

УДК 621.396.677.83

А.А. Иванов, М.Е. Комнатнов

## Полуаналитический метод для оценки эффективности экранирования корпуса с апертурой

Предложен полуаналитический метод для расчета эффективности экранирования (ЭЭ) корпуса с апертурой, заполненной диэлектрическим или магнитным материалом. Метод основан на сочетании квазистатического анализа копланарных полосковых линий передачи (КПЛ) и аналитической модели эквивалентной схемы корпуса. Моделирование КПЛ сводится к решению простой электростатической задачи и может быть выполнено любым доступным численным методом. При этом вычисление ЭЭ может быть выполнено на основе любой из существующих моделей эквивалентной схемы корпуса. В диапазоне частот до 1 ГГц выполнено обширное тестирование предложенного метода на примере стандартизированного корпуса  $300 \times 120 \times 300$  мм<sup>3</sup>. Чтобы показать возможности метода, представлены результаты анализа ЭЭ тестовых корпусов с вентиляционной решеткой из ПВХ и со стеклом в апертуре. Используя этот метод совместно с ранее опубликованной аналитической моделью, выполнены вычисления ЭЭ корпуса с проводящей пластиной внутри. Показано, что предложенный метод обладает приемлемой точностью, а среднее значение абсолютной погрешности не превышает 6,4 дБ.

**Ключевые слова:** эффективность экранирования, метод эквивалентной схемы корпуса, квазистатическое моделирование.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2021-24-1-16-23

Экранирующие корпуса широко применяются для защиты радиоэлектронных средств (РЭС) от воздействия излучаемых электромагнитных помех. Способность корпуса обеспечивать защиту РЭС определяется значением его эффективности экранирования (ЭЭ), которая, прежде всего, зависит от конструкции корпуса [1]. Значительное влияние на ЭЭ также оказывает внутреннее содержимое корпуса, такое как печатные платы [2], металлические пластины [3], кабельные сборки [4] и др. Помимо этого, величина ЭЭ во многом зависит от заполнения апертуры корпуса [5, 6]. Таким образом, создание экранирующего корпуса является сложной задачей, требующей учета всех особенностей конструкции проектируемого РЭС.

Для оценки ЭЭ корпусов широко используются численные методы [7–10], которые позволяют определять ЭЭ сложных и детализированных экранирующих конструкций с высокой точностью, однако требуют значительных вычислительных затрат. При этом большинство коммерческих программных продуктов, основанных на численных методах, являются дорогостоящими и по этой причине недоступными для широкого круга разработчиков [11]. По сравнению с численными методами, аналитические модели вычисления ЭЭ [12–15] обладают значительно меньшей вычислительной сложностью. Однако они пригодны только для анализа простых экранирующих структур, поэтому их применение целесообразно лишь на ранних этапах проектирования РЭС. Исходя из описанных недостатков, актуальной задачей для совершенствования теории экранирования является разработка универсальных и быстрых гибридных или полуаналитических методов оценки ЭЭ [16–18]. Примером может послужить метод [19] для анализа ЭЭ корпуса с апертурой произвольной формы, основанный на сочетании численного анализа и аналитического метода эквивалентной схемы [13].

В этой статье предлагается полуаналитический метод для оценки ЭЭ корпуса с апертурой, заполненной диэлектрическим или магнитным материалом. Этот метод основан на сочетании аналитического метода из [13] и квазистатического моделирования, которое используется для определения импеданса стенки корпуса с апертурой  $Z_{ар}$ . Расчет  $Z_{ар}$  сводится к решению простых электростатических задач, занимающих существенно меньшее время по сравнению с полноволновым моделированием, используемым в [19]. Вычисления могут быть выполнены с помощью любого доступного численного метода (например, FEM или MoM), в том числе при использовании свободно распространяемого программного обеспечения. Поскольку предложенный метод основан на эквивалентной схеме корпуса, то он может быть объединен со многими существующими аналитическими моделями, разработанными для оценки ЭЭ заполненных корпусов [2–4], корпусов с апертурами на нескольких стенках [20] и т.д.

### Расчет импеданса стенки с апертурой

В соответствии с [13], экранирующий корпус с апертурой при воздействии на него плоской электромагнитной волны может быть представлен в виде эквивалентной схемы (рис. 1), в которой плоская волна заменяется источником напряжения с внутренним сопротивлением  $Z_0 = 120\pi$  Ом, корпус представлен в виде короткозамкнутого отрезка прямоугольного волновода, а фронтальная стенка корпуса заменяется импедансом  $Z_{ар}$ . При этом  $Z_{ар}$  вычисляется на основе погонных параметров копланарной полосковой линии передачи (КПЛ), эквивалентной стенке с апертурой, как [13]

$$Z_{ар} = \frac{1}{2} \frac{l}{a} jZ_c \operatorname{tg} \left( k \frac{l}{2} \right), \quad (1)$$

где  $l$  – ширина апертуры,  $a$  – ширина фронтальной стенки корпуса ( $l/a$  представляет собой корректиру-

ющий коэффициент, определяющий связь между корпусом и его стенкой),  $Z_c$  и  $k$  – характеристический импеданс и постоянная распространения КПЛ.

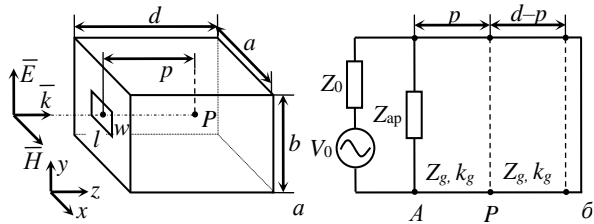


Рис. 1. Экранирующий корпус с апертурой (а) и его эквивалентная схема (б)

Для КПЛ с заполнением постоянная распространения может быть вычислена как [21]

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon_{re} \mu_{re}}, \quad (2)$$

где  $\lambda$  – длина волны источника излучения,  $\epsilon_{re}$  и  $\mu_{re}$  – эффективные значения относительных диэлектрической и магнитной проницаемостей заполнения.

Поскольку КПЛ имеет конечную ширину проводников, то значения  $\epsilon_{re}$  и  $\mu_{re}$  могут быть получены с помощью квазистатического моделирования. Рассмотрим подвешенную в воздухе КПЛ с характеристическим импедансом  $Z_{c1}$  и толщиной  $t$ , в которой пространство  $w$  между торцами проводников заполнено материалом с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_r$  (рис. 2). Для данной структуры значение  $\epsilon_{re}$  может быть получено как [22]

$$\epsilon_{re} = C/C_0, \quad (3)$$

где  $C_0$  – погонная ёмкость КПЛ без заполнения,  $C$  – погонная ёмкость КПЛ с диэлектрическим заполнением пространства между проводниками.

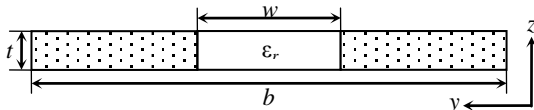


Рис. 2. Поперечное сечение двухпроводной КПЛ, эквивалентной стенке корпуса с заполненной апертурой

Для аналогичной КПЛ, заполненной материалом с относительной магнитной проницаемостью  $\mu_r$ , значение  $\mu_{re}$  может быть вычислено как

$$\mu_{re} = L/L_0, \quad (4)$$

где  $L_0$  и  $L$  – погонные индуктивности КПЛ в отсутствие и в присутствии заполнения магнитным материалом между проводниками соответственно.

Для вычисления погонной индуктивности в (4) целесообразно использовать электростатическую аналогию [23]. Следуя ей, для КПЛ с магнитным заполнением между проводниками погонная индуктивность может быть вычислена как

$$L = \mu_0 \epsilon_0 / C', \quad (5)$$

где  $\mu_0$  и  $\epsilon_0$  – магнитная и электрическая постоянные,  $C'$  – дополнительная погонная ёмкость КПЛ, в которой пространство между проводниками заполнено материалом с  $\epsilon'_r = 1/\mu_r$ .

Подстановка (5) в (4) дает

$$\mu_{re} = \frac{L}{L_0} = \frac{\mu_0 \epsilon_0 C_0}{\mu_0 \epsilon_0 C'} = \frac{C_0}{C'}. \quad (6)$$

Таким образом, выражения (3) и (6) могут быть применены при вычислении  $k$  для КПЛ с неоднородным диэлектрическим или магнитным заполнением соответственно. При этом, объединяя (2)–(6) и учитывая, что  $Z_c = (L/C)^{1/2}$ , импеданс  $Z_{ap}$  может быть рассчитан для трех разных случаев. Так, если апертура заполнена материалом с  $\mu_r=1$  и  $\epsilon_r>1$ , то

$$Z_{ap} = j \frac{1}{2} \frac{l}{a} \frac{1}{c \sqrt{CC_0}} \operatorname{tg} \left( \frac{\pi l}{\lambda} \sqrt{\frac{C}{C_0}} \right), \quad (7)$$

где  $c$  – скорость света в свободном пространстве.

Для материала с  $\mu_r>1$  и  $\epsilon_r=1$

$$Z_{ap} = j \frac{1}{2} \frac{l}{a} \frac{1}{c \sqrt{C'C_0}} \operatorname{tg} \left( \frac{\pi l}{\lambda} \sqrt{\frac{C_0}{C'}} \right). \quad (8)$$

Наконец, если апертура заполнена материалом с  $\mu_r>1$  и  $\epsilon_r>1$ , то

$$Z_{ap} = j \frac{1}{2} \frac{l}{a} \frac{1}{c \sqrt{C'C}} \operatorname{tg} \left( \frac{\pi l}{\lambda} \sqrt{\frac{C}{C'}} \right). \quad (9)$$

Полученные выражения (7)–(9) могут быть применены для расчета импеданса фронтальной стенки произвольной формы с неоднородным заполнением апертуры. При этом численный анализ используется только для получения погонных емкостей, что значительно уменьшает вычислительные затраты по сравнению с [19]. При решении электростатической задачи могут быть учтены неоднородности стенки корпуса, такие как элементы крепежа, загибы кромки металлического листа и т.п.

При последующих вычислениях ЭЭ используется эквивалентная схема из [13], представленная на рис. 1. На первом шаге импеданс  $Z_{ap}$  фронтальной стенки с апертурой вычисляется по (7)–(9) как параллельное соединение двух входных сопротивлений короткозамкнутых отрезков эквивалентной КПЛ. Для этого, на основе погонных параметров, полученных по результатам моделирования КПЛ, определяются характеристический импеданс  $Z_c$  и постоянная распространения  $k$  вдоль оси  $x$  (см. рис. 1, а). После чего расчет характеристического импеданса  $Z_g$  и постоянной распространения  $k_g$  выполняется для корпуса (вдоль оси  $z$  на рис. 1, а). Затем, используя теорему Тевенина и выражения для вычисления входного сопротивления линии передачи, выполняются преобразования эквивалентной схемы корпуса в точку наблюдения  $P$ , а из токов и напряжений в преобразованной схеме вычисляется ЭЭ. Более подробно методика расчета ЭЭ по методу эквивалентной схемы корпуса изложена в обзорной работе [24].

#### Тестирование метода

В данном разделе представлены результаты тестирования предложенного метода. Во всех рассмотренных случаях для вычисления параметров КПЛ применялся метод моментов с поверхностной

дискретизацией структуры. Для достижения хорошей сходимости для каждой КПЛ выполнялось уточнение сетки. Значения погонных ёмкостей рассчитывались на основе модели из [25].

В первую очередь, для проверки (5) выполнен расчет погонной индуктивности трех двухпроводных структур с магнитным заполнением, представленных на рис. 3. Сравнивались результаты, полученные с помощью (5), аналитических выражений из [26] (для структур на рис. 3, *a* и *б*) и программы FEMM [27] (для структуры на рис. 3, *в*). Полученные результаты приведены в табл. 1. Видно, что значения погонной индуктивности, рассчитанные с помощью (5) и [26, 27], хорошо согласуются, т.е. (5) может быть применено для расчета индуктивности с приемлемой точностью.

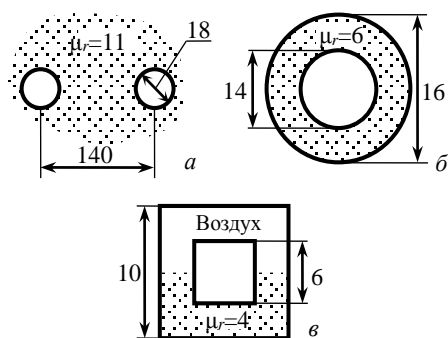


Рис. 3. Тестовые двухпроводные структуры (размеры указаны в мм)

Далее для проверки (7) в диапазоне 1–1000 МГц выполнены вычисления ЭЭ в центре корпуса  $a = 300$  мм,  $b = 120$  мм и  $d = 300$  мм (см. рис. 1) с апертурой, расположенной на фронтальной стенке толщиной  $t = 1$  мм. При вычислениях применялась структура КПЛ из рис. 2. Рассмотрено 2 случая. В случае 1 корпус содержал апертуру  $w = l = 80$  мм, заполненную материалом с  $\epsilon_r = 80$ . В случае 2 использовалась апертура с  $l = 160$  мм,  $w = 6$  мм и  $\epsilon_r = 10$ .

При вычислениях предложенным методом ЭЭ определялась, следуя [13]. Сравнивались результаты, полученные предложенным методом и методом конечных элементов (МКЭ). При расчетах по МКЭ ЭЭ определялась из напряженности электрического поля, а в качестве материала корпуса применялся идеальный проводник. При дискретизации структуры использовалось адаптивное уточнение сетки. Начальное число ячеек на длину волны составляло 40, а уточнение сетки не превышало 30% от общего числа элементов на каждом шаге. Во всех случаях  $\epsilon_r$  оставалось постоянным во всем частотном диапазоне. Результаты вычисления ЭЭ представлены на рис. 4, где также приведены частотные зависимости ЭЭ корпусов с пустыми апертурами (по МКЭ).

Из рис. 4 видно, что результаты, полученные по МКЭ и предложенным методом, согласуются. Средние значения абсолютной погрешности ( $\Delta$ ) составляют 6,4 дБ (см. рис. 4, *a*) и 2,9 дБ (см. рис. 4, *б*).

Таблица 1

Результаты расчета погонной индуктивности

Структура	(5) мГн/м	[26] или [27], мГн/м
Рис. 3, <i>a</i>	12,058	12,069
Рис. 3, <i>б</i>	0,1602	0,1601
Рис. 3, <i>в</i>	0,1413	0,1427

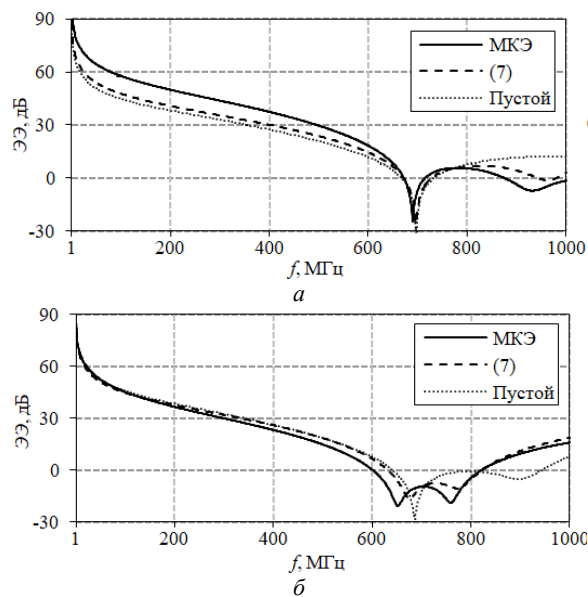


Рис. 4. Частотные зависимости ЭЭ корпуса с апертурой: *a* –  $w = l = 80$  мм; *б* –  $l = 160$  мм,  $w = 6$  мм

При этом предложенный метод требует существенно меньших вычислительных затрат. Так, для случая 2 время вычисления частотных зависимостей из 1000 точек при помощи МКЭ и предложенного метода составило 1238 и 5,16 с соответственно (ПК с Intel Core i5 3,4 ГГц и 8 Гб ОЗУ). При заполнении апертур диэлектриком их резонансные частоты сдвигаются в низкочастотную область, а ЭЭ вблизи этих частот снижается вплоть до отрицательных значений. Из рис. 4, *б* видно, что для случая 2 резонансная частота апертуры смещается на 155 МГц, что приводит к наложению резонансов корпуса и апертуры, а ЭЭ становится отрицательной в диапазоне частот 600–820 МГц. В случае 1 резонанс апертуры смещается на 944 МГц (на частоту 931 МГц при расчетной резонансной частоте для пустой апертуры  $80 \times 80$  мм<sup>2</sup>  $f_r = c/2l = 1875$  МГц). При этом в области частот до 650 МГц ЭЭ корпуса с заполненной апертурой оказывается более высокой, чем при пустой апертуре.

Используя (8) и методику из [13], в диапазоне 1–1000 МГц выполнены вычисления ЭЭ в центре корпуса ( $a = d = 300$  мм,  $b = 120$  мм) с апертурой  $w = l = 80$  мм, заполненной магнитным материалом с  $\mu_r = 10, 80, 160$  (КПЛ из рис. 2). Для подтверждения корректности (8) вычисления ЭЭ данной структуры также выполнены при помощи МКЭ. Для вычисленных частотных зависимостей значение  $\Delta$  составило 2,9 дБ (при  $\mu_r = 10$ ), 1,6 дБ (при  $\mu_r = 80$ ) и 4,5 дБ (при  $\mu_r = 160$ ). Результаты вычисления ЭЭ для случая наибольшей погрешности (при  $\mu_r = 160$ ) приведены на рис. 5, где также представлена частотная зависи-

мость ЭЭ для корпуса с пустой апертурой. В табл. 2 представлены значения ЭЭ, рассчитанные для трех исследуемых случаев на частотах 300, 600 и 900 МГц.

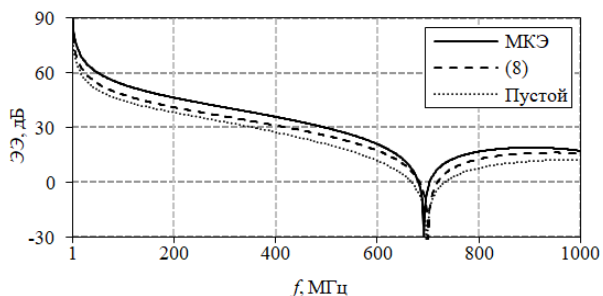


Рис. 5. Частотные зависимости ЭЭ корпуса с апертурой, заполненной материалом с  $\mu_r = 160$

Таблица 2

Значения ЭЭ корпуса с заполненной апертурой (дБ)						
$\mu_r$	300 МГц		600 МГц		900 МГц	
	МКЭ	(8)	МКЭ	(8)	МКЭ	(8)
10	33,1	35,9	13,9	17,3	12,4	15,8
80	37,6	36,0	17,8	17,4	15,9	16,1
160	40,8	36,1	20,9	17,4	18,9	16,2

Из полученных результатов видно, что при увеличении магнитной проницаемости материала, заполняющего апертуру, ЭЭ корпуса увеличивается. В результате при  $\mu_r = 160$  ЭЭ корпуса с заполненной апертурой оказывается в среднем на 8,5 дБ выше, чем ЭЭ пустого корпуса (см. рис. 5). При этом резонансные частоты не претерпевают значительных изменений в выбранном диапазоне даже при высоких значениях  $\mu_r$ .

Далее для проверки (9) в диапазоне частот 1–1000 МГц выполнены вычисления ЭЭ того же корпуса с апертурой, заполненной магнитоэлектрическим материалом с  $\mu_r = 10$  и  $\epsilon_r = 80$ . При вычислении погонных параметров применялась структура КПЛ из рис. 2. Полученные частотные зависимости, вычисленные по МКЭ и предложенным методом, представлены на рис. 6, где также приведены результаты вычисления ЭЭ для корпуса с пустой апертурой.

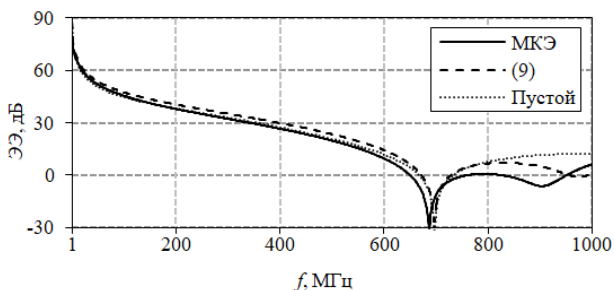


Рис. 6. Частотные зависимости ЭЭ корпуса с апертурой, заполненной материалом с  $\mu_r = 10$  и  $\epsilon_r = 80$

Из рис. 6 видно, что зависимости, полученные по МКЭ и предложенным методом, согласуются, однако наблюдается различие между резонансными частотами апертуры (на 63 МГц). При этом значение погрешности  $\Delta$  составляет всего 4,3 дБ. В диапазоне до 700 МГц частотные зависимости ЭЭ для пустого

и заполненного корпусов отличаются незначительно, поскольку  $\mu_r$  имеет небольшое значение. При этом из-за высокого  $\epsilon_r$  резонансная частота апертуры уменьшается, что приводит к снижению ЭЭ.

### Примеры сложных конструкций

В данном разделе представлены результаты вычисления ЭЭ корпусов со сложной конструкцией стенки с апертурой, демонстрирующие возможности предложенного метода. Для подтверждения полученных результатов приводятся частотные зависимости ЭЭ, полученные с помощью численных методов. Для вычисления погонных параметров КПЛ, как и ранее, применялся метод моментов [25].

Используя предложенный полуаналитический метод и МКЭ, выполнены вычисления ЭЭ в центре типового прямоугольного корпуса со стеклом ( $\epsilon_r = 10$ ), закрепленным во фронтальной стенке сложной формы (внутри пазов, образованных двухугловым изгибом металла). Геометрические размеры исследуемого корпуса и линии передачи, эквивалентной его фронтальной стенке с апертурой, представлены на рис. 7. Полученные зависимости ЭЭ в диапазоне частот 1–1000 МГц приведены на рис. 8. Видно, что частотные зависимости ЭЭ, полученные по МКЭ и предложенным методом, хорошо согласуются ( $\Delta = 3,1$  дБ). На частоте 970 МГц виден резонанс апертуры, из-за которого в верхней части исследуемого частотного диапазона (от 0,8 до 1 ГГц) ЭЭ принимает отрицательные значения.

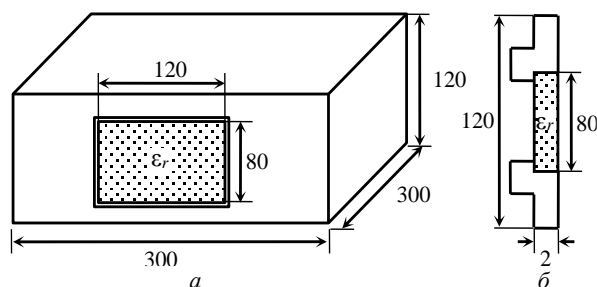


Рис. 7. Корпус со стеклом в апертуре (а) и КПЛ, эквивалентная его стенке (б) (размеры указаны в мм)

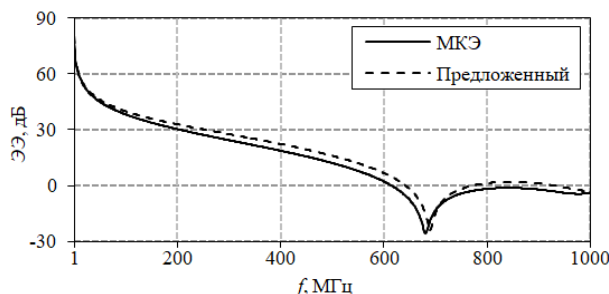


Рис. 8. Частотные зависимости ЭЭ корпуса со стеклом в апертуре

Далее вычислена ЭЭ корпуса с вентиляционной решеткой из ПВХ ( $\epsilon_r = 4$ ) в апертуре. Геометрические размеры исследуемого корпуса и вентиляционной решетки приведены на рис. 9. Поскольку длина волны на верхней границе выбранного частотного диапазона меньше, чем ширина и длина исследуемого корпуса, то для преобразования эквивалентной

схемы в процессе вычисления ЭЭ использовалась методика из [28], позволяющая учитывать распространение внутри корпуса волн высших типов. Для проверки результатов ЭЭ определялась при помощи двух численных методов: метода матрицы линий передачи (ММЛП) и МКЭ. Вычисления по ММЛП выполнялись, следуя [29]. Полученные частотные зависимости представлены на рис. 10. Видно, что частотные зависимости ЭЭ, полученные полуаналитическим методом и по МКЭ, согласуются. При этом на зависимости, полученной по МКЭ, второй резонанс корпуса (828 МГц) отсутствует. Напротив, на зависимости, полученной по ММЛП, данный резонанс присутствует, однако на частоте 1 МГц отличие между результатами достигает 44 дБ.

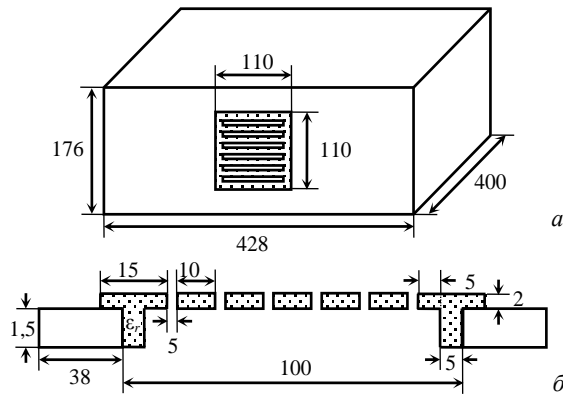


Рис. 9. Корпус с вентиляционной решеткой в апертуре (а) и линия передачи, эквивалентная стенке с апертурой (б) (размеры указаны в мм)

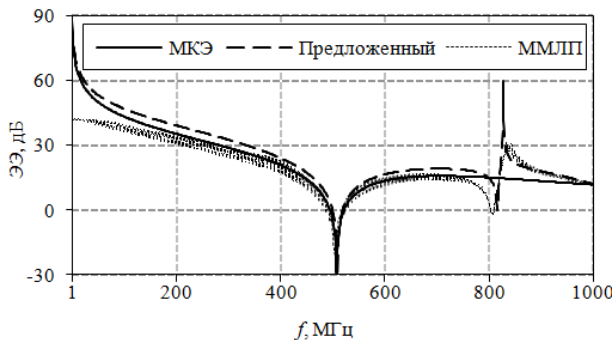


Рис. 10. Частотные зависимости ЭЭ корпуса с вентиляционной решеткой в апертуре

В диапазоне 1–1000 МГц выполнены вычисления ЭЭ корпуса  $a = d = 300$  мм и  $b = 120$  мм со смотровым окном в апертуре ( $w = 30$  мм,  $l = 150$  мм) и печатной платой внутри (рис. 11, а). Окно (рис. 11, б) выполнено из органического стекла с  $\epsilon_{r1} = 3,5$  и закреплено на стенке корпуса при помощи уплотнителя из ABS пластика с  $\epsilon_{r2} = 5$ . В качестве печатной платы рассматривалась бесконечно тонкая идеально проводящая металлическая пластина высотой 70 мм, перекрывающая всю ширину корпуса. Вычисления ЭЭ выполнялись в точке наблюдения  $P$ , расположенной на расстоянии 200 мм от стенки со смотровым окном. Преобразования эквивалентной схемы корпуса выполнялись на основе методики из [30], предназначенной для анализа ЭЭ корпусов с печатными платами или проводящими пластинами внут-

ри. Частотные зависимости ЭЭ, полученные предложенным методом и по МКЭ, представлены на рис. 12.

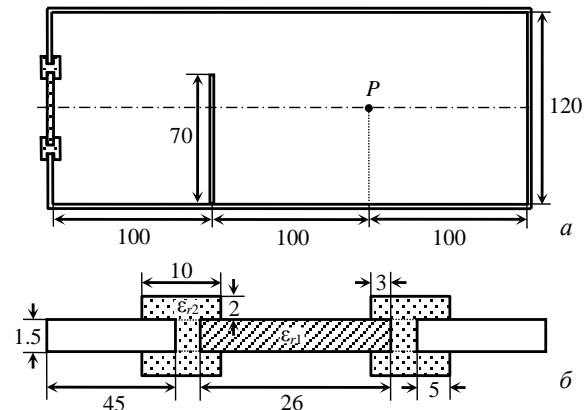


Рис. 11. Вид сбоку корпуса со смотровым окном и проводящей пластиной (а); КПЛ, эквивалентная его фронтальной стенке (б) (размеры указаны в мм)

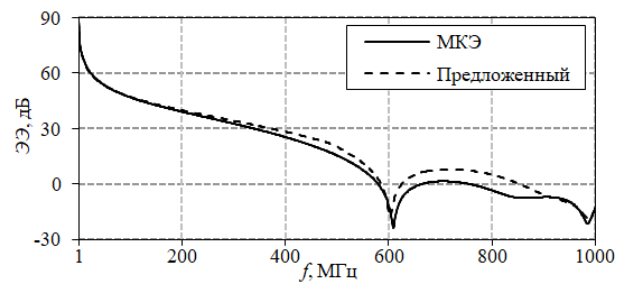


Рис. 12. Частотные зависимости ЭЭ корпуса со смотровым окном и проводящей пластиной внутри

Из рис. 12 видно, что частотные зависимости схожи, а  $\Delta = 3,3$  дБ. Присутствие печатной платы и диэлектрика приводит к наложению резонансов корпуса и апертуры. Вследствие этого в довольно широком диапазоне частот (около 750–1000 МГц) значения ЭЭ корпуса оказываются отрицательными.

#### Ограничения и погрешность метода

Результаты вычислений, представленные в предыдущих разделах, доказывают, что предложенный метод обладает приемлемой точностью и подходит для анализа ЭЭ корпусов с заполненной апертурой. Однако описанный в работе вариант этого метода обладает рядом ограничений. Во-первых, при расчете ЭЭ с использованием (7)–(9) не могут быть учтены высшие типы волн, распространяющиеся в апертуре. Это ограничение связано с использованием квазистатического моделирования и применением при расчете импеданса  $Z_{ap}$  наиболее простого выражения (1) из аналитической модели [13]. Во-вторых, в отличие от [19], предложенный метод не подходит для анализа ЭЭ корпусов с апертурой произвольной формы. При этом он пригоден для прямоугольных апертур, которые довольно часто встречаются на практике. В-третьих, в описанном варианте предложенного метода не может быть учтено произвольное положение апертуры во фронтальной стенке корпуса. Наконец, необходимо отметить, что электростатическая аналогия (5), применяемая в данной работе для вычисления погонной индуктивности,

имеет собственные ограничения. Так, при моделировании с использованием (5) частота предполагается настолько высокой, что линии магнитного поля можно считать расположенными вне сечений проводников КПЛ. Иными словами, данная электростатическая аналогия не может гарантировать удовлетворительную точность результатов при решении низкочастотных задач экранирования.

Погрешность предложенного метода во многом зависит от выражения, применяемого для вычисления импеданса  $Z_{ар}$ . Так, существенное влияние на ЭЭ оказывает коэффициент  $l/a$ , который может быть заменен на другой коэффициент, позволяющий получить более корректные результаты, например, из [29]. Заметную долю погрешности может вносить неверное определение резонансной частоты апертуры, которое зависит от аргумента функции  $tg$ , применяемой в выражениях для вычисления  $Z_{ар}$ . Другими словами, значение резонансной частоты определяется результатами вычисления погонных емкостей при квазистатическом моделировании, поскольку показатель преломления среды, использующийся при расчете длины волны, рассчитывается на основании этих емкостей. Таким образом, точность расчета резонансной частоты апертуры определяется сходимостью результатов квазистатического моделирования КПЛ. При этом для большинства реальных корпусов эквивалентная КПЛ имеет значительную ширину, но небольшую толщину проводников, т.е. для получения точных результатов необходимо утолщение сетки, что, очевидно, приводит к значительному росту вычислительных затрат. Поэтому при моделировании КПЛ наиболее рационально использовать численные методы с поверхностной дискретизацией границ исследуемой структуры (например, метод моментов, примененный в этой работе).

#### Заключение

Предложен полуаналитический метод для расчета ЭЭ корпусов с апертурой, неоднородно заполненной диэлектрическим или магнитным материалом. Метод может быть объединен с любой аналитической моделью на основе эквивалентной схемы корпуса, поэтому его можно использовать для определения ЭЭ сложных конструкций, таких как корпус с печатными платами, кабельными сборками или другими элементами РЭС. Выполнено тестирование предложенного метода. Показано, что он обладает приемлемой точностью в сравнении с численными методами, при этом требует значительно меньших вычислительных затрат. Описаны недостатки метода и предложены способы их преодоления.

Результаты вычислительных экспериментов, выполненных в работе, показывают, что заполнение апертуры значительно влияет на ЭЭ корпуса. Так, увеличение относительной магнитной проницаемости материала, заполняющего апертуру, приводит к увеличению ЭЭ, а заполнение диэлектриком приводит к изменению резонансных частот апертуры, что может значительно ухудшить ЭЭ. Например, для структуры на рис. 11 из-за наложения резонансов

корпуса и апертуры ЭЭ становится отрицательной в широком частотном диапазоне. Таким образом, при проектировании корпуса РЭС необходимо уделять значительное внимание предполагаемому содержанию как самого корпуса, так и его апертур.

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

#### Литература

1. On the meaning of enclosure shielding effectiveness / J. Dawson, A.C. Marvin, M.P. Robinson, I. Flintoft // Proc. of IEEE International symposium on electromagnetic compatibility. – Netherland, Amsterdam, 2018. – P. 746–751.
2. Li F. Study of the influence of PCB parameters on the shielding effectiveness of metal cavity with holes / F. Li, J. Han, C. Zhang // Proc. of IEEE International technology, networking, electronic and automation control conference. – China, Chengdu, 2019. – P. 1–5.
3. Model of the electromagnetic field inside a cuboidal enclosure populated with conducting planes or printed circuit boards / D.W.P. Thomas, A.C. Denton, T. Konefal et al. // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2001. – Vol. 43, No. 2. – P. 161–169.
4. Characterisation of the shielding effectiveness of populated equipment enclosures / D.W.P. Thomas, A. Denton, T. Konefal et al. // Proc. of International conference and exhibition on electromagnetic compatibility. – USA, New York, 1999. – P. 1–6.
5. A fast circuit model description of the shielding effectiveness of a box with imperfect gaskets or apertures covered by thin resistive sheet coatings / T. Konefal, J. Dawson, A.C. Marvin et al. // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2006. – Vol. 48, No. 1. – P. 134–144.
6. Solin J.R. Formula for the field excited in a cavity sealed by a plate backed with a conductive elastomer / J.R. Solin // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2016. – Vol. 58, No. 1. – P. 111–116.
7. 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, No. 2. – P. 274–283.
8. 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. Yu, Z. Shi // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2010. – Vol. 53, No. 1. – P. 73–81.
9. EMI from cavity modes of shielding enclosures-FDTD modeling and measurements / M. Li, J. Nuebel, J.L. Drewniak et al. // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2000. – Vol. 42, No. 1. – P. 29–38.
10. Finite element method applied to shielding performance of enclosures / L.B. Gravelle, G.I. Costache // Proc. of IEEE International symposium on electromagnetic compatibility. – USA, Seattle, 1988. – P. 69–72.
11. Куксенко С.П. Методы оптимального проектирования линейных антенн и полосковых структур с учетом электромагнитной совместимости: дис. ... д-ра. техн. наук: 05.12.07. – Томск, ТУСУР, 2019. – 436 с.
12. Aperture excitation of electrically large, lossy cavities / D.A. Hill, M.T. Ma, A.R. Ondrejka et al. // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 1994. – Vol. 36, No. 3. – P. 169–178.
13. Analytical formulation for the shielding effectiveness of enclosures with apertures / M.P. Robinson, T.M. Benson,



C. Christopoulos et al. // *IEEE Transactions on electromagnetic compatibility*. – 1999. – Vol. 40, No. 3. – P. 240–248.

14. A fast multiple mode intermediate level circuit model for the prediction of shielding effectiveness of a rectangular box containing a rectangular aperture / T. Konefal, J. Dawson, A. Marvin et al. // *IEEE Transactions on electromagnetic compatibility*. – 2005. – Vol. 47, No. 4. – P. 678–691.

15. Solin J.R. Formula for the field excited in a rectangular cavity with a small aperture / J.R. Solin // *IEEE Transactions on electromagnetic compatibility*. – 2011. – Vol. 53, No. 1. – P. 82–90.

16. Wallyn W. Fast shielding effectiveness prediction for realistic rectangular enclosures / W. Wallyn, D.D. Zutter, E. Laermans // *IEEE Transactions on electromagnetic compatibility*. – 2003. – Vol. 45, No. 4. – P. 639–643.

17. Youngfang B. Analysis for shielding effectiveness of infinite metal plate with arrayed apertures using semi-analytical FDTD / B. Youngfang, L. Yinghua // *Proc. of Asia-pacific conference on environmental electromagnetics*. – China, Hangzhou, 2003. – P. 56–59.

18. Shielding effectiveness of screened rooms with line feed-throughs – a semi-analytical approach / H. Karcoon, S. Parr, S. Dickmann, R. Rambousky // *Proc. of IEEE International symposium on electromagnetic compatibility*. – Germany, Dresden, 2015. – P. 312–316.

19. Inbavalli V.P. Calculation of shielding effectiveness of an enclosure with arbitrary shaped apertures using hybrid approach / V.P. Inbavalli, C. Venkatesh, T.R. Suresh Kumar // *Proc. of International conference on electromagnetic interference and compatibility*. – India, Bengaluru, 2018. – P. 1–4.

20. Circuit modeling and measurement of shielding effectiveness against oblique incident plane wave on apertures in multiple sides of rectangular enclosure / J. Shim, D.G. Kam, J.H. Kwon, J. Kim // *IEEE Transactions on electromagnetic compatibility*. – 2010. – Vol. 52, No. 3. – P. 566–577.

21. Gupta K.C. *Microstrip Lines and Slotlines*, 2nd ed. / K.C. Gupta, R. Garg, I.J. Bahl. – USA, Norwood: Artech House, 1996. – 547 p.

22. Collin R.E. *Field Theory of Guided Waves*, 2nd ed. / R.E. Collin. – USA, Piscataway: IEEE Press, 1991. – 859 p.

23. Mautz J.R. The inductance matrix of multiconductor transmission line in multiple magnetic media / J.R. Mautz, R.F. Harrington, G.G. Hsu // *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*. – 1988. – Vol. 36, No. 8. – P. 1293–1295.

24. 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.

25. Gazizov T.R. Analytic expressions for MoM calculation of capacitance matrix of two dimensional system of conductors and dielectrics having arbitrarily oriented boundaries / T.R. Gazizov // *Proc. of IEEE International symposium on electromagnetic compatibility*. – Canada, Montreal, 2001. – P. 151–155.

26. Grover F.W. *Inductance calculations, working formulas and tables* / F.W. Grover. – USA, NY, Mineola: Dover Publications, 1946. – 286 p.

27. Finite element method magnetics: Home Page [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.femm.info/wiki/HomePage> (дата обращения: 15.12.2020).

28. Shi D. 3 high-order mode transmission line model of enclosure with off-center aperture / D. Shi, Y. Shen, Y. Gao // *Proc. of IEEE International symposium on electromagnetic compatibility*. – China, Qingdao, 2007. – P. 361–364.

29. Sadiku M.N.O. *Numerical Techniques in Electromagnetics with MATLAB* / M.N.O. Sadiku. – 3rd ed. – USA, FL, Boca Raton: CRC Press, 2009. – 730 p.

30. Ivanov A.A. Analytical model for evaluating shielding effectiveness of an enclosure populated with conducting plates / A.A. Ivanov, M.E. Komnatnov, T.R. Gazizov // *IEEE Transactions on electromagnetic compatibility*. – 2020. – Vol. 62, No. 5. – P. 2307–2310.

#### Иванов Антон Андреевич

Аспирант каф. телевидения и управления (ТУ) Томского государственного ун-та систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)  
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7 952 182 01 43  
Эл. почта: anton.ivvv@gmail.com

#### Комнатнов Максим Евгеньевич

Канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник,  
доцент каф. ТУ ТУСУРа  
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7-952-888-38-96  
Эл. почта: maxmek@mail.ru

Ivanov A.A., Komnatnov M.E.

#### Semi-analytical method for evaluating shielding effectiveness of an enclosure with an aperture

The paper presents a semi-analytical method for calculating the shielding effectiveness (SE) of an enclosure with an aperture filled with a dielectric or magnetic material. The method is based on a combination of quasi-static analysis of coplanar strip lines (CPS) and an analytical model of an enclosure equivalent circuit. A simulation of a CPS is reduced to solving a simple electrostatic problem and can be performed by any available numerical method. The SE calculation can be performed using any of the existing models of an enclosure equivalent circuit. In the range up to 1 GHz, a validation of the proposed method was carried out using a standardized enclosure  $300 \times 120 \times 300 \text{ mm}^3$  as an example. To show the capabilities of the method, the paper presents the results of SE for enclosures with a PVC ventilation grill and a glass in the aperture. Using this method in conjunction with a previously published analytical model, the SE calculations for the enclosure with a conducting plate were also performed. The results show that the proposed method has an acceptable accuracy, and the average value of the absolute error does not exceed 6.4 dB.

**Keywords:** shielding effectiveness, equivalent circuit method, quasi-static simulation.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2021-24-1-16-23

#### References

1. Dawson J., Marvin A.C., Robinson M.P., Flintoft I. On the meaning of enclosure shielding effectiveness. *Proceedings of IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. The Netherland, Amsterdam, 2018, pp. 746–751.

2. Li F., Han J., Zhang C. Study of the influence of PCB parameters on the shielding effectiveness of metal cavity with holes. *Proc. of IEEE International Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference*. China, Chengdu, 2019, pp. 1–5.

3. Thomas D.W.P., Denton A., Konefal T. et al. Model of the electromagnetic field inside a cuboidal enclosure populated with conducting planes or printed circuit boards. *IEEE*

- Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2001, vol. 43, no. 2, pp. 161–169.
4. Thomas D.W.P., Denton A., Konefal T. et al. Characterisation of the shielding effectiveness of populated equipment enclosures. *Proceedings of International Conference and Exhibition on Electromagnetic Compatibility*. USA, New York, 1999, pp. 1–6.
5. Konefal T., Dawson J., Marvin A.C. et al. A fast circuit model description of the shielding effectiveness of a box with imperfect gaskets or apertures covered by thin resistive sheet coatings. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2006, vol. 48, no. 1, pp. 134–144.
6. Solin J.R. Formula for the field excited in a cavity sealed by a plate backed with a conductive elastomer. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2016, vol. 58, no. 1, pp. 111–116.
7. 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, no. 2, pp. 274–283.
8. Nie B.L., Du P.A., Yu Y., Shi Z. Study of the shielding properties of enclosures with apertures at higher frequencies using the transmission line modeling method. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2010, vol. 53, no. 1, pp. 73–81.
9. Li M., Nuebel J., Drewniak J.L. et al. EMI from cavity modes of shielding enclosures-FDTD modeling and measurements. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2000, vol. 42, no. 1, pp. 29–38.
10. Gravelle L.B., Costache G.I. Finite element method applied to shielding performance of enclosures. *Proc. of IEEE International symposium on Electromagnetic Compatibility*. USA, Seattle, 1988, pp. 69–72.
11. Kuksenko S.P. *Metody optimalnogo proektirovaniya linejnyh antenn i poloskovykh struktur s uchetom jelektromagnitnoj sovmestimosti* [Methods of an optimum designs for linear antennas and stripline structures taking into account electromagnetic compatibility. Doctor thesis], Tomsk, Russia, 2019. 436 p. (in Russ.).
12. Hill D.A., Ma M.T., Ondrejka A.R. et al. Aperture excitation of electrically large, lossy cavities. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 1994, vol. 36, no. 3, pp. 169–178.
13. Robinson M.P., Benson T.M., Christopoulos C. et al. Analytical formulation for the shielding effectiveness of enclosures with apertures. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 1999, vol. 40, no. 3, pp. 240–248.
14. Konefal T., Dawson J., Marvin A.C. et al. A fast multiple mode intermediate level circuit model for the prediction of shielding effectiveness of a rectangular box containing a rectangular aperture. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2005, vol. 47, no. 4, pp. 678–691.
15. Solin J.R. Formula for the field excited in a rectangular cavity with a small aperture. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2011, vol. 53, no. 1, pp. 82–90.
16. Wallyn W., Zutter D.D., Laermans E. Fast shielding effectiveness prediction for realistic rectangular enclosures. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2003, vol. 45, no. 4, pp. 639–643.
17. Youngfang B., Yinghua L. Analysis for shielding effectiveness of infinite metal plate with arrayed apertures using semi-analytical FDTD. *Proceedings of Asia-pacific Conference on Environmental Electromagnetic*, China, Hangzhou, 2003, pp. 56–59.
18. Karcoon H., Parr S., Dickmann S., Rambousky R. Shielding effectiveness of screened rooms with line feed-throughs – a semi-analytical approach. *Proceedings of IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Germany, Dresden, 2015, pp. 312–316.
19. Inbavalli V.P., Venkatesh C., Suresh Kumar T.R. Calculation of shielding effectiveness of an enclosure with arbitrary shaped apertures using hybrid approach. *Proceedings of International Conference on Electromagnetic Interference and Compatibility*. India, Bengaluru, 2018, pp. 1–4.
20. Shim J., Kam D.G., Kwon J.H., Kim J. Circuitual modeling and measurement of shielding effectiveness against oblique incident plane wave on apertures in multiple sides of rectangular enclosure. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2010, vol. 52, no. 3, pp. 566–577.
21. Gupta K.C., Garg R., Bahl I.J. *Microstrip Lines and Slotlines*, 2nd ed. USA, Norwood: Artech House, 1996. 547 p.
22. Collin R.E. *Field Theory of Guided Waves*, 2nd ed. USA, Piscataway: IEEE Press, 1991. 859 p.
23. Mautz J.R., Harrington R.F., Hsu G.G. The inductance matrix of multiconductor transmission line in multiple magnetic media. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1988, vol. 36, no. 8, pp. 1293–1295.
24. Ivanov A.A., Komnatnov M.E. The analytical models review for metal enclosures shielding effectiveness estimating based on the equivalent circuit method. *System of Control, Communication and Security*, 2019, no. 2, pp. 110–142.
25. Gazizov T.R. Analytic expressions for MoM calculation of capacitance matrix of two-dimensional system of conductors and dielectrics having arbitrarily oriented boundaries. *Proc. of IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. Canada, Montreal, 2001, pp. 151–155.
26. Grover F.W. *Inductance calculations, working formulas and tables*. USA, NY, Mineola: Dover Publications, 1946. 286 p.
27. Finite element method magnetics: Home Page [Online]. Available: <http://www.femm.info/wiki/HomePage>. (Accessed: December 15, 2020).
28. Shi D., Shen Y., Gao Y. 3 high-order mode transmission line model of enclosure with off-center aperture. *Proceedings of IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. China, Qingdao, 2007, pp. 361–364.
29. Sadiku M.N.O. *Numerical Techniques in Electromagnetics with MATLAB*, 3rd ed. USA, FL, Boca Raton: CRC Press, 2009. 730 p.
30. Ivanov A.A., Komnatnov M.E., Gazizov T.R. Analytical model for evaluating shielding effectiveness of an enclosure populated with conducting plates. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2020, vol. 62, no. 5, pp. 2307–2310.

**Anton A. Ivanov**

Postgraduate student, Department of Television and Control  
Tomsk State University of Control Systems  
and Radioelectronics (TUSUR)  
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7-952-182-01-43  
Email: anton.ivvv@gmail.com

**Maxim E. Komnatnov**

Candidate of Science in Engineering,  
Senior Researcher, Associate Professor,  
Department of Television and Control, TUSUR  
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7-952-888-38-96  
Email: maxmek@mail.ru