычислительный алгоритм и программный модуль для оценки эффективности экранирования (ЭЭ) многослойных экранирующих структур, выполненных из металлов и композитных материалов. Эти алгоритм и модуль основаны на комбинации двух аналитических моделей, отличающихся низкими вычислительными затратами. Приведены результаты тестирования модуля на примере расчета ЭЭ трех структур.

Ключевые слова: эффективность экранирования, композитные материалы, металлы, аналитическая модель, программный модуль.

Для оценки эффективности экранирования (ЭЭ) сложных структур, таких как многослойные экраны, обычно используются численные методы. Они дают точные оценки ЭЭ, но требуют значительных временных и вычислительных ресурсов. В связи с этим, более целесообразным является использование аналитических моделей, которые обладают малой вычислительной сложностью и позволяют быстро оценить ЭЭ. К сожалению, большинство существующих аналитических моделей предназначены для экранов не более чем двумя слоями [1–4]. Однако известны модель D. Shi [5], а также ее модификация [6], позволяющие рассчитывать металлические экраны с произвольным числом слоев и экраны из слоистых радиопоглощающих композитов. Так, целью работы является разработка алгоритма и программного модуля для аналитической оценки ЭЭ плоских экранов.

Разработка алгоритма. Согласно [5, 6], для вычисления ЭЭ структура с n слоями заменяется эквивалентной схемой, состоящей из n четырехполюсников, соединенных каскадно. Значения ЭЭ определяются из коэффициента передачи в эквивалентной схеме, который, в свою очередь, вычисляется на основе ABCD-параметров четырехполюсников. Эти ABCD-параметры находятся из значений постоянной распространения k_i и характеристического импеданса Z_i в каждом i -м слое экрана в зависимости от его толщины t и электрофизических свойств (электропроводности σ , диэлектрической проницаемости ϵ и магнитной проницаемости μ). Причем выбор метода расчета k и Z зависит от того, является ли материал слоя хорошим проводником или

электрическим изолятором. На основе аналитических моделей [5, 6] разработан алгоритм для расчета ЭЭ многослойных структур, выполненных из разных материалов. Блок-схема алгоритма представлена на рис. 1.

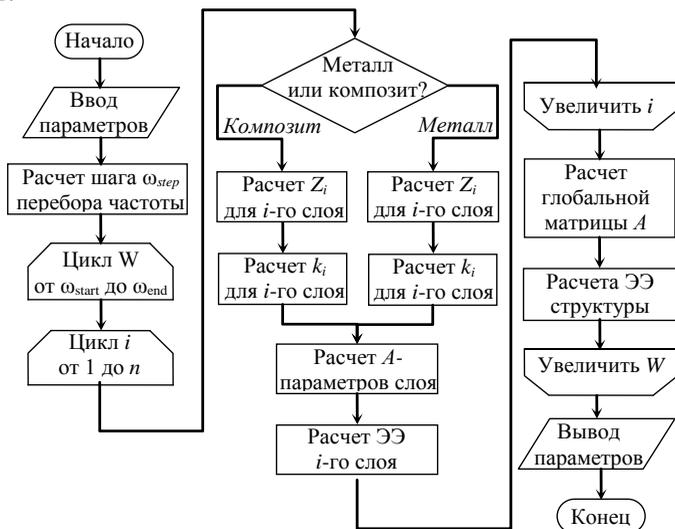


Рис. 1. Блок-схема алгоритма вычисления ЭЭ

Создание программного модуля. На основе алгоритма из рис. 1 создан программный модуль (рис. 2).

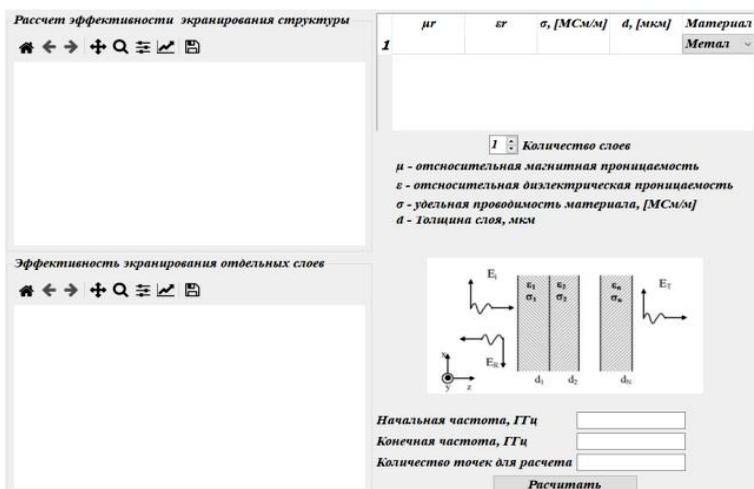


Рис. 2. Графический интерфейс пользователя программного модуля

При разработке использовались язык программирования Python, а также библиотеки: NumPy (для работы с данными); PyQt5 (для создания графического интерфейса пользователя в QtDesigner); Matplotlib (для вывода частотных зависимостей ЭЭ).

Верификация. Для верификации программного модуля и алгоритма выполнено сравнение результатов (рис. 3), полученных с его помощью, с эталонными (из [6] и вычисленными в TALGAT). Вычисления выполнены для четырех однослойных структур. Структуры 1 и 2 имели толщину 1 мм и были выполнены из меди и алюминия, а ЭЭ определялось в диапазоне частот от 10 кГц до 1 МГц. Структуры 3 и 4 имели толщины 1 и 2 мм соответственно. При этом они были выполнены из одного и того же композитного материала с $\epsilon_r = 9,1 + 0,4j$ и $\mu_r = 0,7 + 1j$. Вычисления ЭЭ для этих структур выполнялись в диапазоне частот 0–12 ГГц.

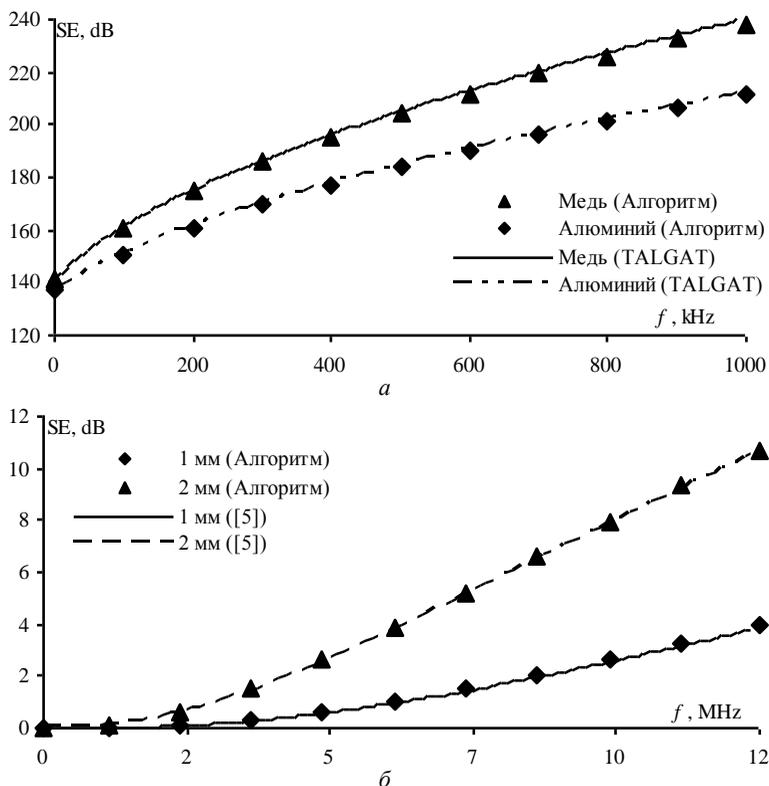


Рис. 3. Частотные зависимости ЭЭ однослойных структур из металлов (а) и композитного материала (б)

Из рис. 3 видно, что результаты расчетов в разработанном модуле хорошо согласуются с [6] и системой TALGAT. Таким образом, разработанные алгоритм и программный модуль могут использоваться для оценки ЭЭ с приемлемой точностью.

Заключение. Разработаны алгоритм и программный модуль для аналитической оценки ЭЭ плоских экранов. Приведены результаты его тестирования.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-10165, <https://rscf.ru/project/23-79-10165/>.

ЛИТЕРАТУРА

1. Rudd M. Determining high-frequency conductivity based on shielding effectiveness measurement using rectangular waveguides / M. Rudd, T.C. Baum, K. Ghorbani // IEEE Trans. Instrum. Meas. – Jan. 2020. – Vol. 69, No. 1. – P. 155–162.

2. Xia X. et al. Modeling for the electromagnetic properties and EMI shielding of Cf/mullite composites in the gigahertz range // J. Eur. Ceram. Soc., – Aug. 2020. – Vol. 40, No. 9. – P. 3423–3430,

3. Kizilcay A.O. Equivalent analytical model of plain weave composite fabric for electromagnetic shielding applications / A.O. Kizilcay, Y. Akinay, J. Microw // Power Electromagn. Energy. – Jul. 2020. – Vol. 54, No. 3. – P. 245–253.

4. Schulz B. Shielding theory and practice / B. Schulz, V.C. Plantz, D.R. Brush // IEEE Trans. Electromgn. Compat. – Aug. 1988. – Vol. 30, No. 3. – P. 187–201.

5. Shi D. Determination of shielding effectiveness of multilayer shield by making use of transmission line theory / D. Shi, Y. Gao, Y. Shen // in Proc. Int. Symp. Electromagn. Compat. and Electomagn. Ecolg. – Saint-Petersburg, 2007. – P. 95–97.

6. Ivanov A.A. et al. Analytical model and software for evaluating the shielding materials properties // Proc. 2021 IEEE 22nd Int. Conf. Young Pro. Elect. Dev. Mater., Souzga, the Altai Republic, Russia. – 2021. – P. 189–192.

7. TALGAT (2020) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://talgat.org/talgat-software/>.

УДК 621.372

АЛГОРИТМ АВТОМАТИЧЕСКОГО ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОЙ СЕГМЕНТАЦИИ ДУГИ КАК ПАРАМЕТРА МОДЕЛИРОВАНИЯ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ

П.П. Снетков, студент каф. ТУ;

И.Е. Сагиева, к.т.н., доцент каф. ТУ, м.н.с. НИЛ «БЭМС РЭС»

г. Томск, ТУСУР, indira_sagieva@mail.ru

Впервые представлен алгоритм автоматического выбора оптимальной сегментации дуги как параметр моделирования линии переда-