
УДК 621.396

Воздействие преднамеренных электромагнитных помех на бортовые кабели космических аппаратов

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: k309@mai.ru*

Аннотация

В работе приводятся результаты расчётов уровней кондуктивных электромагнитных помех в бортовых двухпроводных линиях связи и кабелях космических аппаратов, которые могут возникать при преднамеренных электромагнитных воздействиях.

Ключевые слова: электромагнитная помеха, электромагнитное поле, бортовой кабель, линия связи, космический аппарат

Преднамеренные электромагнитные помехи (ЭМП) создаются специальными техническими средствами в виде импульсных или высокочастотных электромагнитных полей с целью ухудшения качества функционирования, нарушения режимов работы, полного прекращения работоспособности и выхода из строя элементов, устройств и приборов бортовых систем космических аппаратов (КА). Специальные технические средства представляют собой установки, создающие высокочастотное или импульсное электромагнитные поля и состоящие из генераторов с антеннами направленного действия.

Такие установки могут создавать направленное электромагнитное поле с большими уровнями напряжённости на значительном расстоянии.

Попадая в зону действия такой установки космический аппарат, из-за необратимости процессов, происходящих под действием наведённых в электрических цепях бортовых систем кондуктивных помех, может прекратить своё существование как управляемый объект.

Установка для создания преднамеренных электромагнитных помех может размещаться на космическом аппарате, бортовые системы которого предназначены для поиска, сближения с за-

данном объектом и направления на него излучающей антенны. Схема воздействия излучаемых электромагнитных помех на заданный объект в виде космического аппарата приведена на рис. 1.

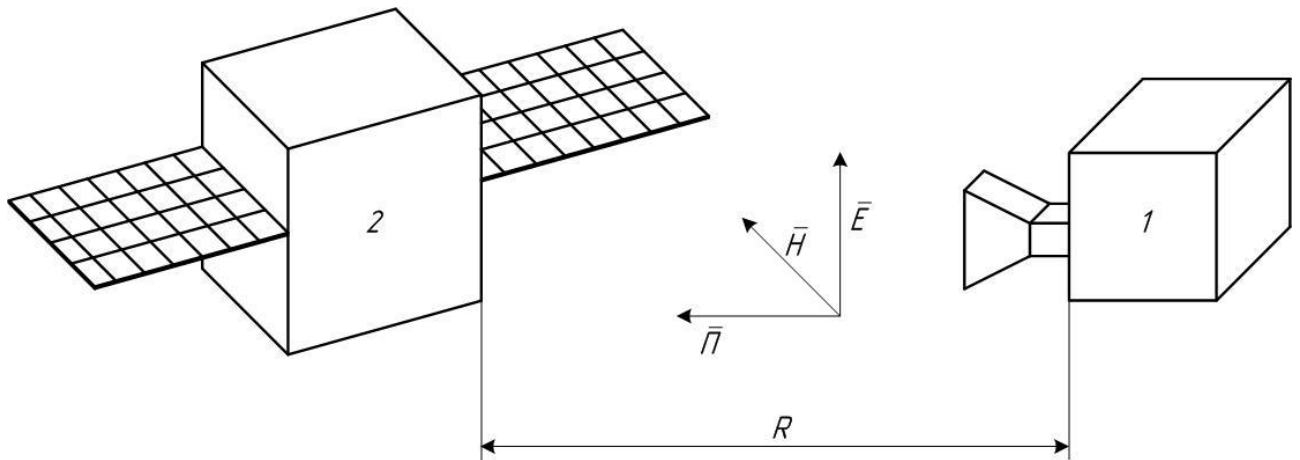


Рис. 1. Схема воздействия излучаемых ЭМП от КА с установкой направленного действия (1) на КА объект (2): R – расстояние между КА источником и КА приёмником; \vec{E} – вектор напряжённости электрического поля; \vec{H} – вектор напряжённости магнитного поля; \vec{P} – вектор Пойнтинга

Для обеспечения экономичного режима работы установки электромагнитные помехи могут создаваться в виде импульсов с амплитудой напряжённости электрического поля

$$E_m \cong 10^4 \dots 10^5 \frac{\text{В}}{\text{м}}, \text{ длительностью } T_{\text{и.}} \cong 10^{-9} \dots 10^{-8} \text{ с, частотой следования } f_{\text{сл.}} \cong 10^2 \dots 10^3 \text{ Гц.}$$

Форма типового импульса напряжённости электрического поля (рис. 2) имеет вид:

$$E(t) = E_m \cdot e^{-\sigma t} \cdot \sin(\omega_0 t),$$

где E_m – амплитудное значение напряжённости электрического поля; $\omega_0 = \frac{2\pi}{T_0}$;

T_0 – период свободных колебаний.

Форма импульса тока в излучающей антенне установки – источника ЭМП:

$$i(t) = I_m \cdot e^{-\sigma t} \cdot \sin(\omega_0 t),$$

где I_m – амплитудное значение тока.

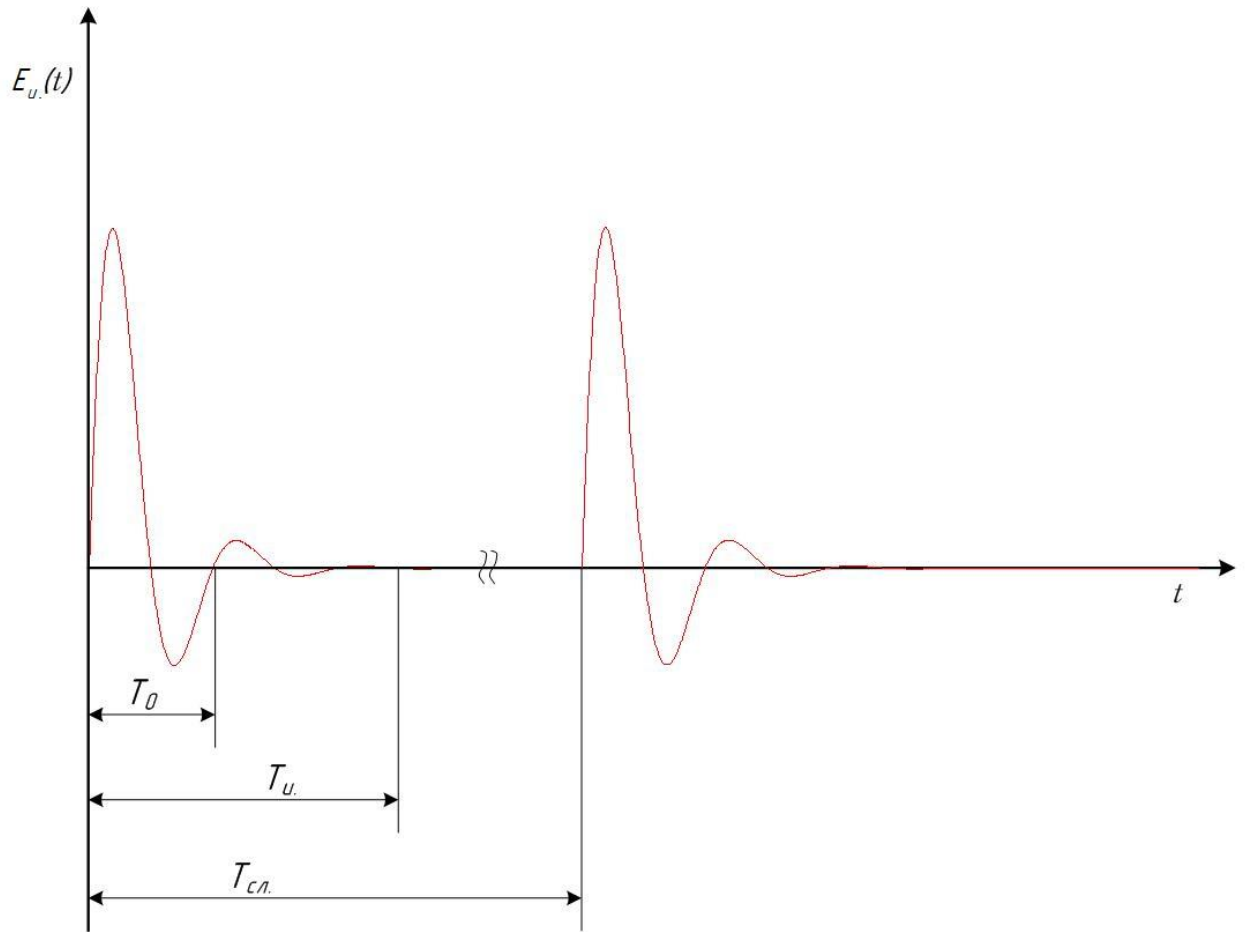


Рис. 2. Импульсы напряжённости электрического поля: T_u – длительность импульса; T_0 – период колебаний; $T_{сл.} = \frac{1}{f_{сл.}}$ – период следования импульсов; $f_{сл.}$ – частота следования импульсов

Формула тангенциальной составляющей напряжённости электрического поля от не-направленной антенны в виде элементарного вибратора с круговой диаграммой направленности имеет вид [1]:

$$E_{\theta}(t) = \frac{I_m \ell \cdot \sin \theta}{4\pi R \epsilon_a c^2} \cdot \sqrt{\sigma^2 + \omega_0^2} \cdot e^{-\sigma \left(t - \frac{R}{c} \right)} \cdot \sin \left[\omega_0 \cdot \left(t - \frac{R}{c} \right) - \arctg \frac{\omega_0}{\sigma} \right], \quad (1)$$

где I_m – амплитудное значение тока в вибраторе; $c \approx 3 \cdot 10^8 \frac{M}{c}$; $\epsilon_a = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$ – абсолютная диэлектрическая проницаемость среды; $\epsilon_0 \approx 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{Ф}{M}$; ϵ_r – относительная диэлектрическая проницаемость среды; θ – зенитный угол; R – расстояние от источника до приёмника; ℓ – длина элементарного вибратора.

Формула аксиальной составляющей напряжённости магнитного поля имеет вид:

$$H_\psi(t) = \frac{I_m \ell \cdot \sin \theta}{4\pi R c} \cdot \sqrt{\sigma^2 + \omega_0^2} \cdot e^{-\sigma \left(t - \frac{R}{c} \right)} \cdot \sin \left[\omega_0 \cdot \left(t - \frac{R}{c} \right) - \arctg \frac{\omega_0}{\sigma} \right]. \quad (2)$$

На основании формул (1) и (2) выражение вектора Пойнтинга можно представить в виде:

$$\vec{P} = \frac{I_m^2 \ell^2 \cdot \sin^2 \theta}{32\pi^2 R^2 c^3 \epsilon_a} \cdot (\sigma^2 + \omega_0^2) \cdot e^{-2\sigma \left(t - \frac{R}{c} \right)} \cdot \left[\frac{c\sigma + \omega_0^2}{\sqrt{(\omega_0^2 + c^2) \cdot (\sigma^2 + \omega_0^2)}} - \sin \left[2\omega_0 \cdot \left(t - \frac{R}{c} \right) - \psi \right] \right], \quad (3)$$

где $\psi = \arctg \frac{c\sigma - \omega_0^2}{\omega_0 \cdot (\sigma + c)}$.

Формула мгновенной мощности излучения, полученная на основе формулы вектора Пойнтинга (3), имеет вид:

$$P_{изл.}(t) = \frac{I_m^2 \ell^2 \cdot (\sigma^2 + \omega_0^2)}{12\pi c^3 \epsilon_a} \cdot e^{-2\sigma \left(t - \frac{R}{c} \right)} \cdot \left[\frac{c\sigma + \omega_0^2}{\sqrt{(\omega_0^2 + c^2) \cdot (\sigma^2 + \omega_0^2)}} - \sin \left[2\omega_0 \cdot \left(t - \frac{R}{c} \right) + \psi \right] \right],$$

где $\psi = \arctg \frac{c\sigma - \omega_0^2}{\omega_0 \cdot (\sigma + c)}$.

Среднее значение мощности излучения за время, равное длительности импульса $T_{и.}$:

$$P_{изл.} = \frac{I_m^2 \ell^2 \cdot (\sigma^2 + \omega_0^2) \sin^2 \theta}{12\pi c^3 \epsilon_a T_{и.}} \cdot \left[e^{-2\sigma \left(T_{и.} - \frac{R}{c} \right)} \cdot \left(\frac{1}{2\sqrt{\sigma^2 + \omega_0^2}} \sin \left[2\omega_0 \left(T_{и.} - \frac{R}{c} \right) + \psi_0 \right] \right) - \right.$$

$$\left. -\frac{c\sigma + \omega_0^2}{2\sigma\sqrt{(\omega_0^2 + c^2) \cdot (\sigma^2 + \omega_0^2)}} \right) + e^{\frac{2\sigma R}{c}} \cdot \left(\frac{c\sigma + \omega_0^2}{2\sigma\sqrt{(\omega_0^2 + c^2) \cdot (\sigma^2 + \omega_0^2)}} - \frac{1}{2\sqrt{\sigma^2 + \omega_0^2}} \sin \left[-2\omega_0 \frac{R}{c} + \psi_0 \right] \right) \quad (4)$$

где $\psi_0 = \arctg \frac{c}{\omega_0}$.

Принимая мощность излучения $P_{\text{изл.}} = 10^{10}$ Вт, при $T_{\text{н.}} = 2 \cdot 10^{-9}$ с; $\omega_0 = 6,28 \cdot 10^9$ с⁻¹, из формулы (4) определим величину произведения амплитудного значения тока на длину элементарного вибратора:

$$I_{\text{н.}} \ell \approx 4564,07638 \text{ А} \cdot \text{м}. \quad (5)$$

Временные диаграммы напряжённостей электрического и магнитного полей $E_\theta(t)$ и $H_\psi(t)$, излучаемых ненаправленной антенной в виде элементарного вибратора [1], для значений $\sigma = 2,5 \cdot 10^9$ 1/с; $\omega_0 = 2\pi \cdot 10^9$ 1/с; $R = 500$ м; $\theta = \frac{\pi}{2}$ с учётом (5), приведены на рис. 3 и рис. 4 соответственно.

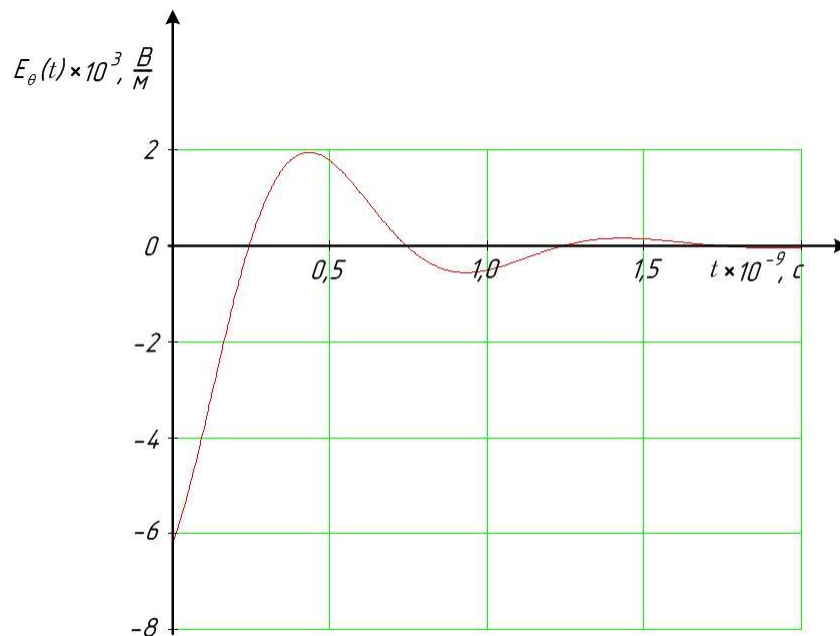


Рис. 3. Временная диаграмма напряжённости электрического поля, создаваемого направленной антенной в виде элементарного вибратора

В случае применения направленной антенны с коэффициентом усиления $k_y = 1000$ временные диаграммы напряжённостей электрического и магнитного полей для рассматриваемого случая приведены на рис. 5 и рис. 6 соответственно.

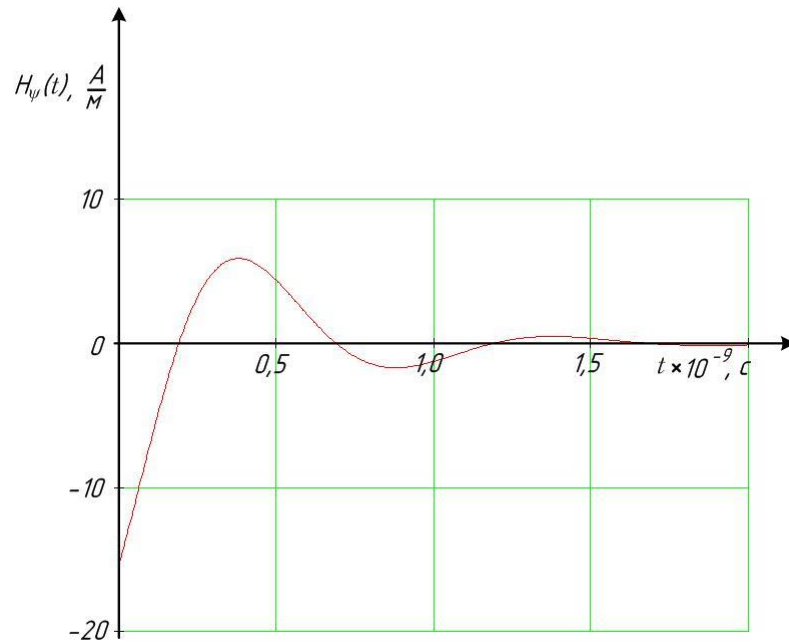


Рис. 4. Временная диаграмма напряжённости магнитного поля, создаваемого ненаправленной антенной в виде элементарного вибратора

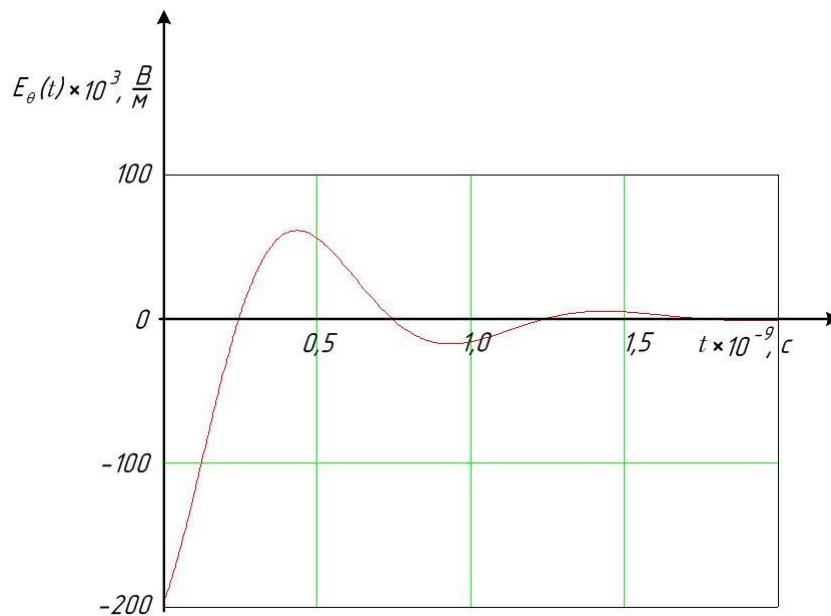


Рис. 5. Временная диаграмма напряжённости электрического поля, создаваемого направленной антенной с коэффициентом усиления антенны $k_y = 1000$

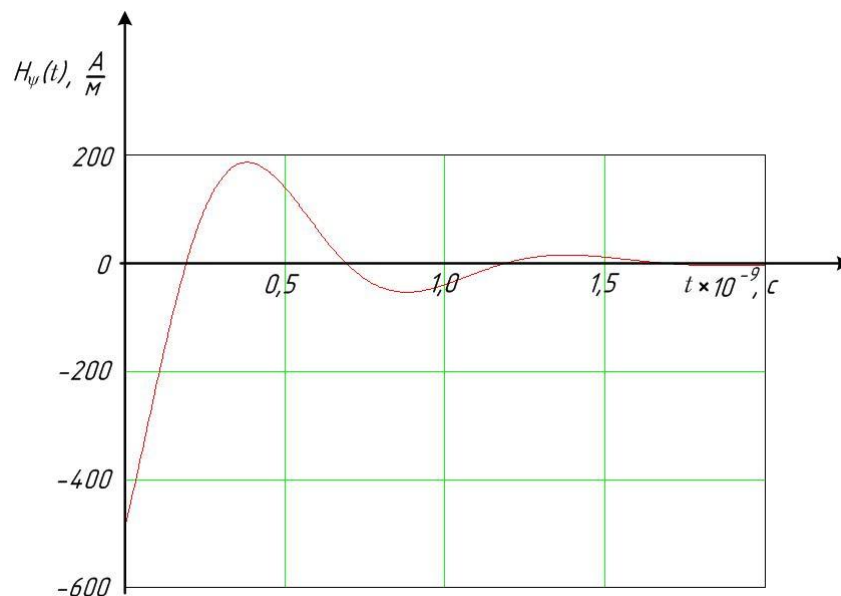


Рис. 6. Временная диаграмма напряжённости магнитного поля, создаваемого направленной антенной с коэффициентом усиления антенны $k_y = 1000$

Под воздействием электрического и магнитного полей в бортовой неэкранированной двухпроводной линии связи наводятся кондуктивные электромагнитные помехи в виде токов и напряжений.

Эквивалентная схема для расчёта наведённых токов и напряжений приведена на рис. 7.

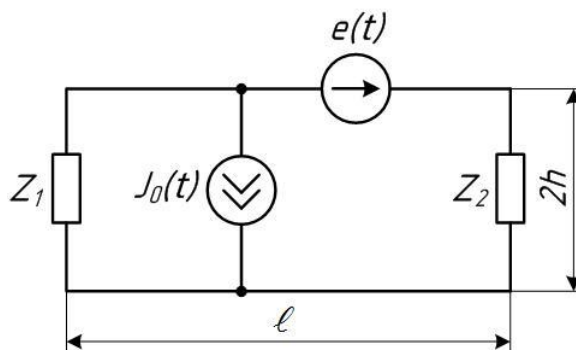


Рис. 7. Эквивалентная схема для расчётов наведённых токов и напряжений, наведённых в двухпроводной линии при воздействии электрического и магнитного полей электромагнитной волны дальней зоны

Ток, создаваемый в двухпроводной линии электрическим полем при выполнении условия квазистационарности определяется формулой [2]:

$$i(t) = \frac{2\pi\epsilon_0\ell \cdot h}{\ln\left(\frac{2h}{a}\right)} \cdot \frac{dE_\theta(t)}{dt}, \quad (6)$$

где a – радиус проводника; ℓ – длина линии; h – половина расстояния между проводниками; $E_\theta(t)$ – напряжённость электрического поля.

Напряжение на нагрузке двухпроводной линии:

$$u_1(t) = i(t) \cdot Z_1; \quad u_2(t) = i(t) \cdot Z_2,$$

где Z_1 (Z_2) – полное сопротивление нагрузки на одном из концов линии.

Напряжение, создаваемое в двухпроводной линии магнитным полем определяется формулой:

$$u(t) = 2\mu_0\ell \cdot h \cdot \frac{dH_\psi(t)}{dt},$$

где $\mu_0 \approx 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$ – магнитная постоянная.

Соответственно ток в нагрузке линии:

$$i_n(t) = \frac{u(t)}{Z_1 + Z_2}.$$

Временные диаграммы напряжения и тока в нагрузке двухпроводной линии для значений $a = 0,1 \cdot 10^{-3}$ м; $\ell = 0,1$ м; $h_1 = 0,005$ м; $h_2 = 0,05$ м; $Z_1 = Z_2 = 50$ Ом, приведены на рис. 8 и рис. 9 соответственно.

Воздействие электрического и магнитного полей на экран бортового кабеля приводит к протеканию по экрану высокочастотных токов. Воздействие на экран электрического поля можно рассматривать как включение между экраном и заземляющей поверхностью эквивалентного источника тока, величина тока которого может быть приближённо оценена по формуле (6).

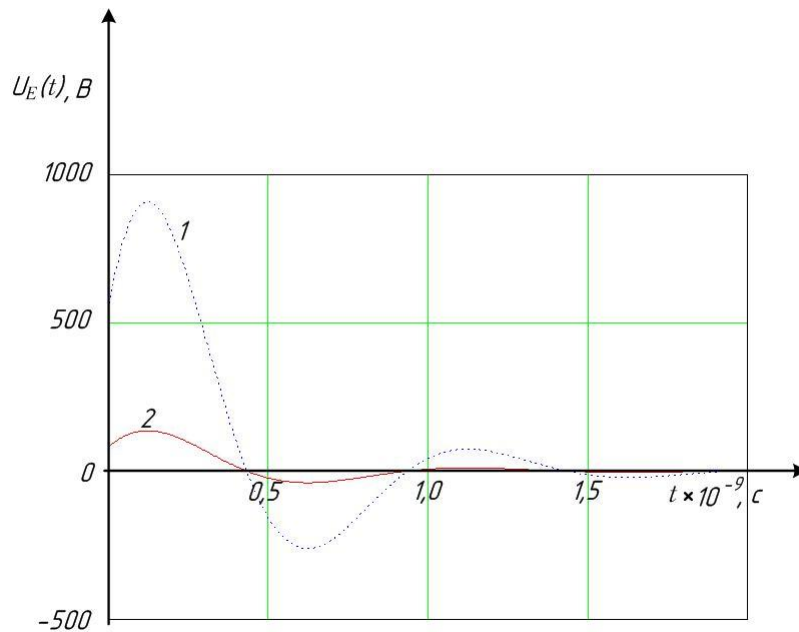


Рис. 8. Временные диаграммы напряжений в неэкранированной двухпроводной линии, возникающих при воздействии электрического поля направленной антенны с коэффициентом усиления $k_y = 1000$ для различных расстояний между проводниками:

1 – $2h_2 = 0,1$ м; 2 – $2h_1 = 0,01$ м

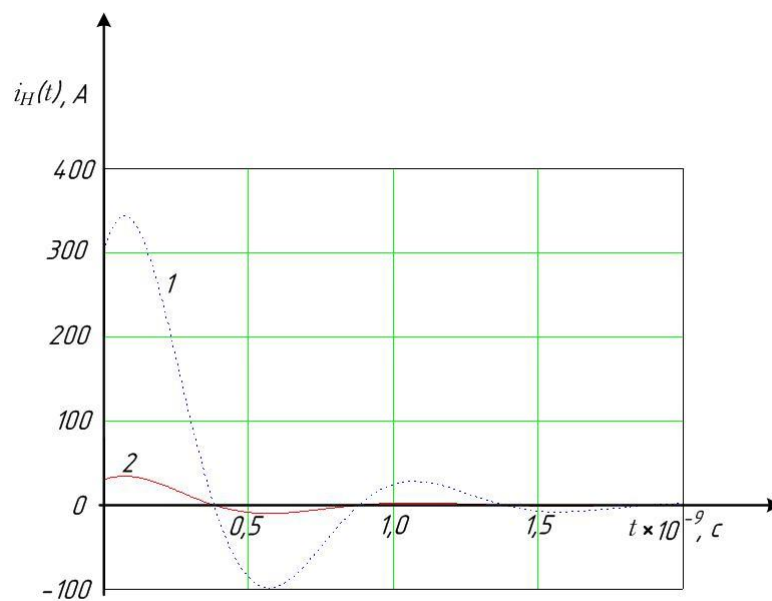


Рис. 9. Временные диаграммы токов в неэкранированной двухпроводной линии, протекающего вследствие воздействия магнитного поля направленной антенны с коэффициентом усиления $k_y = 1000$ для различных расстояний между проводниками:

1 – $2h_2 = 0,1$ м; 2 – $2h_1 = 0,01$ м

Протекание тока по экрану бортового кабеля вызывает появление напряжения на внутренних проводниках и соответственно на нагрузке.

При выполнении условия квазистационарности изображение по Лапласу напряжения на нагрузке определяется формулой общего вида:

$$U_{\text{н.в.п.}}(p) = I_{\text{э.}}(p) \cdot Z_{\text{э.св.}}(p) \cdot L, \quad (7)$$

где L – длина экранированного кабеля $I_{\text{э.}}(p)$ – изображение по Лапласу тока $i_{\text{э.}}(t)$, протекающего по экрану кабеля;

$$Z_{\text{э.св.}}(p) = \frac{1}{T^2 p^2 + mp + n} + pM$$

– операторная функция, модуль которой аппроксимирует

модуль сопротивления связи, представленный аналитической формулой [2],[3]

$$Z_{\text{э.св.}}(\omega) = \frac{1 + j}{2\pi r_0 \cdot \sigma_{\text{э.}} \cdot \delta \cdot \operatorname{sh} \left[\frac{(1 + j) \cdot d}{\delta} \right]} + j\omega M;$$

r_0 – радиус экрана кабеля; $\sigma_{\text{э.}}$ – удельная проводимость материала, из которого изготовлен эк-

ран; $\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu_a \cdot \sigma_{\text{э.}}}}$ – толщина скин-слоя материала, из которого изготовлен экран; d – тол-

щина экрана кабеля; T, m, n – коэффициенты, значения которых определяются при аппроксимации; M – взаимная индуктивность между экраном и внутренними проводниками кабеля, характеризующая неоднородности экрана в виде оплётки.

В случае если под воздействием электрического поля по экрану протекает ток, приближённо описываемый формулой (6), выражение (7) примет вид

$$U_{\text{н.в.п.}}(p) = k \cdot \frac{1 + pM \cdot (T^2 p^2 + mp + n)}{T^2 p^2 + mp + n} \cdot \frac{\omega_0 - (p + \sigma)}{(p + \sigma)^2 + \omega_0^2} \quad (8)$$

$$\text{где } k = \frac{I_m \ell \cdot L^2 h \cdot (\sigma^2 + \omega_0^2) \cdot \sin \theta}{2Rc^2 \ln \left(\frac{2h}{a} \right)} \cdot \operatorname{arctg} \left[\frac{\omega_0 \cdot (\sigma + c)}{c\sigma - \omega_0^2} \right].$$

Временная диаграмма напряжения на нагрузке, построенная на основании выражения

(8) для значений $L = 0,1 \text{ м}$; $I_m \ell \approx 4564,07638 \text{ А} \cdot \text{м}$; $T \approx -1,2152 \cdot 10^{-9} \sqrt{\frac{\text{М}}{\text{Ом}}} \cdot \text{с}$; $a = 0,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$;

$h = 0,005 \text{ м}$; $\sigma = 2,5 \cdot 10^9 \frac{1}{\text{с}}$; $\omega_0 = 2\pi \cdot 10^9 \frac{1}{\text{с}}$; $\theta = \frac{\pi}{2}$ и параметров экрана кабеля типа

"ПОМС 10×16": $\sigma_s = 5,6 \cdot 10^7 \frac{\text{СМ}}{\text{М}}$; $\mu_r = 1$; $r_0 = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $d = 0,08 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $M \approx 8,474 \cdot 10^{-9} \frac{\text{ГН}}{\text{М}}$

с учётом коэффициента усиления направленной антенны $k_y = 1000$ приведена на рис. 10.

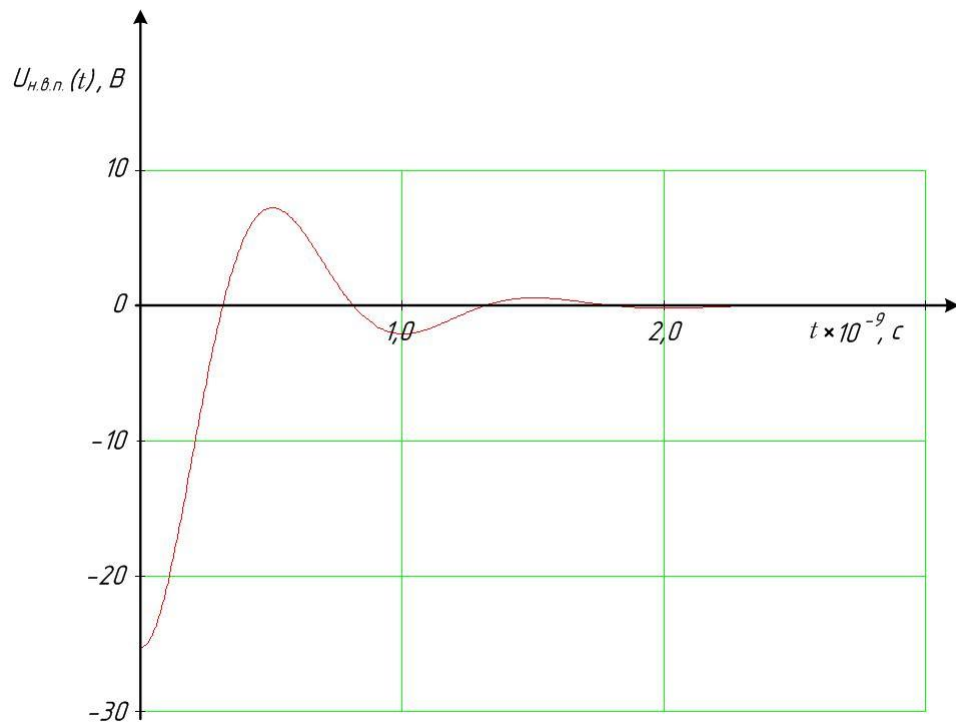


Рис. 10. Временная диаграмма напряжения на внутренних проводниках кабеля с экраном типа "ПОМС 10×16"

Полученные временные диаграммы позволяют сделать заключение о том, что под воздействием электромагнитных помех, в виде направленного импульсного электромагнитного поля (в данном случае электрическое и магнитное поля рассматривались отдельно), в бортовых двухпроводных линиях связи и кабелях КА возникают напряжения и токи, мгновенные значения которых могут представлять опасность для элементов и устройств бортовых систем и, следовательно, в целом для функционирования КА как управляемого объекта.

Библиографический список

1. Атабеков Г.И., Купалян С.Д., Тимофеев А.Б., Хухриков С.С. Нелинейные электрические цепи. Электромагнитное поле. Под редакцией Г.И. Атабекова. М.: Энергия, 1979. – 432 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.