

## РАСЧЁТ МОЩНОСТИ, РАССЕИВАЕМОЙ НА КОРПУСЕ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ПРИ ПРЯМОМ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ РАЗРЯДЕ

© 2014 А.В. Костин

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

Описывается пример расчёта мощности, рассеиваемой на корпусе бортовой аппаратуры космических аппаратов при прямом электростатическом разряде. Проводится анализ полученного результата с целью выявления опасности теплового воздействия электростатических разрядов на температурный режим бортовой аппаратуры космических аппаратов.

*Бортовая аппаратура, космический аппарат, электростатический разряд, мощность, ток, электрическое поле, магнитное поле, сопротивление.*

На борту космических аппаратов (КА) нередко возникают электростатические разряды (ЭСР). Причиной ЭСР является дифференциальная зарядка элементов конструкции КА. В связи с внедрением больших и сверхбольших интегральных микросхем в космическое приборостроение, а также увеличением срока службы КА вновь встал вопрос об устойчивости бортовой аппаратуры (БА) КА к ЭСР. Основными факторами ЭСР, влияющим на нормальное функционирование БА КА, являются электромагнитные помехи [1]. Однако токи, текущие по корпусу БА КА, особенно при прямом ЭСР (непосредственно в корпус), вызовут изменение его температуры.

Целью работы является проведение оценочного расчёта средней мощности, рассеиваемой на корпусе БА КА при прямом ЭСР. Причина проведения такого анализа заключается в том, что энергия ЭСР может достигать 0,2 Дж, а частота повторения ЭСР может достигать 50 Гц. При такой энергии и частоте повторения импульса ЭСР средняя мощность за период будет составлять 10 Вт. Это достаточно большая величина для БА КА, что может не только затруднить её работу, но и нарушить работоспособность.

### Исходные данные

Рассмотрим корпус БА КА в форме параллелепипеда, размеры которого указаны на рис. 1. Материал корпуса – сплав на основе алюминия. Толщина стенок 1,5 мм. Отвер-

стия и другие неоднородности, через которые могут проникнуть электромагнитные волны внутрь корпуса, отсутствуют.

Будем считать, что прибор установлен на непроводящую поверхность, а все металлизированные элементы конструкции КА находятся достаточно далеко от корпуса БА КА, так что ёмкость между корпусом БА и металлизированными элементами КА незначительна.

ЭСР будем моделировать, подключив источник тока  $I_p(t)$  между точкой разряда на верхней крышке и точкой металлизации на передней панели корпуса БА КА. Координаты точек подключения показаны на рис. 1. На рис. 2 показана форма импульса тока источника  $I_p(t)$ . При ЭСР в систему, состоящую из корпуса БА и остальных элементов конструкции КА, вносятся дополнительные носители электрического заряда. Имеется ввиду, что БА металлизирована с элементами конструкции КА, поэтому рассматривается система. Эти носители должны распределиться по поверхности проводника [2]. Часть носителей придёт на поверхность корпуса БА. Поэтому ток через клемму металлизации будет меньше, чем ток дуги ЭСР и модель, предложенная выше, не является точной. Однако, площадь поверхности рассматриваемой БА чаще всего много меньше, чем площадь поверхностей остальных элементов конструкции. Следовательно, предложенная модель даст достаточную точность.

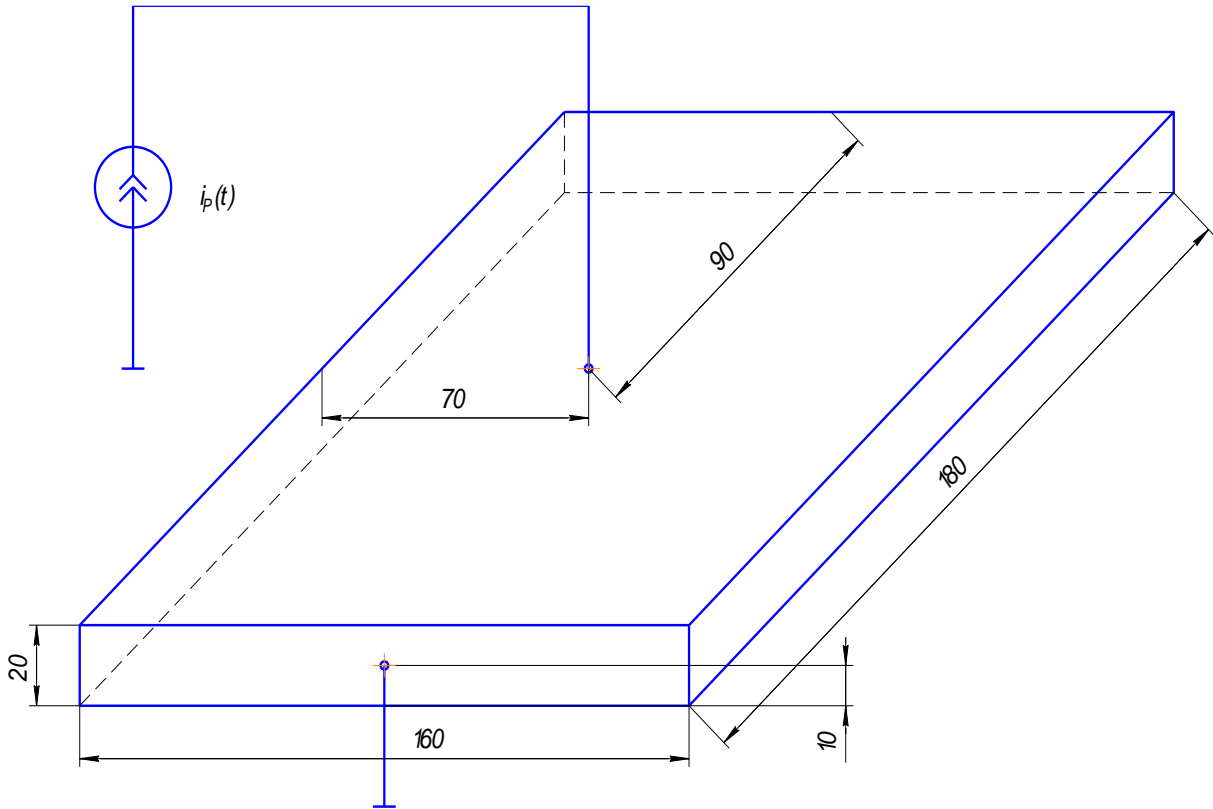


Рис. 1. Подключение источника ЭСР к корпусу КА

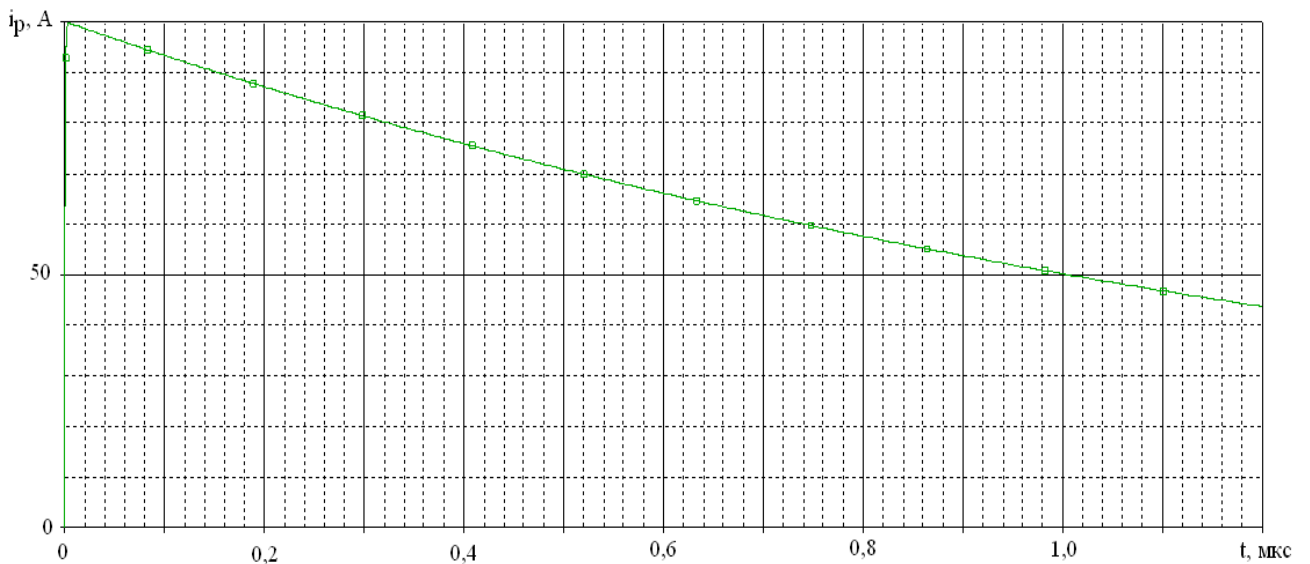


Рис. 2. Временная диаграмма разрядного импульса

Для моделирования выбран сигнал с самой большой длительностью импульса и самой маленькой длительностью переднего фронта [1, 3].

Параметры импульса, приведённого на рис. 2, следующие:

- длительность импульса по уровню 0,5 – 1 мс;
- длительность фронта по уровню 0,1-0,9 – 1 нс;
- амплитуда импульса 100 А.

Аналитическое выражение такого импульса выглядит следующим образом [3]:

$$i_p(t) = I \cdot (e^{p_1 t} - e^{p_2 t}),$$

где  $p_1 = -6,899 \cdot 10^5$ ,  $p_2 = -2,202 \cdot 10^9$  для рассматриваемого случая. Подвергнем это выражение преобразованию Фурье. При этом получим [4]

$$\begin{aligned} \dot{I}_p(j\omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} i_p(t) e^{-j\omega t} dt = \\ &= I \frac{p_1 - p_2}{\sqrt{p_1^2 + \omega^2} \sqrt{p_2^2 + \omega^2}} e^{j \left[ \arctg\left(\frac{\omega}{p_1}\right) + \arctg\left(\frac{\omega}{p_2}\right) \right]}, \end{aligned}$$

где  $j = \sqrt{-1}$  - мнимая единица,  $\omega$  - угловая частота.

### Общий принцип определения рассеиваемой мощности

Чтобы рассчитать среднюю мощность, рассеиваемую на корпусе БА КА при прямом ЭСР, необходимо определить сопротивление корпуса БА КА между точкой приложения ЭСР и точкой металлизации. Тогда, при известном токе, можно будет найти среднюю мощность рассеивания на корпусе БА. Поскольку сопротивление корпуса будет зависеть от частоты, то необходимо провести моделирование в широком диапазоне частот.

### Разбиение на элементарные фигуры

Корпус является цепью с распределёнными параметрами. Для расчёта сопротивления корпуса БА разобьём последний на некоторое количество прямоугольных параллелепипедов (рис. 3).

Размер каждого параллелепипеда  $20 \times 20 \times 1,5$  мм. В центр каждого параллелепипеда поместим узел. Каждый узел будет электрически связан с соседним посредством  $LR$  цепи.  $LR$  цепь определяется расстоянием между узлами, шириной полос, на которые условно разбит корпус, и толщиной корпуса. Такой параллелепипед будет совпадать по размерам с параллелепипедом, на которые был разбит корпус. На рис.3 показана поверхность параллелепипеда со штриховкой, наклонённой вправо и влево. Штриховка, наклонённая вправо, указывает на параллелепипед с определяющей параметрами горизонтальной  $LR$  цепью. Штриховка, наклонённая влево, указывает на параллелепипед с определяющей параметрами верти-

кальной  $LR$  цепью. В настоящем примере они одинаковы. Более правильно было бы включить между каждым узлом и корпусом ёмкость, но поскольку выше было сказано, что корпус БА КА находится достаточно далеко от металлизированных элементов конструкции, то этими ёмкостями можно пренебречь.

Суммарные токи в верхней и нижней панели корпуса будут определяться составляющими  $I_{xi}$  и  $I_{yi}$ . Аналогично - для всех остальных панелей БА. Вообще, при анализе цепи с распределёнными параметрами более правильно говорить не о силе тока, а о плотности. Чем меньше элементарные параллелепипеды, тем точнее будут вычисления. Однако анализ существенно усложнится ввиду большого количества элементов.

Итак, описанным выше способом строим эквивалентную цепь с сосредоточенными параметрами.

### Определение активного и реактивного сопротивления параллелепипеда

Поле внутри проводника прямоугольного сечения, по одной из поверхностей которого течёт ток (рис. 4), описывается уравнениями [5]

$$\begin{aligned} \dot{H} &= \dot{I}_y \frac{I \operatorname{sh}(p(h-z))}{b \operatorname{sh}(ph)}, \\ \dot{E} &= -\frac{1}{\gamma} \frac{d\dot{H}_y}{dz} = \dot{I}_x \frac{p I \operatorname{ch}(p(h-z))}{\gamma b \operatorname{sh}(ph)}, \end{aligned}$$

где  $\gamma$  - проводимость,  $I$  - ток в проводнике,  $b$  - ширина проводника,  $h$  - высота проводника,  $p = \sqrt{j \cdot \omega \cdot \gamma \cdot \mu \cdot \mu_0}$ ,  $\mu$  - относительная магнитная проницаемость,  $\mu_0$  - магнитная постоянная.

Для определения комплексного сопротивления воспользуемся теоремой Умова-Пойнтинга

$$-\oint \dot{\vec{E}} \times \dot{\vec{H}} \cdot d\vec{S} = I^2 Z.$$

Из теоремы выражаем сопротивление, которое будет складываться из активной  $R$  и реактивной  $X$  составляющих

$$Z = R + jX \frac{-\oint \dot{\vec{E}} \times \dot{\vec{H}} \cdot d\vec{S}}{I^2} = \frac{pl}{b\gamma \cdot \operatorname{th}(ph)}.$$

При этом активное сопротивление будет равно

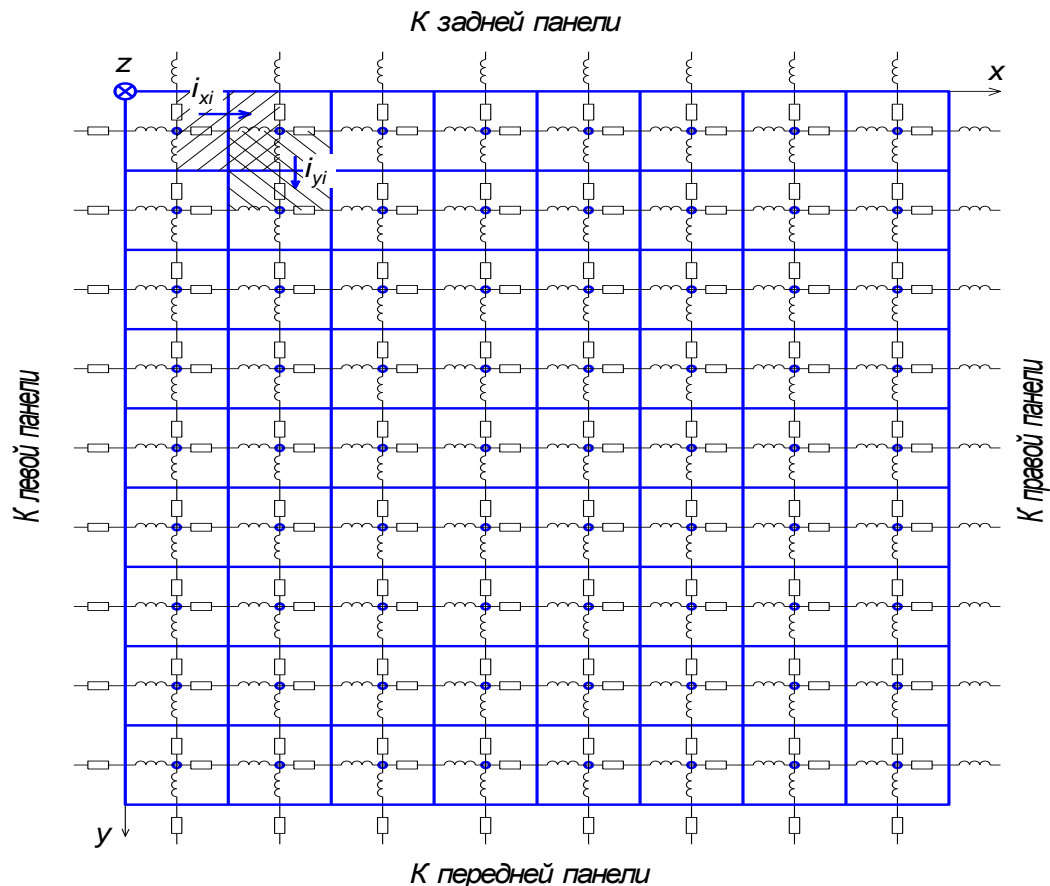


Рис.3. Представление верхней панели корпуса КА в виде эквивалентной схемы

$$R = Re \left\{ \frac{pl}{b\gamma \cdot th(ph)} \right\},$$

а индуктивность равна

$$L = \frac{X}{\omega} = \frac{Im \left\{ \frac{pl}{b\gamma \cdot th(ph)} \right\}}{\omega}.$$

Графики зависимостей  $R(f)$  и  $X(f)$  представлены на рис. 5. Определим сопротивление и индуктивность элементарного параллелепипеда на частотах от 1 кГц до 168,3 МГц с шагом, равным двукратному увеличению частоты, и на нулевой частоте. В табл. 1 приведены значения  $R$  и  $L$  на этих частотах.

В местах перехода с одной поверхности на другую параллелепипеды вырождаются в фигуру в виде двух объединённых параллелепипедов меньшей длины, расположенных под углом друг другу. Поскольку площадь поверхности этих параллелепипедов та же, что и у рассматриваемых, а объём отличается незначительно, то их индуктивность и активное сопротивление можно принять таки-

ми же, что и у фигур, рассмотренных выше. Ошибка будет более существенной на вершинах, где площадь поверхности и объём будут меньше, чем у рассмотренных выше элементарных параллелепипедов. Однако, вершин всего 8, а количество параллелепипедов много больше. Поэтому вклад первых в общую ошибку будет не таким значимым.

### Построение эквивалентной схемы и проведение расчёта

В результате была построена эквивалентная схема, состоящая из 178 узлов. Источник тока подключен к узлам 76 и 166. Моделирование производилось в среде OrCAD 9.1. Моделирование проводилось на частотах, указанных в табл. 1 с использованием значений  $R$  и  $L$ , приведённых в той же таблице.

Результатом моделирования является амплитуда напряжения  $\dot{U}$  на источнике тока  $i$ . Если записать комплексное сопротивление корпуса через закон Ома, то получим

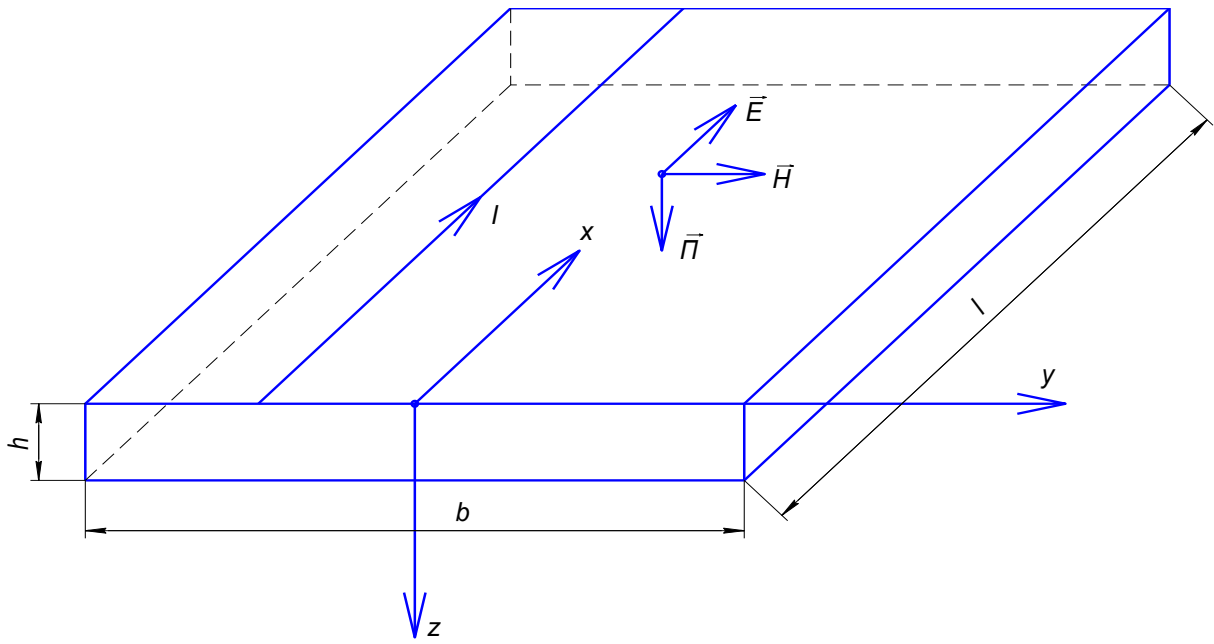


Рис. 4. Элементарный параллелепипед

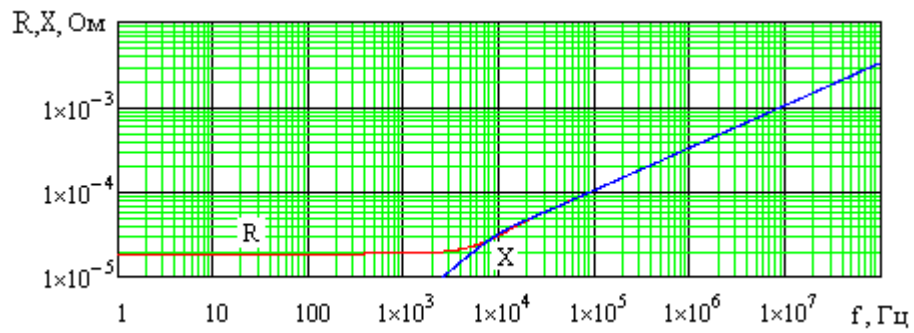


Рис. 5. Зависимость активной и реактивной составляющей от частоты

Таблица 1. Значения сопротивления и индуктивности

f, кГц	R, Ом	L, Гн	f, кГц	R, Ом	L, Гн
0	$1.867 \times 10^{-5}$	0	512	$2.379 \times 10^{-4}$	$7.395 \times 10^{-11}$
1	$1.883 \times 10^{-5}$	$6.267 \times 10^{-10}$	1024	$3.364 \times 10^{-4}$	$5.229 \times 10^{-11}$
2	$1.932 \times 10^{-5}$	$6.22 \times 10^{-10}$	2048	$4.758 \times 10^{-4}$	$3.698 \times 10^{-11}$
4	$2.118 \times 10^{-5}$	$6.042 \times 10^{-10}$	4096	$6.729 \times 10^{-4}$	$2.615 \times 10^{-11}$
8	$2.728 \times 10^{-5}$	$5.467 \times 10^{-10}$	8192	$9.516 \times 10^{-4}$	$1.849 \times 10^{-11}$
16	$4.095 \times 10^{-5}$	$4.253 \times 10^{-10}$	16384	$1.346 \times 10^{-3}$	$1.307 \times 10^{-11}$
32	$5.97 \times 10^{-5}$	$2.967 \times 10^{-10}$	32768	$1.903 \times 10^{-3}$	$9.244 \times 10^{-12}$
64	$8.41 \times 10^{-5}$	$2.091 \times 10^{-10}$	65536	$2.692 \times 10^{-3}$	$6.536 \times 10^{-12}$
128	$1.19 \times 10^{-4}$	$1.479 \times 10^{-10}$	131072	$3.806 \times 10^{-3}$	$4.622 \times 10^{-12}$
256	$1.682 \times 10^{-4}$	$1.046 \times 10^{-10}$	168300	$4.313 \times 10^{-3}$	$4.079 \times 10^{-12}$

$$\begin{aligned}\dot{Z}_K &= \frac{\dot{U}_K}{\dot{I}_K} = \frac{|\dot{U}_K|}{|\dot{I}_K|} e^{j(\varphi_{UK} - \varphi_{IK})} = \\ &= \frac{|\dot{U}_K|}{|\dot{I}_K|} \cos(\varphi_{UK} - \varphi_{IK}) + \\ &+ j \frac{|\dot{U}_K|}{|\dot{I}_K|} \sin(\varphi_{UK} - \varphi_{IK}).\end{aligned}$$

Необходимо знать активное сопротивление корпуса, т.к. именно оно преобразует электрическую энергию в тепло. Тогда активное сопротивление корпуса можно найти следующим образом

$$\begin{aligned}R_K &= \frac{|\dot{U}_K|}{|\dot{I}_K|} \cos(\varphi_{UK} - \varphi_{IK}) = \\ &= |\dot{Z}_K| \cos(\varphi_{UK} - \varphi_{IK}).\end{aligned}$$

Таблица 2. Результаты моделирования

$f$ , кГц	$ \dot{U}_K $ , мкВ	$ \dot{Z}_K $ , мкОм	$\varphi_{UK} - \varphi_{IK}$ , градусах	$R_K$ , мкОм
0	18,6195	18,6195	0	18,6195
1	19,1884	19,1884	11,8113	18,78254
2	20,7880	20,7880	22,0268	19,27217
4	25,9948	25,9948	35,639	21,13086
8	38,6230	38,6230	45,2094	27,22155
16	59,0521	59,0521	46,2359	40,86324
32	84,1821	84,1821	44,9784	59,57185
64	118,6216	118,6216	44,9946	83,91943
128	167,8268	167,8268	44,9876	118,7444
256	237,2999	237,2999	45,0083	167,8389
512	335,5830	335,5830	44,9996	237,3891
1024	474,5544	474,5544	45,0028	335,6778
2048	671,2048	671,2115	45,0034	474,779
4096	949,2701	949,2701	45,004	671,4557
8192	1342,4230	1342,4230	45,0035	949,5563
16384	1898,3184	1898,3184	44,9888	1343,11
32768	2684,5597	2684,5597	45,0034	1898,913
65536	3796,9271	3796,9271	44,9932	2686,22
131072	5369,1194	5369,1194	45,0034	3797,827
168300	6084,2545	6084,2545	45,0025	4303,743

Как известно, средняя активная мощность за период периодического сигнала может быть найдена как сумма мощностей, рассеиваемых каждой гармоникой

При моделировании источник тока формировал сигнал амплитудой 1 А и начальной фазой  $0^\circ$ . В табл. 2 представлены результаты моделирования.

#### Расчёт мощности, рассеиваемой на корпусе

Рассматривать воздействие одиночного импульса не имеет смысла, так как от его воздействия корпус даже не нагреется. Энергия, сообщённая этим импульсом, быстро рассеется, так как её мало. Но периодическое воздействие импульсов может привести к более значимому изменению температуры. Как уже было сказано, частота повторения импульсов ЭСР может достигать  $f_H=50$  Гц.

$$P = I_{P0}^2 R_{K0} + \sum_{n=1}^N \frac{I_{Pn}^2}{2} R_{Kn},$$

где  $N$  – число гармоник в рассматриваемом диапазоне частот (от 50 Гц до 168,3 МГц),  $I_{P0}$  – постоянная составляющая в спектре тока

ЭСР,  $I_{Pn}$  – амплитуда тока гармоники с номером  $n$  в спектре тока ЭСР,  $R_{K0}$  – сопротивление корпуса по постоянному току,  $R_{Kn}$  – активное сопротивление корпуса на гармонике с номером  $n$ . Число гармоник определяем из выражения

$$N = \frac{f_{max}}{f_n} = 3,366 \cdot 10^6.$$

Амплитуды гармоник определяем из спектральной плотности одиночного импульса по формуле [6]

$$I_{Pn} = 2 \cdot f_u \cdot |I(j2\pi n f_u)|.$$

Постоянную составляющую определяем как среднее значение сигнала

$$I_0 = \frac{1}{T_H} \int_0^{T_H} i_p(t) dt \approx \frac{I}{T_H} \cdot \frac{p_1 - p_2}{p_1 p_2} = 7,245 \cdot 10^{-3} A,$$

где  $T_H = 1/f_H$  – период следования импульсов ЭСР.

Сопротивление  $R_{K0}$  известно, а сопротивления  $R_{Kn}$  необходимо найти. Моделирование проводилось лишь на 20 точках, а всего гармоник более трёх миллионов. Для определения  $R_{Kn}$  необходимо знать зависимость сопротивления корпуса от частоты  $R_K(f)$ . Для определения последней проведём кусочно-линейную аппроксимацию по найденным значениям. Каждый фрагмент функции представим в виде отрезка прямой линии. Уравнения этих прямых линий будут выглядеть следующим образом

$$R_K(f) = \frac{R_{K(m+1)} - R_{Km}}{f_{(m+1)} - f_m} (f - f_m) + R_{Km}, \text{ при } f \in (f_m; f_{m+1}]$$

где  $m$  – номер частоты из табл. 1 и 2.

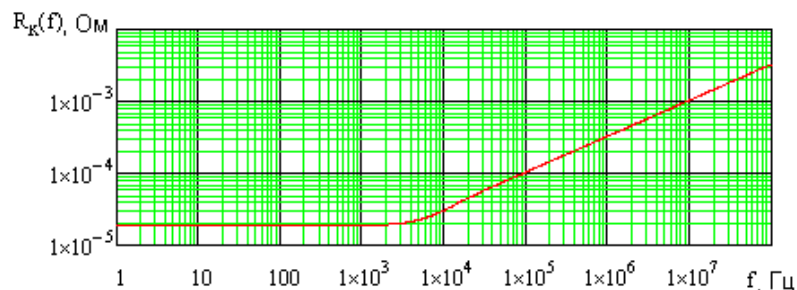


Рис. 6. Аппроксимация кривой зависимости активного сопротивления корпуса БА от частоты

### Выводы

Полученные результаты расчётов и опыт конструирования БА КА показывают, что мощность, рассеиваемая на корпусе при

На рис. 6 представлен график аппроксимированной функции  $R_K(f)$ . Как видно из рисунка, аппроксимация довольно точная, фрагментов линий практически невидно. Проведение такой аппроксимации стало возможным также благодаря отсутствию резонансов в эквивалентной схеме.

Расчёт средней мощности, рассеиваемой на корпусе, даёт значение 54, 38 мкВт. Расчёт проводился при помощи Mathcad 14. Другое сопротивление, которое не учтено в процессе расчёта, это само сопротивление контакта металлизации. При резбовом соединении провода металлизации (как правило, это плетёнка с наконечником) сопротивление контакта, как правило, не превышает 200 мкОм. Зависимость этого сопротивления от частоты является очень сложной. Однако можно предположить, что сопротивление контакта будет очень слабо зависеть от частоты. Это связано с тем, что контакт обеспечивается не по всей поверхности, а в большом количестве микроскопических точек ввиду неровностей и шероховатости поверхностей. Это будет работать как многожильный провод, в котором сопротивление меньше зависит от частоты. Таким образом, считаем, что сопротивление контактов не зависит от частоты.

По такой же методике находим мощность, рассеиваемую на контакте металлизации. Она составляет 72,4 мкВт.

прямом ЭСР, не может вызвать существенного повышения температуры корпуса даже при отводе тепла излучением через основание. Конечно, в реальной БА имеется масса

неоднородностей и резбовых соединений. На резбовых соединениях будет рассеиваться большая мощность, но, как показано выше, эта величина незначительна. Исходя из изложенных выше рассуждений можно

сделать вывод, что проводить тепловое расчёты БА КА с учётом воздействия ЭСР не имеет смысла. Процесс этот ресурсоёмкий, а полученный результат не повлияет на общую картину.

### Библиографический список

1. Костин А.В., Пиганов М.Н. Расчет помех в цепях бортовой аппаратуры космических аппаратов, вызванных электростатическими разрядами / (Известия Самарского научного центра РАН. 2012.Т.14.№4(5). С. 1376-1379.

2. Яворский Б.Ф., Детлаф А.А. Справочник по физике. М.: Наука, 1964.-512 с.

3. Соколов А.Б. Обеспечение стойкости бортовой аппаратуры космических аппаратов к воздействию электростатических разрядов. Диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Москва: МИЭМ, 2009.

4. Костин, А.В. Анализ методов защиты бортовой аппаратуры космических ап-

паратов от воздействия факторов электростатического разряда //Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета, 2011. №7(31). С. 107-112.

5. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле. Учебник для электротехн., энерг., приборостроит. спец. вузов. 8-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1986. 236 с.

6. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы: Учебник для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Радио и связь, 1986. 512 с.

### Информация об авторе

**Костин Алексей Владимирович**, аспирант кафедры конструирования и технологии электронных систем и устройств, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва

(национальный исследовательский университет). E-mail: [kipres@ssau.ru](mailto:kipres@ssau.ru). Область научных интересов: повышение устойчивости бортовой аппаратуры космических аппаратов к внешним воздействующим факторам.

## CALCULATION OF POWER DISSIPATION IN CORPS OF ONBOARD EQUIPMENT OF SPACE VEHICLE IN DIRECT ELECTROSTATIC DISCHARGE

© 2014 A.V. Kostin

Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

Describes an example of the calculation of power dissipation in corps of onboard equipment of space vehicle in direct electrostatic discharge. The analysis of the obtained results in order to identify hazards thermal influence of electrostatic discharges on the temperature regime of onboard equipment of space vehicle.

*Onboard equipment, the space vehicle, electrostatic discharge, power, current, electric field, magnetic field, resistance.*



## References

1. Kostin AV Piganov MN The calculation of interference in the circuits onboard equipment spacecraft caused by electrostatic discharges / (Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2012.T.14. № 4 (5). P. 1376-1379. (In Russ.)
2. Jaworski B.F., Detlaf A.A. Handbook of physics. Nauka, 1964.-512.
3. Sokolov A.B. Ensuring stability of onboard equipment space vehicles to the effects of electro-static discharge. Thesis for the degree of Doctor of Technical Sciences. Moscow: MIEM 2009.
4. Kostin A.V. Analysis methods of protection board equipment cosmic devices against electrostatic discharge factors / Bulletin of the Samara State Aerospace University vennogo-2011. № 7 (31). P. 107-112. (In Russ.)
5. Bessonov L.A. Theory of Electrical Engineering. Electromagnetic field. Textbook for electro-technical., Energy., Priborostroit. specials. universities. 8<sup>th</sup> ed., Rev. and add. M.: Higher. scl., 1986. 236.
6. Gonorovsky I.S. Radiotekhnical circuits and signals: A Textbook for wu-call. 4th ed., Rev. and add. M.: Radio and Communications, 1986. 512.

## About the author

**Kostin Aleksey Vladimirovitch**, post-graduate student. E-mail: [kipres@ssau.ru](mailto:kipres@ssau.ru). Area of research: increase of stability of onboard equipment of space vehicles to external influencing factors.