

УДК 621.396.677.83

А.А. Иванов, А.А. Квасников, С.П. Куксенко, М.Е. Комнатнов

Прототип программного модуля для оценки эффективности экранирования корпусов радиоэлектронных средств

Оценка эффективности экранирования (ЭЭ) корпусов радиоэлектронных средств (РЭС), в соответствии с требованиями электромагнитной совместимости, необходима на ранней стадии проектирования. Для этого целесообразно применять аналитические методы, которые требуют минимальных вычислительных затрат и позволяют значительно сократить время разработки РЭС. В данной работе, на основе аналитического метода эквивалентной цепи, разработан алгоритм, отличающийся возможностью вычисления и трехмерного отображения ЭЭ в зависимости от частоты источника воздействия и положения точки наблюдения. Представлен прототип программного модуля для быстрой оценки ЭЭ корпусов РЭС. Описаны особенности разработки, а также основные возможности модуля. Выполнено сравнение результатов вычислений ЭЭ четырех различных корпусов, полученных при помощи электродинамического моделирования и разработанного модуля. Показано, что с помощью математических моделей, реализованных в модуле, можно получить приемлемую погрешность вычислений ЭЭ, при этом ускорить их на 5 порядков. Разработанный прототип программного модуля доступен для свободного использования.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, эффективность экранирования, метод эквивалентной цепи, свободное программное обеспечение

Введение

Электромагнитное экранирование является одним из основных конструкторских средств обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) [1]. Так, для уменьшения восприимчивости радиоэлектронных средств (РЭС), чувствительных к воздействию излучаемых электромагнитных помех различной природы, широко применяются металлические экранирующие корпуса. Ослабление подобных воздействий определяется величиной эффективности экранирования (ЭЭ), которая зависит от конструкции корпуса, наличия в его стенках щелей, вентиляционных отверстий и т.п. [2]. По этой причине разработка корпуса для конкретного устройства является сложной задачей, требующей многократного вычисления ЭЭ на ранних этапах разработки РЭС.

При проектировании конструкции корпуса важно предварительно определить положение элементов и узлов РЭС, чувствительных к электромагнитному полю, поскольку поле внутри корпуса не является однородным и изменение положения точки наблюдения или отдельных элементов РЭС приводит к смещению резонансных частот и их амплитуд [3]. Таким образом, на ранних этапах проектирования РЭС необходима оценка ЭЭ в различных точках наблюдения внутри предполагаемого корпуса. Такая оценка может быть выполнена при помощи численных методов, позволяющих получить значения ЭЭ с высокой точностью для сложных форм экранирующих конструкций, однако для их применения требуются дорогостоящие программные продукты, значительные вычислительные ресурсы, а также высококвалифицированные разработчики [4–6]. Альтернативным решением данной проблемы является применение аналитических методов оценки ЭЭ [7]. Они позволяют с минимальными вычислительными затратами оценить ЭЭ простых экранирующих конструкций. Также с их помощью возможно предварительно оценить помехоустойчивость, массу и габариты разрабатываемого устройства, что позволит сократить время его проектирования с учетом требований ЭМС [8]. Таким образом, аналитические методы оценки ЭЭ более предпочтительны для применения на ранних этапах разработки РЭС.

Цель данной работы – разработка и тестирование прототипа программного модуля для системы компьютерного моделирования TALGAT, позволяющего выполнить быструю предварительную оценку ЭЭ корпусов на основе аналитических математических моделей.

Алгоритм вычисления эффективности экранирования

Среди аналитических методов оценки ЭЭ широкое распространение получил метод эквивалентной цепи [9]. На его основе разработан ряд математических моделей (ММ) для цилиндрических [10] и прямоугольных [11–16] корпусов с различным положением, геометрической формой и количеством апертур. Особенности данных ММ, а также сравнение результатов вычисления ЭЭ для некоторых типовых структур подробно рассмотрены в [7].

Согласно методу эквивалентной цепи, корпус с апертурой во фронтальной стенке при падении на нее плоской электромагнитной волны (рис. 1а) представляется эквивалентной схемой (рис. 1б), при этом ЭЭ определяется из напряжений V_p или токов I_p в точке наблюдения P . Разработан алгоритм (рис. 2), позволяющий вычислить ЭЭ по ММ из [9–16].

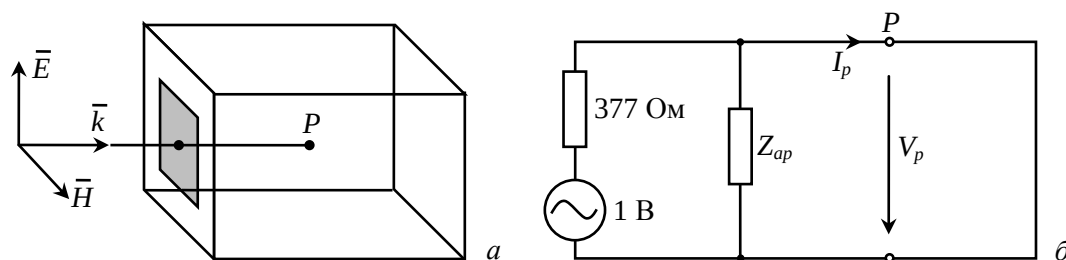


Рис. 1. Корпус с апертурой (а) и его эквивалентная схема (б)

Отличительной особенностью разработанного алгоритма является наличие внешнего цикла P , позволяющего вычислить частотные зависимости ЭЭ в различных точках наблюдения от p_1 до p_k с шагом Δp . Работа алгоритма выполняется следующим образом: в блок «Ввод параметров вычисления» оператором задаются параметры корпуса, апертуры или массива апертур, источника воздействия (диапазона частот, шага Δf , режима возбуждения m, n). Заданные параметры поступают на вход циклов точки P и частоты f . С помощью блока «Выбор ММ» задаются аналитические выражения для дальнейшего вычисления ЭЭ, в частности выполняется выбор способа вычисления сопротивления Z_{ap} фронтальной стенки корпуса с апертурой (рис. 1б). Результаты вычислений поступают на внешний M и вложенный N циклы, необходимые для учета высших типов волн. Внутри цикла N в зависимости от текущего значения дискретных переменных m, n происходит вычисление характеристического импеданса Z_g и постоянной распространения k_g в корпусе, преобразование эквивалентной схемы с помощью теоремы Тевенина и формул для расчета входного сопротивления линии передачи, а также вычисление напряжения V_p в точке наблюдения. Внешний и вложенный циклы могут быть вызваны повторно для учета волн TM_{mn} типов. Полученное напряжение V_Σ используется при вычислении ЭЭ. По завершению циклов f и P зависимости ЭЭ могут быть выведены в необходимой для оператора форме.

Особенности разработки программного модуля

Выбор инструментов разработки обусловлен требованиями к функциональности модуля и конечному виду графического интерфейса пользователя (ГИП). Так, в качестве языка разработки выбран язык C++, отличающийся высокой вычислительной производительностью, а также поддерживающий механизмы эффективного управления памятью и параллельных вычислений на многопроцессорных системах. Использованы возможности среды Qt и библиотек, входящих в ее состав, применение которых позволило разработать адаптивный ГИП. Для создания трехмерных моделей корпусов использованы библиотеки Tree.js и Csg.js (JavaScript), интеграция которых поддерживается платформой Qt.

Обобщенная организация структуры разработанного программного модуля в виде диаграммы пакетов UML представлена на рис. 3. ГИП отвечает за получение данных из модели *DataModel*, а также производит их отображение. *DataModel* является объектной моделью предметной области, в которой хранятся входные параметры для вычислений (размеры корпуса и апертур, характеристики источника воздействия, положение точки наблюдения) и данные для отображения результатов оценки ЭЭ, а также соответствующие методы для работы с ними. Основные вычисления выполняются в

классе *CalculationThread*, реализующем ММ из [9–16] в соответствии с алгоритмом на рис. 2. Расчет ЭЭ производится в отдельном потоке, что позволяет сохранить возможность работы с программным модулем во время выполнения вычислений.

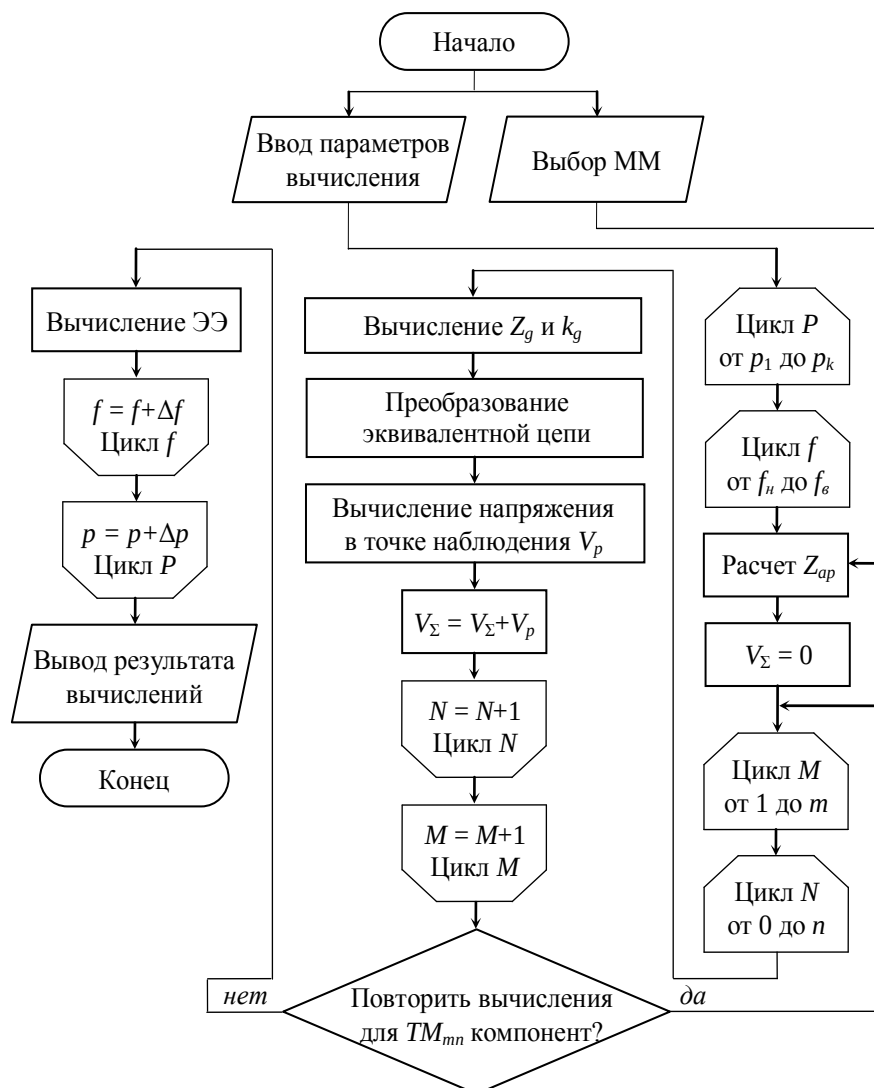


Рис. 2. Блок-схема алгоритма вычисления ЭЭ

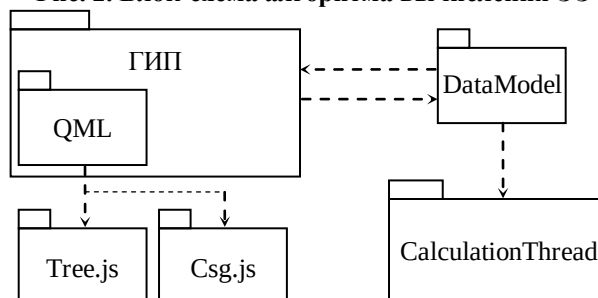


Рис. 3. Обобщенная организация структуры программного модуля в виде диаграммы пакетов UML

Для ускорения вычислений с помощью моделей из [11, 16], требующих численного интегрирования, в программном модуле реализован метод трапеций с применением правила оценки погрешности Рунге [17]. Задано требуемое значение относительной погрешности не более 10^{-3} , что позволило сохранить точность вычисления ЭЭ вплоть до третьего знака после запятой.

Отличительной особенностью разработанного модуля является возможность трехмерного отображения ЭЭ в зависимости от частоты воздействия и положения точки наблюдения внутри корпуса [18, 19]. Данный функционал позволяет выявить и локализовать области, в которых ЭЭ принимает наихудшие значения, а также выполнить комплексную оценку ЭЭ в различных точках наблюдения, что может быть полезно для выбора оптимального расположения элементов РЭС внутри экранирующего корпуса на начальной стадии проектирования. Пример трехмерного отображения ЭЭ корпуса с массивом апертур представлен на рис. 4. При необходимости полученная частотная зависимость может быть представлена в двухмерном виде в требуемой точке наблюдения, а также сохранена в текстовом формате.

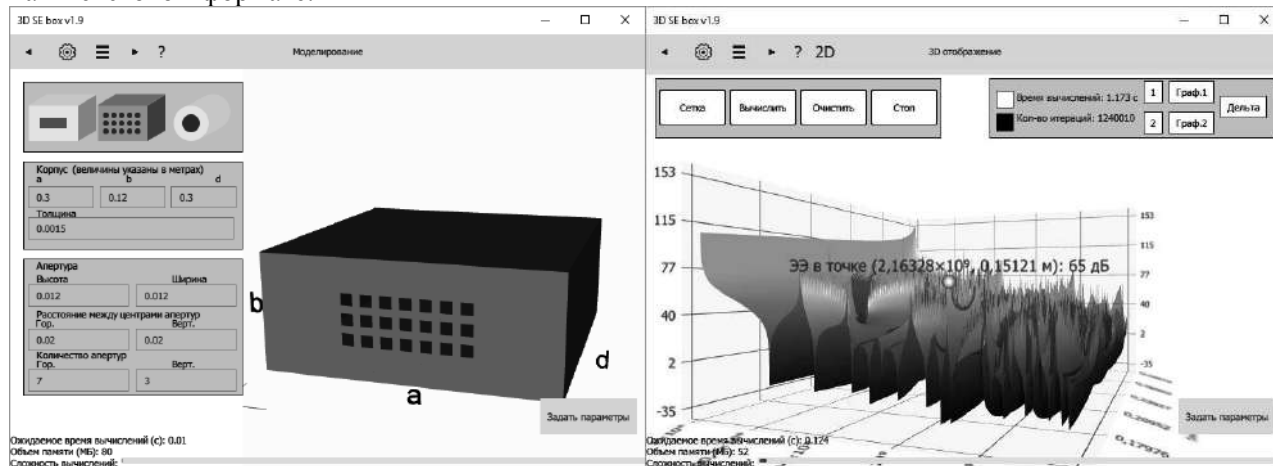


Рис. 4. Результат оценки ЭЭ корпуса с массивом апертур

Реализована возможность загрузки текстовых файлов с расширением .txt для вычисления абсолютной погрешности частотных зависимостей ЭЭ, полученных из внешнего источника и с помощью разработанного программного модуля, а также для оценки ЭЭ прямоугольного корпуса с апертурой с помощью расчетно-экспериментального метода на основе измерения S -параметров [20].

При вводе значений параметров анализируемого корпуса производится предварительная оценка трудоемкости расчетов ЭЭ и объема требуемой памяти. Для оценки трудоемкости применяются системные значения оперативной памяти рабочей станции, что позволяет объективно оценить целесообразность вычислений в условиях ограниченных временных и вычислительных ресурсов.

Тестирование программного модуля

Тестирование модуля выполнено на примере четырех различных экранирующих корпусов: мультимплекса ABB FOX515 [21], блока модальных фильтров для защиты оборудования сети Ethernet 100Base-T от воздействия сверхкоротких импульсов [22], помехозащитного фильтра высоковольтной сети электропитания космического аппарата [23], а также низкочастотного цилиндрического соединителя 2РМДТ [24]. Выбор данных корпусов связан со значительным различием их конструкций, позволяющим наглядно продемонстрировать возможности разработанного модуля.

Корпус мультимплекса ABB FOX515 имеет внутренние размеры $445 \times 270 \times 278$ мм³ и толщину стенок $t = 1,5$ мм (рис. 5а). Верхняя часть съемной фронтальной панели перфорирована массивом 108×15 апертур диаметром $d = 3$ мм. Апертуры расположены в шахматном порядке под углом 30° (рис. 5б). Фронтальная панель имеет угол скоса кромки 45° и притупление кромки (до верхнего ряда апертур) 4 мм. Оценка ЭЭ такого корпуса может быть выполнена с помощью моделей из [13–15]. При этом угол скоса кромки и смещение перфорации относительно центра корпуса не учитываются. Частотные зависимости ЭЭ, вычисленные в центре корпуса с помощью электродинамического моделирования (ЭДМ), а также моделей из [13–15], представлены на рис. 4в.

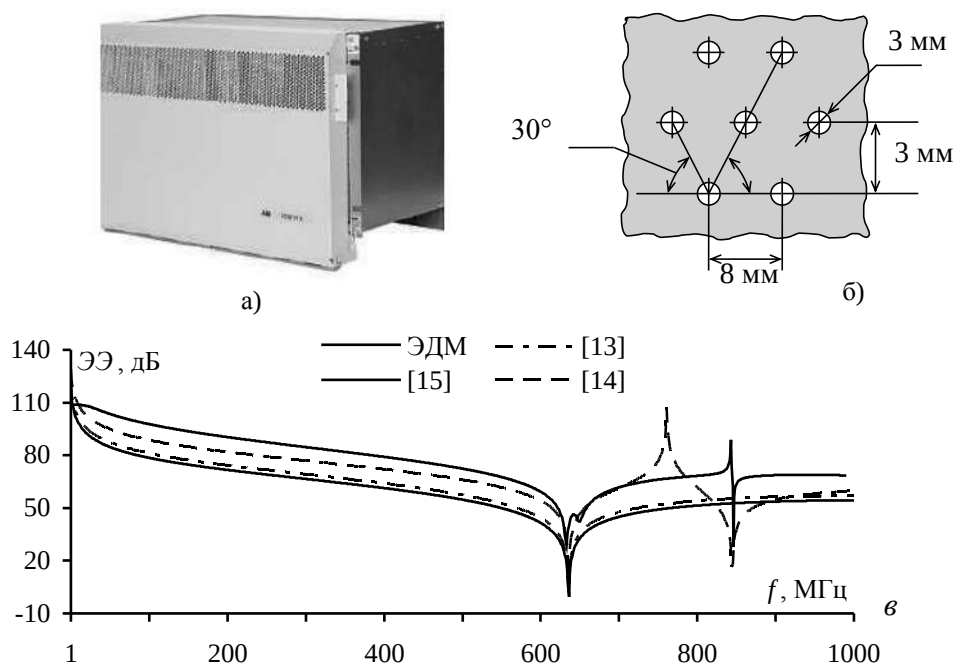


Рис. 5. Внешний вид (а), геометрическая модель перфорации (б) и частотные зависимости ЭЭ (в) корпуса мультиплексора ABB FOX515

Из рис. 5в видно, что поведение частотных зависимостей совпадает вплоть до частоты первого резонанса корпуса (638 МГц). При использовании аналитических моделей из [13, 15] отсутствует резонанс на частоте 845 МГц поскольку в вычислениях не учитываются высшие типы волн TE_{mn} . Среднее значение абсолютной погрешности результатов вычисления ЭЭ по модели из [13] относительно ЭДМ составило $\Delta_{13} = 14,54$ дБ, а по моделям из [14] и [15] – $\Delta_{14} = 8,53$ дБ и $\Delta_{15} = 17,2$ дБ, соответственно.

Корпус модального фильтра [22] имеет геометрические размеры $440 \times 42 \times 197,5$ мм и толщину стенок 1 мм (рис. 6а). На фронтальной панели расположено 12 апертур размером 15×16 мм для соединителей 8P8C. Для оценки ЭЭ корпуса применялись ЭДМ, ММ из [15], а также из [13, 14], исходя из равенства площадей прямоугольных и круглых апертур [25] (рис. 6б). Видно, что поведение зависимостей согласуется, а отличие результатов не превышает 8 дБ для частотных зависимостей, полученных ММ из [13–14], и 23 дБ – из [15].

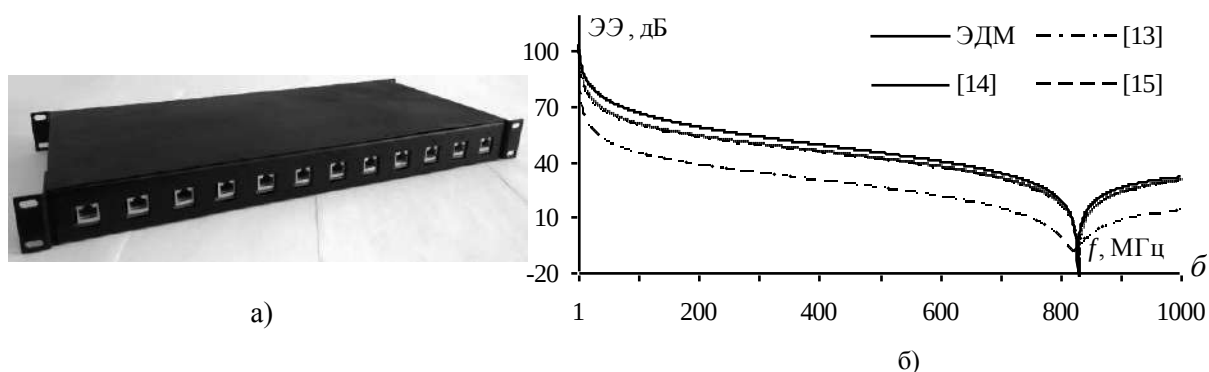


Рис. 6. Корпус фильтра сети Ethernet 100Base-T (а) и его частотные зависимости ЭЭ (б)

Геометрическая модель корпуса помехозащитного фильтра сети электропитания [23] показана на рис. 7а. Корпус имеет внутренние размеры $110 \times 8,5 \times 48$ мм, толщина его стенок составляет 2 мм. Корпус состоит из основания высотой 5,5 мм и съемной верхней крышки. Неоднородность, образованная на стыке крышки и основания, рассматривалась в виде апертуры шириной $w = 50$ мкм. Для вычисления ЭЭ применялись ЭДМ и модели из [11–12] (рис. 7б.). На зависимости, полученной по ММ из [12], резонанс щели (1,4 ГГц) смещается на частоту 700 МГц, что связано со способом вычис-

ления сопротивления Z_{ap} в данной модели, при этом максимальное отличие ЭЭ на данной частоте составляет 35,8 дБ. На зависимости полученной моделью из [11] резонансные частоты щели и корпуса (3,44 ГГц) согласуются с полученными ЭДМ, но на частоте 2,6 ГГц разность значений ЭЭ достигает 36,5 дБ.

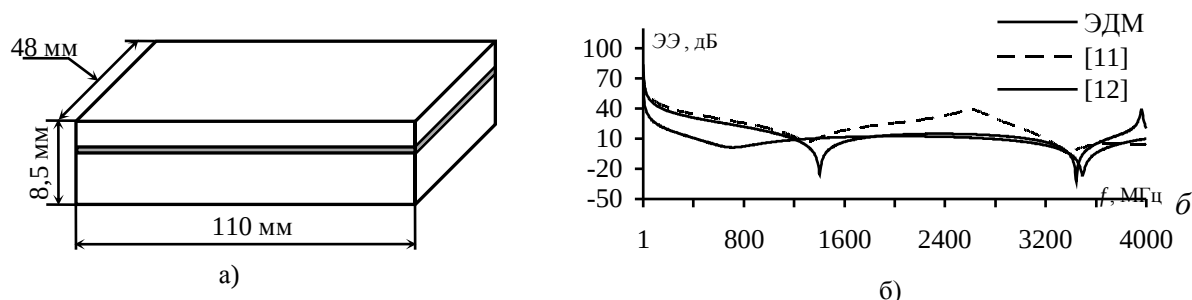


Рис. 7. Геометрическая модель корпуса помехозащитного фильтра высоковольтной сети электропитания космического аппарата (а) и его частотные зависимости ЭЭ (б)

Экранирующий корпус соединителя 2РМДТ [24] с толщиной стенок 2,5 мм имеет длину 64 мм и внутренний диаметр 28 мм. Упрощенная геометрическая модель корпуса для оценки ЭЭ аналитическими методами представлена на рис. 8а. При вычислениях предполагалось, что фронтальная стенка корпуса раскрыта полностью, т.е. размер апертуры совпадает с внутренним диаметром корпуса. На рис. 8б приведены частотные зависимости ЭЭ, полученные с помощью модели из [10] и ЭДМ. Видно, что характер поведения зависимостей идентичен, а отличие результатов составляет не более 8,6 дБ.

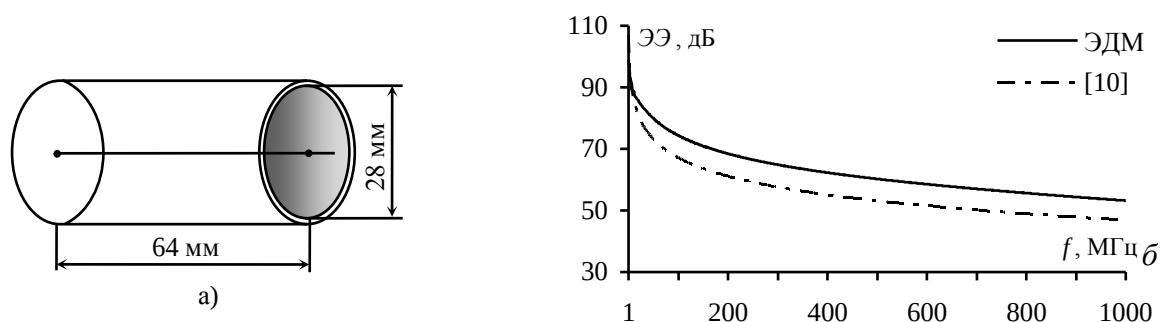


Рис. 8. Геометрическая модель корпуса соединителя 2РМДТ (а) и его частотные зависимости ЭЭ (б)

В табл. 1 представлено сравнение времени вычисления ЭЭ рассмотренных корпусов с помощью ЭДМ и ММ, реализованных в программном модуле. Видно, что вычисленные оценки ЭЭ с помощью ММ требует значительно (на 5 порядков) меньших затрат времени в сравнении с ЭДМ. При этом модели из [10–15] обладают приемлемой точностью, а среднее значение абсолютной погрешности не превышает 19,71 дБ. Таким образом, используя данные модели на ранних этапах проектирования РЭС, можно быстро оценить ЭЭ, что позволит существенно сократить время разработки конечного изделия.

Заключение

Представлен алгоритм для быстрой оценки ЭЭ корпусов РЭС, использующий аналитический метод эквивалентной цепи. На основе алгоритма разработан прототип программного модуля для системы моделирования задач ЭМС TALGAT, отличающийся возможностью вычисления и трехмерного отображения ЭЭ в зависимости от частоты источника воздействия и положения точки наблюдения. На примере четырех различных корпусов показано, что разработанный программный модуль позволяет с приемлемой точностью выполнить оценку ЭЭ и требует на 5 порядков меньших затрат времени, по сравнению с электродинамическим моделированием.

В дальнейшем, в программном модуле планируется создание механизма принятия решений, включающего автоматический выбор ММ в зависимости от входных параметров корпуса, а также расширение функционала для возможности оценки ЭЭ корпуса произвольной конструкции. Также

целесообразны разработка и реализация моделей, позволяющих учитывать заполнение корпуса элементами РЭС (проводящими пластинами, диэлектриком, печатными платами). Разработанный прототип программного модуля в настоящий момент доступен для свободного использования [26].

Таблица 1

Время вычисления ЭЭ рассмотренных корпусов для 1000 частотных точек

Корпус	ММ, с	ЭДМ, с	Абсолютная погрешность Δ , дБ	
			Средняя	Максимальная
Мультиплексор ABB FOX515	[13] – 0,024	2764	14,54	39,2
	[14] – 0,023		8,53	60,3
	[15] – 0,026		17,2	39,7
Фильтр сети Ethernet 100Base-T	[13] – 0,017	2063	4,72	8,08
	[14] – 0,017		2,93	6,53
	[15] – 0,021		19,71	22,02
Защитный фильтр сети электропитания	[11] – 0,012	2943	9,39	36,5
	[12] – 0,007		9,04	35,8
Соединитель 2РМДТ	[10] – 0,011	3267	6,87	8,3

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

Список литературы

1. Кечиев Л.Н. Экранирование технических средств и экранирующие системы / Л.Н. Кечиев, Б.Б. Акбашев, П.В. Степанов. – М.: Группа ИДТ, 2010. – 470 с.
2. Бутин В.И. Количественная оценка энергии высокочастотного излучения, проникающего внутрь корпуса РЭА, в начале резонансного режима экранирования / В.И. Бутин, П.Я. Кундышев // Технологии ЭМС – 2017. – № 2 (61). – С. 3–14.
3. Liu E. An extended analytical formulation for fast prediction of shielding effectiveness of an enclosure at different observation points with an off-axis aperture / E. Liu, P.A. Du, B.L. Nie // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2014. – Vol. 56, № 3. – P. 589–598.
4. Nie B.L. Study of the shielding properties of enclosures with apertures at higher frequencies using the transmission line modeling method / B.L. Nie, P.A. Du, Y.T. Yu et al. // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2011. – Vol. 53, № 1. – P. 73–81.
5. Araneo R. Fast MoM analysis of the shielding effectiveness of rectangular enclosures with apertures, metal plates, and conducting objects / R. Araneo, G. Lovat // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2009. – Vol. 51, № 2. – P. 274–283.
6. Jiao C. Subcell FDTD analysis of shielding effectiveness of a thin-walled enclosure with an aperture / C. Jiao, L. Li, X. Cui et al. // IEEE Transactions on magnetics. – 2006. – Vol. 42, № 4. – P. 1075–1078.
7. Иванов А.А. Обзор аналитических моделей для оценки эффективности экранирования металлических корпусов на основе метода эквивалентной цепи / А.А. Иванов, М.Е. Комнатнов // Системы управления, связи и безопасности. – 2019. – № 2. – С. 110–142. doi: 10.24411/2410-9916-2019-10206.
8. Комнатнов М.Е. Эффективность экранирования унифицированных электронных модулей / М.Е. Комнатнов, Т.Р. Газизов, А.С. Дементьев // Известия вузов. Физика. – 2012. – № 7, Т. 55. – С. 89–92.
9. Robinson M.P. 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. – Vol. 32, № 17. – P. 1559–1560.
10. Wang Y. The analysis of multi-mode cylindrical enclosure shielding effectiveness with apertures / Y. Wang, X. Zhao, J. Chen, X. Sun // 2010 International conference on computer, mechatronics, control and electronic engineering. (Changchun, China, 24–26 August 2010). – Changchun, 2010. – P. 527–530.

11. Shi D. 3 high-order mode transmission line model of enclosure with off-center aperture / D. Shi, Y. Shen, Y. Gao. // IEEE International symposium on electromagnetic compatibility (Qingdao, China, 23–26 October 2007) – Qingdao, 2007. – P. 361–364.
12. Nie B.L. An efficient and reliable circuit model for the shielding effectiveness prediction of an enclosure with an aperture / B.L. Nie, P.A. Du // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2015. – Vol. 57, № 3. – P. 357–364.
13. Dehkhoda P. An efficient and reliable shielding effectiveness evaluation of a rectangular enclosure with numerous apertures / P. Dehkhoda, A. Tavakoli, R. Moini // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2008. – Vol. 50, № 1. – P. 208–212.
14. Nie B.L. An improved circuital method for the prediction of shielding effectiveness of an enclosure with apertures excited by a plane wave / B.L. Nie, P.A. Du, P. Xiao // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2018. – Vol. 60, № 5. – P. 1376–1383.
15. Ren D. A fast calculation approach for the shielding effectiveness of an enclosure with numerous small apertures / D. Ren, P.A. Du, Y. He et al. // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2016. – Vol. 58, № 4. – P. 1033–1041.
16. Po'ad F.A. Analytical and experimental study of the shielding effectiveness of a metallic enclosure with off-centered apertures / F.A. Po'ad, M.Z.M. J'enu, C. Christopoulos et al. // 17th International Zurich symposium on electromagnetic compatibility (Singapore, 1–3 march 2006) – Singapore, 2006. – P. 618–621.
17. Бахвалов Н.С. Численные методы / Н.С. Бахвалов, Н.П. Жидков, Г.М. Кобельков. – М.: Бином, 2004. – 636 с.
18. Komnatnov M.E. Method of shielding effectiveness analysis for an enclosure with an aperture // 2017 International multi-conference on engineering, computer and information sciences. (Novosibirsk, Russia, 18–22 September 2017). – Novosibirsk, 2017. – P. 421–426.
19. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018661874 РФ. Вычисление и трехмерное отображение эффективности экранирования металлическим корпусом с апертурой / А.А. Квасников, М.Е. Комнатнов, С.П. Куксенко, Т.Р. Газизов – Заявка № 2018616275. Дата поступления 18.06.2018. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 20.09.18.
20. Shourvarzi A. Shielding effectiveness estimation of a metallic enclosure with an aperture using S-parameter analysis: analytic validation and experiment / A. Shourvarzi, M. Joodaki // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2016. – Vol. 59, № 2. – P. 537–540.
21. Utility Communications. Multi-service multiplexer FOX515. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://new.abb.com/network-management/ru/sistemy-svyazi/volokonno-opticheskiye-seti/multiservisnaya-sistema-dostupa-fox515> (дата обращения: 12.02.2019).
22. Куксенко С.П. Оценка уровня излучаемой электромагнитной эмиссии семикаскадного модального фильтра для сети Ethernet 100Base-T / С.П. Куксенко, Р.Р. Хажибеков, Т.Т. Газизов. // Технологии ЭМС. – 2017 – № 1 (60). – С. 13–20.
23. Куксенко С.П. Моделирование помехозащищенной сети электропитания космического аппарата / С.П. Куксенко // Труды МАИ. – 2019. – № 105. – С. 1–20.
24. Соединители (разъемы) 2PMT, 2PMDT в России – «ЗАВОД ЭЛЕКОН» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://zavod-elecon.ru/catalog/2rmt-2rmdt/>, свободный (дата обращения 12.06.2019).
25. Turner J.D. Characterization of the shielding effectiveness of equipment cabinets containing apertures / J.D. Turner, T.M. Benson, C. Christopoulos et al. // 1996 International symposium on electromagnetic compatibility (Rome, Italy, 17–20 September 1996) – Roma, 1996 – P. 574–578.
26. «3D SE BOX». Программный модуль для оценки эффективности экранирования корпусов радиоэлектронных средств [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://talgat.org/news/3d_se_box, свободный (дата обращения: 14.03.2019).

Авторы

Иванов Антон Андреевич, магистрант каф. телевидения и управления (ТУ), ТУСУР, инженер научно-исследовательской лаборатории «Безопасность и электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств» (НИЛ «БЭМС РЭС»), тел: (3822) 41-34-39, эл. почта: anton.ivvv@gmail.com;

Квасников Алексей Андреевич, магистрант каф. ТУ, ТУСУР, инженер НИЛ «БЭМС РЭС», тел: (3822) 41-34-39, эл. почта: aleksejkvasnikov@gmail.com;

Куксенко Сергей Петрович, канд.техн.наук, доцент каф. ТУ, старший научный сотрудник НИЛ «БЭМС РЭС», тел: (3822) 41-34-39, эл. почта: ksergp@tu.tusur.ru;

Комнатнов Максим Евгеньевич, канд.техн.наук, доцент каф. ТУ, старший научный сотрудник НИЛ «БЭМС РЭС», тел: (3822) 41-34-39, эл. почта: maxmek@mail.ru.

Ivanov A.A., Kvasnikov A.A., Kuksenko S.P., Komnatnov M.E.

Software module prototype for evaluating the shielding effectiveness of radio-electronic equipment enclosures

Abstract. Evaluation of the shielding effectiveness (SE) of radio-electronic equipment enclosures, in accordance with the requirements of electromagnetic compatibility, is necessary at an early design stage. To do this, it is advisable to use analytical methods that require less computational time and significantly reduce the development time of radio-electronic equipment. In this paper, an algorithm based on the analytical equivalent circuit method was presented. This algorithm allows to calculate and obtain a three-dimensional graph of the shielding effectiveness as a function of the source frequency and the position of the observation point. A software module prototype for quick evaluating of SE of radio-electronic equipment enclosures is developed. The features of the development and the main capabilities of the module are described. The results of SE calculations of 4 different enclosures obtained by electrodynamic modeling and the developed module are compared. It was shown that it is possible to obtain an acceptable error in the SE calculation by using the mathematical models implemented in the software module and speed them up by 5 orders of magnitude. The developed prototype of the software module is available for free use.

Key words: electromagnetic compatibility, shielding effectiveness, equivalent circuit method, free software.

References

1. Kechiev L.N., Akbashev B.B., Stepanov P.V. Jekranirovanie tehnikeskikh sredstv i jekranirujushhie sistemy. Moscow, IDT group, 2010. – 470 p. (In Russian).
2. Butin V.I., Kundyshev P.Ya. On energy transmitted inside the electronics housing under external microwave radiation in the beginning of the resonance mode of shielding. *Technologies of EMC*. 2017, № 2 (61), pp. 3–14. (In Russian)
3. Liu E., Du P.A., Nie B.L. An extended analytical formulation for fast prediction of shielding effectiveness of an enclosure at different observation points with an off-axis aperture. *IEEE Transactions on electromagnetic compatibility*. 2014, vol. 56, iss. 3, pp. 589–598. doi: 10.1109/TEMC.2013.2289742.
4. Nie B.L., Du P.A., Yu Y.T. et al. Study of the shielding properties of enclosures with apertures at higher frequencies using the transmission line modeling method. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2011, vol. 53, iss. 1, pp. 73–81. doi: 10.1109/TEMC.2010.2047398.
5. Araneo R., Lovat G. Fast MoM analysis of the shielding effectiveness of rectangular enclosures with apertures, metal plates, and conducting objects. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2009, vol. 51, iss. 2, pp. 274–283. doi: 10.1109/TEMC.2008.2010456.
6. Jiao C., Li L., Cui X. et al. Subcell FDTD analysis of shielding effectiveness of a thin-walled enclosure with an aperture. *IEEE Transactions on magnetics*. 2006, vol. 42, iss. 4, pp. 1075–1078. doi: 10.1109/TMAG.2006.871638.
7. Ivanov A.A., Komnatnov M.E. The analytical models review for metal enclosures shielding effectiveness estimating based on the equivalent circuit method. *Systems of Control, Communication and Security*. 2019, no. 2, pp. 110–142. doi: 10.24411/2410-9916-2019-10206.

8. Komnatnov M.E., Gazizov T.R., Dement'ev A.S. Jefferktivnost' jekranirovaniya unificirovannyh jel-ektronnyh module [Shielding Effectiveness of Standardized Electronic Modules]. *Russian Physics Journal*. 2012, vol. 55, no. 7, pp. 89–92. (in Russian).
9. Robinson M.P., Turner J.D., Thomas D.W.P. et al. Shielding Effectiveness of a Rectangular Enclosure with a Rectangular Aperture. *Electronics Letters*. 1996, vol. 32, no. 17, pp. 1559–1560. doi: 10.1049/EL:19961030.
10. Wang Y., Zhao X., Chen J. Sun X. The Analysis of Multi-Mode Cylindrical Enclosure Shielding Effectiveness with Apertures. *Proceedings of 2010 International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering*. Changchun, 2010, pp. 527–530. doi: 10.1109/CMCE.2010.5610270.
11. Shi D., Shen Y., Gao Y. 3 High-Order Mode Transmission Line Model of Enclosure with Off-Center Aperture. *Proceedings of 2007 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. Qingdao, 2007, pp. 361–364. doi: 10.1109/ELMAGC.2007.4413505.
12. Nie B.L., Du P.A. An efficient and reliable circuit model for the shielding effectiveness prediction of an enclosure with an aperture. *IEEE Transactions on electromagnetic compatibility*. 2015, vol. 57, iss. 3, pp. 357–364. doi: 10.1109/TEMC.2014.2383438.
13. Dehkhoda P., Tavakoli A., Moini R. An efficient and reliable shielding effectiveness evaluation of a rectangular enclosure with numerous apertures. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2008, vol. 50, iss. 1, pp. 208–212. doi: 10.1109/TEMC.2007.911922.
14. Nie B.L., Du P.A., Xiao P. An improved circuital method for the prediction of shielding effectiveness of an enclosure with apertures excited by a plane wave. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2018, vol. 60, iss. 5, pp. 1376–1383. doi: 10.1109/TEMC.2017.2761399.
15. Ren D., Du P.A., He Y. et al. A fast calculation approach for the shielding effectiveness of an enclosure with numerous small apertures. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2016, vol. 58, iss. 4, pp. 1033–1041. doi: 10.1109/TEMC.2016.2547739.
16. Po'ad F.A., J'enu M.Z.M., Christopoulos C. et al. Analytical and experimental study of the shielding effectiveness of a metallic enclosure with off-centered apertures. *Proceeding of 17th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility*. Singapore, 2006. pp. 618–621. doi: 10.1109/EMCZUR.2006.215010.
17. Bahvalov N.S., Zhidkov N.P., Kobel'kov G.M. Chislennyye metody [Numerical Methods]. Moscow, Binom, 2004. – 636 p. (In Russian).
18. Komnatnov M.E. Method of shielding effectiveness analysis for an enclosure with an aperture. *Proceeding of 2017 International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences*. Novosibirsk, 2017, pp. 421–426. doi: 10.1109/SIBIRCON.2017.8109920
19. Kvasnikov A.A., Komnatnov M.E., Kuksenko S.P., Gazizov T.R. Vychislenie i trehmernoe otobrazhenie jefferktivnosti jekranirovaniya metallicheskim korpusom s aperturoj. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlja EVM [Calculation and three-dimensional display of the shielding effectiveness of metal enclosure with an aperture. The Certificate on Official Registration of the Computer Program]. No. 2018616275, 2018.
20. Shourvarzi A., Joodaki M. Shielding effectiveness estimation of a metallic enclosure with an aperture using S-parameter analysis: analytic validation and experiment. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2016, vol. 59, iss. 2, pp. 537–540. doi: 10.1109/TEMC.2016.2615525
21. Utility Communications. Multi-service multiplexer FOX515. URL: <https://new.abb.com/network-management/ru/sistemy-svyazi/volonno-opticheskiye-seti/multiservisnaya-sistema-dostupa-fox515> (accessed 12.02.2019).
22. Kuksenko S.P., Hazhibekov R.R., Gazizov T.T. Estimation of radiated electromagnetic emission level from seven-stage modal filter for Ethernet 100Base-T network. *Technologies of EMC*. 2017, № 1 (60), pp. 13–20. (In Russian)
23. Kuksenko S.P. Simulation of a spacecraft noise immune power network. *Trudy MAI*. 2019, no. 105, pp. 1–20. (In Russian)
24. 2RMT, 2RMDT connectors in Russia – "PLANT ELEKON" products. URL: <https://zavod-elecon.ru/catalog/2rmt-2rmdt/> (accessed 12.06.2019).
25. Turner J.D., Benson T.M., Christopoulos C. et al. Characterization of the shielding effectiveness of equipment cabinets containing apertures. *Proceeding of 1996 International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. Roma, 1996, pp. 574–578.

26. «3D SE BOX». Software module for evaluating the shielding effectiveness of electronic equipment enclosures. – URL: http://talgat.org/news/3d_se_box (accessed 14.03.2019).

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR), Pr. Lenina, 40, 634050 Tomsk, Russian Federation

Authors

Ivanov Anton Andreevich, engineer of scientific research laboratory «Security and Electromagnetic Compatibility of Radio-Electronic Equipment » (SRL «SEMC REE»), Master's degree student at the Department of Television and Control (TU), TUSUR, tel: (3822) 41-34-39, e-mail: anton.ivvv@gmail.com;

Kvasnikov Aleksey Andreevich, engineer of SRL «SEMC REE». Master's degree student TU, TUSUR, tel: (3822) 41-34-39, e-mail: aleksejkvasnikov@gmail.com;

Kuksenko Sergej Petrovich, PhD, senior researcher of SRL «SEMC REE», assistant professor TU, TUSUR, tel: (3822) 41-34-39, e-mail: ksergp@tu.tusur.ru;

Komnatnov Maksim Evgen'evich, PhD, senior researcher of SRL «SEMC REE», assistant professor TU, TUSUR, tel: (3822) 41-34-39, e-mail: maxmek@mail.ru.