

УДК 621.31

Моделирование воздействия мощных электромагнитных помех на электротехнический комплекс самолета

Кириллов В.Ю.^{1*}, Клыков А.В.^{2}, Нгуен В.Х.^{1***}**

¹*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия*

**e-mail: kaf309@mai.ru*

²*Аэрокосмические системы, ул. Программистов, 4, Дубна, 141983, Россия*

***e-mail: klykov@aerospace-systems.ru*

****e-mail: vankhoi2603@gmail.com*

Аннотация

Проводится анализ видов и источников мощных электромагнитных помех (МЭМП), воздействующих на элементы и устройства электротехнического комплекса (ЭТК) самолета, и приводятся формулы расчета тока по плетеному экрану и синфазного напряжения на внутренних проводниках экранированного кабеля, расположенного в композитном крыле, при воздействии электрического поля молнии и магнитного поля тока молнии, протекающего по фюзеляжу самолета. Результаты расчетов показывают возможность выбора плетеного экрана для экранирования кабеля, исходя из амплитуды наведенного синфазного напряжения на внутренних проводниках кабеля и из массы экранов, а также необходимость применения дополнительных мер защиты элементов и устройств ЭТК самолета от ЭМП, проникающих через экранированные кабели, расположенные в композитном крыле самолета.

Ключевые слова: бортовая кабельная сеть, молния; плетеный экран; самолет, электромагнитная помеха, электротехнический комплекс

Введение

Воздействие МЭМП на ЭТК самолета может привести к значительному ухудшению качества функционирования бортовых систем самолета, потере работоспособности элементов и устройств ЭТК самолета, возникновению аварийных ситуаций.

Целью статьи является проведение анализа МЭМП, воздействующих на ЭТК самолетов, введение определения стойкости ЭТК самолетов к МЭМП, математического моделирования воздействия МЭМП на ЭТК самолетов.

На основе ГОСТ 18311-80 [1] введем определение: *электротехнический комплекс* – это совокупность взаимосвязанных электротехнических устройств и изделий, предназначенных для производства, преобразования, передачи, распределения, потребления электрической энергии. Таким образом, *электротехнических комплекс* самолета включает в себя всё бортовое электротехническое и радиоэлектронное оборудование, все системы, создающие и использующие в процессе своей работы электрическую энергию.

На рисунке 1 представлена схема воздействия МЭМП на цепи ЭТК самолета через бортовую кабельную сеть (БКС), связывающую между собой электротехнические устройства и изделия [2].

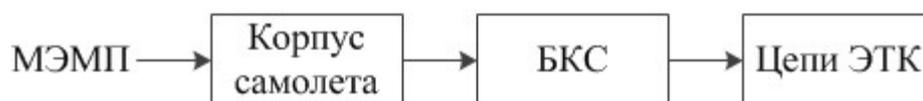


Рисунок 1 – Схема воздействия МЭМП на цепи ЭТК самолета

Источники МЭМП в зависимости от происхождения подразделяются на естественные и искусственные. Схема классификации источников МЭМП приведена на рисунке 2.



Рисунок 2 – Виды МЭМП и их источники

Искусственные источники создают преднамеренные и непреднамеренные МЭМП. К искусственным источникам непреднамеренных МЭМП относятся источники индустриального происхождения и мощные радиопередающие средства. Искусственными источниками преднамеренных МЭМП являются специальные технические средства создания излучаемых электромагнитных помех для целенаправленного ухудшения качества функционирования или полного нарушения работоспособности ЭТК самолета.

Индустриальные источники МЭМП такие как, например, высоковольтные установки для научных исследований и технологических целей, высоковольтные линии электропередачи, могут создавать электромагнитные импульсы и представляют опасность в основном для низколетящих самолетов.

Мощные радиопередающие и радиолокационные средства, работающие в широком частотном диапазоне от десятков Гц до десятков ГГц, могут создавать опасные для ЭТК самолетов излучаемые электромагнитные помехи в виде модулированных по амплитуде и частоте с электрической напряженностью от 50 до 7200 В/м в частотном диапазоне 2 МГц – 18 ГГц [3-5].

Техническими средствами преднамеренных МЭМП являются средства радиоэлектронной борьбы (РЭБ) и электромагнитное оружие (ЭМО). Параметры техниче-

ских средств РЭБ [6] в диапазоне субмиллиметровых и миллиметровых волн имеют вид:

- Импульсная мощность в одномодовом режиме генератора от $2,5 \cdot 10^6$ Вт (длина волны 0,5 мм) до $6,4 \cdot 10^8$ Вт (длина волны 8 мм);
- Импульсная мощность в многомодовом режиме генератора от $2,5 \cdot 10^8$ Вт (длина волны 0,5 мм) до $6,4 \cdot 10^{10}$ Вт (длина волны 8 мм);
- Дальность постановки активных помех от 10 км до 100 км.

Электромагнитное оружие создает сверхширокополосные (СШП) электромагнитные импульсы (ЭМИ) большой амплитуды, длительность воздействующих импульсов которых соразмерна с длительностью рабочих импульсов, сопровождающих обработку информации в ЭТК. Параметры СШП ЭМИ электромагнитного оружия имеют вид [7]:

- Пиковая мощность в антенне 2–20 ГВт;
- Электрическая напряженность электромагнитного поля 56 кВ/м на расстоянии 100 м (у наиболее совершенных установок);
- Длительность фронта 85–250 пс;
- Длительность импульса 0,1–3 нс;
- Частота генерирования импульсов от одиночных до нескольких кГц.

Источниками естественных МЭМП являются грозовые разряды, поражающие факторы которых – ток молнии и электромагнитный импульс. Наиболее опасным фактором грозового разряда является ток молнии. Форма импульса тока молнии приближенно можно представить в виде [8]:

$$I_{\text{м}}(t) = I_{\text{max}} \cdot k \cdot (e^{-\alpha_1 t} - e^{-\alpha_2 t}),$$

где $I_{\text{max}} = 200$ кА, $k = 1,051$, $\alpha_1 = 0,0138 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$, $\alpha_2 = 1,6248 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$, t – время (с). Временная диаграмма импульса тока молнии приведена на рисунке 3.

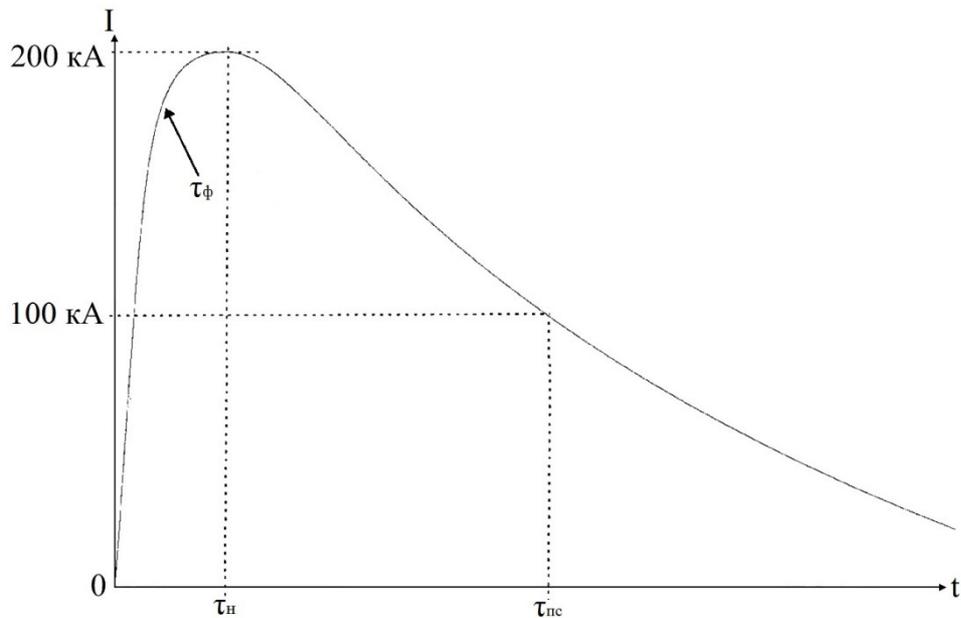


Рисунок 3 – Временная диаграмма импульса тока молнии, где: $\tau_{\phi} = 2 \cdot 10^{-6}$ с – длительность фронта импульса; $\tau_n = 3 \cdot 10^{-6}$ с – время нарастания импульса; $\tau_{пс} = 50 \cdot 10^{-6}$ с – время половинного спада заднего фронта импульса

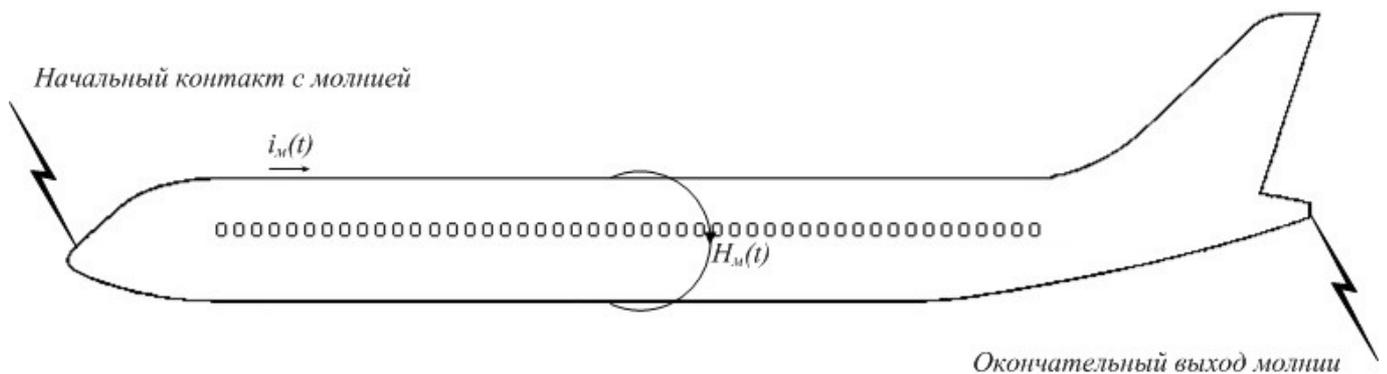


Рисунок 4 – Протекание тока молнии по фюзеляжу самолета

При попадании тока молнии в самолет и протекании вдоль фюзеляжа (рисунок 4) в окрестности самолета возникает сильное магнитное поле, напряженность которого, приближенно можно вычислить по формуле:

$$H_m(t) = \frac{I_m(t)}{2\pi r_{\phi}}$$

где $I_m(t)$ – импульсный ток молнии, протекающий по фюзеляжу самолета, r_{ϕ} – радиус фюзеляжа самолета.

Магнитное поле, образовавшееся в результате протекания тока молнии по фюзеляжу самолета, является МЭМП, которая приводит к появлению импульсных кон-

дуктивных помех в виде наведенных напряжений и токов в кабелях расположенных в композитных крыльях самолета (рисунок 5).

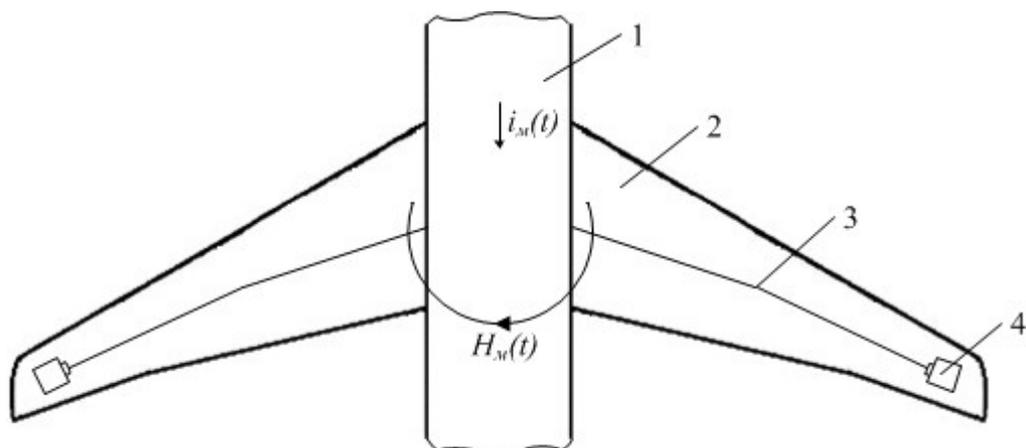


Рисунок 5 – Воздействие магнитного поля тока молнии на кабели в крыльях самолета: 1 – фюзеляж самолета; 2 – крыло самолета; 3 – бортовой кабель в крыле самолета; 4 – электротехническое устройство

Учитывая длину кабеля в крыле самолета $\sim 10-15$ м, длительность импульса тока молнии не менее $4 \cdot 10^{-4}$ с и фронта $2 \cdot 10^{-6}$ с экран кабеля можно рассматривать как электрически короткую линию. Эквивалентная схема воздействия электрического поля канала разряда молнии и магнитного поля тока молнии на экран кабеля в композитном крыле самолета приведена на рисунке 6.

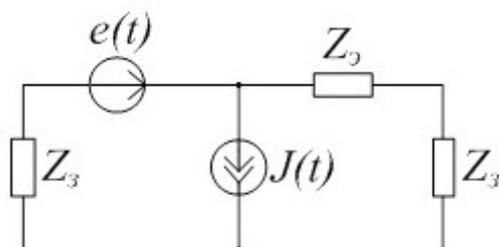


Рисунок 6 – Эквивалентная схема воздействия электрического и магнитного полей на экран кабеля в крыле самолета: $e(t)$ – ЭДС наводимая на экране кабеля под воздействием магнитного поля тока молнии; Z_3 – сопротивление экрана кабеля; Z_3 – сопротивление металлизации экрана кабеля; $J(t)$ – источник тока эквивалентный воздействию электрического поля на экран кабеля

Напряжение, наводимое на экране кабеля, вычисляется по формуле:

$$u(t) = 2\mu_0 l h \frac{dH(t)}{dt}; \quad (1)$$

где l – длина кабеля в крыле самолета; h – среднее расстояние между экраном кабеля и конструктивными металлическими элементами крыла, r – радиус экрана кабеля.

Мгновенная напряженность магнитного поля тока молнии и электрического поля канала разряда молнии в зависимости от времени равна:

$$H(t) = H_{\text{мсп}} \cdot (e^{-\alpha_1 t} - e^{-\alpha_2 t}),$$

Среднее амплитудное значение напряженности магнитного поля тока молнии вычисляется по формуле:

$$H_{\text{мсп}} = \frac{1}{l} \int_0^l \frac{I_{\text{max}}}{2\pi \cdot (r_{\phi} + l)} dl,$$

где r_{ϕ} – радиус фюзеляжа.

Источник тока эквивалентный воздействию электрического поля на экран кабеля определяется по формуле:

$$J(t) = \frac{2\pi\epsilon_0 lh}{\ln(2h/r)} \cdot \frac{dE(t)}{dt}. \quad (2)$$

где r – радиус экрана кабеля.

Мгновенная напряженность электрического поля канала разряда молнии в зависимости от времени равна:

$$E(t) = E_{\text{мсп}} \cdot (e^{-\alpha_1 t} - e^{-\alpha_2 t}),$$

Амплитудное значение напряженности электрического поля $E_{\text{мсп}} = 3 \cdot 10^6$ В/м [9, с.220].

Формулы напряжения (1) и тока (2) в операторной форме имеют вид:

$$u(p) = 2\mu_0 lh \cdot H_{\text{мсп}} \cdot \frac{p \cdot (\alpha_2 - \alpha_1)}{(p + \alpha_1) \cdot (p + \alpha_2)};$$

$$I_E(p) = \frac{2\pi\epsilon_0 lh}{\ln(2h/r)} \cdot E_{\text{мсп}} \cdot \frac{p \cdot (\alpha_2 - \alpha_1)}{(p + \alpha_1) \cdot (p + \alpha_2)}.$$

Операторное выражение результирующего тока, создаваемого на экране кабеля в крыле самолета:

$$I(p) = I_E(p) + I_H(p).$$

Ток на экране, создаваемый магнитным полем, $I_H(p)$ определяется по формуле:

$$I_H(p) = \frac{U(p)}{r_m + r_3 + pL_3} = 2\mu_0 lh \cdot H_{mcp} \cdot \frac{p \cdot (\alpha_2 - \alpha_1)}{(p + \alpha_1) \cdot (p + \alpha_2)(r_m + r_3 + pL_3)}$$

где r_3 – сопротивление экрана кабеля по постоянному току; r_m – сопротивление металлизации экрана кабеля; L_3 – индуктивность экрана кабеля.

Синфазное напряжение внутренних проводников кабеля в операторной форме имеет вид:

$$U_{вп}(p) = I(p) \cdot Z_{асв}(p), \quad (3)$$

где $Z_{асв}(p)$ – операторная функция, модуль которой аппроксимирует модуль сопротивления связи $Z_{св}(p)$ между экраном кабеля и внутренними проводниками.

Для плетеного экрана сопротивление связи определяется по формуле Вэнса при $p = j\omega$ [10, с.197]:

$$Z_{св}(j\omega) = Z_d + j\omega M_{12},$$

где Z_d – сопротивление связи эквивалентного сплошного экрана с отверстиями, M_{12} – взаимная индуктивность между жгутами.

$$Z_d = r_3 \cdot \frac{(1-j) \cdot d/\delta}{sh[(1+j) \cdot d/\delta]}$$

где d – диаметр проволоки, δ – глубина скин-слоя.

$$r_3 = \frac{4}{\pi d^2 N_n N_{ж} \sigma \cos \alpha}; \quad \delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_r \mu_0 \sigma_c}}$$

где N_n – число проволок в жгуте, $N_{ж}$ – число жгутов в экране, σ – удельная проводимость проволок экрана, α – угол плетения, $\omega = 2\pi f$ – круговая частота.

$$M_{12} = \begin{cases} \frac{\pi \mu_0}{6 N_{ж}} \cdot (1-K)^{3/2} \cdot \frac{e^2}{E(e) - (1-e^2) \cdot K(e)}, & \text{при } \alpha < 45^\circ; \\ \frac{\pi \mu_0}{6 N_{ж}} \cdot (1-K)^{3/2} \cdot \frac{e^2 \cdot (\sqrt{1-e^2})^{-1}}{E(e) - K(e)}, & \text{при } \alpha > 45^\circ, \end{cases}$$

где K – оптическая плотность, $K(e)$ – полный эллиптический интеграл первого рода, $E(e)$ – полный эллиптический интеграл второго рода.

$$K = 2F - F^2; \quad F = \frac{d N_n N_{ж}}{4\pi r \cos \alpha}; \quad e = \begin{cases} \sqrt{1 - tg^2 \alpha}, & \text{при } \alpha < 45^\circ; \\ \sqrt{1 - ctg^2 \alpha}, & \text{при } \alpha > 45^\circ; \end{cases}$$

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

где F – фактор заполнения.

На основе формулы (3) был проведен расчет наведенного синфазного напряжения на внутренних проводниках экранированного кабеля, расположенного в композитном крыле, в случае протекания тока молнии по фюзеляжу самолета с помощью программных комплексов Mathcad и MATLAB. Для значений $I_{max} = 200$ кА; $k = 1,051$, $\alpha_1 = 0,0138 \cdot 10^6$ с⁻¹, $\alpha_2 = 1,6248 \cdot 10^6$ с⁻¹; $H_{mcp} = 5,7$ кА/м; $E_{mcp} = 3$ МВ/м; $r_{\phi} = 2$ м; $l = 10$ м; $r = 4$ мм; $h = 0,05$ м; $r_m = 4$ мОм; $r_3 = 336$ мОм; $L_3 = 10$ мкГн амплитудное значение тока на экране и синфазного напряжения внутренних проводников кабеля с экраном ПОМС 6x10 соответственно равны $I_3 = 652,06$ А и $U_{вп} = 217,44$ В. На рисунках 7-12 приведены временные и частотная диаграммы рассчитанных среднего значения напряженности магнитного поля тока молнии (H_{mcp}), напряженности электрического поля молнии (E_{mcp}), создаваемого магнитным полем тока по экрану (I_H), создаваемого электрическим полем тока по экрану (I_E), наведенного синфазного напряжения на внутренних проводниках экранированного кабеля ($U_{вп}$) и аппроксимированного сопротивления связи ($Z_{асв}$) соответственно. Амплитудные значения токов по экрану и синфазных напряжений на внутренних проводников для кабелей с другими экранами, применяемыми при проектировании БКС самолетов, приведены в таблице 1.

Таблица 1

№	Тип экрана	Ток по экрану I_3 [А]	Синфазное напряжение на внутренних проводниках $U_{вп}$ [В]	Масса, г/м
1	ПМС 6x10 (0,05)	622,44	399,40	6,93
2	ПОМС 6x10	652,06	217,44	6,0
3	ПМСН 8	595,54	584,50	11,7
4	ПЭЛА 6x10 (0,12)	670,57	117,13	8,31
5	ПАМу-Л 6x10 (0,1) 70-80%	657,21	189,00	4,65
6	ПАМу-Л 6x10 (0,1) 80-95%	666,75	136,96	6,27
7	ПАМу-Л 6x10 (0,12) 70-80%	661,54	164,94	5,47

№	Тип экрана	Ток по экрану I_0 [A]	Синфазное напряжение на внутренних проводниках $U_{вп}$ [В]	Масса, г/м
8	ПАМу-Л 6x10 (0,12) 80-95%	671,71	111,65	7,9
9	ArmorLite 103-051-012	619,29	419,58	9,12
10	ПМу-Л 12	670,95	115,57	8,59

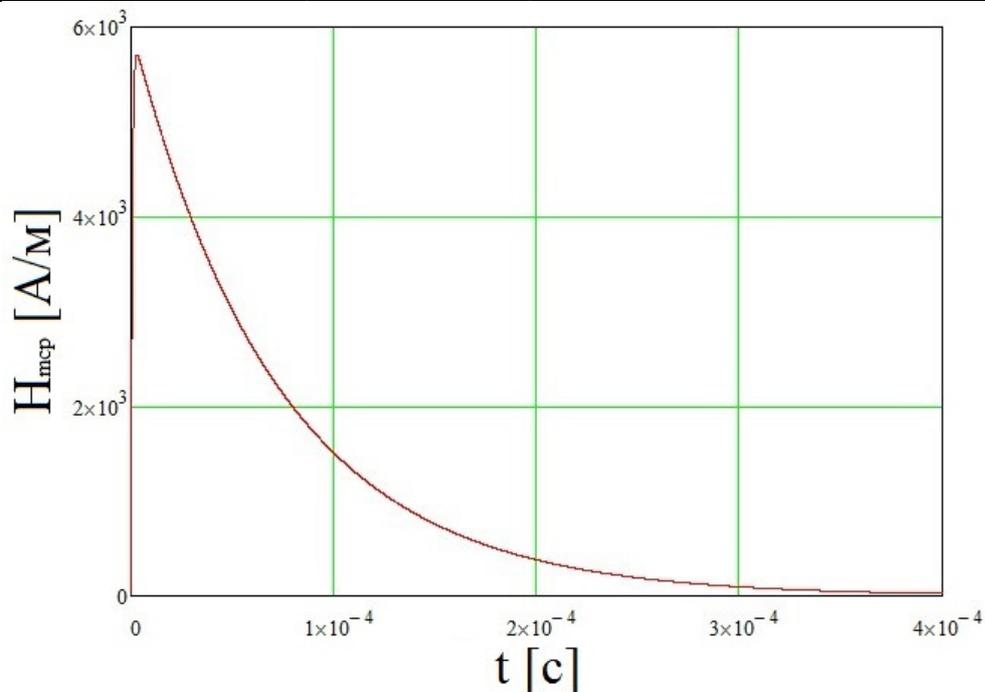


Рисунок 7 – Временная диаграмма среднего значения напряженности магнитного поля тока молнии

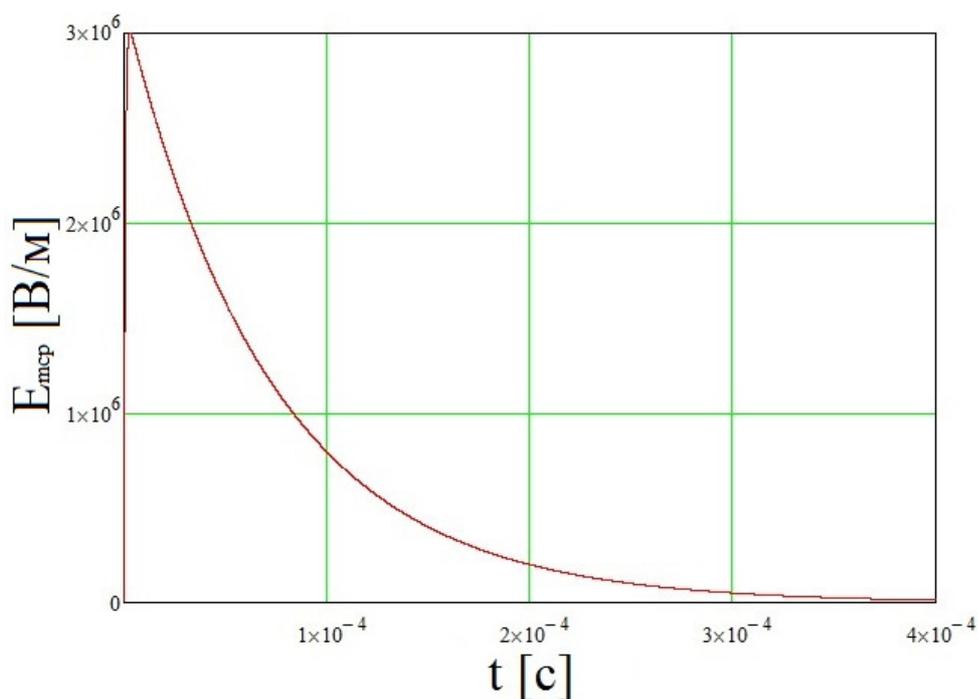


Рисунок 8 – Временная диаграмма напряженности электрического поля молнии

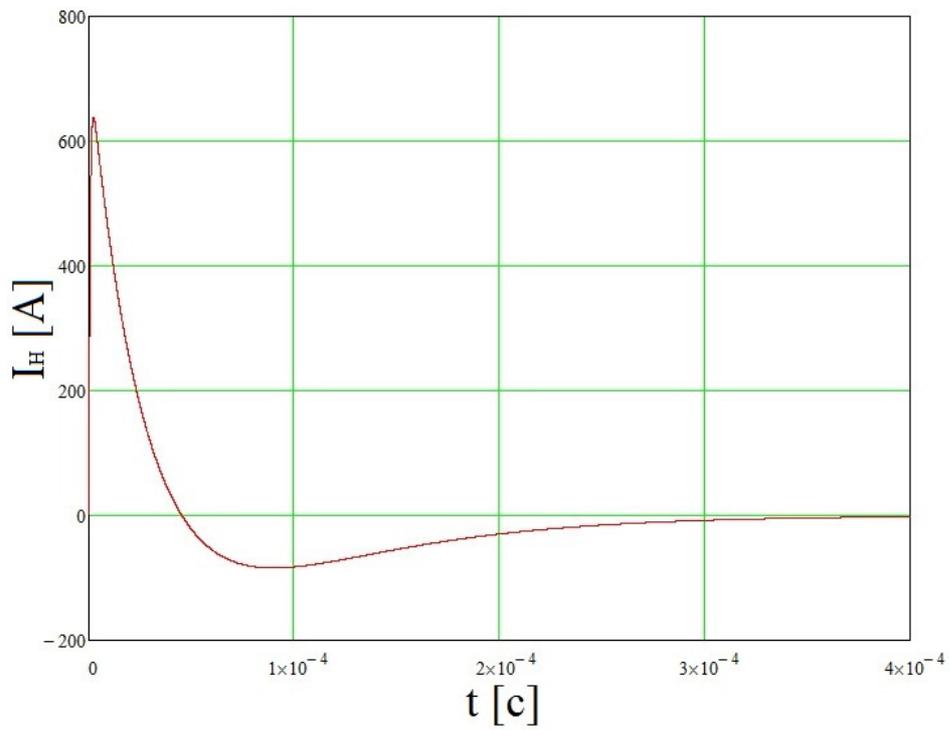


Рисунок 9 – Временная диаграмма тока протекающего по экрану кабеля в крыле самолета, создаваемого магнитным полем тока молнии

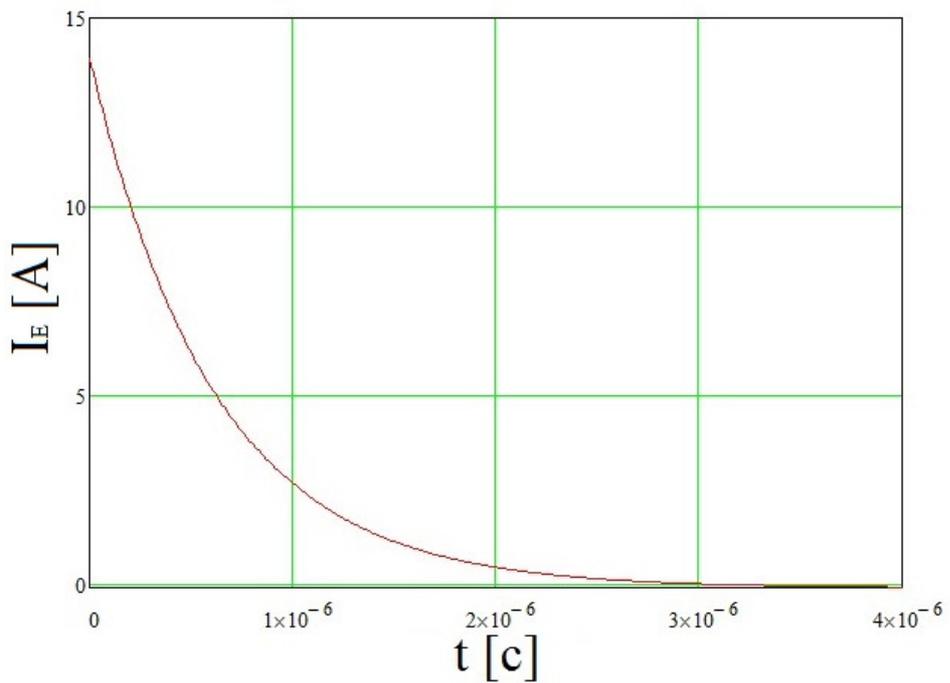


Рисунок 10 – Временная диаграмма тока протекающего по экрану кабеля в крыле самолета, создаваемого электрическим полем молнии

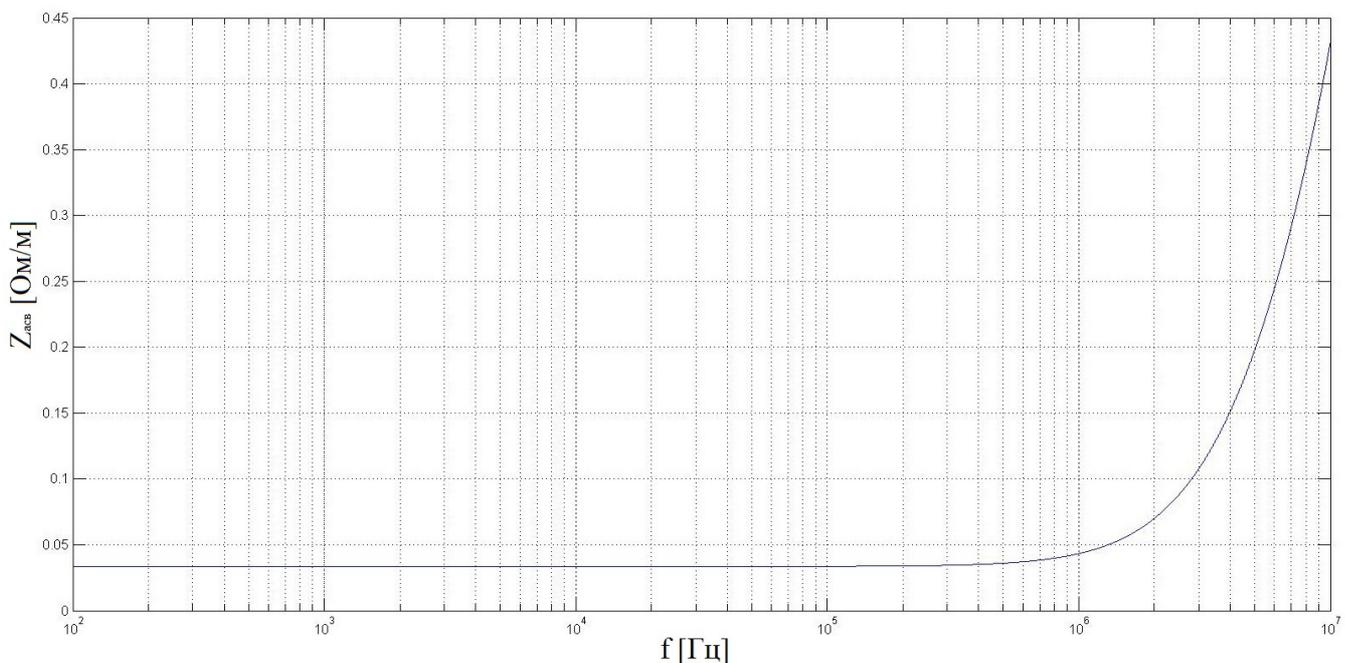


Рисунок 11 – Частотная диаграмма модуля операторной функции $Z_{acв}(p)$ плетеного экрана ПОМС 6x10

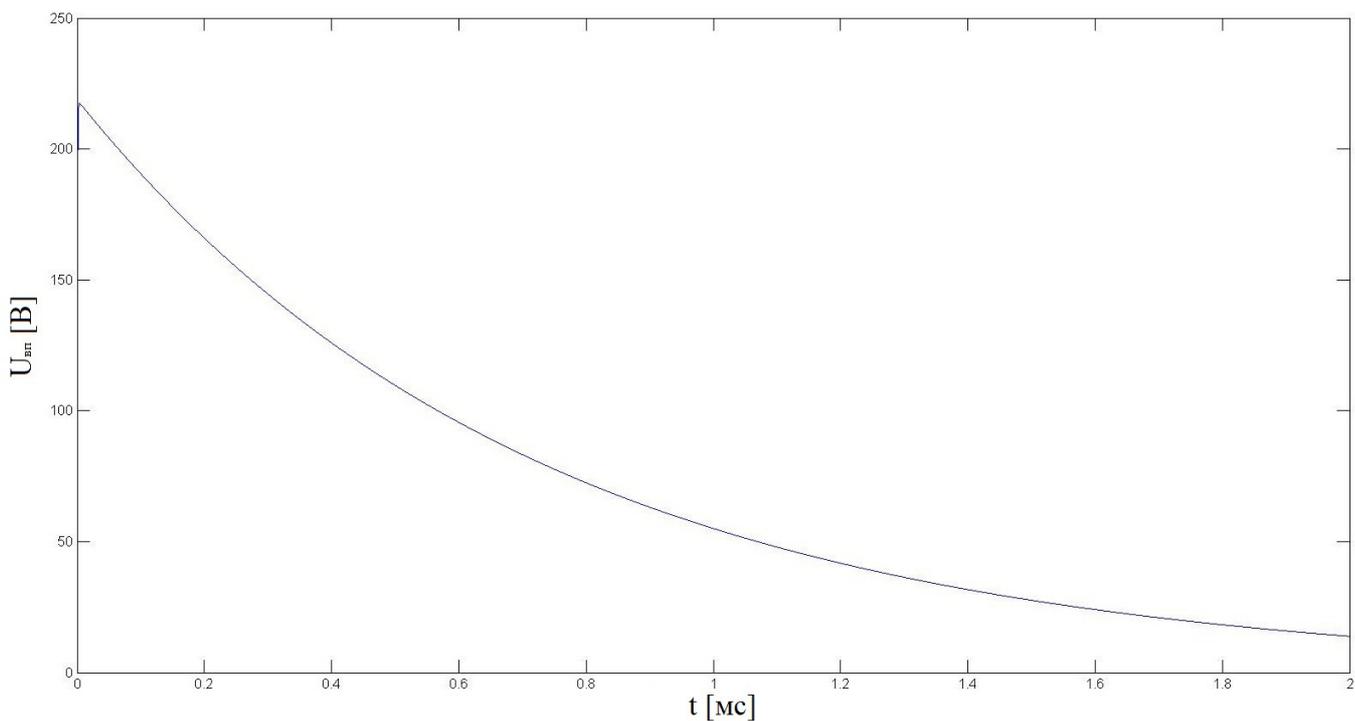


Рисунок 12 – Временная диаграмма синфазного напряжения внутренних проводников кабеля с экраном ПОМС 6x10

Заключение

Расчет токов по экрану и синфазных напряжений на внутренних проводниках кабеля с различными экранами показывает, что электрическое поле молнии и магнитное тока молнии, протекающего по фюзеляжу самолета, наводят существенные

синфазные напряжения на внутренних проводниках экранированного кабеля, расположенного в композитном крыле самолета. Приведенные расчеты дают возможность выбирать параметры экранов кабелей, исходя из амплитуды наведенного синфазного напряжения на внутренних проводниках кабеля и требований к массогабаритным показателям экранов, а также показывают необходимость применения дополнительных мер защиты элементов и устройств ЭТК самолета от воздействия электрического и магнитного полей молнии на экранированные кабели, расположенные в композитном крыле самолета.

Библиографический список

1. Изделия электротехнические. Термины и определения основных понятий. ГОСТ 18311-80. М.: Издательство стандартов. 1981. 21 с.
2. Акбашев Б.Б., Балюк Н.В., Кечиев Л.Н. Обеспечение информационной и функциональной безопасности в специальных технических зданиях при электромагнитных воздействиях / Технологии ЭМС. 2011. № 2(37). С. 3-12.
3. MIL-STD-461F, *Department of defense interface standard Requirements for the control of electromagnetic interference characteristics of subsystems and equipment*, December 10, 2007, 255 p.
4. RTCA/DO-160G, *Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment*, Prepared by SC-135, December 8, 2010, 542 p.
5. Квалификационные требования КТ-160D «Условия эксплуатации и окружающей среды для бортового авиационного оборудования (Внешние воздействующие факторы) Требования, нормы и методы испытаний». АРМАК. 2004. 324 с.
6. Добыкин В.Д., Куприянов А.И., Пономарев В.Г., Шустов Л.Н. Радиоэлектронная борьба. Силовое поражение радиоэлектронных систем. М.: Вузовская книга, 2007. 468 с.
7. Чермошенцев С.Ф. Информационные технологии электромагнитной совместимости электронных средств. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2000. 152 с.

8. Кравченко В.И., Болотов Е.А., Летунова Н.И. Радиоэлектронные средства и мощные электромагнитные помехи. М.: Радио и связь, 1987. 256 с.
9. Кравченко В.И. Грозозащита радиоэлектронных средств. М.: Радио и связь, 1991. 264 с.
10. Дьяков А.Ф., Максимов Б.К., Борисов Р.К., Кужекин И.П., Жуков А.В. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике и электротехнике. М.: Энергоатомиздат, 2003. 768 с.