

**ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ГИБРИДНОГО МЕТОДА
РАСЧЁТА ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКРАНИРОВАНИЯ
НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО
МЕТОДА УЗЛОВЫХ ПОТЕНЦИАЛОВ**

*С. Канте, аспирант; А.А. Иванов, доцент каф. ТУ, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, каф. ТУ, salif.kante.pro@gmail.com*

Представлена программная архитектура специализированного приложения для расчёта эффективности экранирования металлических корпусов. Приложение основано на гибридном полуаналитическом методе, сочетающем метод эквивалентных схем и модифицированный метод узловых потенциалов. Описаны трёхуровневая структура, модуль расчётных моделей и принцип формирования матричного уравнения эквивалентной схемы корпуса. Представлены два режима работы и результаты верификации приложения.

Ключевые слова: эффективность экранирования, метод эквивалентных схем, модифицированный метод узловых потенциалов, программная архитектура, электромагнитная совместимость.

Для обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) радиоэлектронных средств необходима точная оценка эффективности экранирования (ЭЭ) их корпусов. Такие численные методы, как метод конечных разностей во временной области (МКРВО) и метод конечных элементов (МКЭ), дают высокую точность, но требуют значительных вычислительных ресурсов и не позволяют проводить быстрый анализ на ранних стадиях проектирования [1, 2]. В работе [3] предложены гибридный полуаналитический метод на основе метода эквивалентных схем (МЭС) и модифицированный метод узловых потенциалов (ММУП) [4]. Он сочетает аналитическую эффективность с анализом сложных многосекционных конструкций без ручных алгебраических выкладок. Цель данной работы – представить результаты программной реализации данного метода.

Приложение реализовано на языке программирования C++ с применением фреймворка Qt 6 и библиотеки Eigen 3 [5]. Трёхуровневая архитектура включает модуль расчётных моделей, решатель ММУП и графический интерфейс (рис. 1). Расчётные модели независимы от алгоритма решения системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), что обеспечивает расширяемость системы.

Метод основан на пространственной декомпозиции: экран разбивается на четыре подобласти (источник возбуждения, стенка с апертурой, волновод до точки наблюдения и волновод после неё), каждая из которых заменяется эквивалентной цепью.

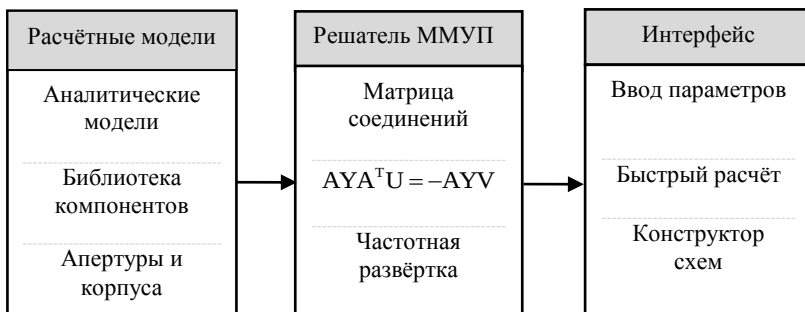


Рис. 1. Трёхуровневая архитектура приложения

Библиотека компонентов включает шесть элементов: источник возбуждения, прямоугольную апертуру, апертуру со съёмной крыш-кой-резонатором, волновод с воздушным заполнением, волновод с диэлектрическим заполнением (постоянная распространения которого определяется через эффективную проницаемость по теории эффективных сред) и импеданс нагрузки в точке наблюдения. Аналитические выражения для проводимости апертуры и параметров волновода взяты из [3, 6].

Решатель автоматически формирует матрицу соединений и матрицу проводимостей ветвей, а после решает систему уравнений ММУП. Преимущество ММУП перед обычными преобразованиями схемы заключается в масштабируемости: потенциалы во всех узлах, а значит, и значения ЭЭ во всех точках наблюдения находятся за одно решение вне зависимости от сложности экранирующей конструкции. Матрица соединений строится однократно, а матрица проводимостей пересчитывается на каждом шаге частотной развёртки, которая выполняется из n точек за n решений системы.

Разработанная программа предоставляет два режима работы (рис. 2). В первом пользователь задаёт параметры корпуса (a , b , d , t , размеры апертур, положение точки наблюдения p) и диапазон частот, а схема и матрицы ММУП формируются автоматически. Второй режим представляет собой визуальный редактор, где пользователь самостоятельно собирает эквивалентную схему, а граничное условие задней стенки добавляется автоматически. Оба режима выводят частотную зависимость ЭЭ и поддерживают экспорт в CSV-формат.

Выполнено сравнение значений ЭЭ, полученных в программе, с результатами, полученными на основе МКЭ, для двух малогабаритных прямоугольных экранов с размерами $10 \times 4 \times 10$ и $15 \times 4 \times 15$ мм, апертурой 1×3 мм и толщиной стенки $t = 1$ мм.

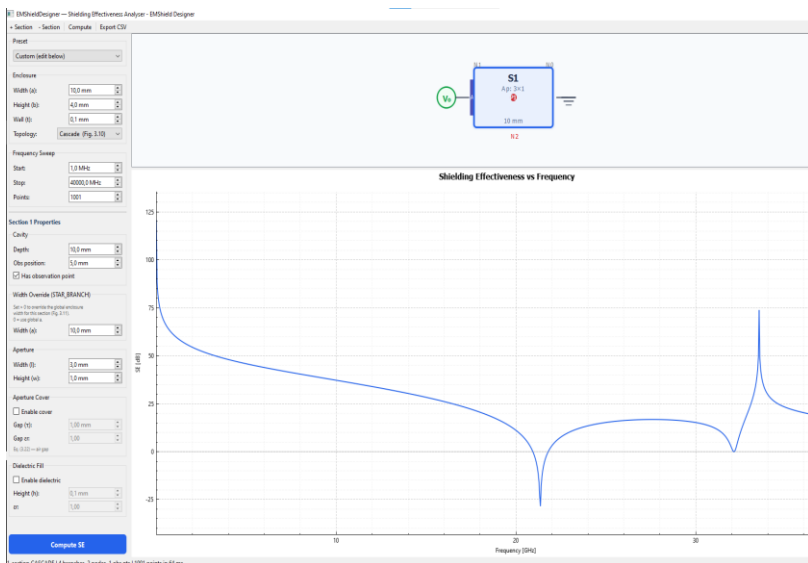


Рис. 2. Интерфейс программы EMShieldDesigner: режим «Быстрый расчёт»

При расчётах по МКЭ использовались сетки с размером ячеек не менее $\lambda/20$. Расчёты выполнялись в диапазоне частот от 1 МГц до 40 ГГц. Результаты для экрана $10 \times 4 \times 10$ мм, полученные в режиме «Быстрый расчёт», приведены на рис. 3, результаты для экрана $15 \times 4 \times 15$ мм, полученные в режиме «Конструктор схем», – на рис. 4. Результаты показали хорошую согласованность с референсными данными во всём диапазоне частот.

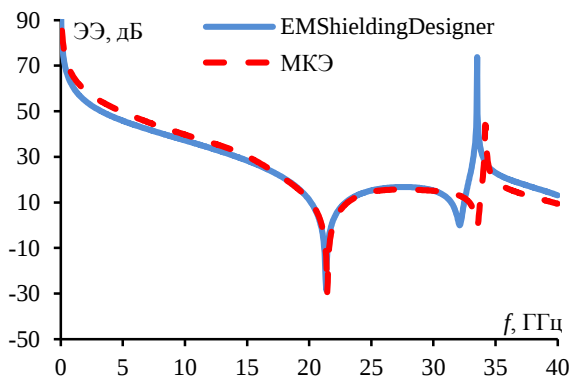


Рис. 3. Частотные зависимости ЭЭ, полученные в EMShieldDesigner и по МКЭ (экран $10 \times 4 \times 10$ мм)

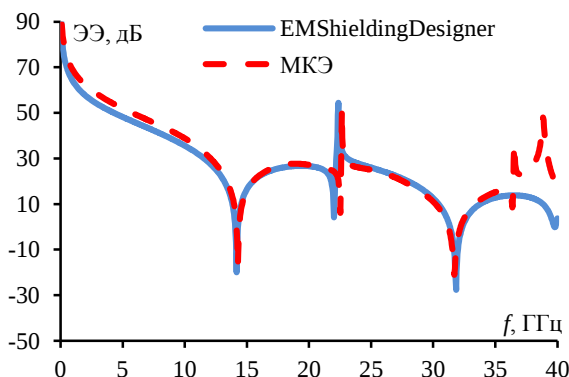


Рис. 4. Частотные зависимости ЭЭ, полученные в EMShieldingDesigner и по МКЭ (экран $15 \times 4 \times 15$ мм)

Разработана трёхуровневая программная архитектура специализированного приложения для расчёта ЭЭ экранирующих корпусов. Два режима работы охватывают типовые и нестандартные конфигурации корпусов. Верификация подтвердила корректность реализованного алгоритма. Перспективами являются интеграция в процедуры испытаний на ЭМС и расширение функциональных возможностей программы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ott H.W. Electromagnetic Compatibility Engineering. – Hoboken: Wiley, 2009. – 865 p.
2. Taflove A. Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method / A. Taflove, S.C. Hagness. – 3rd ed. – Norwood: Artech House, 2005. – 1038 p.
3. Generalized Algorithm Based on Equivalent Circuits for Evaluating Shielding Effectiveness of Electronic Equipment Enclosures / A.A. Ivanov, A.A. Kvasnikov, A.V. Demakov, M.E. Komnatnov, S.P. Kuksenko, T.R. Gazizov // Algorithms. – 2023. – Vol. 16, No. 6. – Art. no. 294.
4. Alexander C.K. Fundamentals of Electric Circuits / C.K. Alexander, M.N.O. Sadiku. – 6th ed. – New York: McGraw-Hill Education, 2017. – 976 p.
5. Eigen 3.4.1 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://gitlab.com/libeigen/eigen/-/releases/3.4.1>, свободный (дата обращения: 18.03.2026).
6. Analytical formulation for the shielding effectiveness of enclosures with apertures / M.P. Robinson, T.M. Benson, C. Christopoulos, J.F. Dawson, M.D. Ganley, A.C. Marvin, S.J. Porter, D.W.P. Thomas // IEEE Trans. Electromagn. Compat. – 1998. – Vol. 40, No. 3. – P. 240–248.