

РАСЧЁТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ВНУТРИ ОДНОРОДНЫХ КОРПУСОВ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ

© 2012 А. В. Костин

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва
(национальный исследовательский университет)

Предложен метод расчёта напряжённостей электрического и магнитного полей внутри однородных экранов для определения характеристик электромагнитных помех внутри корпусов бортовой аппаратуры космических аппаратов в условиях воздействия электростатических разрядов. Приведены результаты экспериментов, подтверждающие адекватность предложенного метода.

Бортовая аппаратура, космический аппарат, электростатический разряд, электрическое поле, магнитное поле, магнитный поток, ток, ЭДС.

В последнее время наблюдается бурное развитие электроники. Увеличивается надёжность, срок службы, расширяются функциональные возможности радиоэлектронной аппаратуры. Всё это на фоне уменьшения габаритов и массы. Указанные общие тенденции не обходят стороной и бортовую аппаратуру (БА) космических аппаратов (КА). К сожалению, такая аппаратура не всегда стойка к импульсным электромагнитным помехам, таким как электростатический разряд (ЭСР). Они возникают из-за электризации различных элементов конструкции КА [1]. Чаще всего корпуса БА изготавливаются из металла и выполняют роль электромагнитных экранов.

При проведении теоретической оценки устойчивости БА к ЭСР необходимо определить поле внутри корпуса первой. Корпус БА является неоднородным. Под неоднородностями понимаются щели, отверстия и радиопрозрачные окна. Неоднородные электромагнитные экраны рассчитываются в два этапа. На первом этапе определяется поле внутри однородного экрана (поле, прошедшее сквозь стенки). На втором этапе – поле, прошедшее через неоднородности. Затем поля суммируются по принципу суперпозиции.

Оба этапа не могут быть рассмотрены в рамках одной статьи ввиду их объёмности. По этой причине рассмотрим лишь расчёт поля внутри однородного экрана.

Автором настоящей статьи был проведён анализ методик определения электромагнитного поля (ЭМП) внутри однородных экранов и выбрана методика, которая справедлива для квазистационарного поля, поскольку даёт достаточно точный результат [2]. Для использования такой методики необходимо выполнение условий:

$$\frac{c}{f_M} \gg l, \quad (1)$$

$$2p f_M \epsilon_0 e \ll s, \quad (2)$$

где c – скорость света в вакууме, f_M – максимальная частота в спектре разрядного импульса (для ЭСР – 168,3 МГц [3]), l – максимальный линейный размер корпуса БА, ϵ_0 – электрическая постоянная, ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость, σ – удельная электрическая проводимость. Учитывая размеры корпусов БА и значение f_M , можно сказать, что условие (1) выполняется для корпусов БА. Выражение (2) справедливо для металлических материалов, из которых изготавливают корпуса БА.

Под воздействием электрического поля (рис. 1,а) в гранях экрана, перпендикулярных вектору $\vec{E}_y(t)$, происходит разделение свободных зарядов 1 и 1', 2 и 2', как это показано на рис. 1, б. Одновременно с этим заряды 1' перетекают и компенсируют 2. Результатом этих процессов является возникновение компенсирующего электрического поля $\vec{E}_{k,y}(t)$ внутри экрана, когда его левая грань заряжается

отрицательно, а правая – положительно (рис. 1,в). Компенсирующее электрическое поле $\vec{E}_{k,y}(t)$, направленное навстречу воздействию полю $\vec{E}_y(t)$ (рис. 1,в), обеспечивает защитный эффект экрана. Поле $\vec{E}_{e,y}(t)$ внутри экрана определяется формулой

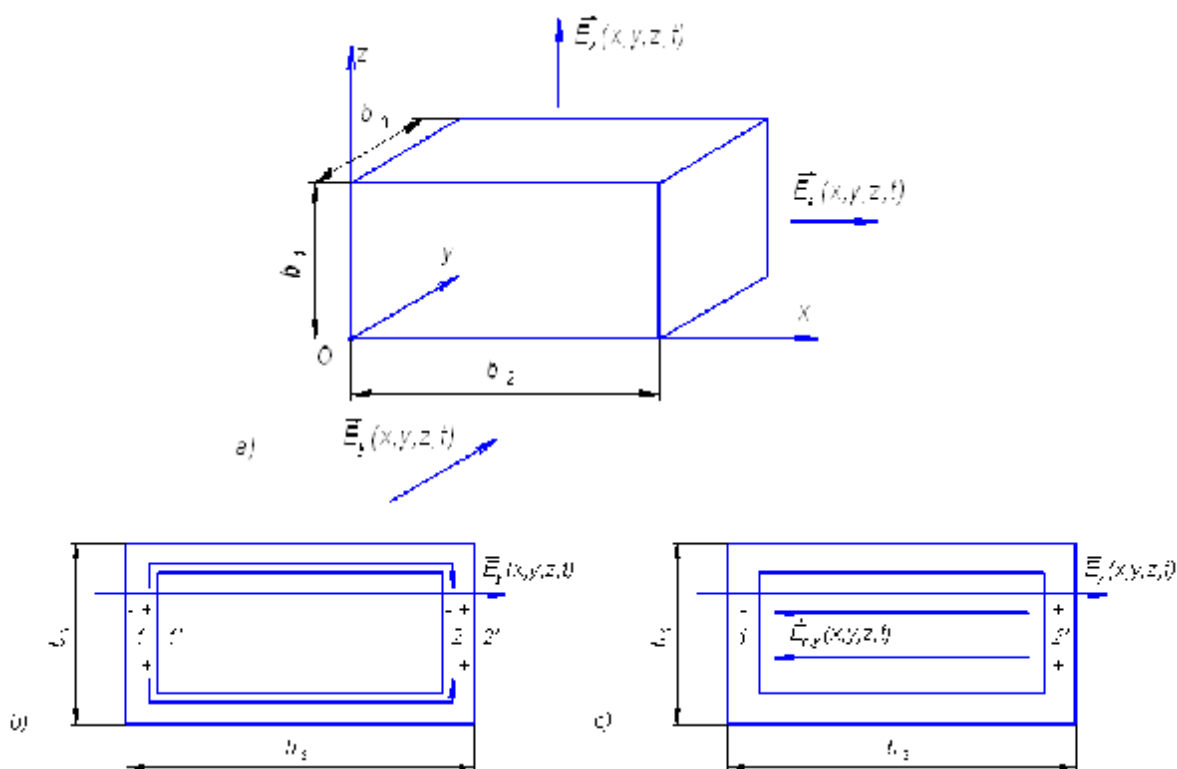
$$\vec{E}_{e,y}(t) = \vec{E}_y(t) - \vec{E}_{k,y}(t). \tag{3}$$


Рис. 1. Воздействие электрического поля на электромагнитный экран

Пусть на однородный электромагнитный экран в форме параллелепипеда (а корпуса БА КА чаще всего имеют именно такую форму) действует электрическое поле вызванное ЭСР

$$\vec{E}(t) = \vec{E}_x(t) + \vec{E}_y(t) + \vec{E}_z(t). \tag{4}$$

Рассмотрим воздействие составляющей $E_y(t)$ на экран (рис. 1), а затем, распространим на остальные координаты. Согласно методике, описанной в [2], электрическое поле вызывает в стенках

экрана ЭДС

$$e_y(t) = \int_0^{b_3} E_y(t) dy. \tag{5}$$

Под действием $e_y(t)$ в гранях экрана, параллельных вектору $E_y(t)$, возникает переменный ток $i_y(t)$. Цепь, по которой течёт этот ток, можно представить в виде эквивалентной схемы с сосредоточенными параметрами (рис. 2). L_i, C_i, R_i – индуктивность, ёмкость и активное сопротивление экрана соответственно.

Индекс i равен x , если рассматривается воздействие составляющей $E_x(t)$. Индекс i равен y , если рассматривается воздействие

составляющей $E_y(t)$. Индекс i равен z , если рассматривается воздействие составляющей $E_z(t)$.

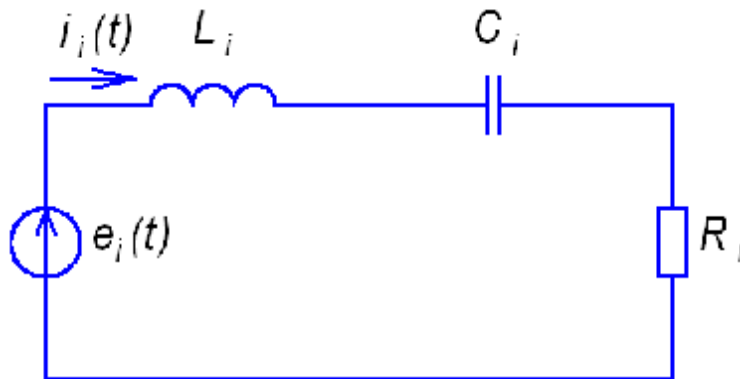


Рис. 2. Эквивалентная схема экрана

Ток в цепи, представленной на рис.2, можно определить из уравнения [2]

$$e_y(t) = R_y \cdot i_y(t) + L_y \frac{di_y(t)}{dt} + \frac{1}{C_y} \int i_y(t) dt \quad (6)$$

Компенсирующее поле можно определить из уравнения [2]

$$\int_0^{b_3} E_{к.у}(t) dy = L_y \frac{di_y(t)}{dt} + \frac{1}{C_y} \int i_y(t) dt \quad (7)$$

Решим эти уравнения операторным методом. Из выражения (6) получим ток

$$\begin{aligned} \mathcal{I}_y(p) &= \frac{\mathcal{E}_y(p)}{R_y + pL_y + 1/pC_y} = \\ &= \frac{pC_y}{p^2L_yC_y + pR_yC_y + 1} \int_0^{b_3} \mathcal{E}_y(p) dy \end{aligned} \quad (8)$$

где $p = \delta + j\omega$ – комплексная частота; δ – коэффициент затухания; j – мнимая единица; ω – угловая частота. Из формулы (7) выразим компенсирующее поле и подставим в него ток. При этом получим

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{к.у}(p) &= \frac{p^2C_yL_y + 1}{p^2L_yC_y + pR_yC_y + 1} \frac{d}{dy} \int_0^{b_3} \mathcal{E}_y(p) dy = \\ &= \frac{p^2C_yL_y + 1}{p^2L_yC_y + pR_yC_y + 1} \mathcal{E}_y(p) \end{aligned} \quad (9)$$

Индуктивность экрана можно найти по формуле, приведённой в [4]

$$L_y = \frac{\mu_0 b_3}{2p} \left(\ln \frac{2\sqrt{pb_3}}{\sqrt{b_1 b_2}} - 1 - m_H \ln C_0 \right) \quad (10)$$

где μ_0 и μ_H – магнитная постоянная и относительная начальная магнитная проницаемость материала экрана соответственно; C_0 – функция поперечных размеров экрана, которая приведена в книге [4].

Ёмкость экрана можно определить как ёмкость конденсатора, образованного плоскостями экрана, на которых образуются заряды [2]:

$$C_y = \frac{\epsilon_0 b_1 b_2}{b_3} \quad (11)$$

В выражении (11) относительная диэлектрическая проницаемость равна единице. Это справедливо для вакуума и воздуха, внутри БА КА чаще всего бывает именно такая среда.

Сопротивление экрана определяется по формуле [2]

$$R_y = \frac{4b_3 + b_y}{8s(b_1 + b_2)d_y} \quad (12)$$

где σ – удельная электрическая проводимость материала стенок экрана; d – эффективная толщина стенок экрана; b – коэффициент, который определяется по формуле [2]

$$b_y = \begin{cases} b_1(3 - b_1/b_2), \text{ при } b_1 \leq b_2, \\ b_2(3 - b_2/b_1), \text{ при } b_1 \geq b_2. \end{cases} \quad (13)$$

Эффективная толщина стенок экрана учитывает скин-эффект

$$d_y = \frac{w_0 d_0 + I_{1,y}}{w_0 + G_{1,y}}. \quad (14)$$

Входящие в формулу (14) параметры определяются следующим образом:

$$w_0 = \frac{2}{m_0 S \cdot d_0^2}, \quad (15)$$

$$G_{1,y} = \int_{w_0}^{\infty} \frac{|\dot{I}_y(w)|^2}{|\dot{I}_y(0)|^2} dw, \quad (16)$$

$$I_{1,y} = \int_{w_0}^{\infty} \frac{|\dot{I}_y(w)|^2}{|\dot{I}_y(0)|^2} d(w) dw, \quad (17)$$

$$d(w) = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{m_0 S w}}, \quad (18)$$

где $\dot{I}_y(w)$ равно $\dot{I}_y(p)$ при $p = jw$, то есть при коэффициенте затухания, равном нулю.

Итак, компенсирующее поле внутри экрана можно определить по формулам:

$$\dot{E}_{k,x}(p) = \frac{p^2 C_x L_x + 1}{p^2 L_x C_x + p R_x C_x + 1} \dot{E}_x(p);$$

$$\dot{E}_{k,y}(p) = \frac{p^2 C_y L_y + 1}{p^2 L_y C_y + p R_y C_y + 1} \dot{E}_y(p);$$

$$\dot{E}_{k,z}(p) = \frac{p^2 C_z L_z + 1}{p^2 L_z C_z + p R_z C_z + 1} \dot{E}_z(p). \quad (19)$$

Если принять коэффициент затухания комплексной частоты p равным нулю, то получим спектральную плотность электрического поля. В некоторых случаях для анализа можно использовать именно её, но если необходима временная зависимость, то выражения (19) необходимо подвергнуть обратному преобразованию Лапласа.

Рассмотрим воздействие магнитного поля на электромагнитный экран. Пусть на однородный электромагнитный экран в форме параллелепипеда действует магнитное поле, вызванное ЭСР

$$\dot{H}(t) = \dot{H}_x(t) + \dot{H}_y(t) + \dot{H}_z(t). \quad (20)$$

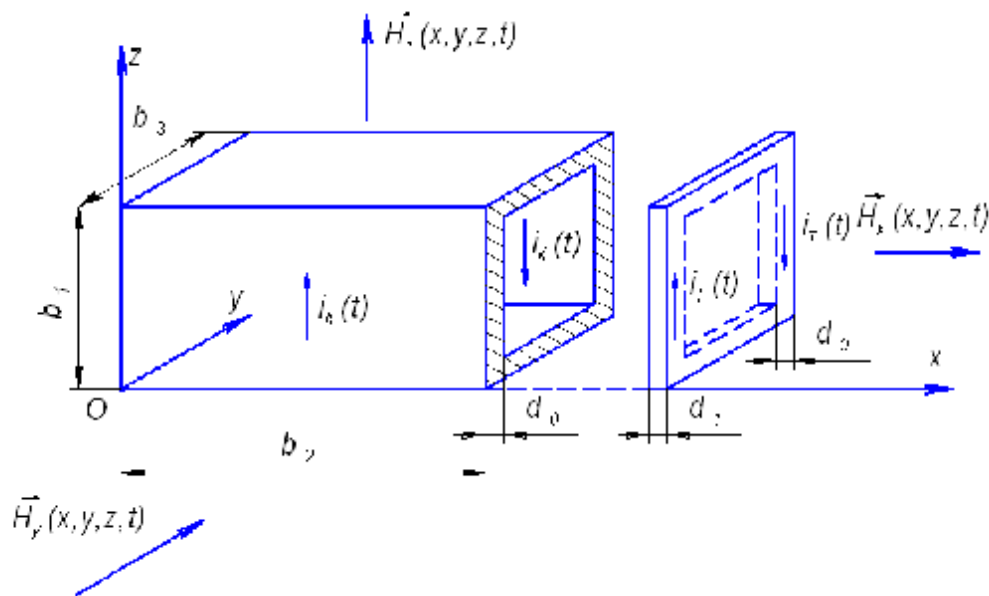


Рис. 3. Воздействие магнитного поля на электромагнитный экран

Согласно физико-математической модели, описанной в [2], поле внутри экрана определяется в два этапа. На первом этапе поле взаимодействует с торцевой гранью экрана. На втором этапе поле (как результат взаимодействия с торцевой гранью) взаимодействует с корпусом экрана.

Рассмотрим воздействие составляющей $H_x(t)$ на экран, представленный на рис. 3. На торцевую стенку с размерами b_1, b_3 действует магнитное поле с магнитной индукцией, равной произведению магнитной постоянной на проекцию вектора напряжённости магнитного поля на ось Ox $\mu_0 H_x(t)$. Поскольку на границе раздела торцевой стенки и воздушной среды нормальные составляющие линий магнитной индукции непрерывны [5], то магнитная индукция в торцевой стенке экрана будет равна

$$\dot{B}_x(t) = m_0 \dot{H}_x(t). \quad (21)$$

Под действием магнитной индукции в торцевой стенке наводится ЭДС

$$e_{T,x}(t) = -\frac{d}{dt} \int_S \dot{B}_x(t) dS, \quad (22)$$

где S – поверхность торцевой грани $b_1 b_3$. ЭДС, наведённая в торцевой грани экрана, вызывает ток $i_{T,x}(t)$. Торцевую стенку, по которой течёт этот ток, можно представить в виде эквивалентной схемы с сосредоточенными параметрами (рис. 4). $L_{T,i}, R_{T,i}$ – индуктивность и активное сопротивление торцевой стенки экрана соответственно; $L_{K,i}, R_{K,i}$ – индуктивность и активное сопротивление корпуса экрана соответственно. Индекс i равен x , если рассматривается воздействие составляющей $H_x(t)$. Индекс i равен y , если рассматривается воздействие составляющей $H_y(t)$. Индекс i равен z если, рассматривается воздействие составляющей $H_z(t)$. Запишем второй закон Кирхгофа для этой цепи

$$R_{T,x} i_{T,x}(t) + L_{T,x} \frac{di_{T,x}(t)}{dt} = -\frac{d}{dt} \int_S \dot{B}_x(t) dS. \quad (23)$$

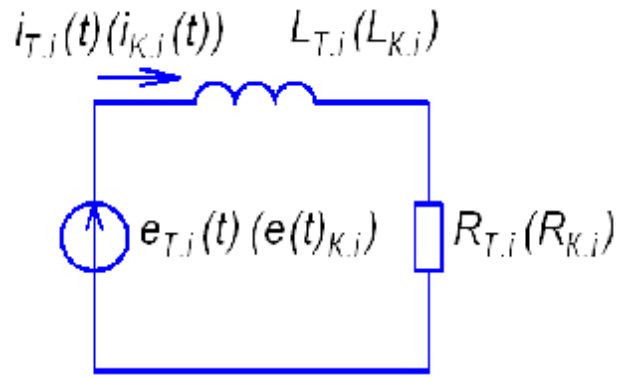


Рис. 4. Эквивалентная схема торца корпуса (экрана)

Ток $i_{T,x}(t)$ вызывает магнитное поле индукцией $\dot{B}'_x(t)$. Магнитную индукцию можно найти из уравнения

$$\frac{d}{dt} \int_S \dot{B}'_x(t) dS = L_{T,x} \frac{di_{T,x}(t)}{dt}. \quad (24)$$

Решив уравнение (23) операторным методом, получим

$$\begin{aligned} \dot{B}'_{T,x}(p) &= -\frac{p}{R_{T,x} + L_{T,x}p} \int_S \dot{B}_x(p) dS = \\ &= -\frac{p}{R_{T,x} + L_{T,x}p} \dot{B}_x(p), \end{aligned} \quad (25)$$

где $\dot{B}_x(p)$ – магнитный поток вектора $\dot{B}_x(p)$ через площадку S .

Теперь решим уравнение (24) операторным методом

$$\dot{B}'_{T,x}(p) = \frac{1}{L_{T,x}} \int_S \dot{B}_x(p) dS = \frac{\dot{B}_x(p)}{L_{T,x}}, \quad (26)$$

где $\dot{B}_x(p)$ – магнитный поток вектора $\dot{B}_x(p)$ через площадку S .

Приравняв правые части (25) и (26) и выразив $\dot{B}_x(p)$ через $\dot{B}'_x(p)$, получим

$$\dot{B}'_x(p) = -\frac{L_{T,x}p}{R_{T,x} + L_{T,x}p} \dot{B}'_x(p). \quad (27)$$

Результирующий магнитный поток в торце экрана будет равен сумме $\dot{B}'_x(p) + \dot{B}_x(p)$ (по принципу суперпозиции)

$$\dot{B}'_x(p) = \frac{R_{T,x}}{R_{T,x} + L_{T,x}p} \dot{B}_x(p). \quad (28)$$

Если в (28) выразить магнитные потоки через векторы магнитной индукции (через интегралы по поверхности S), внести под знак интеграла выражений перед интегралом в правой части как константу $R_{T,x}/(R_{T,x}+L_{T,x}p)$ и продифференцировать обе части по S , то получим

$$\mathbb{B}_x(p) = \frac{R_{T,x}}{R_{T,x} + L_{T,x}p} \mathbb{B}_x(p). \quad (29)$$

Поскольку на границе раздела торцевой стенки и воздушной среды нормальные составляющие линий магнитной индукции непрерывны [5], то магнитная индукция в полости экрана будет равна результирующей магнитной индукции в торце экрана. Теперь результирующее поле взаимодействует с корпусом экрана. Для определения поля внутри экрана необходимо проделать те же операции, что и для определения результирующего поля торцевой стенки [2]. Получим

$$\mathbb{B}_{p,x}(p) = \frac{R_{K,x}}{R_{K,x} + L_{K,x}p} \times \frac{R_{T,x}}{R_{T,x} + L_{T,x}p} \mathbb{B}_x(p), \quad (30)$$

где $R_{K,x}$, $L_{K,x}$ – эквивалентное сопротивление и индуктивность, соответственно, корпуса экрана (рис.4).

Итак, поле внутри экрана можно определить по формулам:

$$\begin{aligned} \mathbb{B}_{p,x}(p) &= \frac{R_{K,x}}{R_{K,x} + L_{K,x}p} \cdot \frac{R_{T,x}}{R_{T,x} + L_{T,x}p} \mathbb{B}_x(p); \\ \mathbb{B}_{p,y}(p) &= \frac{R_{K,y}}{R_{K,y} + L_{K,y}p} \cdot \frac{R_{T,y}}{R_{T,y} + L_{T,y}p} \mathbb{B}_y(p); \\ \mathbb{B}_{p,z}(p) &= \frac{R_{K,z}}{R_{K,z} + L_{K,z}p} \cdot \frac{R_{T,z}}{R_{T,z} + L_{T,z}p} \mathbb{B}_z(p). \end{aligned} \quad (31)$$

Индуктивность экрана можно найти из формул, приведённых в [4]. Активные сопротивления экрана можно найти, представив элементы конструкции последнего в виде металлических колец (рис. 3) с учётом скин-эффекта. Если принять коэффициент затухания комплексной частоты p равным нулю, то получим спектральную плотность электрического поля. В некоторых

случаях для анализа можно использовать именно её, но если необходима временная зависимость, то выражения (31) необходимо подвергнуть обратному преобразованию Лапласа.

Одна из часто встречающихся конструкций БА КА – блочная конструкция (рис. 5). При анализе таких конструкций выражения (19) и (31) не будут справедливы и ими пользоваться нельзя. Необходимо рассматривать воздействие каждой составляющей полей отдельно. Так, например, при расчёте составляющей $B_{p,z}(t)$ во внутренней полости корпуса, представленного на рис.5, а необходимо учитывать влияние всех торцевых граней и корпусов. Примерно такая же картина будет при определении составляющей $B_{p,x}(t)$ во внутренней полости корпуса, представленного на рис. 5, б.

С целью определения адекватности предложенного метода был проведён эксперимент по определению магнитного поля внутри однородных экранов. Эксперимент был проведён по методике, предложенной в [2]. Лабораторный генератор создавал одиночный импульс магнитного поля, описываемый выражением

$$H(t) = 258(e^{-9,075 \cdot 10^4 t} - e^{-9,739 \cdot 10^6 t}), \text{ А/м.} \quad (32)$$

Измерения проводились индукционным датчиком с последующим неполным интегрированием [2]. Выражение (32) – это составляющая поля, параллельная оси соленоидальной катушки индукционного датчика в месте его установки без экрана.

Затем датчик помещался в экран и проводились измерения магнитного поля внутри трёх экранов (1,2 и 3). Экраны 1 и 2 были изготовлены из сплава АмГ 6 и представляли собой цилиндры диаметром 10 см и длиной 25 см. Толщина стенок экрана 1 была равна 0,4 мм. Толщина стенок экрана 2 была равна 2,5 мм. Экран 3 был изготовлен из сплава 30ХГСА и представлял собой форму параллелепипеда с длиной рёбер $b_1=15$ см, $b_2=3$ см, $b_3=5$ см. Толщина стенок экрана 1 была равна 0,1 мм.

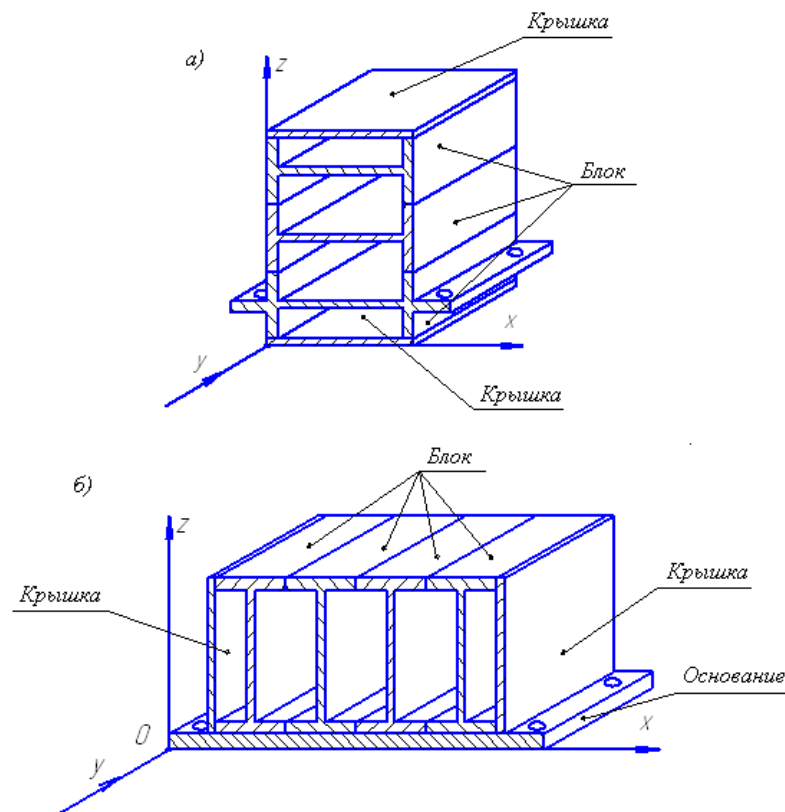


Рис. 5. Блочные конструкции БА КА

Таблица 1. Расчётные и экспериментальные данные

№ Экрана	$u(t_{m1}),$ мВ		$\tau_{\phi 1},$ мкс		$\tau_{\Pi 1},$ мкс		$t_0,$ мкс		$\tau_{\phi 2},$ мкс		$\tau_{\Pi 2},$ мкс	
	Расч.	Эксп.	Расч.	Эксп.	Расч.	Эксп.	Расч.	Эксп.	Расч.	Эксп.	Расч.	Эксп.
1	510	660	20	21	50	49	81	79	40	41	257	190
2	59	47	30,3	30,6	75	81	131	145	185	170	756	610
3	47	54	40	60	141	144	280	250	190	115	860	690

В табл. 1 представлены результаты расчёта и эксперимента.

Форма импульса на выходе датчика приведена на рис. 6. Расчётные значения получены в два этапа. Сначала рассчитывалось поле внутри экрана, затем – сигнал на выходе датчика. Расчёт по второму этапу проводился по методике, приведённой в [2].

Приведённые в табл. 1 расчётные и экспериментальные значения параметров выходного импульса индукционного датчика показывают достаточно высокую сходимость. Благодаря этому можно сделать вывод, что предложенная в настоящей статье методика расчёта электромагнитного поля внутри однородных экранов в условиях воздействия ЭСР вполне адекватна.

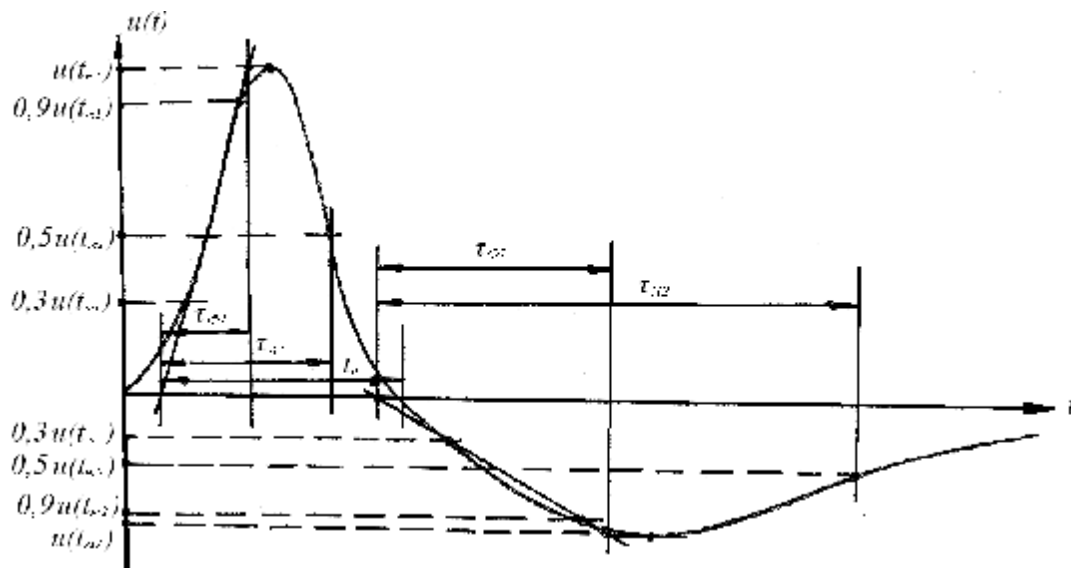


Рис. 6. Форма импульса на выходе датчика

Библиографический список

1. NASA-HDBK-4002A. Mitigating in-space charging effects. Guideline. National Aeronautics and Space Administration, 2011.-181 p.
2. Кокшаров, А.М. Импульсные электромагнитные поля внутри неоднородных экранов [Текст]/А.М. Кокшаров.- М.: ВА РВСН им. Петра Великого, 1998.- 312 с.
3. Костин, А.В. Анализ методов защиты бортовой аппаратуры космических аппаратов от воздействия

факторов электростатического разряда [Текст]/А.В. Костин//Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета, 2011.- №7(31). – С. 107-112.

4. Калантаров, П.Р., Расчёт индуктивностей [Текст]/ П.Р. Калантаров, Л.А. Цейтлин. – Справочная книга 3-е. изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленигр. отд: 1986. - 488 с.
5. Яворский, Б.Ф., Справочник по физике [Текст]/ Б.Ф. Яворский, А.А. Детлаф – М.: Наука, 1964. – 512 с.

CALCULATION OF THE ELECTROMAGNETIC FIELD IN HOMOGENEOUS HULL OF ON BOARD EQUIPMENT OF SPACE VEHICLE UNDER INFLUENCE OF ELECTROSTATIC DISCHARGES

© 2012 A.V. Kostin

Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov
(National Research University)

The method of calculation of the electric and magnetic fields in homogeneous shields for calculations electromagnetic interference inside the hull of on board equipment of space vehicle under influence of electrostatic discharges. Experimental results confirming the adequacy of the proposed method.

Onboard equipment, the space vehicle, electrostatic discharge, electric field, magnetic field, magnetic flow, current, EMF.

Информация об авторе

Костин Алексей Владимирович, аспирант кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: xpehbam27@yandex.ru. Область научных интересов: повышение устойчивости бортовой аппаратуры космических аппаратов к внешним воздействующим факторам.

Kostin Aleksey Vladimirovich, post-graduate student of the design and manufacture of electronic equipment department, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: xpehbam27@yandex.ru. Area of scientific: increase of stability of onboard equipment of space vehicles to external influencing factors.