

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.396

РАСЧЁТ ПЕРЕКРЁСТНЫХ ПОМЕХ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ РУЛЕВОГО ПРИВОДА САМОЛЁТА

Кириллов В.Ю., Томилин М.М.

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия
e-mail: emc@mai.ru*

Приведены пространственные диаграммы распределения компонент напряжённости магнитного поля, создаваемого токами в цепях электропитания рулевого электромеханического привода самолёта. Построена диаграмма наведённого магнитным полем напряжения в двухпроводной линии связи, позволяющая определять безопасные расстояния от цепей электропитания, при которых не происходит искажения информационных и управляющих сигналов в линиях связи самолёта.

Ключевые слова: самолёт, электромеханический привод, электромагнитная помеха.

В бортовых комплексах современных «более электрифицированных самолётов» с повышенным уровнем электрификации [1] для управления различными функциональными органами [2] предполагается применение двух типов электроприводов — электромеханического и электрогидростатического [3, 4]. Количественное увеличение применяемого электрооборудования приводит к возникновению излучаемых электромагнитных помех (ЭМП) в виде электрического и магнитного полей с высокими уровнями напряжённостей, создаваемых, в частности, фазными токами электромеханических приводов. Основным источником излучаемых ЭМП, создаваемых системами электроприводов, являются жгуты цепей электропитания. Жгуты цепей электропитания рулевых электромеханических приводов состоят из витых или аксиальных пар проводников, предназначенных для протекания

токов в десятки ампер [5], [6]. Соответственно, создаваемые ими излучаемые ЭМП могут привести к искажению сигналов в линиях связи бортового комплекса самолёта и, следовательно, к ухудшению качества его функционирования.

Настоящая работа посвящена расчёту уровней излучаемых ЭМП в виде составляющих компонент гармонического магнитного поля, создаваемого фазными токами в цепях электропитания исполнительного двигателя электромеханического рулевого привода самолёта, и перекрёстных помех в виде напряжений в неэкранированных двухпроводных линиях связи.

Излучаемые ЭМП в виде электрического или магнитного полей витой пары проводников (рис. 1) определяются как суперпозиция сдвинутых по фазе на 180° гармонических полей, создаваемых в отдельности каждым из двух скрученных между собой

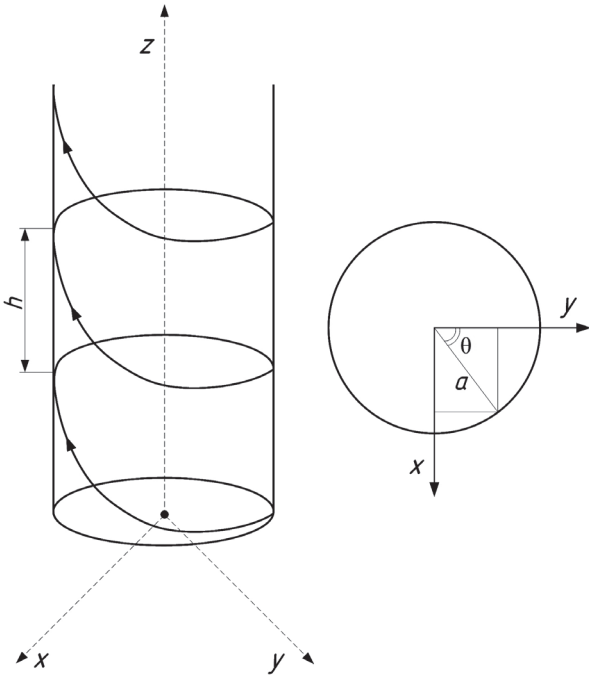


Рис. 1. Витая пара проводников в цилиндрической системе координат: a — радиус проводника витой пары; h — шаг скрутки витой пары; θ — угол в плоскости Oxy

проводников [7]. Уравнения витой пары проводников в цилиндрической системе координат:

$$\begin{cases} x = a \sin \theta; \\ y = a \cos \theta; \\ z = h \frac{\theta}{2\pi}, \end{cases}$$

где a — радиус проводника витой пары (образующей цилиндра); h — шаг скрутки витой пары; θ — угол в плоскости Oxy .

Уравнения Максвелла в цилиндрической системе координат для диэлектрической среды и гармонических колебаний относительно составляющих напряжённости электрического поля $\underline{E}_z, \underline{E}_\phi, \underline{E}_r$ имеют вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 \underline{E}_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \underline{E}_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \underline{E}_z}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 \underline{E}_z}{\partial z^2} = (j\omega\sqrt{\mu_a \epsilon_a})^2 \underline{E}_z; \\ \frac{\partial^2 \underline{E}_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \underline{E}_r}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \underline{E}_r}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 \underline{E}_r}{\partial z^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial \underline{E}_\phi}{\partial \phi} - \frac{\underline{E}_r}{r^2} = \\ = (j\omega\sqrt{\mu_a \epsilon_a})^2 \underline{E}_r; \\ \frac{\partial^2 \underline{E}_\phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \underline{E}_\phi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \underline{E}_\phi}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 \underline{E}_\phi}{\partial z^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial \underline{E}_r}{\partial \phi} - \frac{\underline{E}_\phi}{r^2} = \\ = (j\omega\sqrt{\mu_a \epsilon_a})^2 \underline{E}_\phi, \end{cases} \quad (1)$$

где r — расстояние до точки наблюдения; ϵ_a — абсолютная диэлектрическая проницаемость среды; μ_a — абсолютная магнитная проницаемость среды; ω — круговая частота.

Составляющие напряжённости магнитного поля $\underline{H}_z, \underline{H}_\phi, \underline{H}_r$ определяются в области $r > a$ через составляющие напряжённости электрического поля $\underline{E}_z, \underline{E}_\phi, \underline{E}_r$, являющиеся решением системы уравнений (1) в квазистационарном режиме для граничных условий [7], следующим образом:

$$\underline{H}_z = -\frac{1}{j\omega\mu} \left[\frac{\partial \underline{E}_\phi}{\partial r} + \frac{\underline{E}_\phi}{r} - \frac{1}{r} \frac{\partial \underline{E}_r}{\partial \phi} \right];$$

$$\underline{H}_\phi = \frac{1}{j\omega\mu} \left[\frac{\partial \underline{E}_r}{\partial z} - \frac{\partial \underline{E}_z}{\partial r} \right];$$

$$\underline{H}_r = \frac{1}{j\omega\mu} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial \underline{E}_z}{\partial \phi} - \frac{\partial \underline{E}_\phi}{\partial z} \right],$$

где r — расстояние до точки наблюдения, в которой рассчитывается напряжённость поля.

Окончательные формулы для расчёта составляющих напряжённости электрического и магнитного полей в области $r > a$ имеют вид [7]:

$$\begin{aligned} \underline{E}_z &= i\omega\mu_a \frac{2I}{\pi} \times \\ &\times \sum_{n=1,3,5}^{\infty} I_n \left(\frac{2\pi a}{h} n \right) K_n \left(\frac{2\pi r}{h} n \right) \cos \left[n \left(\frac{2\pi z}{h} - \phi \right) \right]; \\ \underline{E}_\phi &= i\omega\mu_a \frac{2Ia}{h} \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \left[I_{n+1} \left(\frac{2\pi a}{h} n \right) K_{n+1} \left(\frac{2\pi r}{h} n \right) + \right. \\ &\left. + I_{n-1} \left(\frac{2\pi a}{h} n \right) K_{n-1} \left(\frac{2\pi r}{h} n \right) \right] \cos \left[n \left(\frac{2\pi z}{h} - \phi \right) \right]; \\ \underline{E}_r &= i\omega\mu_a \frac{2Ia}{h} \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \left[I_{n+1} \left(\frac{2\pi a}{h} n \right) K_{n+1} \left(\frac{2\pi r}{h} n \right) - \right. \\ &\left. - I_{n-1} \left(\frac{2\pi a}{h} n \right) K_{n-1} \left(\frac{2\pi r}{h} n \right) \right] \sin \left[n \left(\frac{2\pi z}{h} - \phi \right) \right]; \\ H_z &= -\frac{8I\pi a}{h^2} \times \\ &\times \sum_{n=1,3,5}^{\infty} n I_n \left(\frac{2\pi a}{h} n \right) K_n \left(\frac{2\pi r}{h} n \right) \cos \left[n \left(\frac{2\pi z}{h} - \phi \right) \right]; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} H_\phi &= \frac{4Ia}{hr} \times \\ &\times \sum_{n=1,3,5}^{\infty} n I_n \left(\frac{2\pi a}{h} n \right) K_n \left(\frac{2\pi r}{h} n \right) \cos \left[n \left(\frac{2\pi z}{h} - \phi \right) \right]; \end{aligned} \quad (3)$$

$$H_r = -\frac{8I\pi a}{h^2} \times \sum_{n=1,3,5}^{\infty} n I_n' \left(\frac{2\pi a}{h} n \right) K_n' \left(\frac{2\pi r}{h} n \right) \sin \left[n \left(\frac{2\pi z}{h} - \varphi \right) \right]; \quad (4)$$

$$I_n' \left(\frac{2\pi a}{h} n \right) = \frac{I_{n-1} \left(\frac{2\pi a}{h} n \right) - I_{n+1} \left(\frac{2\pi a}{h} n \right)}{2}; \quad (5)$$

$$K_n' \left(\frac{2\pi r}{h} n \right) = \frac{K_{n-1} \left(\frac{2\pi a}{h} n \right) - K_{n+1} \left(\frac{2\pi a}{h} n \right)}{2},$$

где $I_n \left(\frac{2\pi a}{h} n \right), I_{n\pm 1} \left(\frac{2\pi a}{h} n \right), K_n \left(\frac{2\pi r}{h} n \right), K_{n\pm 1} \left(\frac{2\pi r}{h} n \right)$ — функции Бесселя первого и второго рода соответственно; I — ток, протекающий по проводнику витой пары.

Пространственные диаграммы распределения составляющих напряжённости магнитного поля, построенные в программной среде MATLAB по формулам (2)–(4) для значений параметров $I = 30 \text{ А}; a = 10^{-3} \text{ м}; h = 10^{-2} \dots 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}; r = 0,05 \dots 0,1 \text{ м}$ при $n = 1, 3, \dots, 15$, приведены на рис. 2–4 соответственно. Построения выполнены для предельных значений H_φ, H_r и E_z , т.е. когда

$$\cos \left[n \left(\frac{2\pi z}{h} - \varphi \right) \right] = 1 \text{ или } \sin \left[n \left(\frac{2\pi z}{h} - \varphi \right) \right] = 1.$$

Для указанных параметров и $\omega = 2512 \text{ с}^{-1}$ значения составляющих напряжённости электрического поля E_z, E_φ, E_r принимают относительно малые значения $\sim 3 \frac{\text{МВ}}{\text{м}}$, которыми можно пренебречь.

При $h \rightarrow \infty$ приведённые формулы позволяют рассчитать излучаемые ЭМП в виде гармонических электрического и магнитного полей для аксиальной пары проводников. В области $r > a$ составляющие напряжённости магнитного и электрического полей описываются следующими выражениями [7]:

$$H_z = 0; E_\varphi = E_r = 0;$$

$$H_\varphi = \frac{I}{\pi r} \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \left(\frac{a}{r} \right)^n \cos(n\varphi);$$

$$H_r = \frac{I}{\pi r} \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \left(\frac{a}{r} \right)^n \sin(n\varphi);$$

$$E_z = -i\omega\mu_a \frac{I}{\pi} \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \left(\frac{a}{r} \right)^n \frac{\cos(n\varphi)}{n}.$$

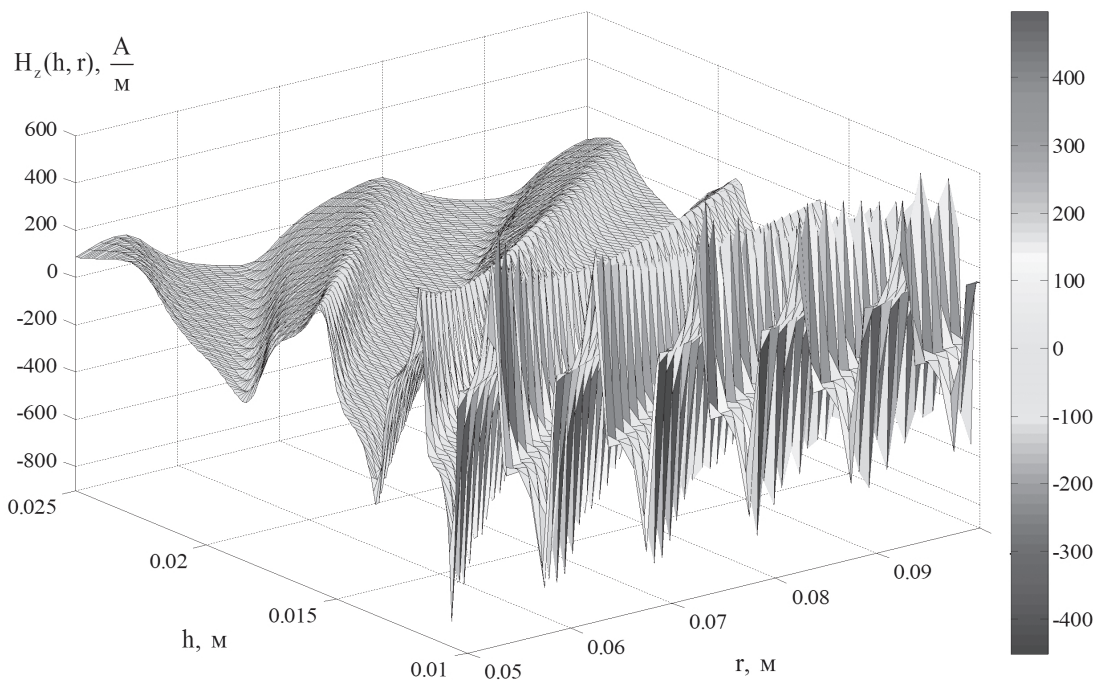


Рис. 2. Пространственная диаграмма аксиальной составляющей напряжённости магнитного поля $H_z(h, r)$, построенная по формуле (2) для следующих значений параметров: $I = 30 \text{ А}; a = 10^{-3} \text{ м}; h = 10^{-2} \dots 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}; r = 0,05 \dots 0,1 \text{ м}$ при $n = 1, 3, \dots, 15$

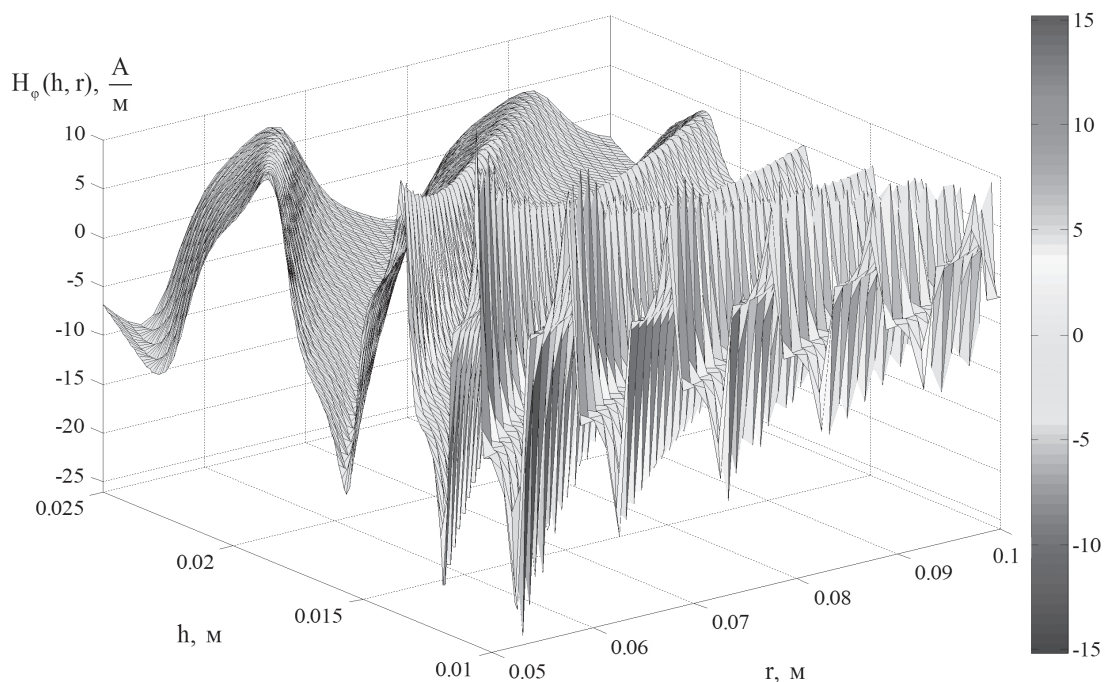


Рис. 3. Пространственная диаграмма тангенциальной составляющей напряжённости магнитного поля $H_\phi(h, r)$, построенная по формуле (3) для следующих значений параметров: $I = 30 \text{ А}$; $a = 10^{-3} \text{ м}$; $h = 10^{-2} \dots 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}$; $r = 0,05 \dots 0,1 \text{ м}$ при $n = 1, 3, \dots, 15$

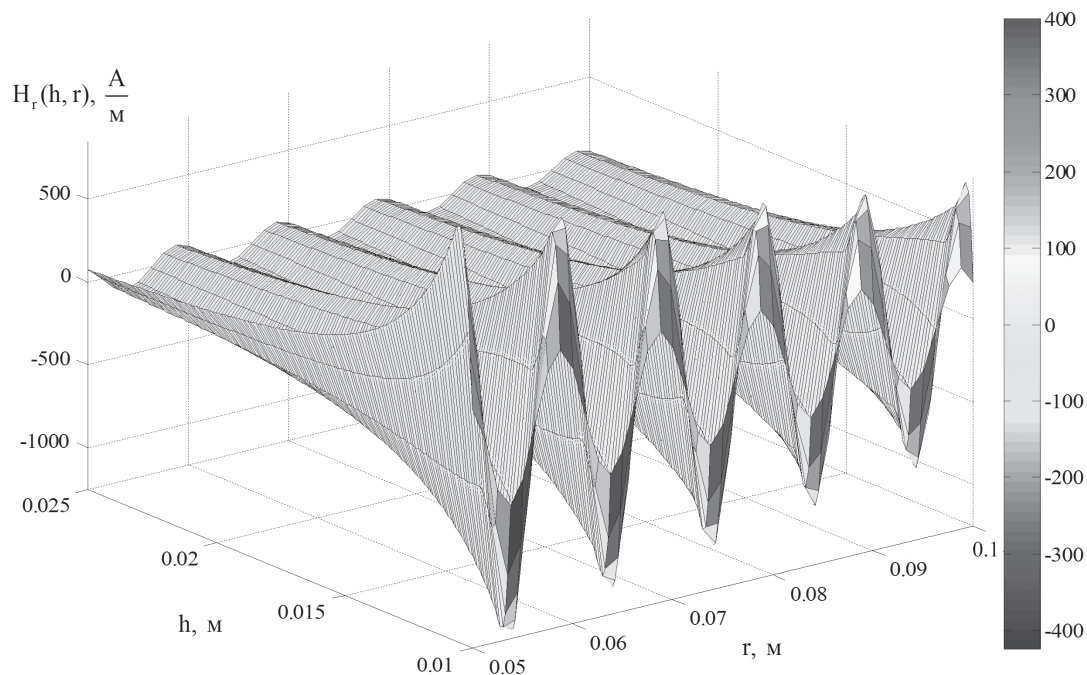


Рис. 4. Пространственная диаграмма радиальной составляющей напряжённости магнитного поля $H_r(h, r)$, построенная по формуле (4) для следующих значений параметров: $I = 30 \text{ А}$; $a = 10^{-3} \text{ м}$; $h = 10^{-2} \dots 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}$; $r = 0,05 \dots 0,1 \text{ м}$ при $n = 1, 3, \dots, 15$

На рис. 5 приведена пространственная диаграмма распределения тангенциальной составляющей напряжённости магнитного поля в зависимости от аксиальной пары проводников с током, построенная

в программной среде MATLAB для следующих значений параметров:

$$I = 30 \text{ А}; a = 10^{-3} \text{ м}; h = 0,2 \dots 2 \text{ м}; r = 0,05 \dots 0,1 \text{ м}$$

при $n = 1, 3, \dots, 15$.

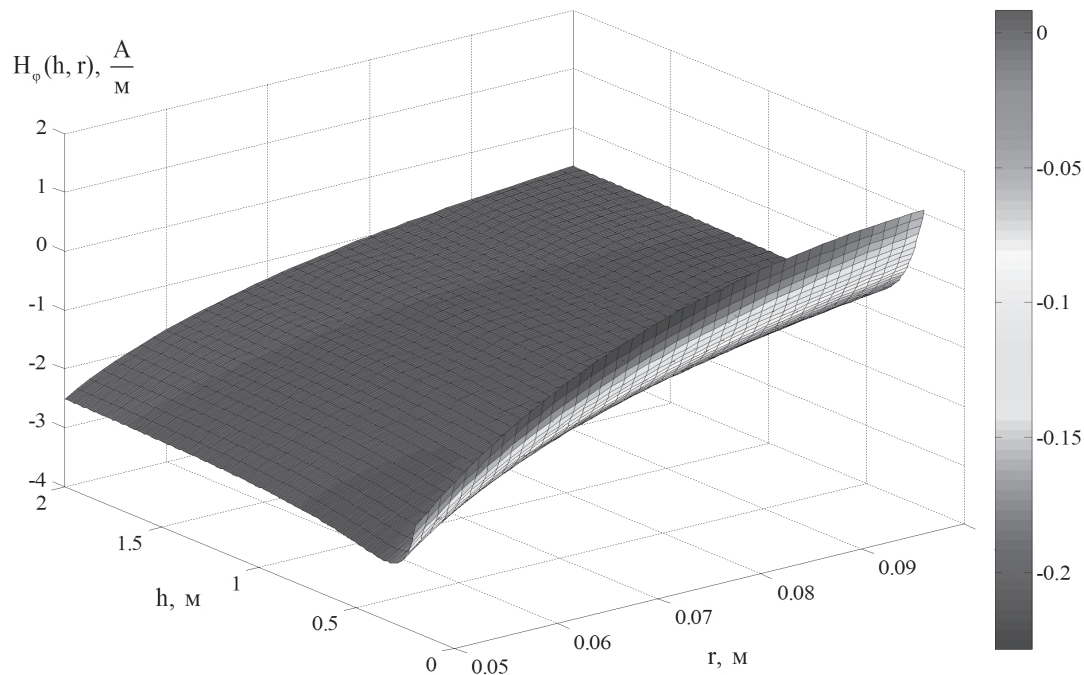


Рис. 5. Пространственная диаграмма тангенциальной составляющей напряжённости магнитного поля $H_\phi(h, r)$, построенная по формуле (3) для следующих значений параметров: $I = 30 \text{ А}$; $a = 10^{-3} \text{ м}$; $h = 0,2 \dots 2 \text{ м}$; $r = 0,05 \dots 0,1 \text{ м}$ при $n = 1,3, \dots, 15$

Электрическое и магнитное поля от аксиальной и витой пар проводников (рис. 2–5) наводят в бортовой кабельной сети перекрёстные кондуктивные ЭМП в виде токов и напряжений [8, 9]. Эквивалентная схема [10] для расчёта наведённых токов и напряжений в неэкранированной двухпроводной линии связи с активной нагрузкой приведена на рис. 6.

Мгновенные значения напряжения, создаваемые в неэкранированной двухпроводной линии связи магнитным полем $H(t, r)$, определяются формулой [10]

$$u(t, r) = 2\mu_0 I \cdot h_1 \cdot \frac{\partial H(t, r)}{\partial t}, \quad (6)$$

где l — длина линии; $2h_1$ — расстояние между проводниками линии; $H(t, r) = H_m(r) \sin(\omega t + \psi)$ — мгновенное значение напряжённости магнитного поля; ψ — начальная фаза;

$H_m(r) = \sqrt{2} \cdot \sqrt{H_z^2(r) + H_r^2(r)}$ — амплитудное значение напряжённости магнитного поля; $H_z(r)$ — аксиальная составляющая напряжённости магнитного поля (2); $H_r(r)$ — радиальная составляющая напряжённости магнитного поля (4). Тангенциальной составляющей напряжённости магнитного поля $H_\phi(r) \ll H_z(r) \cong H_r(r)$ можно пренебречь.

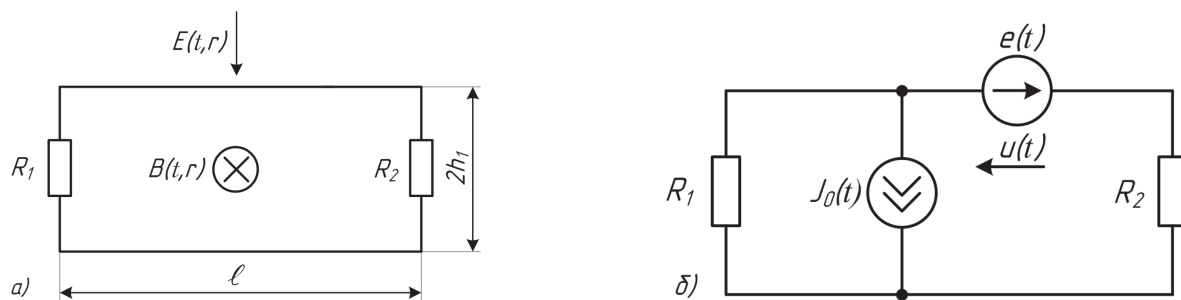


Рис. 6. Схема воздействия электрического и магнитного полей на неэкранированную двухпроводную линию связи (а); эквивалентная электрическая схема (б) для расчёта тока и/или напряжений: l — длина линии; $2h_1$ — расстояние между проводниками линии; $e(t)$, $J_0(t)$ — эквивалентные источники ЭДС и тока, моделирующие воздействие электрического и магнитного полей; R_1 , R_2 — сопротивления нагрузок линии

Пространственно-временная диаграмма мгновенного напряжения (6) в неэкранированной двухпроводной линии связи длиной $l = 10$ м, наведённого магнитным полем на расстояниях $r = 0,0025 \dots 0,05$ м для следующих параметров:

$$I = 30 \text{ А}; a = 10^{-3} \text{ м}; h = 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}; h_1 = 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ м};$$

$$\omega = 2512 \text{ с}^{-1}; \psi = 0 \text{ при } n = 1, 3, \dots, 15$$

приведена на рис. 7.

Как следует из диаграммы (рис. 7), амплитудные значения наведённых магнитным полем напряжений на расстояниях между цепями электропитания и двухпроводной линией связи $0,0025 \dots 0,05$ м изменяются в пределах $0,88 \dots 5,5$ В. Данные значения могут быть соизмеримы с максимальными значениями напряжений информационных сигналов в линиях связи бортового комплекса самолёта $0,8 \dots 4,12$ В. При расстояниях $r \gg 0,05$ м амплитудные значения наведённых напряжений значительно меньше значений информационных и управляющих сигналов в бортовых линиях связи.

Таким образом, пространственно-временная диаграмма позволяет определять безопасные расстояния между цепями электропитания электромеханических приводов и информационными линиями связи бортового комплекса самолёта, при которых амплитудные значения наведённых кондуктивных

помех в виде напряжений значительно меньше значений напряжений информационных и управляющих сигналов.

Выводы

Приведённые пространственные диаграммы (рис. 2—5 и 7) позволяют сделать заключение о том, что при воздействии излучаемых ЭМП в виде гармонического электрического и/или магнитного полей, создаваемых токами в цепях электропитания рулевого электромеханического привода, в информационных линиях связи бортовой кабельной сети самолёта наводятся напряжения и токи. Амплитудные значения наведённых напряжений могут быть соизмеримы с амплитудными значениями напряжений полезных сигналов или больше их. Диаграммы позволяют определять безопасные расстояния между силовыми цепями электропитания и неэкранированными линиями связи. Безопасные расстояния гарантируют то, что амплитудные значения наведённых кондуктивных ЭМП в виде напряжений в линиях связи меньше амплитудных значений напряжений информационных и управляющих сигналов бортового комплекса самолёта.

Библиографический список

1. Резников С.Б., Бочаров В.В., Харченко И.А. Электромагнитная и электроэнергетическая совместимость систем электроснабжения и вторичных источников питания полностью электрифицированных самолётов.

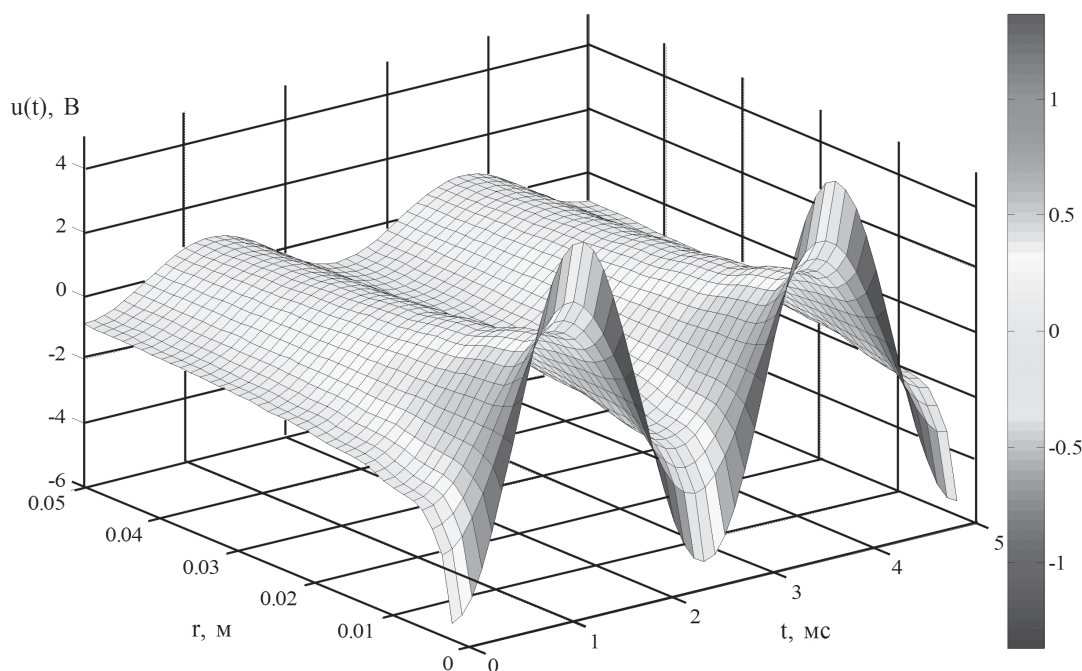


Рис. 7. Пространственно-временная диаграмма мгновенного напряжения (6) в неэкранированной двухпроводной линии связи длиной $l = 10$ м, наведённого магнитным полем на расстояниях $r = 0,0025 \dots 0,05$ м для следующих параметров: $I = 30 \text{ А}; a = 10^{-3} \text{ м}; h = 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}; h_1 = 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}; \omega = 2512 \text{ с}^{-1}; \psi = 0$ при $n = 1, 3, \dots, 15$

- тов / Под ред. С.Б. Резникова. — М.: Изд-во МАИ, 2014. — 160 с.
2. *Ермаков С.А., Сухоруков Р.В.* Развитие систем рулевых гидроприводов самолётов // Труды конференции «Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения». Москва, октябрь 2010. С. 438 — 449.
 3. *Кузьмичёв Р.В., Ситин Д.А., Степанов В.С.* Исполнительные механизмы петлеобразной формы для приводов самолётов с повышенным уровнем электрификации // Труды МАИ. 2011. № 45. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=25426> (accessed 24.04.2016).
 4. *Ogoltsov I., Samsonovich S., Selivanov A., Alekseenkov A.* New developments of electrically powered electrohydraulic and electromechanical actuators for the more electric aircraft // Proceedings of the 29th Congress of the International of the Aeronautical Sciences. St. Petersburg. Russia. September 7 — 12, 2014. URL: http://www.icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2014/data/alle.html
 5. *Кириллов В.Ю., Клыкков А.В., Томилин М.М.* Моделирование переходных процессов усилителя тока двигателя рулевого привода самолёта // Вестник Московского авиационного института. 2016. Т. 23. № 2. С. 175 — 184.
 6. Cadence PCB solution, 2016. URL: <http://www.orcad.com/>
 7. *Гроднев И.И., Сергейчук К.Я.* Экранирование аппаратуры и кабелей связи. — М.: Связьиздат, 1960. — 316 с.
 8. Электромагнитная совместимость технических средств подвижных объектов / Под ред. В.П. Булкова. — М.: Изд-во МАИ, 2004. — 648 с.
 9. *Гайнутдинов Р.Р., Чермошенцев С.Ф.* Прогнозирование перекрёстных электромагнитных помех в кабельных линиях связи беспилотного летательного аппарата // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2014. № 3. С. 200 — 208.
 10. *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.

CROSSTALK CALCULATION IN ELECTRIC CIRCUITS OF AIRCRAFT STEERING GEAR

Kirillov V.Yu., Tomilin M.M.

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

Abstract

Two types of electric drives - electro-mechanical or electro-hydrostatic - are supposed to be implemented for onboard systems of “more electric aircraft” with a great number of various kinds of electrical equipment [1] for controlling various functional elements [2]. The increasing number of implemented electrical equipment, electro-mechanical steering gear in particular, which phase currents cause electromagnetic interference (EMI) in the form of electric and magnetic fields with high-level intensities. The main source of radiated EMI caused by electric drives systems are power circuits’ bundles. Electro-mechanic steering gear power circuits’ bundles consist of a pair of twisted or axial conductors with currents of tens of amps [5, 6]. Correspondingly, they generate radiated EMI, which may cause signal distortion in aircraft onboard system communication lines and, hence, deteriorate its functionality.

The presented study is dedicated to of radiated EMI levels in the form of magnetic field harmonic components computation. These EMI are generated by phase currents in aircraft electro-mechanical actuator

motor powering circuits, and crosstalk in the form of voltages in open conductors of double-wire communication lines.

The presented spacing charts allow deduce that voltages and currents, which amplitudes are commensurable or even greater than valid signals values, occur in aircraft onboard cable system communication lines in the form of harmonic electric and/or magnetic field. The charts allow determining the safe distances between power circuits and open communication lines, wherein the levels of induced conducted interferences are significantly lower than information and control signals peak values in aircraft onboard system communication lines. It allows provide electromagnetic compatibility of high-power and low-power circuits.

The presented paper is a part of the research work on computation and simulation of electromagnetic interferences, caused by transients in aircraft steering gear system.

Keywords: aircraft, electro-mechanical drive, electromagnetic interference.

References

1. Reznikov S.B., Bocharov V.V., Kharchenko I.A. *Elektromagnitnaya i elektroenergeticheskaya sovmestimost' sistem elektrosnabzheniya i vtorichnykh istochnikov pitaniya polnost'yu elektrifitsirovannykh samoletov* (Electromagnetic and electric compatibility of power supply systems and secondary power sources of all-electrical aircraft), Moscow, MAI, 2014, 160 p.
2. Ermakov S.A., Sukhorukov R.V. *Materialy konferentsii "Tekhnicheskie i programmnye sredstva sistem upravleniya, kontrolya i izmereniya"*, Moscow, 2010, pp. 438–449.
3. Kuz'michev R.V., Sitin D.A., Stepanov V.S. *Trudy MAI*, 2011, no. 45, available at: <http://www.mai.ru/science/trudy/eng/published.php?ID=25426> (accessed 24.04.2016).
4. Ogoltsov I., Samsonovich S., Selivanov A., Alekseenkov A. New developments of electrically powered electrohydraulic and electromechanical actuators for the more electric aircraft. *Proceedings of the 29th Congress of the International of the Aeronautical Sciences*, St. Petersburg, Russia, September 7 – 12, 2014, available at: http://www.icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2014/data/alle.html
5. Kirillov V.Yu., Klykov A.V., Tomilin M.M. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2016, vol. 23, no. 2, pp. 175–184.
6. *Cadence PCB solutions*, 2016, available at: <http://www.orcad.com>
7. Grodnev I.I., Sergeichuk K.Ya. *Ekranirovanie apparatury i kabelei svyazi* (Equipment and communications cables shielding), Moscow, Svyaz'izdat, 1960, 316 p.
8. Bulekov V.P. *Elektromagnitnaya sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv podvizhnykh ob"ektov* (Electromagnetic compatibility of moving objects facilities), Moscow, MAI, 2004, 648 p.
9. Gainutdinov R.R., Chermoshentsev S.F. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. A.N. Tupoleva*, 2014, no.3, pp. 200 – 208.
10. Kravchenko V.I., Bolotov E.A., Letunova N.I. *Radioelektronnye sredstva i moshchnye elektromagnitnye pomekhi* (Radioelectronic devices and high-power electromagnetic interferences), Moscow, Radio i svyaz', 1987, 256 p.