

УДК 621.396.677.83

Обзор аналитических моделей для оценки эффективности экранирования металлических корпусов на основе метода эквивалентной цепи

Иванов А. А., Комнатнов М. Е.

Постановка задачи: Технические аспекты информационной безопасности непосредственно связаны с электромагнитной совместимостью радиоэлектронных средств (РЭС). Для ее обеспечения на практике широко применяется электромагнитное экранирование. В частности, для повышения помехозащищенности узлов, блоков и РЭС в целом используются металлические экранирующие корпуса. При проектировании РЭС для оценки эффективности экранирования (ЭЭ) предполагаемого корпуса разработчики часто прибегают к использованию численных методов, что требует значительных вычислительных затрат. Поэтому, на ранних этапах проектирования более предпочтительными оказываются аналитические методы оценки ЭЭ. Среди них широкое распространение, как наиболее универсальные, получили модели на основе метода эквивалентной цепи. **Цель данной работы** – систематизировать и представить существующие аналитические модели для вычисления ЭЭ прямоугольных и цилиндрических корпусов на основе метода эквивалентной цепи, а также сравнить результаты расчетов ЭЭ, полученных с помощью этих моделей и методом конечных элементов. **Результаты и их новизна:** В работе представлен обзор аналитических моделей на основе эквивалентной цепи корпуса, а также описан расчетно-экспериментальный метод для оценки ЭЭ без использования традиционных измерительных средств. Выполнено сравнение для 8 различных экранирующих конструкций. **Практическая значимость:** Результаты исследования могут быть полезны при проектировании РЭС, в том числе для аппаратных средств систем информационной безопасности и связи, а также при разработке новых подходов к вычислению ЭЭ типовых экранирующих конструкций.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, электромагнитное экранирование, экранирование корпусом, эффективность экранирования, помехозащищенность.

Актуальность

Одним из основных направлений обеспечения информационной безопасности является создание и внедрение радиоэлектронных средств (РЭС), изначально устойчивых к различным видам воздействий [1]. К таким воздействиям, в том числе относятся излучаемые электромагнитные помехи (ЭМП) искусственного и техногенного происхождения. Таким образом, технические аспекты информационной безопасности непосредственно связаны с электромагнитной совместимостью (ЭМС) технических средств [2, 3].

Для обеспечения ЭМС широко используется электромагнитное экранирование, позволяющее снизить восприимчивость чувствительных электрических цепей, узлов и блоков РЭС к излучаемым ЭМП. При проектировании РЭС ча-

Библиографическая ссылка на статью:

Иванов А. А., Комнатнов М. Е. Обзор аналитических моделей для оценки эффективности экранирования металлических корпусов на основе метода эквивалентной цепи // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 2. С. 110-142. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10206

Reference for citation:

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 (in Russian).

сто прибегают к использованию металлических экранирующих корпусов различных типов и конструкций. Частотная зависимость эффективности экранирования (ЭЭ) таких корпусов имеет множество резонансов, вызванных внутренними переотражениями от стенок и неоднородностей (печатных плат, электронных компонентов, крепежных элементов и пр.), расположенных внутри корпуса. Значительное влияние на ЭЭ корпуса также оказывают апертуры, находящиеся в его стенках. К ним относятся щели, вентиляционные и крепежные отверстия, производственные дефекты и пр.

Во избежание снижения помехозащищенности РЭС требуется тщательный анализ ЭЭ предполагаемого корпуса. Оценка его ЭЭ может быть получена с помощью численных или аналитических методов. Численные методы [4–10] позволяют получить значения ЭЭ для сложных и детализированных форм экранирующих конструкций, но их применение нецелесообразно на ранних этапах проектирования из-за требуемых значительных вычислительных затрат. Подходы, основанные на аналитических методах, являются более предпочтительными, поскольку с их помощью с приемлемой точностью возможно оценить ЭЭ предполагаемого корпуса и помехозащищенность технического средства или системы в целом, а также сократить время на их разработку [11–13]. Для прямоугольных корпусов известны аналитические методы, основанные на уравнении баланса мощностей [14], теории дифракции Бете [15–19], эквивалентной схеме волноводных мод [20, 21]. Известны методы для оценки ЭЭ однослойных [23, 24] и многослойных [25–27] цилиндрических корпусов. При этом наиболее широкое распространение получили аналитические модели на основе метода эквивалентной цепи корпуса [28]. Данные модели позволяют выполнить вычисления ЭЭ в различных точках наблюдения, для разных геометрических форм корпусов (с учётом их заполнения элементами РЭС) с различным положением, количеством и геометрической формой апертур. Модели на основе метода эквивалентной цепи являются наиболее простыми для понимания и программной реализации, что выделяет их среди прочих аналитических методов. Цель данной работы – систематизировать и представить существующие аналитические модели для вычисления ЭЭ прямоугольных и цилиндрических корпусов на основе метода эквивалентной цепи, а также сравнить результаты расчетов ЭЭ, полученных с помощью этих моделей и методом конечных элементов.

1. Прямоугольный экранирующий корпус

Метод эквивалентной цепи для вычисления ЭЭ прямоугольного корпуса с апертурой во фронтальной стенке, при падении на нее плоской электромагнитной волны (ПЭМВ), был предложен в [28]. На основании эквивалентности соотношения между амплитудами электрической и магнитной компонент ПЭМВ и законом Ома для участка цепи [29], в случае вертикальной поляризации ПЭМВ, ее источник (рис. 1) может быть заменен источником ЭДС амплитудой V_0 с внутренним сопротивлением Z_0 (рис. 2), равным волновому сопротивлению свободного пространства (120π Ом). В случае произвольного направления поляризации ПЭМВ напряжение V_0 может быть задано относительно плоскости,

образованной вектором Пойнтинга $\vec{\beta}$ и нормалью к фронтальной стенке, в виде ортогональных компонент [30]:

$$V_{0\perp} = V_0 \sin(\varphi), \quad (1)$$

$$V_{0\parallel} = V_0 \cos(\varphi), \quad (2)$$

где $V_{0\perp}, V_{0\parallel}$ – напряжения источника, эквивалентные перпендикулярной и параллельной компонентам вектора напряженности электрического поля \vec{E} , φ – угол между вектором \vec{E} и осью y на рис. 1.

Так как величина ЭЭ представляет собой отношение напряженностей поля в некоторой точке наблюдения на расстоянии p от фронтальной стенки корпуса (рис. 1) в его отсутствии и присутствии, то вычисление ЭЭ может быть сведено к расчету напряжения V_p или тока I_p в точке P эквивалентной цепи (рис. 2). В эквивалентной цепи корпус с размерами $a \times b \times d$, представлен в виде короткозамкнутого волновода, с характеристическим сопротивлением Z_g и постоянной распространения k_g . Поэтому для вычисления V_p и I_p цепь преобразуется с помощью типовых формул для вычисления входного сопротивления линии передачи (ЛП), а также теоремы Тевенина. При этом, фронтальная стенка размерами $a \times b$ и толщиной t , содержащая апертуру $w \times l$, может быть представлена в качестве комплексного сопротивления Z_{ap} . Вычисление Z_{ap} является основой при вычислении ЭЭ методом эквивалентной цепи. Большинство моделей различаются именно реализацией этих выражений для разных геометрических форм апертур, их положения и количества в стенке корпуса.

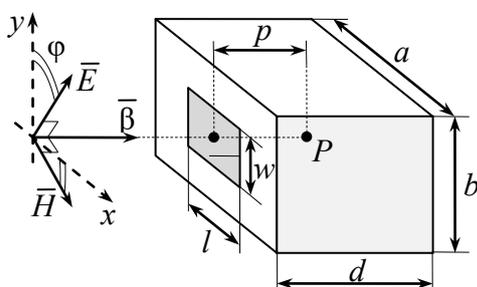


Рис. 1. Геометрическая модель корпуса с апертурой

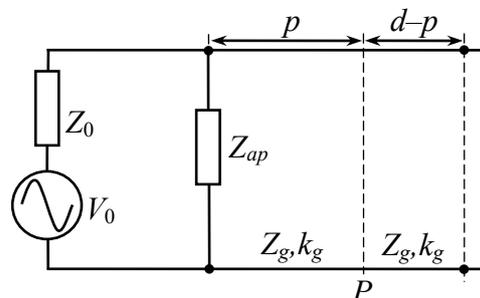


Рис. 2. Эквивалентная цепь для корпуса с апертурой

1.1. Одна апертура в стенке корпуса

Существует ряд подходов к вычислению сопротивления Z_{ap} фронтальной стенки с одной апертурой. Выбор способа вычисления в первую очередь зависит от положения апертуры, а также ее геометрической формы. Наиболее простой подход для корпуса с прямоугольной апертурой в центре фронтальной стенки предложен в [28]. Стенка представлена в виде отрезка короткозамкнутой копланарной линии передачи (ЛП) с характеристическим импедансом

$$Z_{0s} = 120\pi^2 \left[\ln \left(2 \frac{1 + \sqrt{1 - (w_e/b)^2}}{1 - \sqrt{1 - (w_e/b)^2}} \right) \right]^{-1}, \quad (3)$$

где эффективная ширина апертуры w_e при $w/d \leq 1/2\pi$ определяется как

$$w_e = w - \frac{5t}{4\pi} \left(1 + \ln \frac{4\pi w}{t} \right), \quad (4)$$

а при $w/d > 1/2\pi$ как [31]

$$w_e = w - \frac{5t}{4\pi} \left(1 + \ln \frac{2d}{t} \right). \quad (5)$$

Используя (3)–(5), сопротивление Z_{ap} фронтальной стенки с апертурой определяется как [28]

$$Z_{ap} = \frac{1}{2} \frac{l}{a} j Z_{0s} \operatorname{tg} \left(\frac{k_0 l}{2} \right), \quad (6)$$

где k_0 – постоянная распространения в свободном пространстве, l/a – корректирующий коэффициент или коэффициент связи между геометрическими размерами поперечных сечений апертуры и корпуса.

Для апертуры, смещенной по оси x координатной системы (рис. 3), отношение l/a в (6) может быть заменено на коэффициент [32]

$$C_m = \frac{\int_{x_0}^{x_0+l} \sin(\pi m x/a) \sin(\pi(x-x_0)/l) dx}{X}, \quad (7)$$

где m – целое неотрицательное число, соответствующее режиму распространения TE_{m0} в корпусе, X – положение центра и x_0 – координата начала апертуры по оси x (рис. 3).

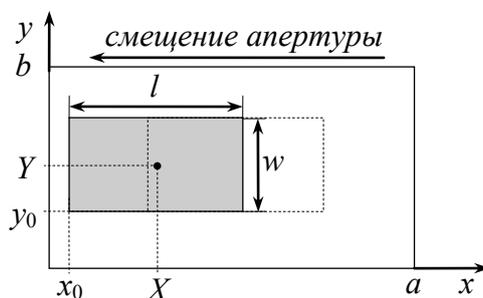


Рис. 3. Координатная система стенки с апертурой

Кроме того, если апертура смещена в одном из направлений координатной системы (например, как показано на рис. 3, апертура смещена влево по оси x), то сопротивление Z_{ap} может быть вычислено как [33]

$$Z_{ap} = Z_{ap1} Z_{ap2} / (Z_{ap1} + Z_{ap2}), \quad (8)$$

$$Z_{ap1} = j \frac{l}{a} Z_{0s} \operatorname{tg}(k_0 l C),$$

$$Z_{ap2} = j \frac{l}{a} Z_{0s} \operatorname{tg}[l(1-C)k_0],$$

где $C = X/a$ при смещении апертуры по оси x координатной системы (рис. 3) и $C = Y/b$ при смещении по оси y .

Для апертуры, расположенной произвольно во фронтальной стенке, с учетом проводящих свойств материала корпуса, (6) будет иметь вид [34]

$$Z_{ap} = \frac{1}{2} C_{mn} Z_{0s} \frac{Z_l + jZ_{0s} \operatorname{tg}(k_0 l / 2)}{Z_{0s} + jZ_l \operatorname{tg}(k_0 l / 2)}, \quad (9)$$

где C_{mn} – коэффициент произвольного положения апертуры, определяющийся как

$$C_{mn} = \frac{\int_{x_0}^{x_0+l} \int_{y_0}^{y_0+w} \cos\left(\frac{\pi n y}{b}\right) \cos\left(\frac{n \pi (y - y_0)}{w}\right) \sin\left(\frac{\pi m x}{a}\right) \sin\left(\frac{\pi (x - x_0)}{l}\right) dx dy}{XY},$$

где X, Y – координаты центра апертуры, y_0 – координата начала апертуры по оси y (рис. 3), m, n – целые неотрицательные числа, соответствующие режиму распространения TE_{mn} в корпусе.

Сопротивление Z_l в (9) определяет проводящие свойства материала и может быть вычислено как [34]

$$Z_l = (1 + j) \sqrt{\pi \mu f / \sigma},$$

где f – частота источника воздействия, σ – удельная проводимость и μ – магнитная проницаемость материала корпуса.

Для апертуры, смещенной в произвольное положение на фронтальной стенке, предложена модель в [35]. В отличие от [34], численное интегрирование не требуется, а сопротивление Z_{ap} определяется как произведение (6) и коэффициента

$$C_{ap mn} = \sin(m \pi X / a) \cos(n \pi Y / b). \quad (10)$$

Представление фронтальной стенки в виде копланарной ЛП не является единственно возможным. Так, в модели из [31], стенка корпуса с апертурой рассматривается в виде комбинации емкостной и индуктивной волноводных диафрагм (рис. 4). Такой метод позволяет располагать апертуру произвольно во фронтальной стенке корпуса. Сопротивление Z_{ap} может быть вычислено как

$$Z_{ap} = [2Y_L + Y_C]^{-1}, \quad (11)$$

где Y_C, Y_L – полные проводимости горизонтальной (емкостной) и вертикальной (индуктивной) диафрагм, которые определяются как [31]

$$Y_C = j \frac{2\gamma_{mn}^2 b}{\mu_0 \pi^2 f} \ln \left[\operatorname{cosec}(\pi Y / b) \operatorname{cosec}(\pi w / (2b)) \right],$$

$$Y_L = -j \left[\operatorname{cosec}^2(\pi X / a) \operatorname{cosec}^2(\pi l / 2a) - 1 \right] / (a \mu_0 f),$$

где

$$\gamma_{mn} = \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0 (\omega^2 - \omega_{mn}^2)},$$

$$\omega_{mn} = \sqrt{\frac{(m \pi / a)^2 + (n \pi / b)^2}{\mu_0 \varepsilon_0}},$$

$\omega=2\pi f$ – угловая частота, $\mu_0=4\pi \cdot 10^{-7}$ [Гн/м] – магнитная постоянная, $\varepsilon_0=10^7/(4\pi c^2)$ [Ф/м] – электрическая постоянная, c – скорость света в вакууме, ω_{mn} – резонансные частоты корпуса.

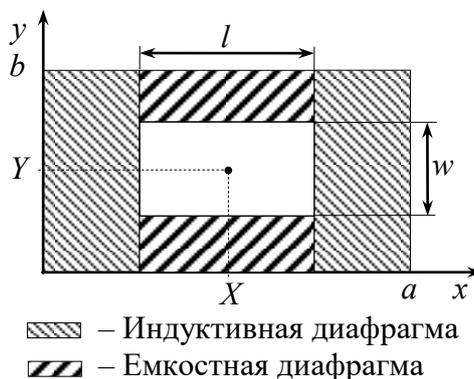


Рис. 4. Модель апертуры в виде комбинации волноводных диафрагм

Если фронтальная стенка содержит круглую апертуру, Z_{ap} может быть вычислено, с использованием одного из представленных выше подходов, при этом необходимо рассчитать размеры эквивалентной прямоугольной апертуры [36]:

$$l = w = d\sqrt{\pi}/2, \quad (12)$$

где d – диаметр круглой апертуры.

1.2 Группа апертур в стенке корпуса

Модель корпуса с одной апертурой является достаточно условной, так как реальные экранирующие корпуса РЭС могут содержать несколько апертур различных форм и размеров в одной стенке. В соответствии с [35, 36], при вычислениях ЭЭ корпуса с группой из N апертур во фронтальной стенке, сопротивления Z_{ap} должны быть рассчитаны для каждой апертуры отдельно, а затем просуммированы [35, 36]:

$$Z_{ap} = \sum_N Z_{apN}. \quad (13)$$

Важно отметить, что подобный подход игнорирует взаимную связь между апертурами и не может использоваться для корпусов с перфорированной стенкой, где апертуры расположены достаточно близко друг к другу. Однако существуют модели, которые применимы в таких случаях.

1.3. Перфорированная стенка корпуса

Для вычисления ЭЭ корпуса с фронтальной стенкой, перфорированной круглыми апертурами предложена модель [37]. Стенка представлена в виде бесконечно тонкой пластины с массивом круглых отверстий. В случае, когда диаметр одной апертуры d и расстояния между центрами апертур в массиве по вертикали d_v и горизонтали d_h (рис. 5) много меньше длины волны источника λ , сопротивление Z_{ap} может быть найдено как

$$Z_{ap} = l_a w_a [abY_{ah}]^{-1}, \quad (14)$$

где l_a , w_a – геометрические размеры массива апертур (рис. 5), Y_{ah} – проводимость перфорированной пластины, которая может быть вычислена как [37, 38]

$$Y_{ah} = -3j \frac{d_h d_v \lambda}{Z_0 \pi d^3}, \quad (15)$$

Геометрические размеры массива могут быть вычислены как

$$l_a = d_h/2 + (h-1)d_h + d_h/2, \\ w_a = d_v/2 + (v-1)d_v + d_v/2,$$

где h и v – число апертур в массиве по горизонтали и вертикали.

Выражения (14), (15) могут быть применены для корпуса с фронтальной стенкой, перфорированной квадратными апертурами $l=w=d_s$, при этом диаметр эквивалентной окружности [39]

$$d = \sqrt{2}d_s.$$

Также, вычисления ЭЭ могут быть выполнены для корпуса с фронтальной стенкой, перфорированной апертурами, смещенными в шахматном порядке на некоторый угол α (рис. 6) [39]. При этом расстояние между апертурами по вертикали определяется как

$$d_v = d_h \sin(\alpha).$$

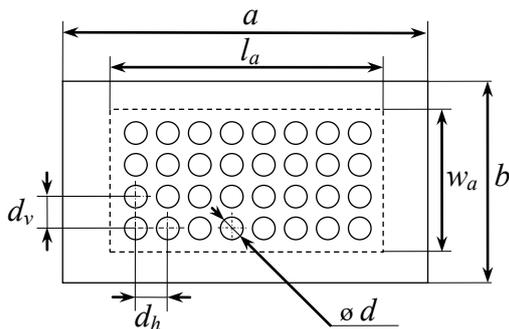


Рис. 5. Перфорированная фронтальная стенка корпуса

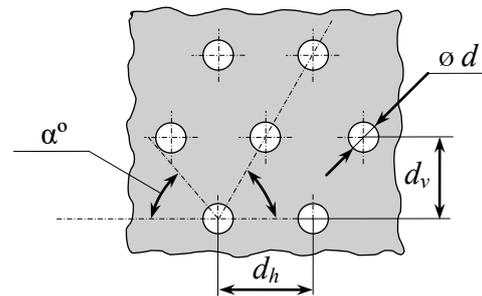


Рис. 6. Массив апертур со смещением рядов

При наклонном падении ПЭМВ под углом θ на стенку, перфорированную круглыми апертурами, сопротивление Z_{ap} может быть вычислено как [40]

$$Z_{ap} = Z_{ap}'' l_a w_a (ab)^{-1}, \quad (16)$$

где Z_{ap}'' определяется как

$$Z_{ap}'' = \frac{jZ_0}{2} \left[1 + \left(\frac{3d_h d_v \lambda}{16\pi(d/2)^3} \zeta \right) \right]^{-0,5} 10^{\frac{8t}{5d}},$$

где $\zeta=1/\cos(\theta)$ при вертикальной и $\zeta=\cos(\theta)$ при горизонтальной поляризации ПЭМВ, падающей на фронтальную стенку.

Такой подход, в отличие от [37], позволяет учитывать толщину t фронтальной стенки корпуса.

Для вычисления ЭЭ корпуса с фронтальной стенкой, перфорированной прямоугольными апертурами размером $x \times y$ предложен метод [41]. Модель перфорированной стенки получена с помощью численных методов. Представленные соотношения позволяют преобразовать массив в одну апертуру, имеющую такие геометрические размеры, при которых достигается согласование результатов вычисления ЭЭ. Для преобразования массива из N апертур необходимо введение коэффициента масштабирования

$$C_s = 1,283N^{-0,1407} - 0,2829. \quad (17)$$

Длина и ширина эквивалентной апертуры могут быть вычислены как

$$l = LC_s,$$

$$w = WC_s,$$

где $W=(S/\eta)^{0,5}$, $L=\eta W$, $S=xyN$, $\eta=x/y$, а для вычисления сопротивления Z_{ap} используется (6).

1.4 Преобразование источника в апертуру

Следующим шагом при вычислениях ЭЭ методом эквивалентной цепи является преобразование источника воздействия V_0 в апертуру в соответствии с теоремой Тевенина. Используя результаты вычисления Z_{ap} , напряжение V_1 и сопротивление Z_1 источника в апертуре определяются как [28]

$$V_1 = \frac{V_0 Z_{ap}}{Z_0 + Z_{ap}}, \quad (18)$$

$$Z_1 = \frac{Z_0 Z_{ap}}{Z_0 + Z_{ap}}. \quad (19)$$

Если фронтальная стенка корпуса имеет существенную толщину t , то напряжение и сопротивление источника могут быть вычислены как [42]

$$V_1 = V_0 \frac{Z_x}{Z_x + Z_0} \frac{Z_{22} \parallel 2Z_{ap}}{Z_{11} + (Z_{22} \parallel 2Z_{ap})},$$

$$Z_1 = \left[(Z_0 \parallel 2Z_{ap}) \parallel Z_{22} + Z_{11} \right] \parallel Z_{22} \parallel 2Z_{ap},$$

где оператор \parallel обозначает параллельное соединение двух сопротивлений,

$$Z_x = \left[(Z_{22} \parallel 2Z_{ap}) + Z_{11} \right] \parallel Z_{22} \parallel 2Z_{ap},$$

$$Z_{11} = j \sin(k_0 t) \xi Z_{0s} / b,$$

$$Z_{22} = -jctg(k_0 t/2) \xi Z_{0s} / b,$$

где ξ – наименьший из размеров апертуры ($\xi = w$, если $l \geq w$ и $\xi = l$, если $l \leq w$).

При произвольном направлении поляризации и наклонном падении ПЭМВ на фронтальную стенку [30] сопротивление источника в апертуре может быть вычислено как

$$Z_1 = \frac{Z_0 + jZ_{0s} \operatorname{tg}(k_0 t)}{Z_{0s} + jZ_0 \operatorname{tg}(k_0 t)}.$$

При этом, учитывая (1)–(2), ортогональные составляющие напряжения в апертуре V_1 определяется как

$$V_{1\perp} = T_{\perp} V_{1\perp},$$

$$V_{1\parallel} = T_{\parallel} V_{0\parallel},$$

где $V_{1\perp}, V_{1\parallel}$ – напряжения источника в апертуре, для перпендикулярной и параллельной компонент \vec{E} ,

$$T = 2Z_{t2} / (Z_{t2} + Z_{t1}),$$

$$Z_{t1} = Z_0 \cos(\theta),$$

$$Z_{t2\perp} = Z_{ap} / \cos(\theta_T),$$

$$Z_{t2\parallel} = Z_{ap} \cos(\theta_T),$$

$$\cos(\theta_T) = \sqrt{1 - \sin^2 \left(\theta \frac{\epsilon_0}{\epsilon_{ap}} \right)},$$

где θ – угол падения ПЭМВ (между плоскостью волнового фронта и нормалью к фронтальной стенке корпуса), $\epsilon_{ap} = \mu_0 / Z_{0s}^2$ [30].

Произвольное направление поляризации также может быть задано путем умножения (18) на $\sin(\varphi)$ для горизонтальной и $\cos(\varphi)$ для вертикальной составляющих ПЭМВ [33]. В этом случае, последующие преобразования эквивалентной цепи выполняются отдельно для двух ортогональных компонент.

1.5. Характеристический импеданс и постоянная распространения

Для преобразования источника в точку наблюдения P необходимо вычислить характеристический импеданс Z_g и постоянную распространения k_g в корпусе. В низкочастотном диапазоне воздействия (до частоты первого резонанса корпуса) или для электрически больших корпусов расчеты могут быть выполнены без учета высших типов волн. Так, при условии вертикальной поляризации ПЭМВ, в режиме возбуждения волн основного типа TE_{10} , Z_g и k_g определяются как [28]

$$Z_g = Z_0 / \sqrt{1 - (\lambda/2a)^2}, \quad (20)$$

$$k_g = k_0 \sqrt{1 - (\lambda/2a)^2}. \quad (21)$$

При вычислениях характеристического импеданса и постоянной распространения для горизонтальной составляющей ПЭМВ, поляризованной в произвольном направлении [33], переменная a в (20)–(21) должна быть заменена значением размера b узкой стенки корпуса.

Учитывая высшие типы волн TE_{mn} , (20)–(21) преобразуются к виду [34]

$$Z_{gmn} = Z_0 / \sqrt{1 - (\lambda m/2a)^2 - (\lambda n/2b)^2},$$

$$k_{gmn} = k_0 \sqrt{1 - (\lambda m/2a)^2 - (\lambda n/2b)^2}. \quad (22)$$

Для мод типа TM_{mn} постоянная распространения может быть вычислена, используя (22), а характеристический импеданс определяется как [34]

$$Z_{gmn} = Z_0 \sqrt{1 - (\lambda m / 2a)^2 - (\lambda n / 2b)^2}.$$

1.6. Преобразование источника в точку наблюдения

Используя результаты вычисления Z_g и k_g , источник воздействия преобразуется из апертуры в точку наблюдения P . Если точка наблюдения находится на оси, проходящей через центр корпуса перпендикулярно фронтальной стенке, напряжение источника может быть вычислено как [28]

$$V_2 = \frac{V_1}{\cos(k_g p) + j(Z_1 / Z_g) \sin(k_g p)}. \quad (23)$$

При этом, сопротивление источника в точке P определяется как [28]

$$Z_2 = \frac{Z_1 + jZ_g \operatorname{tg}(k_g p)}{1 + j(Z_1 / Z_g) \operatorname{tg}(k_g p)}.$$

1.7. Расчет сопротивления нагрузки

Выполнив преобразование источника в точку P , необходимо определить сопротивление нагрузки эквивалентной цепи. Физически, нагрузка представляет собой короткозамкнутый отрезок корпуса, находящийся за точкой наблюдения (рис. 1). Используя выражения для вычисления входного сопротивления ЛП, для идеально проводящих стенок корпуса сопротивление нагрузки может быть вычислено как [28]

$$Z_3 = jZ_g \operatorname{tg}(k_g (d - p)).$$

С учетом проводящих свойств материала корпуса, сопротивление нагрузки определяется как [34]

$$Z_3 = Z_g \frac{Z_l + jZ_g \operatorname{tg}(k_g (d - p))}{Z_g + jZ_l \operatorname{tg}(k_g (d - p))}.$$

1.8. Напряжение и ток в точке наблюдения

В результате выполненных преобразований, эквивалентная цепь корпуса (рис. 2) приводится к виду, представленному на рис. 7. На основе данной цепи, в требуемой точке наблюдения P могут быть рассчитаны напряжение V_p и ток I_p , необходимые для вычисления ЭЭ [28, 36]:

$$V_p = \frac{V_2 Z_3}{Z_2 + Z_3}, \quad (24)$$

$$I_p = \frac{V_2}{Z_2 + Z_3}. \quad (25)$$

С учетом высших типов волн TE_{mn} , напряжение в точке наблюдения может быть вычислено как [34]

$$V_p = \sum_{m=1}^m \sum_{n=0}^n V_{p mn}, \quad (26)$$

где число операций сложения определяется числом повторений вычислений от режима возбуждения волны основного типа до заданного TE_{mn} .

Учитывая моды TE_{mn} и TM_{mn} типов, напряжение в эквивалентной цепи на рис. 7 определяется как [34]

$$V_p = \sqrt{(V_p^{TE})^2 + (V_p^{TM})^2}, \quad (27)$$

где V_p^{TE} , V_p^{TM} – напряжения в точке наблюдения для мод TE_{mn} и TM_{mn} типов, соответственно.

В случае наклонного падения и произвольного направления поляризации ПЭМВ вычисления (24) выполняются для двух ортогональных компонент. При этом результирующее напряжение в точке наблюдения определяется как [30]

$$V_p = \sqrt{(V_{p\perp})^2 + (V_{p\parallel})^2}, \quad (28)$$

где $V_{p\perp}$ и $V_{p\parallel}$ – напряжения источника в апертуре, для перпендикулярной и параллельной компонент \vec{E} .

Выражения (26)–(28) также могут применяться для вычисления тока I_p в эквивалентной цепи на рис. 7 [40].

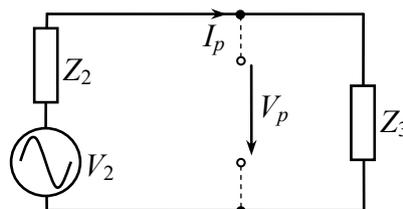


Рис. 7. Эквивалентная цепь после преобразований

1.9. Произвольная точка наблюдения внутри корпуса

Так как поле внутри корпуса имеет сложную структуру, то при проектировании РЭС целесообразно получение комплексной оценки ЭЭ в произвольных точках наблюдения. Такая оценка может оказаться полезной при выборе расположения узлов технического средства внутри экранирующего корпуса для обеспечения высокого уровня помехозащищенности РЭС в целом. Выражения, рассмотренные выше, позволяют вычислить ЭЭ в точке наблюдения, расположенной на оси, проходящей через центр корпуса, перпендикулярно фронтальной стенке.

Наиболее простой метод вычисления ЭЭ в точке наблюдения, смещенной по оси x координатной системы, в которой расположен корпус (рис. 8), предложен в [32]. При этом выражение (23) для вычисления напряжения V_2 заменяется выражением

$$V_2 = \frac{V_1}{\cos(k_g p_z) + j(Z_1/Z_g) \sin(k_g p_z) \sin(m\pi p_x/a)},$$

где p_x , p_z – координаты точки наблюдения вдоль осей x и z , соответственно.

В произвольной точке наблюдения Q внутри корпуса ЭЭ может быть вычислена с помощью преобразования напряжения (24). Для этого требуется введение дополнительных сопротивлений нагрузки, которые показаны на рис. 9. Если точка наблюдения смещена вдоль оси x , эти сопротивления обозначаются как Z_{4x} и Z_{5x} , в случае смещения по оси y – Z_{4y} и Z_{5y} [33]. При смещении точки наблюдения вдоль оси x (рис. 9) сопротивления Z_{4x} и Z_{5x} в случае $0 < q_x \leq p_x$ могут быть вычислены как

$$Z_{4x} = jZ_g \operatorname{tg}(k_g(p_x - q_x)),$$

$$Z_{5x} = jZ_g \operatorname{tg}(k_g q_x),$$

и при $p_x \leq q_x < a$ определяются как

$$Z_{4x} = jZ_g \operatorname{tg}(k_g(q_x - p_x)),$$

$$Z_{5x} = jZ_g \operatorname{tg}(k_g(a - q_x)),$$

где Z_g и k_g могут быть вычислены по выражениям (20)–(21) при замене переменной a на длину корпуса d .

Сопротивления Z_{4y} и Z_{5y} относительно точек p_y и q_y (рис. 9) вычисляются аналогичным способом. Напряжение и ток в произвольной точке Q определяются по (24)–(25). Если смещение точки наблюдения выполняется одновременно в направлениях x и y , то V_q вычисляется, используя (28).

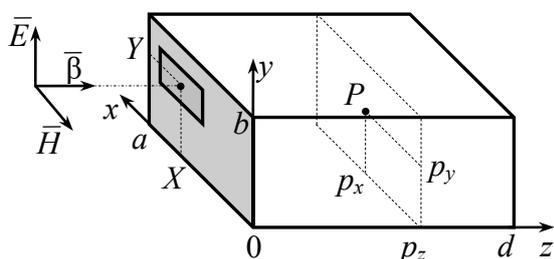


Рис. 8. Координатная система корпуса с апертурой

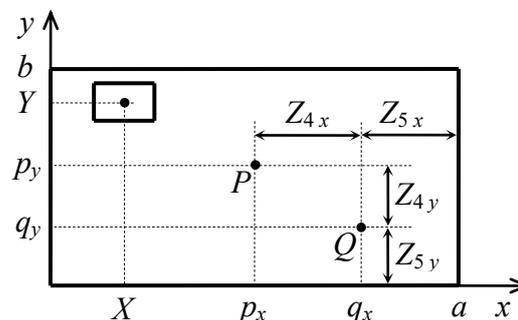


Рис. 9. Положение точек внутри корпуса в плоскости xu

Метод вычисления ЭЭ в произвольной точке Q внутри корпуса также предложен в [35]. При этом напряжения V_2 источника в точке наблюдения определяются для режимов возбуждения волн TE_{mn} и TM_{mn} отдельно:

$$V_2 = \frac{V_1 \sin(k_{gmn}(d - q_z))}{\cos(k_{gmn}d) + j(Z_1/Z_{gmn}^{TE}) \sin(k_{gmn}d)},$$

$$V_2' = \frac{V_1 \cos(k_{gmn}(d - q_z))}{\sin(k_{gmn}d) + j(Z_1/Z_{gmn}^{TM}) \cos(k_{gmn}d)},$$

где q_z – координата произвольной точки наблюдения по оси z (рис. 9), а верхние индексы TE и TM обозначают принадлежность характеристического импеданса Z_g к соответствующей моде.

Компоненты напряжения V_q в произвольной точке наблюдения для мод TE_{mn} определяются как

$$\begin{aligned} V_{q\ xmn}^{TE} &= -\frac{an}{bm} V_2 \cos(m\pi q_x/a) \sin(n\pi q_y/b), \\ V_{q\ ymn}^{TE} &= V_2 \sin(m\pi q_x/a) \cos(n\pi q_y/b), \\ V_{q\ zmn}^{TE} &= 0, \end{aligned}$$

где q_x, q_y – координаты произвольной точки наблюдения в направлении осей x и y координатной системы (рис. 9).

Компоненты напряжения в точке наблюдения для режима TM_{mn} определяются как

$$\begin{aligned} V_{q\ xmn}^{TM} &= \frac{bm}{an} V_2 \cos(m\pi q_x/a) \sin(n\pi q_y/b), \\ V_{q\ ymn}^{TM} &= V_{q\ ymn}^{TE}, \\ V_{q\ zmn}^{TM} &= -\frac{bk_{c\ mn}^2}{n\pi k_g} V_2' \sin(m\pi q_x/a) \cos(n\pi q_y/b), \end{aligned}$$

где волновое число $k_{c\ mn} = \sqrt{(m\pi/a)^2 + (n\pi/b)^2}$.

Результирующее напряжение в произвольной точке Q внутри корпуса может быть вычислено как

$$V_q = \sqrt{(V_{q\ x})^2 + (V_{q\ y})^2 + (V_{q\ z})^2}, \quad (29)$$

где компоненты напряжения $V_{q\ x}, V_{q\ y}, V_{q\ z}$ определяются в соответствии с (26)–(27).

1.10 Вычисление эффективности экранирования

Используя рассчитанные значения напряжения и тока в точке наблюдения, ЭЭ для электрической и магнитной составляющих поля может быть вычислена как [28, 36]

$$\text{ЭЭ}^E = -20 \lg |2V_p/V_0|, \quad (30)$$

$$\text{ЭЭ}^M = -20 \lg |2I_p Z_0/V_0|. \quad (31)$$

Для вычисления ЭЭ в произвольной точке, V_p и I_p заменяются на V_q и I_q , соответственно.

2. Корпус с апертурами на нескольких стенках

Для вычисления ЭЭ корпусом с апертурами на нескольких стенках (рис. 10) воздействующая ПЭМВ раскладывается на компоненты в сферической системе координат (рис. 11), откуда могут быть получены коэффициенты поляризации и наклонного падения ПЭМВ, используемые для вычисления напряжения в точке наблюдения [43]. При этом, корпус может быть представлен в виде двух эквивалентных схем (рис. 12) относительно плоскостей yz и xz (рис. 10). На рис. 11: θ – угол между вектором Пойнтинга $\vec{\beta}$ и осью z ; ψ – угол

между проекцией $\bar{\beta}$ на плоскость xu и плоскостью xz , φ – угол между вектором \bar{E} и плоскостью, образованной вектором $\bar{\beta}$ и осью z . Вектор \bar{E} может быть разложен на компоненты в координатной системе как [43]

$$\begin{aligned} \bar{E} &= \bar{x}[-\cos(\psi)\cos(\theta)\cos(\varphi) - \sin(\psi)\sin(\varphi)]E_0 + \\ &+ \bar{y}[-\sin(\psi)\cos(\theta)\cos(\varphi) - \cos(\psi)\sin(\varphi)]E_0 + \\ &+ \bar{z}[-\sin(\theta)\cos(\varphi)]E_0 = \\ &= \bar{x}F_{px}E_0 + \bar{y}F_{py}E_0 + \bar{z}F_{pz}E_0, \end{aligned}$$

где E_0 – модуль вектора \bar{E} , $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ – единичные векторы, F_{px}, F_{py} и F_{pz} – коэффициенты поляризации, необходимые для последующих вычислений.

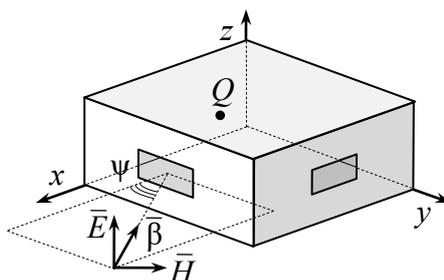


Рис. 10. Корпус с аперттурами на нескольких стенках

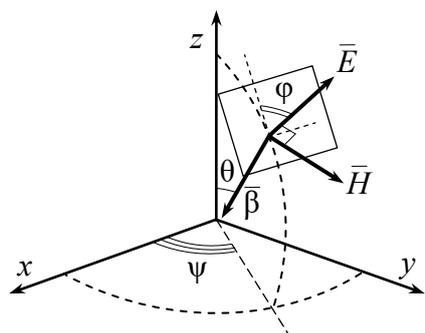


Рис. 11. ПЭМВ в сферических координатах

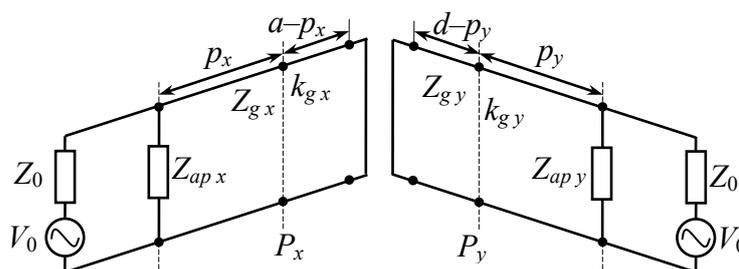


Рис. 12. Эквивалентная цепь для корпуса с аперттурами на нескольких стенках

При наклонном падении ПЭМВ $\bar{\beta}$ в сферических координатах представляется как [43]

$$\begin{aligned} \bar{\beta} &= \bar{x}[-\cos(\psi)\sin(\theta)]\beta_0 + \bar{y}[-\sin(\psi)\sin(\theta)]\beta_0 + \bar{z}[-\cos(\theta)]\beta_0 = \\ &= \bar{x}F_{ix}\beta_0 + \bar{y}F_{iy}\beta_0 + \bar{z}F_{iz}\beta_0, \end{aligned}$$

где β_0 – модуль вектора $\bar{\beta}$, а F_{ix}, F_{iy} и F_{iz} – коэффициенты наклонного падения ПЭМВ, необходимые для последующего вычисления напряжения в точке наблюдения.

В произвольной точке наблюдения Q внутри корпуса (рис. 10) ЭЭ может быть вычислена из напряжений V_{px}, V_{py} в точках P_x и P_y эквивалентной схемы (рис. 11). V_{px} и V_{py} рассчитываются, используя (24), а затем преобразуются, учитывая высшие типы волн и корректирующие коэффициенты. Так, напряже-

ние в эквивалентной цепи относительно плоскости xz может быть вычислено как

$$V_{p\ xz} = \sum_{m=1}^m \sum_{n=0}^n F_{p\ z} F_{i\ x} F_{xz\ mn}^{TE} V_{p\ xmn},$$

где корректирующий коэффициент для волн TE типа относительно плоскости xz определяется как

$$F_{xz\ mn}^{TE} = \sin(m\pi p_y/d) \cos(n\pi p_z/b).$$

Далее, напряжения $V_{p\ xz}$ и $V_{p\ yz}$ суммируются для получения компоненты $V_{q\ z}$ напряжения в произвольной точке наблюдения Q . Вычисления, рассмотренные выше, повторяются для получения x и y составляющих напряжения в точке Q . После этого, результирующее напряжение в произвольной точке наблюдения определяется, согласно (29), а ЭЭ может быть вычислена с помощью (30)–(31).

3. Корпус с заполнением

Существенное влияние на ЭЭ оказывают неоднородности, расположенные внутри корпуса. К таким неоднородностям относятся элементы РЭС, содержащие диэлектрические и проводящие слои, например печатные платы (ПП). Для вычисления ЭЭ корпуса с апертурой, покрытой диэлектриком с внутренней стороны предложена модель [44]. При расчете сопротивления Z_{ap} используется характеристический импеданс щелевой ЛП. Проводник, частично покрывающий обратную сторону ЛП, рассматривается как емкостная диафрагма (рис. 13). Характеристическое сопротивление щелевой ЛП определяется как [44, 45]

$$Z_{0s} = Z_0 \frac{u_{ph}}{u_g} \frac{\pi}{\tau} \frac{\Delta\tau}{\Delta(Z_0 Y_t)}, \quad (32)$$

$$Z_0 Y_t = \frac{l}{2a} \left[-v + g \operatorname{tg} \left(\frac{\zeta \pi g}{l\tau} - \operatorname{ctg}(v/g) \right) \right] + \frac{1}{\tau} \left(\frac{\epsilon_r + 1}{2} - \tau^2 \right) \ln \left(\frac{2}{\pi \delta} \right). \quad (33)$$

где $Z_0 Y_t$ – нормированная проводимость щелевой ЛП, u_g – групповая скорость, u_{ph} – фазовая скорость, $\tau = \lambda/2l$ (l – длина апертуры), $v = \sqrt{\tau^2 - 1}$, ϵ_r – относительная диэлектрическая проницаемость подложки щелевой ЛП, $g = \sqrt{\epsilon_r - \tau^2}$, $\delta = w/b$, ζ – толщина диэлектрического слоя, покрывающего апертуру. В формуле (32) приращение $\Delta(Z_0 Y_t)$ вычисляется из (33) при постоянных значениях ϵ_r , δ , ζ , a и минимальном приращении $\Delta\tau = \tau_1 - \tau_2$ ($\tau_2 < \tau < \tau_1$), при котором значение $Z_0 Y_t$ стремится к нулю, что соответствует вычислению сопротивления Z_{0s} на резонансной частоте щелевой ЛП. Точное значение величины Z_{0s} может быть получено посредством итерационного решения. Более подробно процедура вычисления характеристического сопротивления щелевой ЛП и вывод выражений (32), (33) рассмотрены в [45].

Сопротивление Z_{ap} может быть вычислено, используя (6), а напряжение и сопротивление источника в апертуре с учетом реактивного сопротивления jB емкостной диафрагмы (рис. 14) определяются как [44]

$$V_1 = V_0 \frac{jBZ_{ap}}{Z_0Z_{ap} + jB(Z_0 + Z_{ap})},$$

$$Z_1 = Z_0 \frac{jBZ_{ap}}{Z_0Z_{ap} + jB(Z_0 + Z_{ap})}.$$

Модель из [44] может использоваться для оценки ЭЭ корпуса с апертурой, при помещении в нее жидкокристаллического дисплея или других компонентов РЭС, содержащих диэлектрические и проводящие слои.

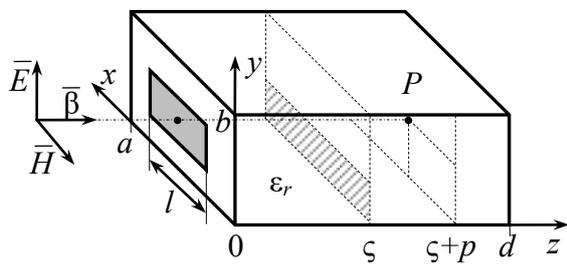


Рис. 13. Модель корпуса с апертурой, покрытой диэлектриком

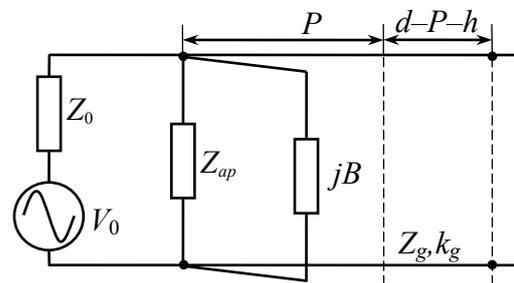


Рис. 14. Эквивалентная цепь корпуса с апертурой, покрытой диэлектриком

Модель для вычисления ЭЭ корпуса с наполнением в виде ПП предложена в [46]. В качестве эквивалента ПП используются проводящие пластины. Рассеяние поля проводящей пластиной, согласно [46], может быть описано путем введения дополнительного сопротивления Z_{gp} в эквивалентную схему корпуса (рис. 15).

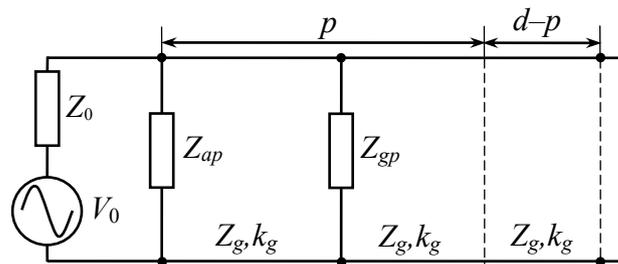


Рис. 15. Эквивалентная цепь корпуса с ПП

Сопротивление проводящей пластины определяется как [46]

$$Z_{gp} = -\frac{Z_{g1}}{2} \left(1 + \frac{1}{S_{11}} \right),$$

где S_{11} – коэффициент отражения от проводящей пластины и

$$Z_{g1} = \frac{j\omega\mu_0}{\Gamma_1}.$$

где Γ_1 – комплексная постоянная распространения для прямоугольной пластины.

Для последующих вычислений используются тензорные функции Грина и численное интегрирование. Модель включает в себя существенный объем выражений, которые в данной работе не приводятся. При этом вычисление ЭЭ выполняется в соответствии с выражениями, рассмотренными ранее.

4. Цилиндрический экранирующий корпус

Метод эквивалентной цепи может быть применен для оценки ЭЭ цилиндрических корпусов с апертурой в торцевой стенке (рис. 16) [47]. При этом, эквивалентная цепь цилиндрического корпуса аналогична представленной в [28] (рис. 2). Для вычисления ЭЭ характеристический импеданс и постоянная распространения в корпусе должны быть заменены на

$$Z_{gmn} = Z_0 / \sqrt{1 - (\lambda/\lambda_{cmn})^2},$$

$$k_{gmn} = k_0 / \sqrt{1 - (\lambda/\lambda_{cmn})^2},$$

где критическая длина волны для цилиндрического корпуса определяется как

$$\lambda_{cmn} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\chi_{mn}}{2\pi R}\right)^2 + \left(\frac{i}{2l}\right)^2}},$$

где i – целые неотрицательные числа, соответствующие числу полуволн, укладываемых вдоль длины d корпуса; χ_{mn} – n -й корень уравнений $J'_m(\alpha_{mn})=0$ (для TE_{mn} мод) и $J_m(\alpha_{mn})=0$ (для TM_{mn} мод), где $J_m(\alpha_{mn})$ – функция Бесселя m -го порядка (значения корней приведены в таблице 1).

Преобразование эквивалентной цепи и вычисление ЭЭ выполняется в соответствии с выражениями, представленными в подразделах 1.6–1.8, 1.10.

Таблица 1 – Корни функции Бесселя m -го порядка

Мода	χ_{mn}	Мода	χ_{mn}	Мода	χ_{mn}	Мода	χ_{mn}
TE_{11}	1,841	TE_{22}	6,706	TM_{10}	2,405	TM_{12}	7,016
TE_{21}	3,054	TE_{02}	7,016	TM_{11}	3,832	TM_{22}	8,417
TE_{01}	3,832	TE_{32}	8,015	TM_{21}	5,135	TM_{03}	8,650
TE_{31}	4,201	TE_{13}	8,536	TM_{02}	5,520	TM_{32}	9,76
TE_{12}	5,331	TE_{23}	9,969	TM_{31}	6,380	TM_{13}	10,173

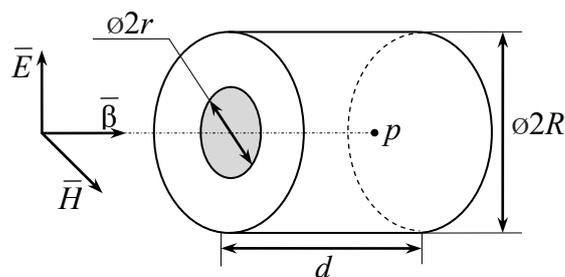


Рис. 16. Цилиндрический корпус с апертурой при падении на нее ПЭМВ

5. Метод вычисления ЭЭ на основе измерения S -параметров

Развитие аналитических моделей, основанных на методе эквивалентной цепи [28], впоследствии привело к возникновению расчетно-экспериментального метода оценки ЭЭ прямоугольных корпусов. Экспериментальной частью метода является измерение S -параметров [48, 49] полосковой линии, расположенной непосредственно над апертурой корпуса. Далее, для расчета ЭЭ используются выражения, представленные в подразделах 1.4–1.10. Данный метод отличается от традиционных способов [50, 51] измерений ЭЭ корпусов и предполагает оценку ЭЭ без использования дорогостоящих измерительных установок (например, безэховой камеры, антенн, усилителя мощности, датчика поля, генератора и прочего), и может быть полезным для быстрой оценки ЭЭ на предварительных стадиях проектирования РЭС. Полезным метод видится для оценки ЭЭ корпусов, геометрически малых размеров (например, экранирующих корпусов и кожухов соединителей), в которые невозможно поместить датчик поля [6, 7].

Измерения S -параметров выполняют при помощи полосковой линии, закрепленной над апертурой, при этом фронтальная стенка представляет собой опорную плоскость (рис. 17). К линии присоединяются коаксиальные соединители для подключения векторного анализатора цепей или измерителя модуля коэффициента передачи и отражения. При проведении измерений полосковая линия должна быть установлена так, чтобы обеспечить минимальный коэффициент отражения от согласованной нагрузки 50 Ом. Для этого измерения коэффициента отражения $|S_{11}|$ выполняются на стенке корпуса без апертур, а положение линии корректируется с помощью прокладок с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r \approx 1$.

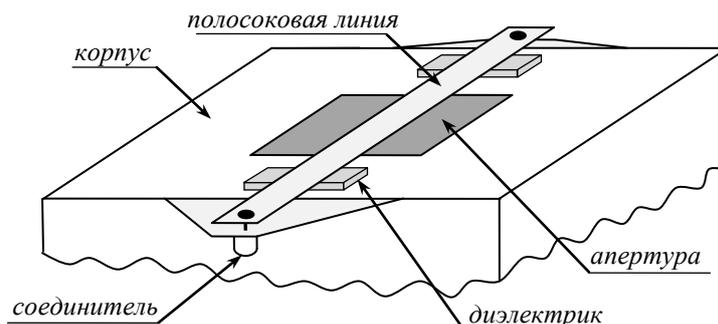


Рис. 17. Фронтальная стенка корпуса с полосковой линией

Используя результаты измерения $|S_{11}|$ (в дБ) для корпуса с апертурой, сопротивление Z_{ap} фронтальной стенки может быть вычислено как [52]

$$Z_{ap} = \frac{Z_{sc} Z}{Z_{sc} - Z}, \quad (34)$$

где

$$Z_{sc} = jZ_g \operatorname{tg}(k_g d),$$

$$Z = \frac{2Z_{in} S_{11}}{1 - S_{11}},$$

где Z_{in} – входное сопротивление векторного анализатора цепей (50 Ом), а Z_g и k_g могут быть вычислены, используя (20)–(21).

Если корпус содержит одну прямоугольную апертуру в центре фронтальной стенки, ЭЭ может быть вычислена по выражениям из [28], используя (34). Если апертура имеет произвольную форму, то измерения $|S_{11}|$ выполняются дважды, изменяя положение полосковой линии [53]. При этом вычисления ЭЭ выполняются для двух ортогональных компонент, а напряжение V_p в точке наблюдения внутри корпуса определяется, используя (28). Для корпуса с апертурой в произвольном положении на фронтальной стенке вычисления выполняются в соответствии с [42], при этом выражение (34) должно быть умножено на коэффициент (10) [54]. Для оценки ЭЭ корпусом с апертурами на нескольких стенках, необходимо измерить $|S_{11}|$ для каждой из апертур, а вычисления ЭЭ выполняются, используя выражения из [43].

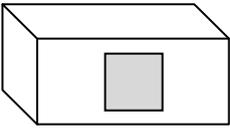
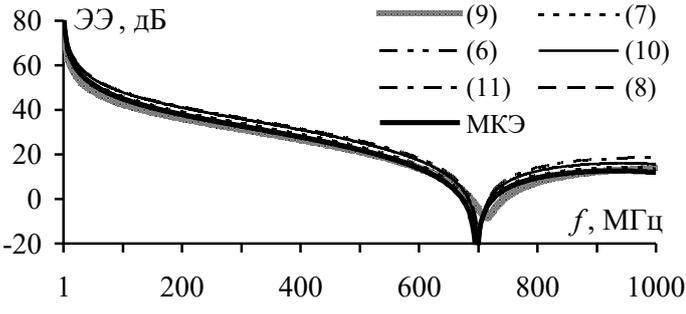
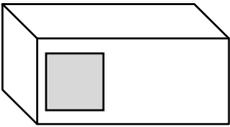
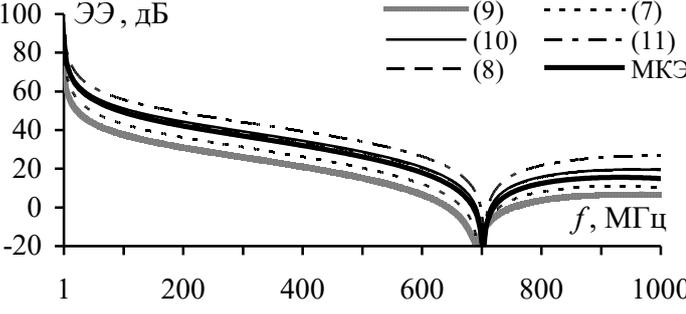
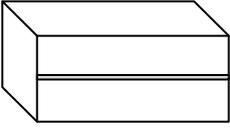
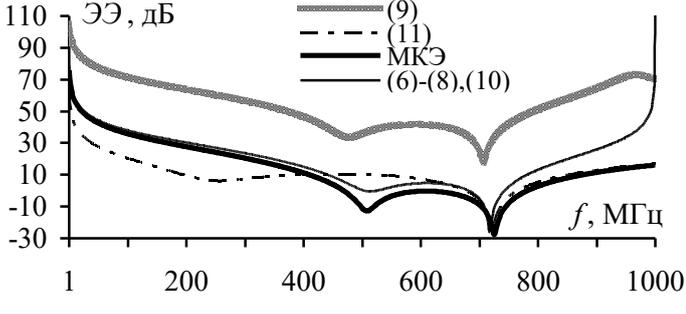
6. Сравнение аналитических моделей

Как было сказано выше, выбор метода вычисления ЭЭ в первую очередь зависит от геометрических размеров апертур, их количества и положения в корпусе. Однако некоторые из представленных выражений обладают схожими возможностями. Поэтому целесообразно представить результаты их сравнения для различных типовых экранирующих конструкций, что может быть полезно для практического применения рассмотренных методов при проектировании РЭС.

Результаты вычисления ЭЭ прямоугольного корпуса с одной апертурой представлены в таблице 2. Вычисления выполнялись в точке наблюдения $P=150$ мм в центре корпуса размерами $300 \times 120 \times 300$ мм³. Рассмотрены три случая: апертура 80×80 мм² в центре фронтальной стенки, апертура 80×80 мм² слева, а также корпус со щелью 1 мм вдоль фронтальной стенки. Частотные зависимости ЭЭ для данных структур также получены с помощью численного метода конечных элементов (МКЭ). Из таблицы 2 видно, что в случае расположения апертуры в центре фронтальной стенки частотные зависимости согласуются лучше всего. Отличие результатов, полученных аналитическими методами и МКЭ, составляет не более 10 дБ. При смещении апертуры влево ($X=70$ мм, $Y=60$ мм) наблюдается расхождение частотных зависимостей. При этом наилучшим образом с МКЭ согласуются результаты, полученные с помощью (8) и (10). Для данных частотных зависимостей среднее значение абсолютной

погрешности относительно МКЭ составило 2,8 дБ (8) и 2,4 дБ (10), соответственно. Таким образом, так как (8), (10) позволяют выполнить вычисления ЭЭ корпуса с апертурой в произвольном положении на фронтальной стенке, их можно считать наиболее подходящими для применения к аналогичным экранирующим конструкциям.

Таблица 2 – Сравнение частотных зависимостей ЭЭ корпуса с одной апертурой, полученных аналитическими моделями и МКЭ

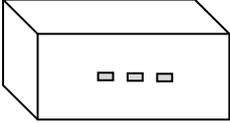
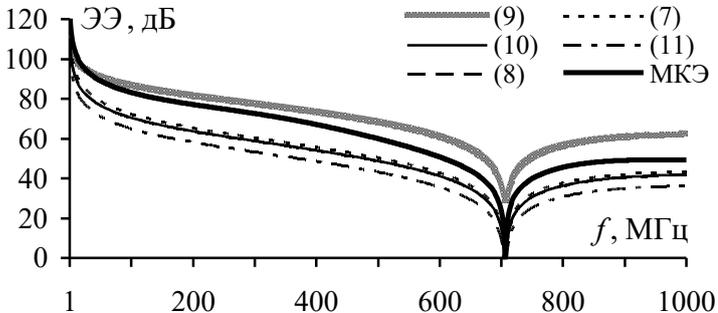
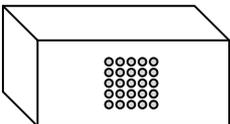
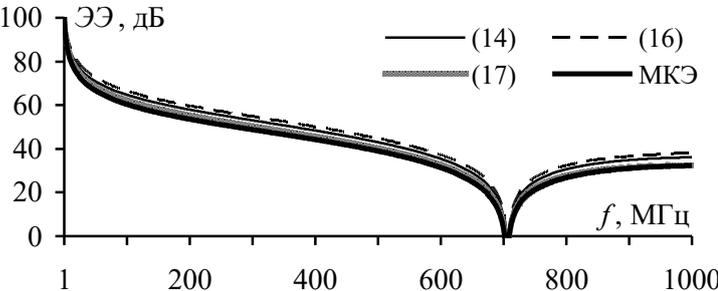
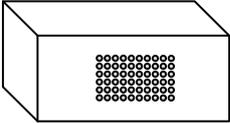
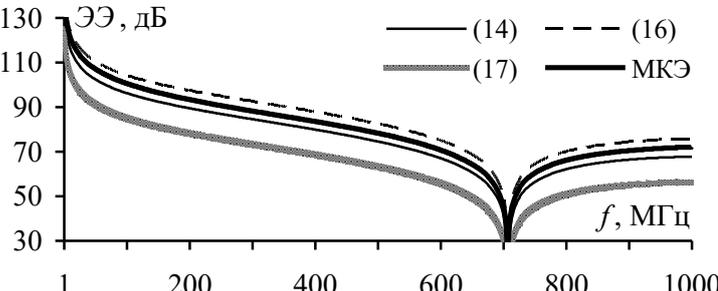
Модель корпуса	Размеры апертуры, мм	Частотные зависимости ЭЭ корпуса, дБ
 Апертура в центре	$X=150$ $Y=60$ $w=80$ $l=80$	
 Апертура слева	$X=70$ $Y=60$ $w=80$ $l=80$	
 Корпус со щелью	$X=150$ $Y=60$ $w=1$ $l=300$	

Результаты вычисления ЭЭ корпуса со щелью 1 мм также приведены в таблице 2. Частотные зависимости ЭЭ, вычисленные, используя выражения (6)–(8), (11), сходятся во всем частотном диапазоне и хорошо согласуются с результатами, полученными МКЭ, до частоты первого резонанса корпуса. На частоте 1 ГГц, соответствующей второму резонансу щели, значение ЭЭ ошибочно обращается в бесконечность. Таким образом, данные модели демонстрируют некорректные результаты для подобных экранирующих конструкций, что связано со способом вычисления сопротивления апертуры. Частотные зависимости, полученные МКЭ и (9), имеют идентичное поведение, но максимальная разность

значений достигает 60 дБ в диапазоне 950–980 МГц, а на частотной зависимости, полученной с помощью (11), резонанс щели сдвинут на частоту 250 МГц, вместо 500 МГц. Таким образом, чтобы получить более объективную оценку ЭЭ корпуса со щелью целесообразно до частоты первого резонанса корпуса применять модель (9), а после данной частоты – (11).

Также, сравнение частотных зависимостей ЭЭ, полученных аналитическими моделями и МКЭ, выполнено для прямоугольного корпуса $300 \times 120 \times 300$ мм³ с группой и массивами апертур. Полученные результаты представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Сравнение частотных зависимостей ЭЭ корпуса с группой или массивом апертур, полученных аналитическими моделями и МКЭ

Модель корпуса	Размеры апертуры, мм	Частотные зависимости ЭЭ корпуса, дБ
 Группа из трех апертур	$Y=60$ $X_1=100$ $X_2=150$ $X_3=200$ $w=10$ $l=20$	
 Массив апертур 5×5	$d=18$ $d_v=20$ $d_h=20$	
 Массив апертур 6×10	$d=4$ $d_v=6$ $d_h=6$	

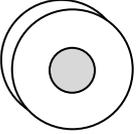
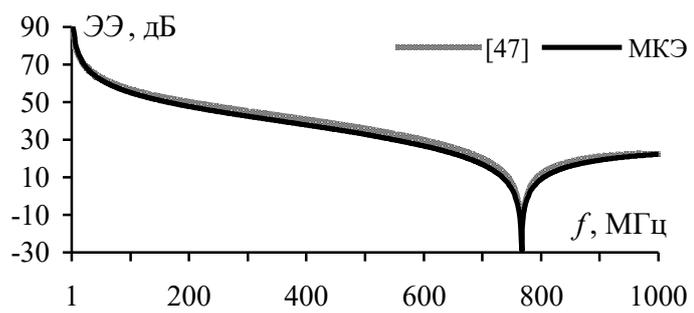
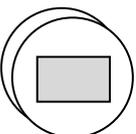
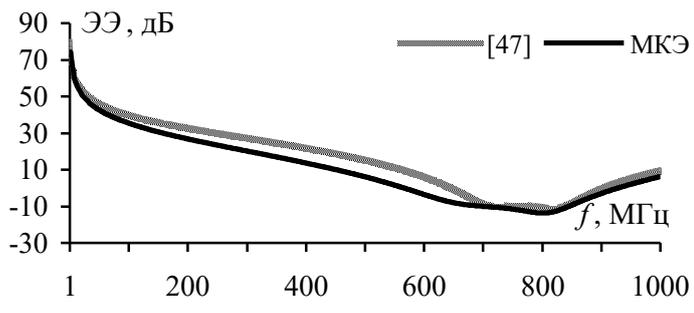
Рассматривались три структуры: корпус с группой из трех апертур 10×20 мм² (положения центров апертур приведены в таблице 3), корпус с массивом 5×5 апертур диаметром 18 мм, а также корпус с массивом 6×10 апертур диаметром 4 мм (расстояния между апертурами в массиве также приведены в таблице 3). Из таблицы 3 видно, что для корпуса с группой апертур наилучшим

образом с МКЭ согласуются результаты, полученные, используя выражения (9) и (7). Среднее значение абсолютной погрешности результатов ЭЭ составило 7,8 дБ (для частотной зависимости (9)) и 9,4 дБ (для частотной зависимости (7)), при этом максимальное отличие значений ЭЭ не превышает 12,4 дБ.

Частотные зависимости ЭЭ корпуса с массивом 5×5 апертур, вычисленные с помощью аналитических моделей, согласуются с результатами, полученными МКЭ. Отличие составляет не более 8 дБ. Наилучшим образом с МКЭ согласуется частотная зависимость, полученная с помощью (17), при этом среднее значение абсолютной погрешности составляет 0,9 дБ. Для корпуса с массивом 6×10 апертур наблюдается большее расхождение частотных зависимостей ЭЭ. Максимальное отличие результатов, полученных (17) и МКЭ, составляет 16,6 дБ. Лучше всего с МКЭ согласуются частотные зависимости, полученные с помощью (14) и (16), при этом отличие не превышает 5 дБ. Таким образом, если массив состоит из апертур небольших размеров, целесообразно применение (14) и (16). В случае, когда массив состоит из крупных апертур, оптимальной является модель (17).

Используя модель [47] и МКЭ выполнены вычисления ЭЭ цилиндрического корпуса $R=150$ мм, $d=300$ мм с толщиной стенок $t=1$ мм. Рассмотрены два случая: корпус с круглой апертурой $r=40$ мм в центре торцевой стенки и корпус с прямоугольной апертурой размерами 80×200 мм². Вычисления выполнялись в точке наблюдения P в центре корпуса. Полученные результаты приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Сравнение частотных зависимостей ЭЭ цилиндрического корпуса с апертурой, полученных аналитическими моделями и МКЭ

Модель корпуса	Размеры апертуры, мм	Частотные зависимости ЭЭ корпуса, дБ
 Круглая апертура	$r=40$	
 Прямоугольная апертура	$w=80$ $l=200$	

Видно, что результаты ЭЭ, полученные для корпуса с круглой апертурой, хорошо согласуются. Среднее значение абсолютной погрешности для частотной зависимости, полученной с помощью [47], составило 2,2 дБ. На частотной зависимости ЭЭ, полученной посредством МКЭ для корпуса с апертурой 80×200 мм², происходит наложение резонансов апертуры и корпуса. Из-за этого в диапазоне частот 660–840 МГц ЭЭ принимает отрицательные значения. При этом зависимость ЭЭ, вычисленная методом [47], хорошо согласуется с результатами, полученными с помощью МКЭ: максимальное расхождение составляет 9,5 дБ, а среднее значение абсолютной погрешности 5,1 дБ. Таким образом, метод эквивалентной цепи может также применяться для оценки ЭЭ цилиндрических корпусов с апертурой.

Выводы

Представлен обзор современного состояния исследований в области аналитических методов вычисления ЭЭ цилиндрических и прямоугольных экранирующих корпусов. Приведены математические модели экранирующих конструкций на основе метода эквивалентной цепи, позволяющие описать поведение ЭЭ в зависимости от геометрической формы, структуры экрана, источника воздействия, а также наличия апертур и неоднородностей внутри корпуса. Представлен расчетно-экспериментальный метод для оценки ЭЭ корпусов на основе измерения *S*-параметров, обладающий рядом преимуществ в сравнении с традиционными методами измерения ЭЭ. Выполнено сравнение частотных зависимостей ЭЭ, полученных аналитическими методами и МКЭ, для прямоугольных и цилиндрических экранирующих корпусов. На основе результатов сравнения представлены рекомендации по применению рассмотренных аналитических моделей для корпусов различных конструкций.

Результаты данной работы могут быть полезны техническим специалистам при проектировании РЭС (в том числе для аппаратных средств систем информационной безопасности и связи) с учетом ЭМС, а также для разработки новых подходов к вычислению ЭЭ типовых экранирующих структур с помощью метода эквивалентной цепи.

Благодарности

Авторы благодарят А.А. Волкова за ценные замечания, благодаря которым данная статья была значительно улучшена.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по проекту RFMEFI57417X0172.

Литература

1. Об утверждении Доктрины информационной безопасности Российской Федерации. Указ Президента РФ от 5 декабря 2016 г. № 646 // Собрание законодательства РФ от 12 декабря 2016 г. № 50 ст. 7074.
2. Акбашев Б. Б. Информационная безопасность специальных технических зданий при электромагнитных воздействиях: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – М.: МИЭМ, 2009. – 37 с.

3. Акбашев Б. Б., Балюк Н. В., Кечиев Л. Н. Защита объектов телекоммуникаций от электромагнитных воздействий. – М.: Грифон, 2014. – 472 с.

4. Газизов Т. Р. Электромагнитная совместимость и безопасность радиоэлектронной аппаратуры: учебное пособие. – Томск: «ТМЛ-Пресс», 2007. – 256 с.

5. Комнатнов М. Е., Газизов Т. Р., Дементьев А. С. Моделирование эффективности экранирования металлической пластиной для бортовой аппаратуры космического аппарата // Доклады томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2011. № 24. Т. 1. С. 133-136.

6. Комнатнов М. Е., Газизов Т. Р. Оценка эффективности экранирования корпуса соединителя бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата // Авиакосмическое приборостроение. 2013. № 4. С. 37–42.

7. Комнатнов М. Е., Газизов Т. Р., Дементьев А. С. Эффективность экранирования унифицированных электронных модулей // Известия высших учебных заведений. Физика. 2012. № 7. Т. 55. С. 89–92.

8. Jiao C., Li L., Cui X., Li H. Subcell FDTD analysis of shielding effectiveness of a thin-walled enclosure with an aperture // IEEE Transactions on magnetics. 2006. Vol. 42. № 4. P. 1075–1078.

9. Fedeli D., Gradoni G., Maglie. F. Primiani V. M. Evaluation of equipment-level enclosure shielding properties in a reverberation chamber: Numerical and experimental analysis // Proceedings of IEEE international symposium on electromagnetic compatibility (Detroit, USA, 18-22 August 2008). – Detroit, 2008. – P. 1–6.

10. Audone B., Balma M. Shielding effectiveness of apertures in rectangular cavities // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. 1989. Vol. 31. № 1. P. 102–106.

11. 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. № 2. P. 274–283.

12. Kraft C. H. Modeling leakage through finite apertures with TLM // Proceedings of IEEE symposium on electromagnetic compatibility (Chicago, USA, 22-26 August 1994). – Chicago, 1994. – P. 73–76.

13. Nie B. L., Du P. A., Yu Y. T., 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. 2011. Vol. 53. № 1. P. 73–81.

14. Feng C., Shen Z. A hybrid FD-MoM technique for predicting shielding effectiveness of metallic enclosures with apertures // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. 2005. Vol. 47. № 3. P. 456–462.

15. Hill D. A., Ma M. T., Ondrejka A. R., Riddle B. F., Crawford M. L., Johnk R. T. Aperture excitation of electrically large lossy cavities // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. 1994. Vol. 36. № 3. P. 169–178.

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

17. Solin J. R. Formula for the field excited in a rectangular cavity with an electrically large aperture // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. 2012. Vol. 54. № 1. P. 188–192.

18. Solin J. R. Corrections to “Formula for the field excited in a rectangular cavity with an electrically large aperture” // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. 2013. Vol. 55. № 6. P. 1369.

19. Solin J. R. Formula for the field excited in a rectangular cavity with an aperture and lossy walls // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. 2015. Vol. 57. № 2. P. 203–209.

20. 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. № 1. P. 111–116.

21. Konefal T. A., Dawson J. F., Marvin A. C., Robinson M. P., Porter S. J. 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. № 4. P. 678–691.

22. Konefal T. A., Dawson J. F., Marvin A. C., Robinson M. P., Porter S. J. 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. № 1. P. 134–144.

23. Wu T. K., Tsai L. L. Shielding properties of thick conducting cylindrical shells with an obliquely incident plane wave // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. 1975. Vol. EMC-17. № 3. P. 189–191.

24. Rashid A. A mathematical method of calculating and measuring the shielding effectiveness of cylindrical enclosures // Proceedings of IEEE international symposium on electromagnetic compatibility (Seattle, USA, 2-4 August 1977) – Seattle, 1977. – P. 1–5.

25. Oktem M. H., Saka B. Design of multilayered cylindrical shields using a genetic algorithm // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. 2001. Vol. 43. № 2. P. 170–176.

26. Elkamchouchi H., Ismaeil M. Shielding effectiveness of multi-layered cylindrical and spherical magnetic shells for static fields // Proceedings of the 26th. national radio science conference. Vol. 2 (New Cairo, Egypt, 17-19 March 2009). – New Cairo, 2009. – P. 1–22.

27. Elkamchouchi H., Ismaeil M. Shielding effectiveness of multi-layered cylindrical and spherical metallic shells in contact for quasi-stationary electric fields. // Proceedings of the 26th. national radio science conference. Vol. 1 (New Cairo, Egypt, 17-19 March 2009). – New Cairo, 2009. – P. 1–14.

28. Robinson M. P., Turner J. D., Thomas D. W. P., Dawson J. F., Ganley M. D., Marvin A. C., Porter S. J., Benson T. M., Christopoulos C. Shielding effectiveness of a rectangular enclosure with a rectangular aperture // Electronics Letters. 1996. Vol. 32. № 17. P. 1559–1560.

29. Schelkunoff S. A. Electromagnetic waves. – New York: D. Van Nostrand Company, Inc., 1943. – 530 p.

30. Shi D., Shen Y., Ruan F., Wei Z., Gao Y. Shielding analysis of enclosure with aperture irradiated by plane wave with arbitrary incident angle and polarization direction // Proceeding of IEEE international symposium on electromagnetic compatibility (Detroit, USA, 18-22 August 2008). – Detroit, 2008. – P. 1–5.

31. 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. № 3. P. 357–364.

32. Po'ad F. A., J'enu M. Z. M., Christopoulos C., Thomas D. W. P. 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, 1-3 march 2006). – Singapore, 2006. – P. 618–621.

33. Liu E., Yin M. C., Du P. A. 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. № 3. P. 589–598.

34. Shi D., Shen Y., Gao Y. 3 high-order mode transmission line model of enclosure with off-center aperture // Proceedings of IEEE International symposium electromagnetic compatibility (Qingdao, China, 23-26 October 2007). – Qingdao, 2007. – P. 361–364.

35. Yin M. C., Liu E., Du P. A. Improved circuit model for the prediction of the shielding effectiveness and resonances of an enclosure with apertures // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. 2016. Vol. 58. № 2. P. 448–456.

36. Robinson M. P., Benson T. M., Christopoulos C., Dawson J. F., Ganley M. D., Marvin A. C., Porter S. J., Thomas D. W. P. Analytical formulation for the shielding effectiveness of enclosures with apertures // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. 1998. Vol. 40. № 3. P. 240–248.

37. Dekhoda P., Tavakoli A., Moini R. An efficient shielding effectiveness calculation (A rectangular enclosure with numerous square apertures) // Proceedings of IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (Honolulu, USA, 9-13 July 2007). – Honolulu, 2007. – P. 1–4.

38. Culshaw W. Reflectors for a microwave fabry-perot interferometer // IRE Transactions on microwave theory and techniques. 1959. Vol. 7. № 2. P. 221–228.

39. Dekhoda 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. № 1. P. 208–212.

40. Nie B. L., Du P. A., Xiao P. An improved circuit 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. № 5. P. 1376–1383.

41. Ren D., Du P. A., He Y., Chen K., Luo J. W., Michelson D. G. A fast calculation approach for the shielding effectiveness of an enclosure with numerous

small apertures // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. 2016. Vol. 58. № 4. P. 1033–1041.

42. Nie B. L., Du P. A., Xiao P. An improved thickness correction method of analytical formulations for shielding effectiveness prediction // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. 2016. Vol. 58. № 3. P. 907–910.

43. 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. № 3. P. 566–577.

44. Kim S., Park D., Lee J. Shielding effectiveness of an enclosure with a dielectric-backed aperture using slotline method // Proceedings of IEEE International symposium on electromagnetic compatibility (Qingdao, China, 23-26 October 2007). – Qingdao, 2007. – P. 432–435.

45. Cohn S. B. Slot line on a dielectric substrate // IEEE Transactions on microwave theory and techniques. 1969. Vol. 17. № 10. P. 768–778.

46. Thomas D. W. P., Denton A. C., Konefal T., Benson T., Christopoulos C., Dawson J.E., Marvin A., Porter S. J., Sewell P. Model of the electromagnetic fields inside a cuboidal enclosure populated with conducting planes or printed circuit boards // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. 2001. Vol. 43. № 2. P. 161–169.

47. 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, China, 24-26 August 2010). – Changchun, 2010. – P. 527–530.

48. Shourvarzi A., Joodaki M. A fast method for estimating shielding effectiveness of an enclosure with apertures // Proceedings of IEEE international symposium on electromagnetic compatibility – EMC Europe (Gothenburg, Sweden, 1-4 September 2014). – Gothenburg, 2014. – P. 464–467.

49. Shourvarzi A., Joodaki M. A network of ports to estimate shielding effectiveness of an enclosure with apertures // Proceedings of IEEE international symposium on electromagnetic compatibility – EMC Europe (Wroclaw, Poland, 5-9 September 2016). – Wroclaw, 2016 – P. 626–630.

50. MIL-STD 285. Method of Attenuation measurements for enclosures, electromagnetic shielding, for electronic test purposes. 1997. – URL: everyspec.com/MIL-STD/MIL-STD-0100-0299/MIL-STD-285_25102 (дата обращения 09.05.2019).

51. IEEE STD-299. IEEE Standard method for measuring the effectiveness of electromagnetic shielding enclosures. 2007. – URL: standards.ieee.org/standard/299-2006.html (дата обращение 07.05.2019).

52. 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. № 2. P. 537–540.

53. Shourvarzi A., Joodaki M. Shielding effectiveness estimation of an enclosure with an arbitrary shape aperture // Proceedings of IEEE International

symposium on electromagnetic compatibility – EMC Europe (Angers, France, 4-7 September 2017). – Angers, 2017. – P. 1–4.

54. Shourvarzi A., Joodaki M. Using aperture impedance for shielding effectiveness estimation of a metallic enclosure with multiple apertures on different walls considering higher order modes // *IEEE Transactions on electromagnetic compatibility*. 2018. Vol. 60. № 3. P. 629–637.

References

1. Decree of the President of the Russian Federation of December 5, 2016 No. 646 «Approving the Information Security Doctrine of the Russian Federation». *Sobranie zakonodatel'stva RF* [Meeting of the Legislation of the Russian Federation], 12 December 2016, No.50, art. 7074.

2. Akbashev B. B. *Informacionnaja bezopasnost' special'nyh tehnikeskikh zdaniy pri jelektromagnitnyh vozdeystvijah*. Diss. dokt tehn. nauk [Information Security of Special Technical Buildings with Electromagnetic Effects. Extended Abstract of D. Sc. Thesis]. Moscow, HSE Tikhonov Moscow Institute of Electronics and Mathematics, 2009, 37 p. (in Russian).

3. Akbashev B. B., Baljuk N. V., Kechiev L. N. *Zashhita ob'ektov telekommunikacij ot jelektromagnitnyh vozdeystvij* [Protection of Telecommunications Facilities from Electromagnetic Effects]. Moscow, Grifon, 2014. 472 p. (in Russian).

4. Gazizov T. R. *Jelektromagnitnaja sovместimost' i bezopasnost' radiojelektronnoj apparatury* [Electromagnetic Compatibility and Safety of Electronic Equipment]. Tomsk, TML-Press, 2007. 246 p. (in Russian).

5. Komnatnov M. E., Gazizov T. R., Dement'ev A. S. Simulation of Metal Plate Shielding Effectiveness for Airborne Equipment of Space Vehicle. *Proceedings of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*, 2011, vol. 24, no. 1, pp. 133–136 (in Russian).

6. Komnatnov M. E., Gazizov T. R., Estimation of Shielding Effectiveness for the Connector Enclosure of Airborne Radio Electronic Equipment of Space Vehicle. *Aerospace Instrument-Making*, 2013, no. 4, pp. 37–42 (in Russian).

7. Komnatnov M. E., Gazizov T. R., Dement'ev A. S. Jeффективност' jekranirovaniya unificirovannyh jelektronnyh module [Shielding Effectiveness of Standardized Electronic Modules]. *Russian Physics Journal*, 2012, vol. 55, no. 7, pp. 89–92 (in Russian).

8. Jiao C., Li L., Cui X., Li H. Subcell FDTD Analysis of Shielding Effectiveness of a Thin-Walled Enclosure with an Aperture. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2006, vol. 42, no. 4, pp. 1075–1078.

9. Fedeli D., Gradoni G., Maglie. F. Primiani V. M. Evaluation of Equipment-Level Enclosure Shielding Properties in a Reverberation Chamber: Numerical and Experimental Analysis. *Proceedings of 2008 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. Detroit, 2008, pp. 1–6.

10. Audone B., Balma M. Shielding Effectiveness of Apertures in Rectangular Cavities. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 1989, vol. 31, no. 1, pp. 102–106.

11. 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.
12. Kraft C. H. Modeling Leakage Through Finite Apertures with TLM. *Proceedings of 1994 IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility*. Chicago, 1994, pp. 73–76.
13. Nie B. L., Du P. A., Yu Y. T., 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*, 2011, vol. 53, no. 1, pp. 73–81.
14. Feng C., Shen Z. A Hybrid FD-MoM Technique for Predicting Shielding Effectiveness of Metallic Enclosures with Apertures. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2005, vol. 47, no. 3, pp. 456–462.
15. Hill D. A., Ma M. T., Ondrejka A. R., Riddle B. F., Crawford M. L., Johnk R. T. Aperture Excitation of Electrically Large Lossy Cavities. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 1994, vol. 36, no. 3, pp. 169–178.
16. 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.
17. Solin J. R. Formula for the Field Excited in a Rectangular Cavity with an Electrically Large Aperture. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2012, vol. 54, no. 1, pp. 188–192.
18. Solin J. R. Corrections to “Formula for the Field Excited in a Rectangular Cavity with an Electrically Large Aperture”. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2013, vol. 55, no. 6, pp. 1369.
19. Solin J. R. Formula for the Field Excited in a Rectangular Cavity with an Aperture and Lossy Walls. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2015, vol. 57, no. 2, pp. 203–209.
20. 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.
21. Konefal T. A., Dawson J. F., Marvin A. C., Robinson M. P., Porter S. J. 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.
22. Konefal T. A., Dawson J. F., Marvin A. C., Robinson M. P., Porter S. J. 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.
23. Wu T. K., Tsai L. L. Shielding Properties of Thick Conducting Cylindrical Shells with an Obliquely Incident Plane Wave. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 1975, vol. EMC-17, no. 3, pp. 189–191.

24. Rashid A. A Mathematical Method of Calculating and Measuring the Shielding Effectiveness of Cylindrical Enclosures. *Proceedings of IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. Seattle, 1977, pp. 1–5.
25. Oktem M. H., Saka B. Design of Multilayered Cylindrical Shields Using a Genetic Algorithm. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2001, vol. 43, no. 2, pp. 170–176.
26. Elkamchouchi H., Ismaeil M. Shielding Effectiveness of Multi-Layered Cylindrical and Spherical Magnetic Shells for Static Fields. *Proceedings of the 26th. National Radio Science Conference. Vol. 2*. New Cairo, 2009, pp. 1–22.
27. Elkamchouchi H., Ismaeil M. Shielding Effectiveness of Multi-Layered Cylindrical and Spherical Metallic Shells in Contact for Quasi-Stationary Electric Fields. *Proceedings of the 26th. National Radio Science Conference. Vol. 1*. New Cairo, 2009, pp. 1–14.
28. Robinson M. P., Turner J. D., Thomas D. W. P., Dawson J. F., Ganley M. D., Marvin A. C., Porter S. J., Benson T. M., Christopoulos C. Shielding Effectiveness of a Rectangular Enclosure with a Rectangular Aperture. *Electronics Letters*, 1996, vol. 32, no 17, pp. 1559–1560.
29. Schelkunoff S. A. *Electromagnetic Waves*. New York, D. Van Nostrand Company, Inc., 1943. 530 p.
30. Shi D., Shen Y., Ruan F., Wei Z., Gao Y. Shielding Analysis of Enclosure with Aperture Irradiated by Plane Wave with Arbitrary Incident Angle and Polarization Direction. *Proceeding of 2008 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. Detroit, 2008, pp. 1–5.
31. 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, no. 3, pp. 357–364.
32. Po'ad F. A., J'enu M. Z. M., Christopoulos C., Thomas D. W. P. 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.
33. Liu E., Yin M. C., Du P. A. 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, no. 3, pp. 589–598.
34. 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.
35. Yin M. C., Liu E., Du P. A. Improved Circuit Model for the Prediction of the Shielding Effectiveness and Resonances of an Enclosure with Apertures. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2016, vol. 58, no. 2, pp. 448–456.
36. Robinson M. P., Benson T. M., Christopoulos C., Dawson J. F., Ganley M. D., Marvin A. C., Porter S. J., Thomas D. W. P. Analytical Formulation for the Shielding Effectiveness of Enclosures with Apertures. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 1998, vol. 40, no. 3, pp. 240–248.

37. Dehkhoda P., Tavakoli A., Moini R. An Efficient Shielding Effectiveness Calculation (A Rectangular Enclosure with Numerous Square Apertures). *Proceedings of 2007 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. Honolulu, 2007, pp. 1–4.

38. Culshaw W. Reflectors for a Microwave Fabry-Perot Interferometer. *IRE Transactions on microwave theory and techniques*, 1959, vol. 7, no. 2, pp. 221–228.

39. 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, no. 1, pp. 208–212.

40. 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, no. 5, pp. 1376–1383.

41. Ren D., Du P. A., He Y., Chen K., Luo J. W., Michelson D. G. A Fast Calculation Approach for the Shielding Effectiveness of an Enclosure with Numerous Small Apertures. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2016, vol. 58, no. 4, pp. 1033–1041.

42. Nie B. L., Du P. A., Xiao P. An Improved Thickness Correction Method of Analytical Formulations for Shielding Effectiveness Prediction. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2016, vol. 58, no. 3, pp. 907–910.

43. Shim J., Kam D. G., Kwon J. H., Kim J. Circuital 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.

44. Kim S., Park D., Lee J. Shielding Effectiveness of an Enclosure with a Dielectric-Backed Aperture Using Slotline Method. *Proceedings of 2007 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. Qingdao, 2007, pp. 432–435.

45. Cohn S. B. Slot line on a dielectric substrate. *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*, 1969, vol. 17, no. 10, pp. 768–778.

46. Thomas D. W. P., Denton A. C., Konefal T., Benson T., Christopoulos C., Dawson J.E., Marvin A., Porter S. J., Sewell P. Model of the Electromagnetic Fields 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.

47. 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.

48. Shourvarzi A., Joodaki M. A Fast Method for Estimating Shielding Effectiveness of an Enclosure with Apertures. *Proceedings of IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe)*. Gothenburg, 2014, pp. 464–467.

49. Shourvarzi A., Joodaki M. A Network of Ports to Estimate Shielding Effectiveness of an Enclosure with Apertures. *Proceedings of IEEE International*

Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe). Wroclaw, 2016, pp. 626–630.

50. MIL-STD 285. Method of Attenuation measurements for enclosures, electromagnetic shielding, for electronic test purposes. Department of Defence, 1997. 15 p.

51. IEEE STD-299. IEEE Standard method for measuring the effectiveness of electromagnetic shielding enclosures. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2007. 52 p.

52. 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, no. 2, pp. 537–540.

53. Shourvarzi A., Joodaki M. Shielding Effectiveness Estimation of an Enclosure with an Arbitrary Shape Aperture. *Proceedings of IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe)*. Angers, 2017, pp. 1–4.

54. Shourvarzi A., Joodaki M. Using Aperture Impedance for Shielding Effectiveness Estimation of a Metallic Enclosure with Multiple Apertures on Different Walls Considering Higher Order Modes. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2018, vol. 60, no. 3, pp. 629–637.

Статья поступила 23 апреля 2019 г.

Информация об авторах

Иванов Антон Андреевич – инженер научно-исследовательской лаборатории «Безопасность и электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств». Магистрант кафедры телевидения и управления. Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. Область научных интересов: электромагнитная совместимость, экранирование. E-mail: anton.ivvv@gmail.com

Комнатнов Максим Евгеньевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Безопасность и электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств». Доцент кафедры телевидения и управления. Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. Область научных интересов: электромагнитная совместимость, экранирование, устройства для испытаний на электромагнитную совместимость. E-mail: maxmek@mail.ru

Адрес: 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 40.

The analytical models review for metal enclosures shielding effectiveness estimating based on the equivalent circuit method

A. A. Ivanov, M. E. Komnatnov

Problem statement. Technical aspects of information security are directly related with electromagnetic compatibility (EMC) of radio-electronic means. To ensure EMC, electromagnetic shielding is widely used in practice. In particular, to increase the noise immunity of components, units and radio-electronic means, metal shielding enclosures are often used. For estimating the shielding effectiveness (SE) of an intended enclosure, during the radio-electronic means design time, developers often use numerical methods. It requires significant computational resources. Therefore, in the early design stages, analytical methods for estimating SE are more preferable. Models, based on the equivalent circuit method, as the most versatile, are widely distributed among them. **The purpose of this paper** is to review and systematize the existing analytical models for calculating the SE of rectangular and cylindrical enclosures based on the equivalent circuit method, and also to compare the SE results obtained using these models and finite element method. **Results and novelty.** The paper presents an overview of analytical models based on the equivalent circuit method, as well as a description of the computational and experimental method for estimating SE without using traditional measuring tools. A comparison for 8 different shielding structures was made. **Practical relevance.** The results of this study may be useful in the radio-electronic means design, including information security and communication hardware systems. Also, they can be useful in the development of new approaches for calculating various shielding structures SE.

Key words: electromagnetic compatibility, electromagnetic shielding, shielding enclosure, shielding effectiveness, noise immunity.

Information about Authors

Anton Andreevich Ivanov – engineer of the Research Laboratory of «Safety and Electromagnetic Compatibility of Radioelectronic Facilities» (SECRF). Master's degree student at the Department of Television and Control. Tomsk state university of control systems and radioelectronics. Field of research: electromagnetic compatibility; electromagnetic shielding. E-mail: anton.ivvv@gmail.com

Maksim Evgen'evich Komnatnov – Ph.D. of engineering sciences, senior research fellow of the Research Laboratory of «Safety and Electromagnetic Compatibility of Radioelectronic Facilities» (SECRF). Associate Professor at the Department of Television and Control. Tomsk state university of control systems and radioelectronics. Field of research: electromagnetic compatibility; electromagnetic shielding; facilities for EMC testing. E-mail: maxmek@mail.ru

Address: Russia, 634050, Tomsk, Lenina prospekt, 40.