

УДК 621.316

Способ вычисления суммарной энергии поля СВЧ, образующейся в экранирующем корпусе, с использованием численных методов моделирования¹

Бутин В. И., Кундышев П. Я., Руденко Ю. А.

Всероссийский научно-исследовательский институт им. Н. Л. Духова
ул. Суцневская, 22, Москва, 127055, Российская Федерация
butinvi@yandex.ru, enniofilm@mail.ru, vniia@vniia.ru

Получено: 8 сентября 2019 г.

Отрецензировано: 13 сентября 2019 г.

Принято к публикации: 16 сентября 2019 г.

Аннотация: Исследуется эффективность экранирования с учетом аккумулированной внутри металлического корпуса аппаратуры энергии высокочастотного электромагнитного поля с использованием численных методов интегрирования и результатов трехмерного моделирования электродинамических задач. Как следует из анализа существующих программных продуктов, отсутствует возможность непосредственного получения значения энергии поля, запасенной в произвольном объеме, в качестве конечного результата. На простейшем примере идеального цилиндрического корпуса продемонстрирована возможность оценки экранирующей способности конструкции на основе аккумулированной энергии с применением численного интегрирования по ограниченному корпусом объему методом трапеций. Проведен тестовый расчет экранирующей способности корпуса на основе данных об энергии поля, аккумулированной в подкорпусном пространстве модельного объекта, полученных на основе результатов моделирования в среде FEKO, которые подтверждены экспериментально с высокой точностью. Разработанная методика позволяет определить влияние различных конструктивных параметров, например, таких как размеры неоднородностей корпуса, на эффективность экранирования конструкций корпусов сложных форм.

Ключевые слова: радиоэлектронная аппаратура (РЭА), эффективность экранирования, корпус, моделирование, FEKO, численные методы, формула трапеций.

¹ Статья является расширенной версией доклада, представленного на 29-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2019 (Севастополь, РФ, 8—14 сентября 2019 г.).

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Бутин В. И., Кундышев П. Я., Руденко Ю. А. Способ вычисления суммарной энергии поля СВЧ, образующейся в экранирующем корпусе, с использованием численных методов // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2019. Т. 2, № 2. С. 180—191.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Бутин, В. И. Способ вычисления суммарной энергии поля СВЧ, образующейся в экранирующем корпусе, с использованием численных методов / В. И. Бутин, П. Я. Кундышев, Ю. А. Руденко // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2019. — Т. 2, № 2. — С. 180—191.

Calculation of microwave energy accumulated inside the shielded volume of electronics using numerical simulation

V. I. Butin, P. Ya. Kundyshev, and Y. A. Rudenko
Dukhov Research Institute of Automatics (VNIIA)
22, ul. Sushchevskaya, Moscow, 127055, Russian Federation
butinvi@yandex.ru, enniofilm@mail.ru, vniia@vniia.ru

Received: September 8, 2019

Peer-reviewed: September 13, 2019

Accepted: September 16, 2019

Abstract: *In this paper the shielding effectiveness calculation based on the microwave energy stored inside the metal shield of electronics is calculated with a numerical method of integration and three-dimension electromagnetic simulation tool FEKO. It was found no option in extant electrostatics simulators to obtain the quantity of energy amount accumulated in random volume as final result. Basing on the simulation of electric intensities dispersed in the region the energy is derived via numerical trapezoid method of the integration over the volume in the simplest example of ideal cylinder shield. Considering high level of simulation accuracy in FEKO for determination of the electric intensity inside a variety of shielding enclosures the shielding effect based on the energy data in test housing was calculated. The procedure obtained can be used to identify the dependence between the shielding effectiveness and different parameters, e.g. the size of the apertures in the shield with complex shapes.*

Keywords: *electronics, shielding effectiveness, housing, simulation, FEKO, numerical methods, trapezoid method.*

For citation (IEEE): V. I. Butin, P. Ya. Kundyshev, and Y. A. Rudenko, “Calculation of microwave energy accumulated inside the shielded volume of electronics using numerical simulation,” *Infocommunications and Radio Technologies*, 2019, vol. 2, no. 2, pp. 180–191. (In Russ.). doi: 10.15826/icrt.2019.02.2.17

1. Введение

Эффективность электромагнитного экранирования конструкции аппаратуры в настоящее время может быть оценена на основании полученных значений напряженности электрической компоненты ЭМП в заданной точке пространства внутри корпуса. Вывод о степени проникновения ЭМП в диапазоне ВЧ—СВЧ при этом, в большинстве случаев, делается упрощенно путем рассмотрения напряженности в одной или нескольких точках внутри исследуемого корпуса. При этом, однако, теряется пространственная локализация ЭМП внутри конструкции, что может стать причиной невыявления наиболее критичных мест внутри аппаратуры со значительными уровнями напряженности, которые потенциально могут привести к нарушению работоспособности аппаратуры РЭА.

Для преодоления данной проблемы следует дискретизировать все пространство внутри корпуса РЭА для поиска и выявления таких проблемных областей. Этот метод успешно используется в практике как отечественного моделирования, так и за рубежом [1—3]. При этом возрастает объем данных для обработки.

Рассмотрим наиболее типовую ситуацию, изображенную на рисунке 1а.

Пусть требуется смоделировать электромагнитную обстановку в предполагаемом месте расположения чувствительных приборов (содержащих, например, интегральные микросхемы, компоненты ЭКБ и др.), расположенных внутри цилиндрического корпуса РЭА. Приборы (показаны условно в виде цилиндров) соединены друг с другом произвольными проводными соединениями (например, двухпроводным монтажом). На корпусе РЭА имеется единственная неоднородность (узкая щель), которая является источником переизлучения ЭМП во внутреннюю область корпуса. Воздействие ЭМП осуществляется в СВЧ-диапазоне, при этом размеры корпуса РЭА являются электрически длинными по отношению к длине волны воздействующего излучения. Результаты моделирования распределения напряженности ЭМП показаны в сечениях на рисунке 1(б) и (в). Как можно видеть, распределение ЭМП имеет, в общем случае, градиентный характер. В случае, если размеры прибора и длины проводных линий связи малы в сравнении с характерными размерами области неоднородности ЭМП, можно полагать, что прибор будет облучаться с приблизительно одинаковыми уровнями ЭМП (см. рисунок 1б и 1в справа). Однако, в случае облучения на резонансных частотах, т.е. при совпадении длин волн с размерами корпуса градиентный характер будет ярко выра-

женным (см. рисунки 1б и 1в слева). Это приведет к тому, что различные части приборов будут подвергаться различным уровням облучения. При этом не ясно, какими уровнями воздействия ЭМП будет подвергаться исходная система «Прибор 1 — проводные соединения — Прибор 2». Это может привести к искажению результатов оценки и снижению достоверности моделирования.

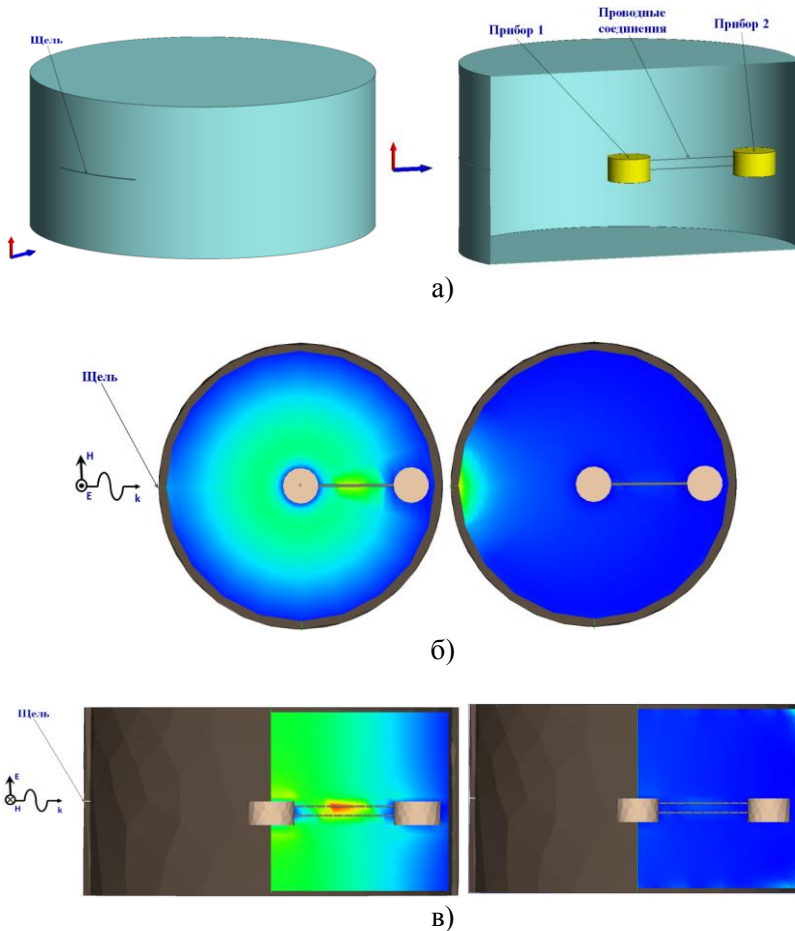


Рис. 1. Воздействие ЭМП СВЧ-диапазона на цилиндрический экран из металла со щелью (а). Распределение напряженности электрической составляющей ЭМП в сечениях экрана — продольном (б) и поперечном (в).

Fig. 1. Microwave interaction with cylindrical metal shield with slit (a). Electric field distribution along the center axis (b) and in the cross-section (c)

Выходом из сложившейся ситуации является оценка экранирующей способности конструкции по суммарной энергии ЭМП, воздействующей на приборы (или на чувствительные составные части), а не на основании дискретных значений напряженности ЭМП. В работах [4—8] представлены результаты сопоставления расчетов, проведенных с использованием среды FEKO [9], с модельными экспериментами в части определения напряженности поля, прошедшего внутрь экранирующих конструкций типовых РЭА. Анализ результатов указывает на высокую точность определения ЭМП, что позволяет использовать FEKO при проведении расчетов напряженности ЭМП в конкретных точках пространства внутри корпусов РЭА, в т.ч. для получения распределения ЭМП по всему занимаемому объему. Вывод результатов моделирования осуществляется по компонентам на конкретной частоте. В цилиндрической системе координат результат может быть представлен по компонентам E_ρ , E_φ , E_z , а также в виде модуля $|E| = \sqrt{E_\rho^2 + E_\varphi^2 + E_z^2}$.

Однако наряду с широкими возможностями в части вывода значений напряженностей ЭМП, как в FEKO, так и в большинстве аналогичных программных продуктов отсутствуют опции по определению суммарной энергии ЭМП, аккумулированной внутри произвольного объема внутри корпуса. Это и обуславливает интерес к разработке собственной методики по оценке накопленной внутри исследуемой конструкции энергии при внешнем воздействии ЭМП СВЧ-диапазона, имея в распоряжении в качестве исходных данных преимущественно компоненты напряженностей E_ρ , E_φ и E_z для заданного массива расчетных точек. Дальнейший расчет энергии в рассматриваемом объеме проводится с использованием численного интегрирования методом трапеций. Для примера проведен расчет экранирующей способности корпуса на основании энергии, которая может воздействующей на типовые компоненты РЭА, размещенные внутри металлического корпуса.

2. Определение эффективности экранирования конструкции по энергетическому фактору

Требуется определить экранирующую способность конструкции на основе суммарной энергии, которая может воздействовать на прибор (компонент РЭА), расположенный внутри корпуса РЭА.

Положим корпус РЭА, изготовленный из металла, в виде тонкостенного цилиндра (см. рисунок 2). Пусть по результатам моделирования (например, в FEKO) получено распределение напряженности ЭМП (E_ρ , E_φ , E_z) внутри корпуса в виде дискретной сетки в заданных интересующих точках. В первую очередь, необходимо рассчитать энергию ЭМП W_Σ , аккумулированную в заданном ограниченном пространстве внутри экрана. Примем далее при рассмотрении, что ЭМП является гармоническим и постоянного действующим во времени, т. е. все виды потерь ЭМП при распространении в корпусе (рассеиваемая мощность в металлических стенках корпуса, в диэлектрическом материале и пр.) скомпенсированы постоянно восполняемой энергией поступающего ЭМП.

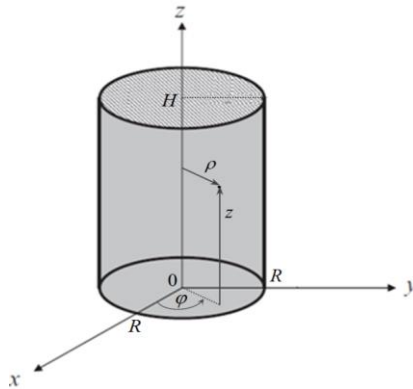


Рис. 2. Тонкостенный цилиндрический экран в декартовой и цилиндрической системах координат.

Fig. 2. Thin cylindrical shield in rectangular and cylindrical coordinates

Так, в общем виде энергия, аккумулированная в экране, W_Σ , представима в виде [10]

$$W_\Sigma = W_e + W_m, \quad (1)$$

где $W_e = \frac{1}{2} \int_V \varepsilon |E|^2 dV$ — энергия, запасенная в электрическом поле,

$W_m = \frac{1}{2} \int_V \mu |H|^2 dV$ — энергия, запасенная в магнитной поле, $\varepsilon = \varepsilon_{cp} \cdot \varepsilon_0$ и

$\mu = \mu_{cp} \cdot \mu_0$ — диэлектрическая и магнитная проницаемости материала среды внутри экрана, $\varepsilon_{cp}, \mu_{cp}, \varepsilon_0, \mu_0$ — относительные диэлектрическая и

магнитная проницаемости среды внутри экрана, диэлектрическая и магнитная постоянные соответственно, E и H — модули напряженности электрической и магнитной составляющих ЭМП внутри экрана соответственно, V — объем, ограниченный экраном.

Рассмотрим отдельно выражение для энергии, запасенной в электрическом поле. Вынесем диэлектрическую постоянную за знак интегрирования, предполагая однородность диэлектрических свойств среды внутри корпуса:

$$W_e = \frac{\varepsilon}{2} \int_V E^2 dV. \quad (2)$$

Рассмотрим подынтегральное выражение. Учитывая цилиндрическую геометрию задачи, целесообразно перейти от прямоугольной системы координат (x, y, z) в цилиндрическую (ρ, φ, z) :

$$\begin{aligned} \int_V E^2 dV &= \iiint_{x,y,z} E^2(x, y, z) dx dy dz = \iiint_{\rho, \varphi, z} \rho E^2(\rho, \varphi, z) d\rho d\varphi dz = \\ &= \int_{\rho=0}^R \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{z=0}^H \rho E^2(\rho, \varphi, z) d\rho d\varphi dz, \end{aligned} \quad (3)$$

где ρ — множитель (якобиан), образующийся при переходе в интеграле по объему из декартовой в цилиндрическую систему координат, $E(\rho, \varphi, z)$ — напряженность электрической составляющей ЭМП в заданной точке внутри экрана.

Учитывая взаимную независимость пределов интегрирования в цилиндрической системе координат, изменим последовательность интегрирования:

$$\int_{\rho=0}^R \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{z=0}^H \rho E^2(\rho, \varphi, z) d\rho d\varphi dz = \int_{z=0}^H \int_{\varphi=0}^{2\pi} \left[\int_{\rho=0}^R \rho E^2(\rho, \varphi, z) d\rho \right] d\varphi dz. \quad (4)$$

В выражении (4) интеграл в скобках рассчитаем численно, используя метод трапеций [11, 12]:

$$\int_a^b f(x) dx \approx k_x \sum_{n=0}^{N_x-1} \left(\frac{f(x_n) + f(x_{n+1})}{2} \right), \quad (5)$$

где $k_x = \frac{b-a}{N}$ — постоянный шаг дискретизации по x , N — число отрезков разбиений.

Выбор метода трапеций условный и связан с простотой вычислений по значениям подинтегральной функции только в крайних точках элементарного отрезка, что позволяет использовать результаты поточечных расчетов в применяемом программном обеспечении (типа ФЕКО и пр.). При необходимости увеличения точности (либо уменьшения времени вычислений) можно уменьшить (либо увеличить) шаг дискретизации, либо можно использовать также методы Симпсона или прямоугольников соответственно.

Применяя формулу трапеций для вычисления интегралов по всем цилиндрическим координатам как для электрической, так и для магнитной составляющих ЭМП, получаем оценку для суммарной энергии поля в виде:

$$W_{\Sigma} = \frac{1}{16} k_{\rho} k_{\phi} k_z \varepsilon_{\text{ср.}} \varepsilon_0 F_E + \frac{1}{16} k_{\rho} k_{\phi} k_z \mu_{\text{ср.}} \mu_0 F_H, \quad (6)$$

где первое слагаемое выражения (6) определяет часть энергии, аккумулированной в электрическом поле, второе — в магнитном поле; k_{ρ} , k_{ϕ} , k_z — шаги дискретизации по цилиндрическим координатам ρ , ϕ , z соответственно; F_E и F_H — множители, образующиеся в результате численного интегрирования тройных интегралов в формулах для электрической и магнитной составляющих ЭМП по формуле трапеций (5).

Основываясь на принятой терминологии [1—3], определим эффективность экранирования по энергетическому признаку как:

$$SE_w = 10 \lg \left(\frac{W_i}{W_{\Sigma}} \right), \quad (7)$$

где W_{Σ} — энергия, аккумулированная во внутреннем пространстве внутри экрана, которая рассчитывается по формуле (6),

$W_i = \frac{1}{2} \int_V \varepsilon |E_i|^2 dV + \frac{1}{2} \int_V \mu |H_i|^2 dV$ — энергия ЭМП, сосредоточенная в том же пространстве при отсутствии экрана, E_i и H_i — электрическая и магнитная составляющие напряженности воздействующего ЭМП.

Выражения (6—7) позволяют оценить экранирующую способность конструкции как функцию энергии, аккумулированной в рассматриваемой области подкорпусного пространства.

3. Пример расчета

Рассмотрим ситуацию, изображенную на рисунке 1. В полем цилиндрическом корпусе из алюминия (радиус $R = 180$ мм, высота $H = 200$ мм, толщина стенок $\Delta = 1$ мм) присутствует щель толщиной 1 мм и шириной

100 мм, через которую ЭМП с напряженностью электрической составляющей E_i проникает во внутреннюю область корпуса. Рассчитаем суммарную энергию, воздействующую на приборы, которые расположены внутри корпуса, а также экранирующей способности данной конструкции.

Для этого, в первую очередь, проведем моделирование распределения напряженности ЭМП во внутреннем пространстве корпуса при условии отсутствия приборов. Это допустимо для оценки суммарной энергии, которая может оказывать воздействие на эти приборы. Для удобства обработки данных зададим шаги дискретизации по всем цилиндрическим координатам $k_p = k_\phi = k_z = 10$. Сетка с расчетными точками показана схематично на рисунке 3.

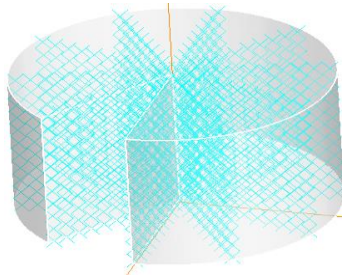


Рис. 3. Расчетная сетка внутренней области цилиндрического корпуса.

Fig. 3. Meshing points inside the cylindrical medium

Далее определим исследуемый частотный диапазон. Отметим, что наибольший интерес представляет частотная область СВЧ-диапазона, при которой наблюдаются резонансные эффекты, обуславливающие повышенную степень проникновения ЭМП внутрь корпуса [13]. Исходя из этого, определим резонансную частоту, соответствующую основной моде корпуса как цилиндрического резонатора при внешнем электромагнитном облучении. В силу выполнения соотношения $\frac{d}{a} = \frac{198 \cdot 10^{-3}}{179 \cdot 10^{-3}} \approx 1,11 < 2$ (где $d = H - 2\Delta$ и $a = R - \Delta$) основной является мода TM_{010} [10]. В общем виде значения резонансных частот колебаний ЭМП в замкнутом цилиндрическом объеме для TM моды определяются как

$$f_{npq}^{TM} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{\chi_{np}}{a}\right)^2 + \left(\frac{q\pi}{d}\right)^2}, \quad (8)$$

где χ_{np} — нули функции Бесселя $J_n(x) = 0$ порядка n ($n = 0, 1, 2, \dots$), p — порядковый номер соответствующего нуля данной функции ($p = 1, 2, 3, \dots$),

n, p, q — целочисленные индексы, характеризующие количество полуволн, укладываемых по периметру продольного сечения корпуса, вдоль его радиуса в продольном сечении и вдоль высоты в его поперечном сечении соответственно.

Соответственно, подставляя все параметры корпуса, получаем $f_{010}^{TM} = 641$ МГц. Для сравнения проведем расчет в заведомо нерезонансных частотных областях и вблизи резонанса. Выберем для данного случая частотный диапазон с 500 до 1500 МГц.

В первую очередь, оценим экранирующие свойства корпуса по напряженности электрической составляющей ЭМП в исследуемом частотном диапазоне. На рисунке 4 приведена частотная зависимость эффективности экранирования $SE_E = 20\lg(E_i / E_0)$, где E_0 — напряженность электрической составляющей ЭМП в точке пространства, рассчитанной в центре экранирующей корпуса, а также SE_W , рассчитанная по формуле (7).

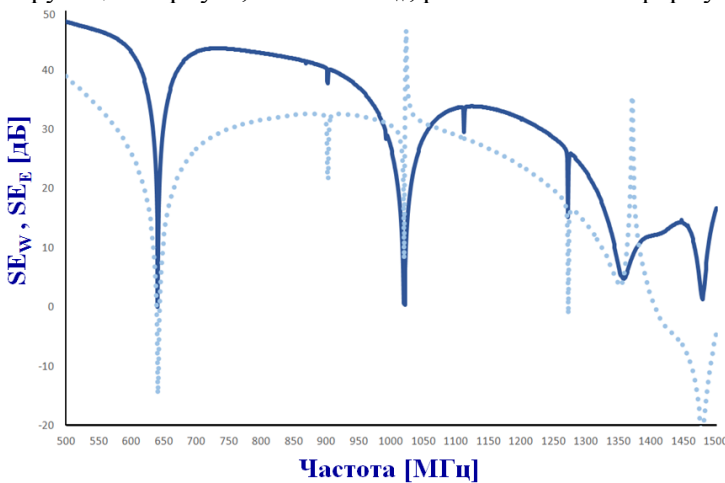


Рис. 4. Частотная зависимость эффективности экранирования (SE_E), рассчитанная в центре корпуса (пунктирная линия), и SE_W (прямая линия).
Fig. 4. Shielding effectiveness (SE_E) calculated in the center of the shield (dot line) and SE_W (flat line)

Резонансные частоты, как это следует из анализа данных на рисунке 4, имеют максимумы в районе частоты 641 МГц.

Анализ полученных результатов указывает на ярко выраженное увеличение энергии, аккумулированной во внутреннем объеме корпуса при облучении его на резонансных частотах. Уровни энергии могут на 3—4 порядка быть выше, чем в нерезонансной области. Это может привести к

тому, что чувствительные приборы, помещенные в защитный корпус, при облучении на резонансных частотах будут подвергнуты значительно более высокому воздействию ЭМП по сравнению с облучением вне резонансной области. Эффективность экранирования, соответственно, будет иметь минимум на резонансной частоте корпуса.

Безусловно, размеры щели и взаимное расположение векторов напряженности ЭМП относительно корпуса будут влиять на величину энергии, аккумулированной внутри экранирующей конструкции. Это, в первую очередь, касается преимущественно резонансной области, что также представляет интерес при дальнейшем исследовании экранирующей способности конструкции в СВЧ-диапазоне воздействующего ЭМП.

4. Заключение

В данной работе было проведено исследование эффективности экранирования на основе данных об энергии высокочастотного электромагнитного поля, аккумулированной внутри металлического корпуса аппаратуры, которая может оказывать воздействие на внутренние чувствительные компоненты, используя численные методы трехмерного моделирования электродинамических задач. При оценке энергии, аккумулированной внутри идеального цилиндрического корпуса, согласно разработанной методике использован численный метод трапеций для интегрирования по всему занимаемому пространству. Выполнен тестовый расчет значения аккумулированной энергии в подкорпусном пространстве и экранирующей способности корпуса РЭА. Результаты тестового расчета указывают на ярко выраженное снижение эффективности экранирования вблизи резонансной частоты корпуса. Полученная методика позволяет выявлять зависимость эффективности экранирования и аккумулированной энергии от различных конструктивных параметров, например, таких как размеры неоднородностей в корпусе (щели, отверстия).

Список литературы

1. Кечиев Л. Н., Акбашев Б. Б., Степанов П. В. Экранирование технических средств и экранирующие системы. М. : ООО «Группа ИДТ», 2010. 470 с.
2. Celozzi S., Araneo R., Lovat G. Electromagnetic shielding. John Wiley and Sons, Inc. IEEE Press: Hoboken, New Jersey, 2008. 358 с.
3. Celozzi S. New figures of merit for the characterization of the performance of shielding enclosures. IEEE Transactions on EMC. 2004. Т. EMC-46. № 1. С. 142.
4. Butin V., Kundyshev P. Immunity Testing Research Method of Unmanned Aerial Vehicle System with Limited Operational Life // 2015 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC). Taipei, Taiwan, 2015. С. 33—36.

5. Butin V. I., Kundyshev P. Ya. Inner filled constructive material effect on shielding effectiveness of screened electronics in resonance mode // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. 2016, Т. 151, № 1. С. 1—5.
6. Butin V., Kundyshev P. Inner filled constructive material effect on shielding effectiveness of screened electronics in resonance regime // 2016 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC), Shenzhen, China. 2016. Т. 01. С. 91—93.
7. Butin V., Kundyshev P. Study of Currents Induced in Wire Lines Placed inside the Metal Shield of Electronics in the Beginning of the Resonance Mode // 2017 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC), Seoul, Korea. 2017. С. 172—174.
8. Бутин В. И., Кундышев П. Я. Исследование экранирующих свойств корпусов РЭА и наведенных токов в типовых проводных соединениях при воздействии СВЧ излучений // Технологии электромагнитной совместимости. 2018. № 1 (64). С. 32—43.
9. FEKO website. Доступен на <http://www.feko.info>;
<http://www.altairhyperworks.com/FEKO> (доступ 1 августа 2019).
10. Harrington R. F. Time-harmonic electromagnetic fields / An IEEE Press Classic Reissue. John Wiley and Sons, 2001. 490 с.
11. Бахвалов Н. С. Численные методы (анализ, алгебра, обыкновенные дифференциальные уравнения). М. : Наука, 1975. 631 с.
12. Калиткин Н. Н. Численные методы. М. : Наука, 1978. 512 с.

Информация об авторах

Бутин Валентин Иванович, доктор технических наук, старший научный сотрудник, начальник научно-исследовательского отделения ФГУП «ВНИИА им. Н. Л. Духова», г. Москва, Российская Федерация.

Кундышев Павел Ярославович, кандидат технических наук, начальник научно-исследовательского отдела ФГУП «ВНИИА им. Н. Л. Духова», г. Москва, Российская Федерация.

Руденко Юрий Алексеевич, научный сотрудник ФГУП «ВНИИА им. Н. Л. Духова», г. Москва, Российская Федерация.

Information about the authors

Valentin I. Butin, Doc. Sci., major researcher, research department director of the Dukhov Research Institute of Automatics “VNIIA”, Moscow, Russian Federation.

Pavel Ya. Kundyshev, Cand. Sci., head of research division, Dukhov Research Institute of Automatics “VNIIA”, Moscow, Russian Federation.

Yuri A. Rudenko, researcher, Dukhov Research Institute of Automatics “VNIIA”, Moscow, Russian Federation.