

УДК 621.396

Исследование частотных характеристик моделей сопротивлений связи бортовых кабелей летательных аппаратов

Кириллов В.Ю., Клыков А.В., Жегов Н.А., Нгуен В.Х., Томилин М.М.

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва А-80, ГСП-3, 125993, Россия

e-mail: k309@mai.ru

Аннотация

В статье приводится сравнение частотных диаграмм различных моделей сопротивления связи бортового кабеля летательного аппарата, выполненное в программной среде MATLAB.

Ключевые слова: бортовой кабель, летательный аппарат, электромагнитная помеха, сопротивление связи.

Бортовые кабели летательных аппаратов (ЛА) являются наиболее восприимчивой частью бортовых систем ЛА к воздействию электромагнитных помех (ЭМП).

К основным источникам внешних ЭМП, представляющих опасность для бортовых систем ЛА относятся [1]: грозовые разряды, электромагнитный импульс ядерного взрыва, электростатические разряды, радиопередающие и радиолокационные станции, установки направленного излучения сверхширокополосных импульсов и т.п.

Излучаемые ЭМП естественного и искусственного происхождения, путём воздействия на бортовую кабельную сеть, могут значительно ухудшить качество функционирования бортовых систем ЛА и, в некоторых случаях, привести к полному нарушению работоспособности.

Защищённость бортовых систем ЛА от ЭМП во многом зависит от эффективности экранирования бортовых кабелей, которая определяется параметрами экранов кабелей и линий связи бортовых систем.

Эффективность экранирования связана с важной характеристикой экранов кабелей – сопротивлением связи (передаточным сопротивлением).

Сопротивление связи определяется отношением напряжения "холостого хода" между внутренним проводником и экраном кабеля к току, протекающему по экрану, на единицу длины:

$$Z_{св.} = \frac{U_{э.п.}}{I_э \cdot \ell}, \quad (1)$$

где $U_{э.п.}$ – напряжение холостого хода между внутренним проводником (проводниками) и экраном; $I_э$ – ток, протекающий по экрану; ℓ – длина кабеля.

Формула (1) справедлива для "электрически короткого" кабеля, т.е. для кабеля, длина которого значительно меньше длины волны излучаемой ЭМП в виде электромагнитного поля.

Упрощённая формула сопротивления связи кабеля с плетёным экраном имеет вид [2]:

$$\underline{Z}_{св.}(\omega) = \frac{1+j}{2\pi r_0 \cdot \sigma_э \cdot \delta(\omega) \cdot \operatorname{sh} \left[\frac{(1+j) \cdot d}{\delta(\omega)} \right]} + j\omega M, \quad (2)$$

где r_0 – радиус экрана бортового кабеля; $\sigma_э$ – удельная проводимость материала,

из которого изготовлен экран; $\delta(\omega) = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu_a \cdot \sigma_э}}$ – толщина скин-слоя материала,

из которого изготовлен экран; d – диаметр проволоки, из которой изготовлен экран; M – взаимная индуктивность между экраном и внутренними проводниками кабеля, характеризующая неоднородности экрана в виде оплётки; $\mu_a = \mu_r \cdot \mu_0$ – абсолютная магнитная проницаемость; μ_r – относительная магнитная проницаемость; $\mu_0 \approx 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$ – магнитная постоянная.

Для количественной оценки взаимной индуктивности M может быть использовано соотношение $\frac{M}{Z_{\text{в}}}$, численное равное, например [2]:

$$\frac{M}{Z_{\text{в}}} = \begin{cases} 98,5 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Гн}}{\text{Ом} \cdot \text{м}} & \text{– кабель с одним плетёным экраном;} \\ 18,6 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Гн}}{\text{Ом} \cdot \text{м}} & \text{– кабель с двумя плетёными экранами;} \\ 4,67 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Гн}}{\text{Ом} \cdot \text{м}} & \text{– кабель с тремя плетёными экранами,} \end{cases}$$

где $Z_{\text{в}}$ – волновое сопротивление кабеля.

Для вычисления сопротивления связи по формуле (2) пренебрегают токами смещения, и принимается допущение:

$$d \ll r_0 \ll \lambda,$$

где λ – наименьшая длина волны ЭМП.

При выполнении указанных условий на низких частотах

$$\frac{d}{\delta(\omega)} \ll 1$$

формула полного сопротивления связи принимает вид:

$$R_0 = |Z_{\text{св.}}| \approx \frac{1}{2\pi r_0 d \sigma_3},$$

где R_0 – сопротивление сплошного экрана по постоянному току.

На высоких частотах

$$\frac{d}{\delta(\omega)} \ll 0; \operatorname{sh} \left[\frac{j \cdot d}{\delta(\omega)} \right] \approx 0,5 e^{(1+j)d\delta(\omega)}$$

и полное сопротивление связи сплошного экрана определяется формулой

$$|Z_{\text{св.}}| = 2\sqrt{2} e^{-d\gamma\delta(\omega)} \cdot R_0.$$

Применение обратного преобразования Фурье к переходной функции экрана позволяет получить выражение вида:

$$\frac{(1+j) \cdot d}{\delta(\omega)} = \sqrt{j\omega\tau_c},$$

где $\tau_c = \mu_0 \delta(\omega) d^2$.

Полное сопротивление связи экрана можно представить в виде:

$$Z_{\text{св.}}(\omega) = \frac{R_0 \sqrt{j\omega\tau_c}}{\operatorname{sh} \sqrt{j\omega\tau_c}}.$$

Постоянная времени проникновения тока через экран выражается формулой

$$\tau_c = \frac{\left(\frac{d}{\delta(f)}\right)^2}{\pi f}$$

Сопротивление связи для оплёточного экрана в соответствии с моделью Венса [3] определяется выражением:

$$\underline{Z}_{св.}(\omega) = \underline{Z}_0(\omega) + j\omega M = \frac{4(1+j) \cdot d}{\pi d^2 N_{ж.} \cdot N_{п.} \cdot \sigma_3 \cdot \delta(\omega) \cdot \cos \alpha \cdot \operatorname{sh} \left[\frac{(1+j) \cdot d}{\delta(\omega)} \right]} + j\omega M, \quad (3)$$

где $N_{ж.}$ – число жгутов в оплётке; $N_{п.}$ – число проволок в жгуте;

$\alpha = \operatorname{arctg} \left(\frac{4\pi r_0 P}{N_{ж.}} \right)$ – угол плетения; P – число пересечений жгутов.

Величина взаимной индуктивности M рассчитывается по формуле:

$$M \approx \begin{cases} \frac{\pi \cdot \mu_0}{6N_{ж.}} \cdot (1-K)^{\frac{3}{2}} \cdot \frac{e^2}{E(e) - (1-e^2) \cdot K(e)} - \text{для } \alpha < 45^\circ; \\ \frac{\pi \cdot \mu_0}{6N_{ж.}} \cdot (1-K)^{\frac{3}{2}} \cdot \frac{e^2}{\sqrt{1-e^2} \cdot [K(e) - E(e)]} - \text{для } \alpha > 45^\circ, \end{cases}$$

где $K = 2F - F^2$ – оптическое перекрытие оплётки; $F = \frac{PN_{п.}d}{\sin \alpha}$ – заполнение оплётки;

$K(e), E(e)$ – полные эллиптические интегралы первого и второго рода соответственно.

$$K(e) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{\sqrt{1-e^2 \cdot \sin^2 \varphi}} d\varphi; \quad E(e) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1-e^2 \cdot \sin^2 \varphi} d\varphi;$$

$$e = \begin{cases} \sqrt{1 - \operatorname{tg}^2 \alpha} & \text{для } \alpha < 45^\circ; \\ \sqrt{1 - \operatorname{ctg}^2 \alpha} & \text{для } \alpha > 45^\circ, \end{cases}$$

Использование формулы (3) целесообразно при выполнении условия $\frac{d}{\delta(\omega)} \ll 1$. При $\omega M \ll |Z_0(\omega)|$ расчёты с использованием формулы (3) приводят к большим погрешностям [3].

Формула сопротивления связи по модели Тайни [4] имеет вид:

$$Z_{\text{св.}}(\omega) \cong \frac{4(1+j) \cdot d}{\pi d^2 N_{\text{ж.}} \cdot N_{\text{п.}} \cdot \sigma_{\text{э.}} \cdot \delta(\omega) \cdot \cos \alpha \cdot \operatorname{sh} \left[\frac{(1+j) \cdot d}{\delta(\omega)} \right]} + j\omega(L_{\text{н}} - L_{\text{б}}),$$

(4)

где $L_{\text{н}} = \frac{2\mu_{\text{а}} N_{\text{ж.}}}{\pi \cos \alpha} \cdot \left(\frac{b}{\pi D_{\text{м}}} \right)^2 \cdot e^{-\frac{\pi d}{b} - 2}$ – индуктивность утечки через неоднородности оп-

лётки (щели); $D_{\text{м}} = 2r_0 + 2,5d$ – средний диаметр оплётки; $b = \frac{2\pi D_{\text{м}} \cos \alpha}{N_{\text{ж.}}} - N_{\text{п.}} d$ – ши-

рина неоднородности оплётки (щели); $L_{\text{б}} = \frac{\mu_{\text{а}} h}{4\pi D_{\text{м}}} \cdot (1 - \operatorname{tg}^2 \alpha)$ – индуктивность оп-

лётки; $h = \frac{2d^2}{b+d}$ – параметр индуктивности оплётки.

Формула сопротивления связи экрана в виде оплётки по модели Клея с обозначениями, принятыми в [5] имеет вид:

$$Z_{\text{T}}(\omega) = Z_{\text{R}}(\omega) + j\omega L_{\text{T}} + (1+j) \cdot \omega L_{\text{с}}, \quad (5)$$

где $\underline{Z}_R(\omega) \approx R_{gs} \cdot \frac{d_R \cdot (1+j)}{\delta(\omega)} \cdot \frac{1}{\operatorname{sh} \left[d_R \cdot \frac{(1+j)}{\delta(\omega)} \right]}$ – передаточное сопротивление эквивалентного цилиндрического экрана; $R_{gs} = \frac{1}{\sigma_s G_0 \cos \alpha} \cdot \frac{2}{\pi^2 D_m d}$ – сопротивление оплётки по постоянному току на единицу длины кабеля; $G_0 = \frac{mnd}{2\pi D_m}$ – минимальный коэффициент

заполнения; m – число жгутов в оплётке; n – число проволок в каждом жгуте;

$D_m = D_0 + 2,5d$ – средний диаметр оплётки; D_0 – внутренний диаметр оплётки;

$\alpha = \arctg \left(\frac{\pi D_m}{s} \right)$ – угол плетения; s – шаг плетения;

$$d_R = \frac{0,67d}{\sqrt{\cos \alpha}} \approx (0,7 \dots 0,8) \cdot d \text{ при } \alpha = 20 \dots 45^\circ;$$

$L_T \approx \frac{\mu_0}{m} \left[0,875 \frac{\pi}{6} (2 - \cos \alpha) (1 - G)^3 e^{-\tau_H} - \frac{0,11}{n} \cos(2k_1 \alpha) \right]$ – индуктивность связи;

$G = \frac{G_0}{\cos \alpha}$ – коэффициент заполнения; $\tau_H = 9,6G_0^3 \sqrt{\frac{B^2 d}{D_m}}$ – показатель, характеризующий затухание магнитной составляющей электромагнитного поля, проникающего вглубь кабеля из-за неоднородностей оплётки; $B = G \cdot (2 - G)$ – оптическое

перекрытие; $k_1 = \frac{\pi}{4} \left[\frac{2}{3} G_0 + \frac{\pi}{10} \right]^{-1}$;

$\omega L_s = \frac{1}{\pi \sigma_s \delta(\omega)} \cdot \frac{1}{D_m} \left[10\pi G_0^2 \cos \alpha (1 - G) e^{-\tau_E} - \frac{3,3}{2\pi G_0} \cos(2k_2 \alpha) \right]$ – "поверхностное" индук-

тивное сопротивление; $\tau_E = 12G_0^3 \sqrt{\frac{B^2 d}{D_m}}$ – показатель, характеризующий затухание электрической составляющей электромагнитного поля, проникающего вглубь

кабеля из-за неоднородностей оплётки; $k_2 = \frac{\pi}{4} \left[\frac{2}{3} G_0 + \frac{3}{8} \right]^{-1}$.

Частотные диаграммы сопротивлений связи для одноэкранный кабеля марки

"ПАМуЛ 6 × 10 0,12" с параметрами: $N_{п.} = 6$; $N_{ж.} = 36$; $d = 0,12 \cdot 10^{-3}$ м; $r_0 = 3,5 \cdot 10^{-3}$ м

$\alpha_1 = 19^\circ$ ($\alpha_2 = 28^\circ$) при условии, что $\sigma_s = 34,57 \cdot 10^6 \frac{СМ}{М}$; $\mu_r = 1$, построенные по форму-

лам

(2) – (5) в диапазоне $f = 10^4 \dots 10^8$ Гц, приведены на рис. 1 и рис. 2.

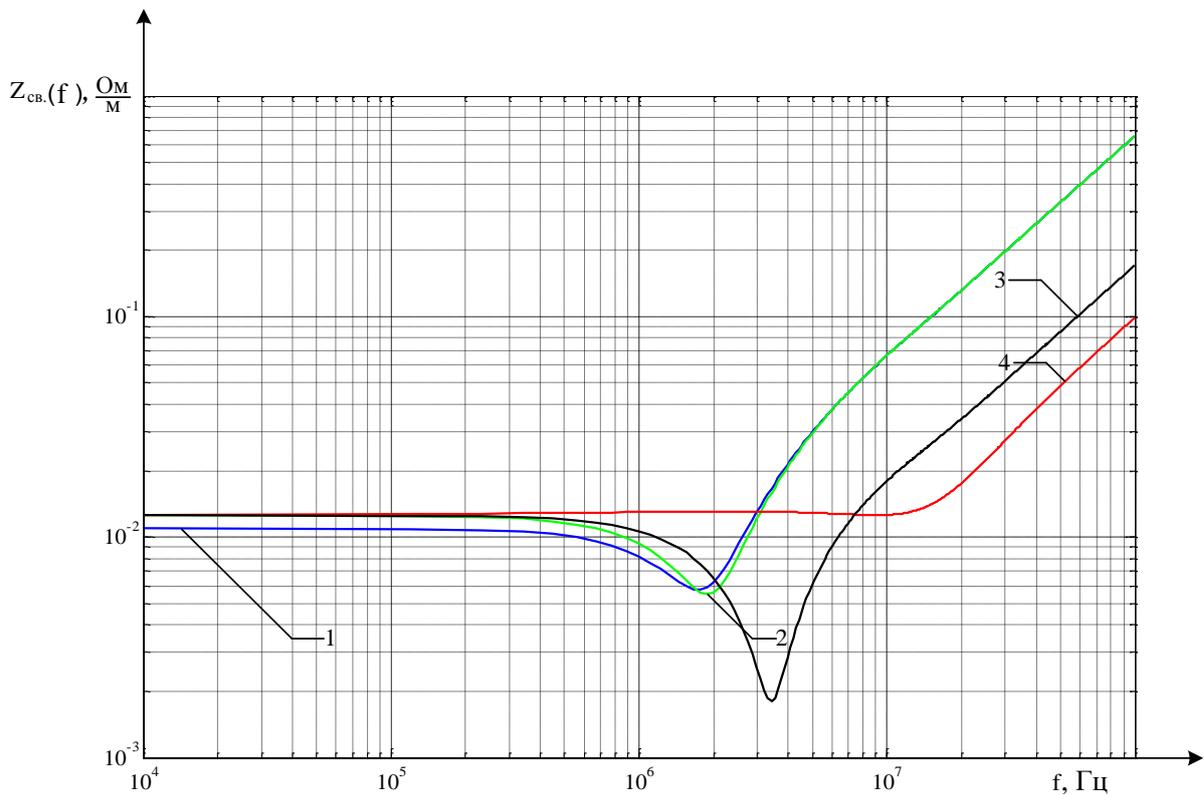


Рис. 1. Частотные диаграммы различных моделей сопротивлений связи кабеля марки "ПАМуЛ 6 × 10 0,12" с углом плетения $\alpha_1 = 19^\circ$: 1 – диаграмма, построенная с использованием формулы (2); 2 – диаграмма, построенная с использованием формулы (3); 3 – диаграмма, построенная с использованием формулы (4); 4 – диаграмма, построенная с использованием формулы (5)

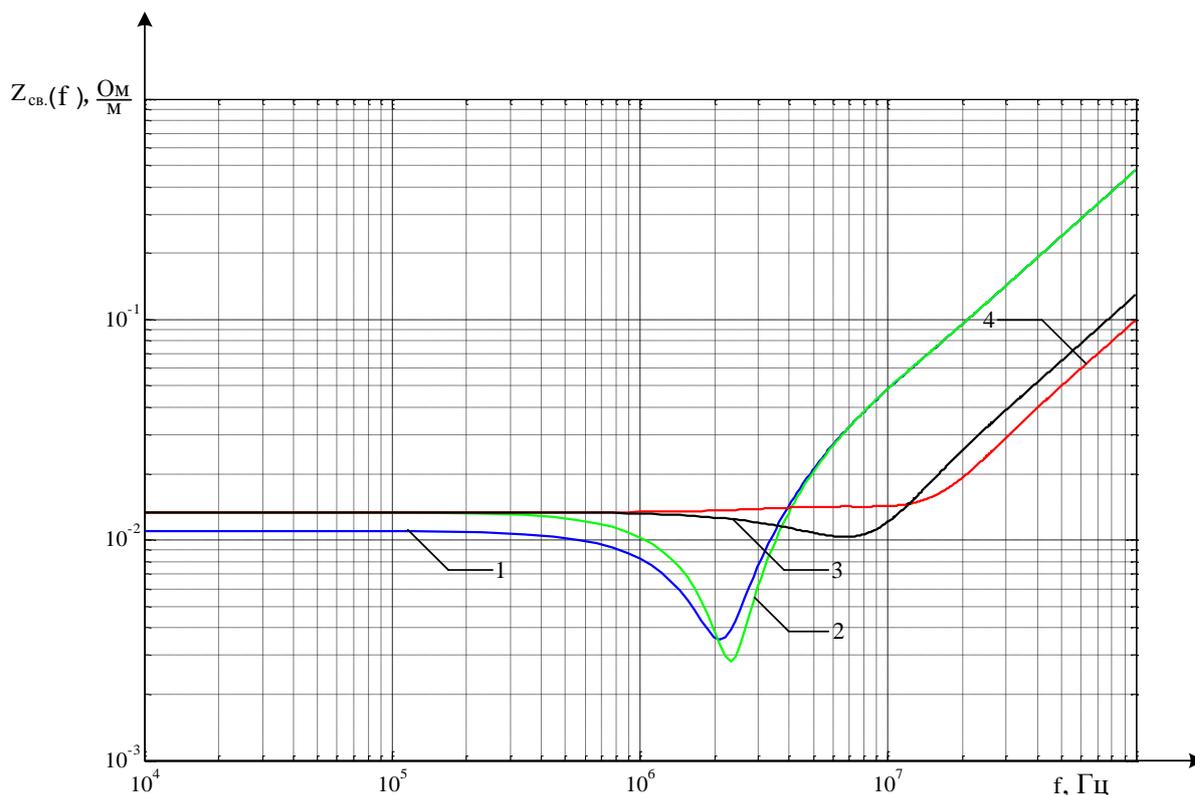


Рис. 2. Частотные диаграммы различных моделей сопротивлений связи кабеля марки "ПАМуЛ 6 × 10 0,12" с углом плетения $\alpha_2 = 28^\circ$: 1 – диаграмма, построенная с использованием формулы (2); 2 – диаграмма, построенная с использованием формулы (3); 3 – диаграмма, построенная с использованием формулы (4); 4 – диаграмма, построенная с использованием формулы (5)

Выводы

Из анализа приведённых частотных диаграмм можно сделать следующие выводы. Частотные диаграммы сопротивления связи различаются в зависимости от выбора модели и конструктивных параметров экрана кабеля: диаграммы 2, 3, 4 (рис. 1 и рис. 2) совпадают в частотной области до 200 кГц, имеют незначительные отличия в диапазоне 200 кГц...1 МГц и существенно различаются на частотах выше 1 МГц. При этом диаграммы 1, 2 (рис. 1 и рис. 2) практически совпадают в частотном диапазоне 4...100 МГц. Поэтому при оценке помехозащищённости бор-

товых кабелей ЛА при воздействии излучаемых ЭМП необходимо выбирать адекватную модель сопротивления связи для рассматриваемого частотного диапазона или использовать частотные характеристики сопротивлений связи, полученные экспериментальным путём.

Библиографический список

1. Кириллов В.Ю. Электромагнитная совместимость летательных аппаратов. – М.: МАИ, 2012. – 162 с.
2. Кравченко В.И., Болотов Е.А., Летунова Н.И.; под ред. В.И. Кравченко. Радиоэлектронные средства и мощные электромагнитные помехи. – М.: Радио и связь, 1987. – 256 с.
3. Дьяков А.Ф., Максимов Б.К., Борисов Р.К., Кужекин И.П., Жуков А.В. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике и электротехнике / под редакцией А.Ф. Дьякова. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – 768 с.
4. N. Akcam, M.H. Karatas. Measurement of transfer impedance and screening attenuation effects on cables using tri-axial method // International journal on "Technical and physical problems of engineering", vol. 4, no 1, pp. 103-107, March 2012.
5. T. Kley. Optimized single-braided cable shields // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility, vol. 35, no 1, pp.1-9, Feb.1993.