

УДК 621.396

СРАВНЕНИЕ РАСЧЁТНЫХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКРАНИРОВАНИЯ БОРТОВЫХ КАБЕЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Жегов Н.А., Кириллов В.Ю., Клыков А.В., 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*

Представлены расчетные и экспериментальные частотные характеристики сопротивления связи и эффективности экранирования бортового кабеля летательного аппарата. Проведено сравнение теоретических и экспериментальных характеристик сопротивлений связи и эффективности экранирования бортового кабеля на заданном диапазоне частот.

Ключевые слова: бортовой кабель, сопротивление связи, электромагнитная помеха, эффективность экранирования.

Бортовая кабельная сеть летательных аппаратов в силу её протяженности и разветвлённой структуры наиболее подвержена воздействию электромагнитных помех (ЭМП). Помехоустойчивость и помехозащищенность бортовых систем во многом зависят от эффективности экранирования бортовых кабелей, которая является одной из основных характеристик бортовых кабелей летательных аппаратов. Эффективность экранирования [1] бортового кабеля при протекании по внешнему экранирующему покрытию тока помехи может быть рассчитана на основе известной частотной характеристики сопротивления связи. Сопротивление связи экранированного кабеля может быть получено на основе известных теоретических моделей [2—5] или опре-

делено экспериментально с помощью коаксиальной установки [6]. Модели сопротивления связи экранированного кабеля различаются из-за различного подхода к описанию физического явления наведения синфазного напряжения на внутренних проводниках кабеля при протекании тока по его внешнему экранирующему покрытию. Частотные характеристики моделей сопротивления связи отличаются друг от друга, что приводит к различию рассчитанных на их основе частотных характеристик эффективности экранирования внешних экранирующих покрытий.

Сопротивление связи определяется отношением напряжения «холостого хода» между внутренними проводниками и экранирующим покрытием кабеля к току, протекающему по внешней поверх-

ности экранирующего покрытия на единицу длины [2]:

$$\underline{Z}_{св} = \frac{U_{э.п}}{I_э} l, \quad (1)$$

где $U_{э.п}$ — напряжение холостого хода между внутренним проводником (проводниками) и экранирующим покрытием; $I_э$ — ток, протекающий по внешней поверхности экранирующего покрытия; l — длина бортового 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 экранирующим покрытием в виде металлизированного плетёного экрана имеет вид [2]

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

где r_0 — радиус экрана бортового кабеля; $\sigma_э$ — удельная проводимость материала, из которого изготовлен экран; $\delta(\omega) = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_a \sigma_э}}$ — 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; $\mu_a = \mu_r \mu_0$ — абсолютная магнитная проницаемость; μ_r — относительная магнитная проницаемость; $\mu_0 \approx 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$ — магнитная постоянная.

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

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

где $N_ж$ — число жгутов в плетёном экране;

$N_п$ — число проволок в жгуте;

$$\alpha = \operatorname{arctg} \left(\frac{4\pi r_0 P}{N_ж} \right) \text{ — угол плетения;}$$

P — число пересечений жгутов.

Взаимная индуктивность M рассчитывается по формуле

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

где $K = 2F - F^2$ — оптическое перекрытие плетёного экрана; $F = \frac{PN_п d}{\sin \alpha}$ — заполнение плетёного экрана; $K(e), E(e)$ — полные эллиптические интегралы первого и второго рода соответственно:

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

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

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

Формула сопротивления связи по модели Тайни [4] имеет вид

$$\underline{Z}_{св}(\omega) \cong \frac{4(1+j)d}{\pi d^2 N_ж N_п \sigma_э \delta(\omega) \cos \alpha \cdot \operatorname{sh} \left[\frac{(1+j)d}{\delta(\omega)} \right]} + j\omega(L_h - L_b), \quad (4)$$

где $L_h = \frac{2\mu_a N_ж}{\pi \cos \alpha} \left(\frac{b}{\pi D_m} \right)^2 e^{\frac{\pi d}{b} - 2}$ — индуктивность утечки через неоднородности экранирующего покрытия; $D_m = 2r_0 + 2,5d$ — средний диаметр экранирующего покрытия в виде плетёного экрана;

$b = \frac{2\pi D_m \cos \alpha}{N_ж} - N_п d$ — ширина неоднородности;

$L_b = \frac{\mu_a h}{4\pi D_m} (1 - \operatorname{tg}^2 \alpha)$ — индуктивность плетёного

экрана; $h = \frac{2d^2}{b+d}$ — параметр индуктивности плетёного экрана.

Формула сопротивления связи экранирующего покрытия в виде металлизированного плетёного экрана по модели Клея с обозначениями, принятыми в [5], имеет вид

$$\underline{Z}_T(\omega) = \underline{Z}_R(\omega) + j\omega L_T + (1+j)\omega L_s, \quad (5)$$

где $\underline{Z}_R(\omega) \approx R_{gs} \frac{d_R \frac{(1+j)}{\delta(\omega)}}{\text{sh} \left[d_R \frac{(1+j)}{\delta(\omega)} \right]}$ — передаточное со-

противление эквивалентного цилиндрического экрана;

$$R_{gs} = \frac{1}{\sigma_s G_0 \cos \alpha} \cdot \frac{2}{\pi^2 D_m d} \text{ — сопротивление плетёного экр$$

раа по постоянному току на единицу длины кабеля;

$$G_0 = \frac{mnd}{2\pi D_m} \text{ — минимальный коэффициент за-$$

полнения;

m — число жгутов плетёного экрана;

n — число проволок в каждом жгуте;

$$D_m = D_0 + 2,5d \text{ — средний диаметр экрана;}$$

D_0 — внутренний диаметр экрана;

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

s — шаг плетения;

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

L_T — индуктивность связи

$$L_T \approx \frac{\mu_0}{m} \times$$

$$\times \left[0,875 \frac{\pi}{6} (2 - \cos \alpha) (1 - G)^3 e^{-\tau_H} - \frac{0,11}{n} \cos(2k_1 \alpha) \right];$$

$$G = \frac{G_0}{\cos \alpha} \text{ — коэффициент заполнения;}$$

$$\tau_H = 9,6G_3 \sqrt{\frac{B^2 d}{D_m}} \text{ — показатель, характеризующий}$$

затухание магнитной составляющей электромагнитного поля, проникающего вглубь кабеля из-за неоднородностей экрана;

$B = G(2 - G)$ — оптическое перекрытие;

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

ωL_s — «поверхностное» индуктивное сопротивление:

$$\omega L_s = \frac{1}{\pi \sigma_s \delta(\omega)} \frac{1}{D_m} \times$$

$$\times \left[10\pi G_0^2 \cos \alpha (1 - G) e^{-\tau_E} - \frac{3,3}{2\pi G_0} \cos(2k_2 \alpha) \right];$$

$$\tau_E = 12G_3 \sqrt{\frac{B^2 d}{D_m}} \text{ — показатель, характеризующий}$$

затухание электрической составляющей электромагнитного поля, проникающего вглубь кабеля из-за неоднородностей экрана;

$$k_2 = \frac{\pi}{4} \left[\frac{2}{3} G_0 + \frac{3}{8} \right]^{-1}.$$

Экспериментальное исследование сопротивления связи бортового кабеля с внешним экранирующим покрытием в виде металлизированного плетёного экрана может быть проведено с помощью установки, спроектированной по коаксиальной схеме [6]. Упрощённая схема коаксиальной установки представлена на рис. 1. Частотная зависимость

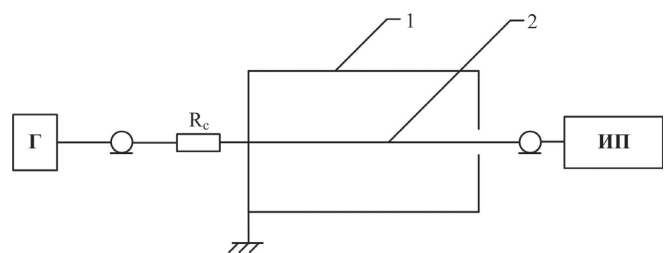


Рис. 1. Упрощенная схема коаксиальной установки: 1 — экран бортового кабеля; 2 — внутренний проводник бортового кабеля; R_c — согласующее сопротивление; Г — генератор; ИП — измерительный приемник

эффективности экранирования определяется по формуле

$$\underline{S}_s(\omega) = \frac{\underline{I}_0(\omega)}{\underline{I}_1(\omega)}, \quad (6)$$

где $\underline{I}_0(\omega)$ — ток, протекающий по внешней поверхности экрана бортового кабеля; $\underline{I}_1(\omega)$ — ток на внутреннем проводнике экранированного бортового кабеля.

Приближенная формула вычисления эффективности экранирования $S_э$ при условии, что сопротивление связи определено, имеет вид [6]

$$S_э[\text{дБ}] = 20 \lg R_c - 20 \lg Z_{св} = 34 - 20 \lg Z_{св}, \quad (7)$$

где $Z_{св}$ — полное сопротивление связи; R_c — согласующее сопротивление в коаксиальной установке, $R_c = 50 \text{ Ом}$.

Сопротивление связи при экспериментальном исследовании определяется по формуле

$$Z_{св} [\text{дБОм}] = U_{э.п} - U_г + 34, \quad (8)$$

где $U_{э.п}$ — синфазное напряжение на внутренних проводниках; $U_г$ — напряжение генератора.

Формула (7), которая следует из формулы (6), справедлива для кабелей длиной не более 1 м и частот, не превышающих 3 МГц. Для более высоких частот необходимо учитывать уменьшение тока из-за возрастающего индуктивного сопротивления экрана кабеля [7]. Формула для определения сопротивления связи с учетом уменьшения тока, протекающего по экранирующему покрытию кабеля, имеет вид

$$Z_{св} [\text{дБОм}] = U_{э.п} - U_г + 20 \lg \sqrt{(R_c + R_э)^2 + \omega^2 L_э^2}, \quad (9)$$

где $R_э$ — сопротивление экрана; $L_э$ — индуктивность экрана.

На рис. 2 приведены частотные характеристики сопротивления связи, построенные в компьютерной среде MATLAB [8], для бортового кабеля с экранирующим покрытием марки ПМуЛ 6,5 ($R_э \approx 0,05 \text{ Ом}$; $L_э \approx 1 \text{ мкГн}$) с параметрами:

$$N_ж = m = 36; N_п = n = 14; d = 50 \cdot 10^{-6} \text{ м};$$

$$r_0 = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \alpha = 25^\circ; \sigma_э = 5,155 \cdot 10^7 \frac{\text{См}}{\text{м}},$$

построенные с использованием формул (2)–(5) совместно с диаграммами сопротивления связи, полученными на основе экспериментальных измерений в коаксиальной установке. На рис. 2 частотная характеристика сопротивления связи (кривая 5) рассчитана по формуле (8), на основе экспериментальных данных, частотная характеристика сопротивления связи (кривая 6) рассчитана по формуле (9) на основе экспериментальных данных.

На рис. 3 приведены частотные характеристики эффективности экранирования для бортового

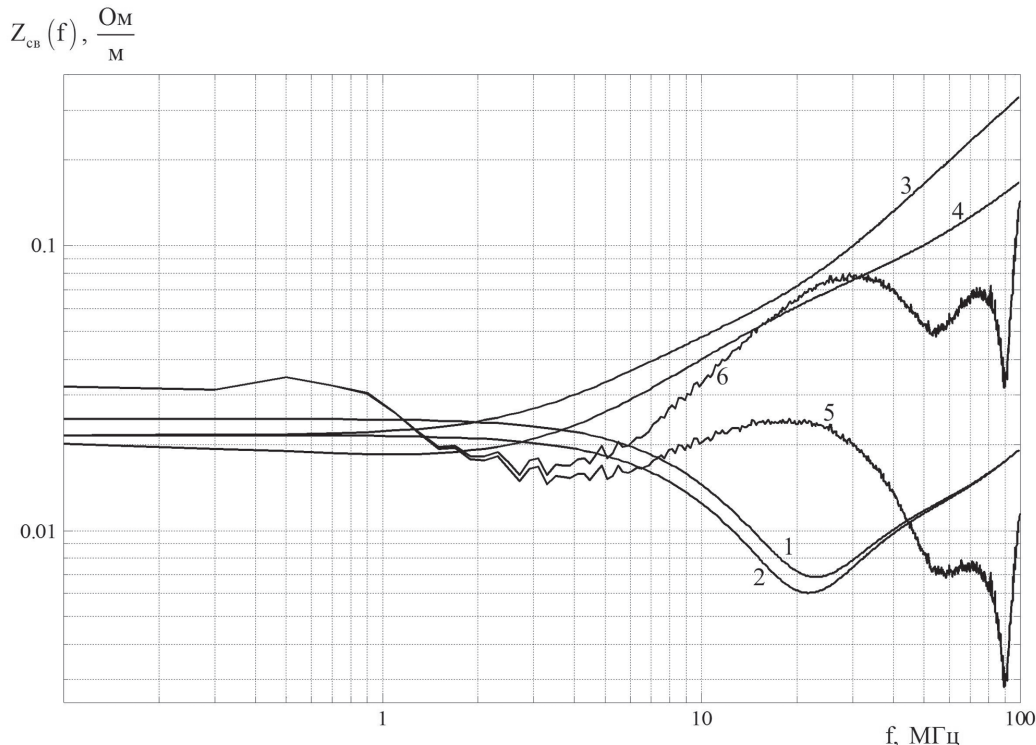


Рис. 2. Частотные характеристики сопротивления связи кабеля марки ПМуЛ 6,5: 1 — характеристика, построенная с использованием формулы (2); 2 — характеристика, построенная с использованием формулы (3); 3 — характеристика, построенная с использованием формулы (4); 4 — характеристика, построенная с использованием формулы (5); 5 — характеристика, полученная по формуле (8) на основе экспериментальных данных; 6 — характеристика, полученная по формуле (9) на основе экспериментальных данных

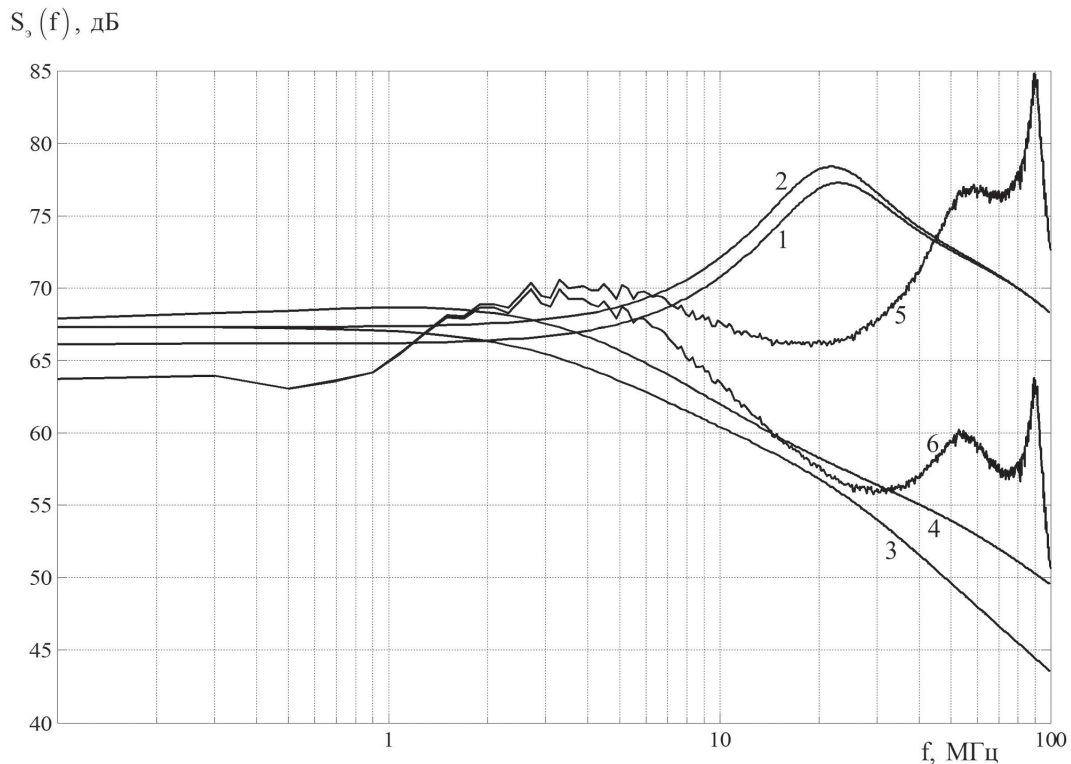


Рис. 3. Частотные характеристики эффективности экранирования (7) экрана марки ПМуЛ 6,5 : 1 — характеристика, построенная с использованием формулы (2); 2 — характеристика, построенная с использованием формулы (3); 3 — характеристика, построенная с использованием формул (4); 4 — характеристика, построенная с использованием формулы (5); 5 — характеристика, построенная на основании формулы (8), в которой используются экспериментальные данные; 6 — характеристика, построенная на основании формулы (9), в которой используются экспериментальные данные

кабеля с экранирующим покрытием марки ПМуЛ 6,5, построенные по формуле (7). Кривые 1–4 частотных характеристик эффективности экранирования построены с учётом использования в формуле (7) различных аналитических формул сопротивления связи (2)–(5). Кривая 5 частотной характеристики эффективности экранирования построена с помощью подстановки в формулу (7) формулы сопротивления связи (8), в которой используются экспериментальные данные. Кривая 6 частотной характеристики эффективности экранирования построена с помощью подстановки в формулу (7) формулы сопротивления связи (9), в которой используются экспериментальные данные.

Выводы

Из анализа приведённых частотных характеристик следует, что частотные характеристики сопротивления связи различаются в зависимости от выбора аналитической модели (2)–(5). Кривые 1–4 (см. рис. 2) имеют незначительные различия ~5...7 мОм/м в частотной области до 3 МГц. При этом кривые 1 и 2 имеют максимальное различие ~2...3 мОм/м. Максимальное различие между кривыми 3 и 4 составляет ~150 мОм/м. Частотные ха-

рактеристики сопротивления связи, полученные по формулам (8) и (9) на основе экспериментальных данных (кривые 5, 6), существенно отличаются от характеристик, построенных на основе аналитических моделей. Следует отметить, что различие частотных характеристик сопротивления связи (кривые 5, 6) обусловлено уменьшением тока на экранирующем покрытии.

Из анализа частотных характеристик (рис. 3) следует, что эффективность экранирования, рассчитанная по формуле (7) с учётом формулы (8) на основе экспериментальных данных (кривая 5), значительно превышает значения эффективности экранирования (кривые 3, 4), полученные на основе аналитических моделей сопротивления связи в частотном диапазоне 10...100 МГц. Как следует из поведения частотной характеристики эффективности экранирования (кривая 6), рассчитанной по формуле (7) с учётом формулы (9) на основе экспериментальных данных, значения эффективности экранирования, рассчитанные по формуле (7) с учётом формулы (8), приводят к завышенным результатам на частотах выше ~3 МГц, так как не учитывается падение тока на экране бортового кабеля.

Поэтому при оценке помехозащищённости бортовых кабелей ЛА необходимо выбирать адекватную модель сопротивления связи для рассматриваемого частотного диапазона или использовать частотные характеристики сопротивлений связи, полученные экспериментальным путём. При этом в расчётах эффективности экранирования ток на экранирующем покрытии должен быть кондуктивной, но не наведённой внешним полем ЭМП, т.е. может быть, например, обратным током от приёмника к источнику при несимметричном подключении. Если ток на внешнем экранирующем покрытии наводится при воздействии излучаемой ЭМП в виде электромагнитного поля, то расчет эффективности экранирования на основе сопротивления связи может привести к завышенным результатам [9].

Библиографический список

1. Кириллов В.Ю., Марченко М.В., Томилин М.М. Электромагнитная совместимость бортовой кабельной сети летательных аппаратов / Под ред. В.Ю. Кириллова. — М.: Изд-во МАИ, 2014. — 172 с.
2. Кравченко В.И., Болотов Е.А., Летунова Н.И. Радиоэлектронные средства и мощные электромагнитные помехи / Под ред. В.И. Кравченко. — 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. Akcam N., Karatas M.H. Measurement of transfer impedance and screening attenuation effects on cables using tri-axial method // International journal on «Technical and physical problems of engineering», March 2012, vol. 4, no 1, pp. 103-107.
5. Kley T. Optimized single-braided cable shields // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility, Feb.1993, vol. 35, no. 1, pp. 1-9.
6. Экранирование бортовой кабельной сети самолетов (вертолетов). Методика измерения эффективности экранирования. ОСТ 1 01205, — М.: Изд-во стандартов, 2012. — 38 с.
7. Кириллов В.Ю., Клыков А.В., Неуен В.Х., Томилин М.М. Исследование сопротивления связи и эффективности экранирования бортовых кабелей летательных аппаратов // Технологии электромагнитной совместимости. 2014. № 2 (49). С. 3-8.
8. Томилин М.М. Программный модуль для анализа частотных характеристик моделей сопротивлений связи бортовых кабелей летательных аппаратов. Свидетельство № 2014615992 от 06.06.2014, бюллетень № 7.
9. Жегов Н.А., Кириллов В.Ю., Клыков А.В., Марченко М.В., Томилин М.М. Сравнение методов исследования эффективности экранирования бортовых кабелей летательных аппаратов // Технологии электромагнитной совместимости. 2015. № 1 (52). С. 44-48.

COMPARISON OF DESIGN AND EXPERIMENTAL FREQUENCY RESPONSE OF SHIELDING EFFICIENCY OF ON-BOARD CABLES FOR FLYING VEHICLES

Zhegov N.A., Kirillov V.Yu., Klykov A.V., Tomilin M.M.

Moscow Aviation Institute (National Research University),
MAI, 4, Volokolamskoe shosse, Moscow, A-80, GSP-3, 125993, Russia
e-mail: k309@mai.ru

Abstract

Purpose

The flying vehicle on-board cable network is subjected to electromagnetic interference due to its length. Electromagnetic interference immunity and susceptibility of on-board systems strongly depends on the on-board cables shielding efficiency. It is one of the main characteristic of flying vehicle on-board cables. When conducted current induced by electromagnetic interference flows over the external surface of shielding cover, the shielding efficiency is evaluated on the basis of well-known frequency response of coupling impedance. Coupling impedance of shielded cable can

be calculated based on theoretical models or found experimentally with co-axial test setup. Coupling impedance models of shielded cable differ due to various approaches of describing the physical phenomenon of the in-phase voltage inducing in inner conductors of the cable, when current flows through external surface of shielding cover. Frequency responses of coupling impedance models differ from each other, which leads to the deference of frequency responses of external shielding efficiency, calculated on their basis.

The goal of this work consists in studying of coupling impedance models of on-board cables for flying vehicles, their divergence at the specified frequency range and

comparison with experimental characteristics obtained using co-axial test setup.

Design/methodology/approach

The theoretical part is based on classical electrodynamics and electrical engineering. Elements of the complex variable theory and operational calculus were used as well.

Findings

The paper presents the results of theoretical and experimental coupling impedance and shielding efficiency frequency response of on-board cables for flying vehicles plotted in MATLAB. It also studies the differences between theoretical and experimental coupling impedance and shielding efficiency frequency response at specified frequency range. It is marked that shielding efficiency frequency response is valid for case of conducted current flows through the cable shielding cover in the absence of external electromagnetic field. In computing shielding efficiency the current through shielding cover must be of conductive origin rather than induced by the field of an external noise, i. e. it can be, for example, a reverse receiver-to-source current in case of non-symmetric connection. If a current through external shielding cover is induced by electromagnetic field effecting the on-board cable, the calculation of shielding efficiency based on coupling impedance frequency response can lead to significant errors/

Current, which flows on cable's shielding cover, should be conducted electromagnetic disturbance when shielding efficiency is calculated. For example, this current could be common-mode return current from the receiver to the source. Shielding efficiency calculation based on coupling impedance frequency characteristic can lead to significant errors in case the conducted current induced by electromagnetic field.

Completeness of the research

The presented paper is a part of the research on calculation of electromagnetic interferences induced in on-board cables of flying vehicles.

Keywords: on-board cable, coupling impedance, electromagnetic interference, shielding efficiency.

References

1. Kirillov V.Yu., Marchenko M.V., Tomilin M.M. *Elektromagnitnaya soyve-stimost' bortovoi kabel'noi seti letatel'nykh apparatov* (Electromagnetic compatibility of cable network for flying vehicles), Moscow, MAI, 2014, 172 p.
2. Kravchenko V.I., Bolotov E.A., Letunova N.I. *Radioelektronnye sredstva i moshchnye elektromagnitnye pomekhi* (Electronic devices and powerful electromagnetic interferences), Moscow, Radio i svyaz', 1987, 256 p.
3. D'yakov A.F., Maksimov B.K., Borisov R.K., Kuzhikin I.P., Zhukov A.V. *Elektromagnitnaya soyvestimost' v elektroenergetike i elektrotekhnike* (Electromagnetic compatibility in power engineering and electrical engineering), Moscow, Energoatomizdat, 2003, 768 p.
4. Akcam N., Karatas M.H. Measurement of transfer impedance and screening attenuation effects on cables using tri-axial method, *International journal on «Technical and physical problems of engineering»*, March 2012, vol. 4, no 1, pp. 103-107.
5. Kley T. Optimized single-braided cable shields. *IEEE Transactions on electromagnetic compatibility*, Feb.1993, vol. 35, no 1, pp.1-9.
6. *Ekranirovanie bortovoi kabel'noi seti samoletov (vertoletov). Metodika izmereniya effektivnosti ekranirovaniya, OST 1 01205-2012* (Shielding of electrical cable network of aircrafts (helicopters). Measurement method of shielding efficiency), Moscow, Standarty, 2012, 38 p.
7. Kirillov V.Yu., Klykov A.V., Nguen V.Kh., Tomilin M.M. *Tekhnologii elektromagnitnoi soyvestimosti*, 2014, no. 2 (49), pp. 3-8.
8. Tomilin M.M. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programm dlya EVM «Programmnyi modul' dlya analiza chastotnykh kharakteristik modelei soprotivlenii svyazi bortovykh kabelei letatel'nykh apparatov»*, no. 2014615992, 06.06.2014 (Certificate of state registration of computer programs «A Software module for the analysis of frequencies characteristics of coupling impedance models of on-board cables for flying vehicles», no. 2014615992, 06.06.2014).
9. Zhegov N.A., Kirillov V.Yu., Klykov A.V., Marchenko M.V., Tomilin M.M. *Tekhnologii elektromagnitnoi soyvestimosti*, 2015, no. 1 (52), pp. 44-48.