

На правах рукописи



КЛЫКОВ АНТОН ВЛАДИМИРОВИЧ

Исследование помехозащищенности электрических жгутов
электротехнических комплексов летательных аппаратов
при воздействии мощных электромагнитных помех

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2016

Работа выполнена на кафедре «Теоретическая электротехника» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: **Владимир Юрьевич Кириллов** - доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теоретическая электротехника» МАИ

Официальные оппоненты: **Владимир Степанович Саенко** – доктор технических наук, профессор, лауреат премии Правительства РФ, Московский институт электроники и математики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

Николай Васильевич Лемешко – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, федеральное государственное унитарное предприятие Ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский институт радио

Ведущая организация: АО «Московский ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский радиотехнический институт»

Защита диссертации состоится «29» ноября 2016 г. в 11 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.125.07 в Московском авиационном институте (национальном исследовательском университете) по адресу: г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, главный административный корпус, зал заседаний Ученого совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» и на сайте: <http://www.mai.ru/events/defence>.

Ваш отзыв на автореферат в количестве двух экземпляров, заверенных печатью, просьба направлять по адресу: 125993, ГСП-3, А-80, Москва, Волоколамское шоссе, д.4, Ученый совет МАИ.

Автореферат разослан «___» _____ 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.125.07

В.С. Степанов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертационной работы

Электрические жгуты (провода, кабели), входящие в электротехнический комплекс (ЭТК) летательных аппаратов (ЛА), в силу их протяженности и разветвлённой структуры наиболее подвержены воздействию излучаемых мощных электромагнитных помех (МЭМП).

На современном этапе авиастроения актуальность обеспечения помехозащищенности ЭТК ЛА от воздействия МЭМП, а также обеспечения надежной передачи энергии и информации по электрическим жгутам возрастает. Этому способствуют следующие факторы: уменьшение эффективности экранирования конструкции ЛА, вследствие расширенного применения композитных материалов; усложнение электромагнитной обстановки, вызванное увеличением количества и мощности источников МЭМП, например, источников электромагнитных полей высокой интенсивности; разработка и внедрение новых электронных и электрических систем ЭТК ЛА, выполняющих функции, необходимые для безопасного продолжения полета и посадки.

Создаваемые источниками естественного и искусственного происхождения излучаемые МЭМП в виде электрических и магнитных полей, распространяясь в атмосферной или космической среде, достигают корпуса ЛА, проникают во внутреннее пространство его конструкции и создают кондуктивные электромагнитные помехи (ЭМП). Кондуктивные ЭМП воздействуют на электропроводные элементы конструкции ЛА, экраны электрических жгутов, на их внутренние проводники и проявляются в виде напряжений и токов в конструкции и в электрических жгутах ЭТК ЛА. Кондуктивные ЭМП, распространяясь по цепям электрических жгутов, проникают через электрические соединители приборов и устройств на проводящие дорожки печатных плат и через выводы полупроводниковых приборов и интегральных микросхем воздействуют на их внутреннюю структуру, что в итоге может привести к ухудшению качества функционирования или отказу ЭТК ЛА.

Помехозащищенность электрических жгутов ЭТК ЛА от МЭМП обеспечивается металлическими плетеными экранами (далее – экранами), которые отличаются параметрами конструкции, такими как: материал и толщина нити, из которой изготовлен экран; количество прядей и нитей в пряди; угол плетения. В зависимости от данных параметров различные экраны имеют разные характеристики эффективности экранирования и массы, которые являются наиболее важными при выборе типа экрана проектируемых электрических жгутов ЭТК ЛА.

Исследование помехозащищенности электрических жгутов ЭТК ЛА при воздействии МЭМП связано с расчетом кондуктивных ЭМП, распространяющихся по цепям (экранам и внутренним проводникам) экранированных электрических жгутов и приводящих к возможному ухудшению качества функционирования или отказу ЭТК ЛА. Данное исследование является актуальной и важной научно-технической задачей, решение которой позволит повысить помехозащищенность электрических жгутов ЭТК ЛА от МЭМП.

Вопросам МЭМП, воздействующих на ЛА, посвящены работы В.И. Кравченко, Л.Н. Кечиева, Н.В. Балюка, В.П. Булекова, В.Ю. Кириллова, Э.М. Базеляна, Ю.П. Райзера, Л.О. Мыровой и др.

Вопросам помехозащищенности электрических жгутов ЭТК ЛА с плетеными экранами посвящены работы таких авторов как: В.И. Кравченко, И.И. Гроднев, А.Ф. Дьяков, В.Ю. Кириллов, М.М. Томилин, М.В. Марченко, В.Х. Нгуен, R.D. Leach, M.V. Alexander, C.A. Clarke, W.E. Larsen, E.F. Vance, T. Kley, M. Tyni и др.

Существующие математические модели проникновения МЭМП во внутреннее пространство конструкции ЛА, корпусов приборов и устройств ЭТК ЛА разработаны для случая периодических излучаемых МЭМП. Известные математические модели и методики расчета наведенных токов и напряжений на экранах и внутренних проводниках электрических жгутов ЭТК ЛА разработаны для случаев воздействия кондуктивных периодических и импульсных ЭМП на электрические жгуты с одним и несколькими экранами. В диссертационной работе предложены математические модели и методики расчета: проникновения во внутреннее пространство конструкции ЛА, корпусов приборов и устройств ЭТК ЛА импульсных излучаемых МЭМП; наведенных токов и напряжений на экранах и внутренних проводниках электрических жгутов ЭТК ЛА, рассматриваемых как цепи с распределенными параметрами, для случаев воздействия периодических и импульсных излучаемых МЭМП.

Цель диссертационной работы

Цель диссертационной работы заключается в повышении помехозащищенности электрических жгутов ЭТК ЛА при воздействии излучаемых МЭМП путем исследования результатов их воздействия в виде наведенных токов и напряжений на экранах и внутренних проводниках электрических жгутов, влияющих на работоспособность и качество функционирования ЭТК ЛА.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать методику расчета уровней излучаемых МЭМП, проникающих во внутреннее пространство конструкции ЛА, корпусов приборов и устройств ЭТК ЛА;
- разработать математические модели воздействия периодических и импульсных

излучаемых МЭМП на экраны и внутренние проводники экранированных электрических жгутов ЭТК ЛА, рассматриваемых в виде электрических цепей с распределенными параметрами;

— разработать методики расчета наведенных излучаемыми МЭМП кондуктивных ЭМП на экранах и внутренних проводниках экранированных электрических жгутов ЭТК ЛА с использованием методов анализа электрических цепей с распределенными параметрами;

— провести сравнение экспериментальных и расчетных характеристик помехозащищенности электрических жгутов ЭТК ЛА;

— провести моделирование воздействия кондуктивных ЭМП, наведенных на внутренних проводниках экранированных электрических жгутов излучаемыми МЭМП, на приборы и устройства ЭТК ЛА.

Предмет и объект исследования

Предметом исследования является помехозащищенность электрических жгутов от излучаемых МЭМП, проникающих во внутреннее пространство конструкции ЛА, корпусов приборов и устройств ЭТК ЛА. Объектом исследования является экранированный электрический жгут.

Методы исследования

При решении поставленных задач в диссертационной работе использованы методы теоретической электротехники, теории экранирования, теории функций комплексного переменного и операционное исчисление. Для решения уравнений и построения диаграмм использован пакет программ MATLAB, для проведения имитационного компьютерного моделирования воздействия МЭМП на ЭТК ЛА применен пакет программ OrCad 9.2.

Научная новизна диссертационной работы

Научная новизна заключается в следующем:

— разработаны математическая модель и методика расчета спектральных характеристик и энергий импульсных излучаемых МЭМП, проникающих во внутреннее пространство конструкции ЛА, корпусов приборов и устройств ЭТК ЛА;

— разработаны математические модели и методика расчета воздействия периодических и импульсных излучаемых МЭМП на экраны электрических жгутов ЭТК ЛА, рассматриваемых в виде электрических цепей с распределенными параметрами;

— разработаны математические модели и методика расчета наведенных импульсными излучаемыми МЭМП кондуктивных ЭМП на внутренних проводниках экранированных электрических жгутов ЭТК ЛА с использованием методов анализа электрических цепей с распределенными параметрами.

Достоверность и обоснованность полученных результатов

Достоверность полученных результатов работы обуславливается корректностью исходных положений, приближений и преобразований, использованием апробированного адекватного математического аппарата, компьютерных программ и логической обоснованностью выводов. Полученные результаты подтверждены компьютерным моделированием и физическими экспериментами.

Практическое значение диссертационной работы

Практическое значение работы заключается в следующем:

- разработано программное обеспечение, которое позволяет рассчитывать проникновение импульсных МЭМП во внутреннее пространство конструкции ЛА и внутрь корпусов приборов и устройств ЭТК ЛА. Программное обеспечение использовано для расчета спектральных характеристик и энергий импульсных МЭМП, воздействующих на электрические жгуты самолета МС-21.

- создан стенд, позволяющий измерять эффективность экранирования и сопротивление связи экранов электрических жгутов. Исследованы частотные характеристики эффективности экранирования и сопротивления связи экранов электрических жгутов в сравнении с частотными характеристиками их математических моделей.

- проведено моделирование воздействия кондуктивных ЭМП, наведенных на внутренних проводниках экранированных электрических жгутов внешними излучаемыми МЭМП, на устройство ЭТК ЛА.

Основные положения, выносимые на защиту:

- математическая модель и методика расчета спектральных характеристик и энергий импульсных излучаемых МЭМП в виде электрического и магнитного полей, проникающих внутрь конструкции ЛА и внутрь корпусов приборов и устройств ЭТК ЛА;

- математические модели и методика расчета воздействия периодических и импульсных излучаемых МЭМП на экраны электрических жгутов ЭТК ЛА, рассматриваемых в виде электрических цепей с распределенными параметрами;

- математические модели и методика расчета наведенных импульсными излучаемыми МЭМП кондуктивных ЭМП на внутренних проводниках экранированных электрических жгутов ЭТК ЛА с использованием методов анализа электрических цепей с распределенными параметрами.

Реализация и внедрение основных результатов работы

Полученные результаты диссертационной работы в части математических моделей воздействия периодических и импульсных излучаемых МЭМП на экраны электрических жгутов ЭТК ЛА и методики расчета наведенных данными МЭМП кондуктивных ЭМП на

внутренних проводниках экранированных электрических жгутов были использованы в рамках СЧ ОКР «Жгутокаб-МАИ»: «Разработка математических моделей и создание проекта отраслевого стандарта по подтверждению параметров помехозащищенности кабельных сборок», проводимой в Московском авиационном институте (национальном исследовательском университете). Полученные результаты диссертационной работы в части методики расчета наведённых ЭМП в электрических жгутах используются в АО «ОКБ «Аэрокосмические системы» (г. Дубна) при проектировании бортовой кабельной сети самолета МС-21.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы представлялись и докладывались на Московских молодёжных научно-практических конференциях «Инновации в авиации и космонавтике» в 2013, 2014 годах, II и III Всероссийских научно-технических конференциях «Технологии, измерения и испытания в области электромагнитной совместимости – ТехноЭМС» в 2015, 2016 годах.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 11 публикаций, в том числе 7 научных статей в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК РФ, и 4 публикации тезисов докладов конференций.

Структура и объём работы

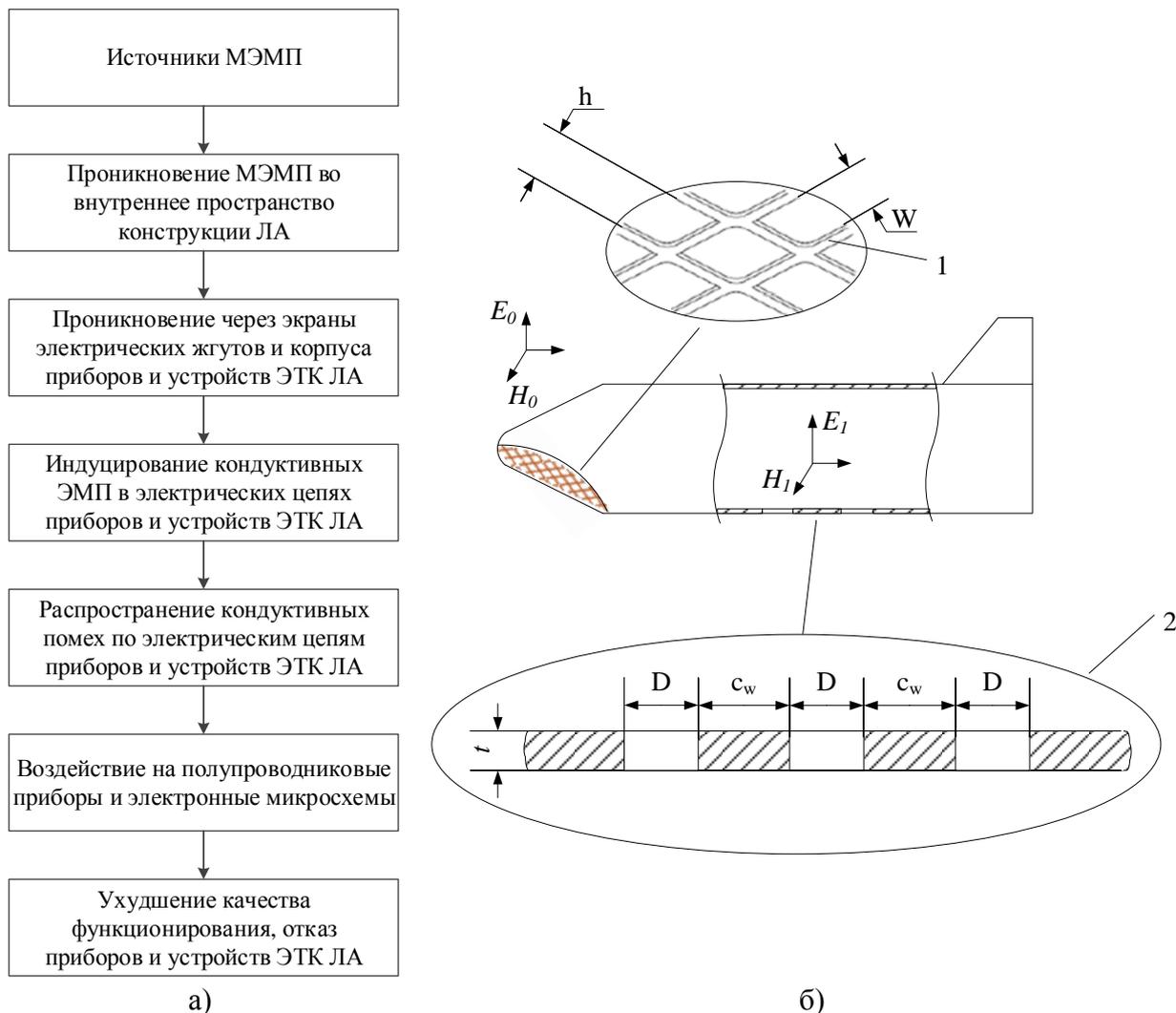
Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка использованных источников, двух приложений. Общий объём диссертации 170 страниц, включая 56 рисунков и 4 таблиц. Список использованных источников включает 55 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность и целесообразность исследования помехозащищенности электрических жгутов электротехнических комплексов летательных аппаратов при воздействии излучаемых мощных электромагнитных помех, определены решаемые научно-технические задачи, показаны научная новизна и практическое значение, даны сведения об апробации и структуре диссертационной работы.

В первой главе диссертационной работы: описаны пути проникновения МЭМП внутрь конструкции ЛА, внутрь корпусов приборов и устройств ЭТК ЛА и в электрические жгуты ЭТК ЛА (рисунок 1, а); приведены параметры напряженностей электрических и магнитных полей грозового разряда и электромагнитного импульса высотного ядерного взрыва (ЭМИ ВЯВ); рассмотрены существующие методики расчета амплитудных значений МЭМП, проникающих через одиночное отверстие, без учета временных и спектральных характеристик МЭМП; приведены уровни восприимчивости различных логических

микросхем к кондуктивным ЭМП; проведен анализ известных математических моделей для расчета уровней импульсных и периодических токов и напряжений на экранах и внутренних проводниках электрических жгутов.



Во второй главе приведена методика расчета спектральных характеристик и энергий периодических и импульсных МЭМП, проникающих внутрь конструкции ЛА или внутрь корпусов приборов и устройств ЭТК ЛА (далее – конструкции ЛА), представленных в виде экранов с группировками апертур, состоящих из круглых или прямоугольных отверстий. На рисунке 1, б) приведена схема проникновения и распространения МЭМП во внутреннем пространстве конструкции ЛА, где 1 – зона апертур в виде прямоугольных отверстий, 2 – зона апертур в виде круглых отверстий.

Методика расчета спектральных характеристик и энергий во внутреннем пространстве конструкции ЛА при воздействии периодических и импульсных МЭМП основана на количественной оценке ослабления периодических и импульсных МЭМП конструкцией ЛА, которая заключается в определении коэффициента экранирования конструкции ЛА с группировкой апертур заданного типа.

Суммарный коэффициент экранирования K_{Σ} конструкции ЛА с n -зонами апертур при условии, что размеры экрана много больше расстояния между источником МЭМП и некоторой точкой пространства, для которой проводится расчет, определяется выражением:

$$K_{\Sigma} = \frac{1}{10^{S_{\Sigma}/20}} = K_{\text{экp}} + \sum_{i=1}^n K_{\text{ап } n} \quad (1)$$

где S_{Σ} – суммарная эффективность экранирования конструкции ЛА с учетом утечек через апертуры; $K_{\text{экp}}$ – коэффициент экранирования сплошного однородного экрана; $K_{\text{ап } n}$ – коэффициент экранирования в n -й зоне апертур; n – число зон апертур, вызывающих утечки.

Суммарный коэффициент экранирования $K_{\Sigma}(\omega)$ для экрана с одной зоной апертур в виде круглых отверстий имеет вид:

$$K_{\Sigma}(\omega) = \left[\frac{\sqrt{\frac{\mu_r \omega}{2\pi\sigma_r}}}{10^{2,62 \cdot t \cdot \sqrt{\omega\mu_r\sigma_r}} \cdot 10^{5,405}} + \frac{\omega \cdot \left[1 + 35 \cdot \left(0,166 / \sqrt{c_w^2 \omega \mu_r \sigma_r} \right)^{2,3} \right]}{10^{1,6 \frac{t}{D}} \cdot \left(1 - 10^{-3,2 \frac{t}{D}} \right) \cdot 10^{8,1} \cdot \sqrt{\pi^3 m} \cdot \coth \left(3,684 \cdot \frac{t}{D} \right)} \right], \quad (2)$$

где μ_r – относительная магнитная проницаемость материала экрана; σ_r – относительная проводимость (относительно меди) материала экрана; ω – круговая частота, рад/с; t – толщина стенки экрана, м; D – диаметр круглого отверстия, м; c_w – зазор проводящего материала между отверстиями, м; m – число отверстий на один м², м⁻².

Выражение суммарного коэффициента экранирования принято использовать для случая проникновения через экран с апертурами периодической МЭМП. В случае проникновения через экран с апертурами импульсной МЭМП, спектральную функцию $F(\omega)$ проникающей во внутреннее пространство конструкции ЛА импульсной МЭМП, можно представить в виде:

$$F(\omega) = K_{\Sigma}(\omega) \cdot |f(p)|_{p=j\omega}, \quad (3)$$

где $K_{\Sigma}(\omega)$ – суммарный коэффициент экранирования конструкции ЛА с апертурами; $f(p) = \mathcal{L}\{f(t)\}$ – функция изображения внешней импульсной МЭМП, p – оператор Лапласа.

Выражение спектральной функции $F(\omega)$ проникающей во внутреннее пространство конструкции ЛА МЭМП, может быть получено при условии, что форма внешней импульсной МЭМП представлена аналитической функцией и имеет вид:

$$f(t) = A_m \cdot \begin{cases} k(e^{-\delta_1 t} - e^{-\delta_2 t}) \\ e^{-\sigma t} \cdot \sin \omega_1 t \end{cases} \quad (4)$$

где A_m – амплитудные значения напряженности МЭМП; $\delta_1, \delta_2, \sigma, \omega_1$ – параметры, характеризующие функции, $\delta_2 > \delta_1; \omega_1 > \sigma$; k – нормирующий коэффициент биэкспоненциальной функции.

Выражения (1)-(4) позволяют количественно определять энергию МЭМП, проникающую во внутреннее пространство конструкции ЛА.

Алгоритм расчета спектральных характеристик и энергий импульсных МЭМП, проникающих внутрь конструкции ЛА и ЭТК ЛА, представленного в виде сплошного экрана с группировкой апертур, состоящей из круглых или прямоугольных отверстий приведен на рисунке 2.



Рисунок 2 – Алгоритм расчета

В диссертационной работе приведен пример расчета ослабления конструкцией ЛА в виде экрана с одной зоной апертур, состоящей из круглых отверстий, импульсной МЭМП в виде электрического поля ЭМИ ВЯВ в диапазоне частот от 10 кГц до 400 МГц.

Параметры экрана конструкции ЛА, состоящего из алюминия, с одиночной зоной апертур в виде круглых отверстий: $\mu_r = 1$; $\sigma_r = 0,636$; $t = 0,001$ м, $D = 0,005$ м; $c_w = 0,01$ м; $m = 5$ м⁻². Параметры импульса напряженности электрического поля ЭМИ ВЯВ: $A_m = 50$ кВ/м; $\tau_\phi = 5$ нс; $\tau_{\text{ши}} = 200$ нс; $\delta_1 = 3,5 \cdot 10^6$ с⁻¹; $\delta_2 = 6,5 \cdot 10^8$ с⁻¹; $k = 1,0343$.

На рисунке 3 приведены частотные диаграммы спектральных функций напряженности электрического поля ЭМИ ВЯВ, проникающего через экран с одной зоной апертур, состоящей из круглых отверстий, где:

$E_1(\omega) = K_\Sigma(\omega) \cdot |f(p)|$, при $p = j\omega$ – спектральная функция импульсной МЭМП, проникшей через экран с апертурами; $E_2(\omega) = K_{\text{ап}}(\omega) \cdot |f(p)|$, при $p = j\omega$ – спектральная функция импульсной МЭМП, проникшей через апертуры; $E_3(\omega) = K_{\text{экр}}(\omega) \cdot |f(p)|$, при $p = j\omega$ – спектральная функция импульсной МЭМП, проникшей через экран.

Энергия электрического поля внешней импульсной МЭМП равна 187,99 Дж. Энергия электрического поля импульсной МЭМП, проникшей через экран, равна $1,84 \cdot 10^{-7}$ Дж. Энергия электрического поля импульсной МЭМП, проникшей через апертуры, равна 0,221 Дж. Энергия электрического поля импульсной МЭМП, проникшей через экран с апертурами, практически равна энергии, проникшей через апертуры, т.е. 0,221 Дж.

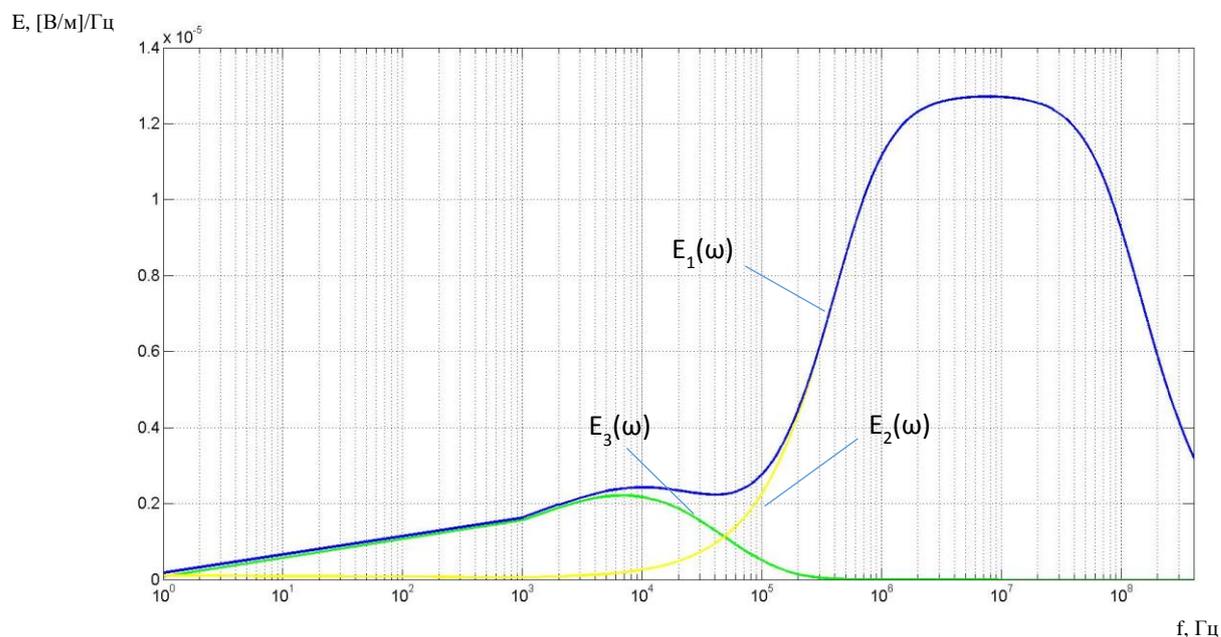
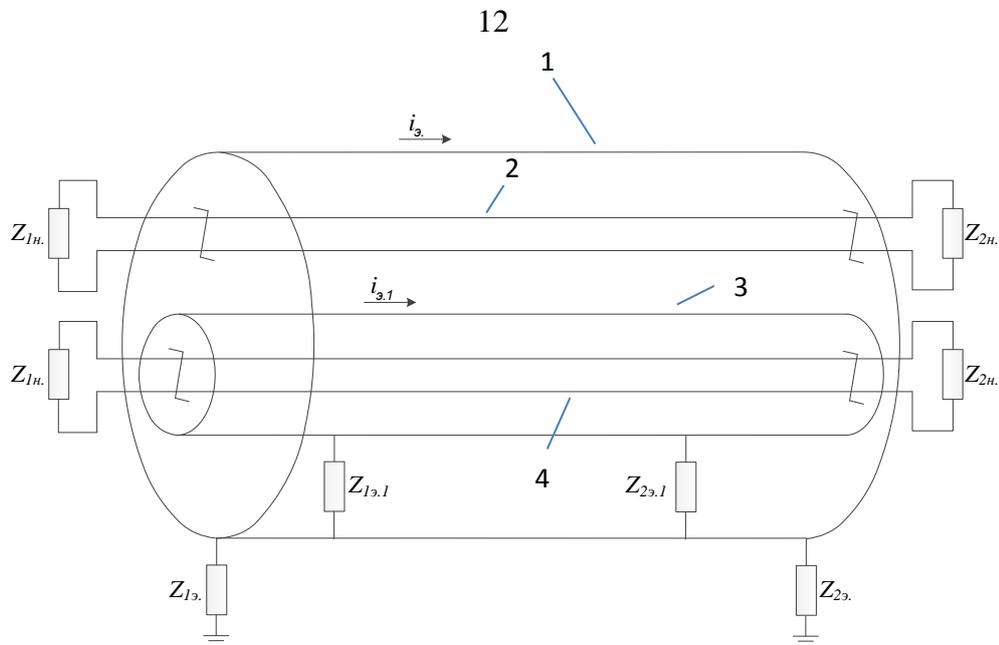


Рисунок 3 – Частотные диаграммы спектральных функций напряженности электрического поля ЭМИ ВЯВ, проникающего через экран с одной зоной апертур в виде круглых отверстий

В третьей главе рассмотрены математические модели сопротивлений связи экранированных электрических жгутов и их частотные характеристики, приведены математические модели воздействия электрического и магнитного поля на экран и внутренние проводники экранированного электрического жгута.

Помехозащищенность электрических жгутов ЭТК ЛА от излучаемых МЭМП во многом зависит от эффективности экранирования электрических жгутов, которая определяется параметрами экранов электрических жгутов. Эффективность экранирования связана с важной характеристикой экранов электрических жгутов – сопротивлением связи. Математические модели сопротивления связи экранов электрических жгутов отличаются из-за различного подхода к описанию физического явления наведения синфазного напряжения на внутренних проводниках электрического жгута при протекании тока по его экрану.

Воздействие излучаемых МЭМП в виде электрического и магнитного полей на электрические жгуты ЭТК ЛА приводит к появлению токов и напряжений на внешнем и внутреннем экранах, а также на внутренних проводниках электрических жгутов (рисунок 4).



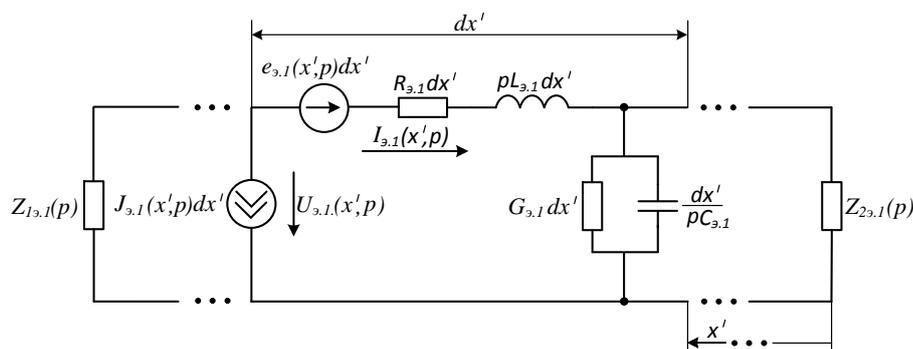
1 – внешний экран электрического жгута; 2 – неэкранированная витая пара; 3 – экран витой пары; 4 – экранированная витая пара; $i_{э.}$ – ток на внешнем экране; $i_{э.1}$ – ток на экране витой пары; $Z_{1н.}$, $Z_{2н.}$ – сопротивление нагрузки витой пары; $Z_{1э.}$, $Z_{2э.}$ – сопротивления заземления внешнего экрана электрического жгута; $Z_{1э.1}$, $Z_{2э.1}$ – сопротивления соединений экрана витой пары и внешнего экрана электрического жгута

Рисунок 4 – Схема экранированного электрического жгута при воздействии МЭМП

Для случаев когда длина волны периодического электрического (магнитного) поля, воздействующего на электрический жгут, соизмерима или меньше геометрической длины электрического жгута, а длительность фронта импульса импульсного электрического (магнитного) поля соизмерима или меньше времени распространения импульса на расстояние, равное длине электрического жгута, соответственно, то оценка воздействия периодических и импульсных полей на электрический жгут производится в работе с использованием методов расчёта переходных процессов в электрических цепях с распределёнными параметрами.

Электрическое и магнитное поля можно разделить на локализованное и распределенное. Локализованное поле сосредоточено в области пространства, размеры которого значительно меньше длины электрического жгута. Распределенное поле сосредоточено в области пространства, размеры которого значительно превышают длину электрического жгута. Напряженность распределенного поля принимается в диссертационной работе одинаковой в окрестности и по всей длине электрического жгута

Эквивалентная схема воздействия излучаемой МЭМП в виде периодического или импульсного электрического (магнитного) локализованного поля на экран витой пары (3 на рисунке 4) экранированного электрического жгута ЭТК ЛА приведена на рисунке 5.



$e_{э,1}(x', p) = I_{э,1}(x', p) \cdot Z_{а,св1}(p)$ – ЭДС на элементарном участке экрана витой пары в операторной форме; $J_{э,1}(x', p) = U_{э,1}(x', p) \cdot Y_{а,св1}(p)$ – ток распределённого источника на экране витой пары в операторной форме; $I_{э,1}(x', p)$ – операторный ток на внешнем экране электрического жгута от воздействия излучаемой МЭМП; $U_{э,1}(x', p)$ – операторное напряжение на внешнем экране электрического жгута от воздействия излучаемой МЭМП; $Z_{а,св1}(p)$, $Y_{а,св1}(p)$ – операторные функции, модули которых аппроксимируют модули частотных характеристик сопротивления и проводимости связи между внешним экраном и экраном витой пары электрического жгута соответственно; $Z_{1,э,1}(p)$, $Z_{2,э,1}(p)$ – операторные сопротивления соединений экрана витой пары и внешнего экрана; $R_{э,1}$, $L_{э,1}$, $G_{э,1}$, $C_{э,1}$ – распределённые параметры экрана витой пары

Рисунок 5 – Эквивалентная схема, иллюстрирующая протекание тока по экрану витой пары при воздействии излучаемой МЭМП на внешний экран электрического жгута ЭТК ЛА

Выражения для определения тока $I_{э,1}(x', p)$ и напряжения $U_{э,1}(x', p)$ на экране витой пары электрического жгута имеют вид:

$$\frac{d^2 I_{э,1}(x', p)}{dx'^2} - \gamma_{э,1}^2(p) \cdot I_{э,1}(x', p) = \frac{dU_{э,1}(x', p)}{dx'} \cdot Y_{а,св,1}(p) - I_{э,1}(x', p) \cdot (G_{э,1} + pC_{э,1}) \cdot Z_{а,св,1}(p);$$

$$\frac{d^2 U_{э,1}(x', p)}{dx'^2} - \gamma_{э,1}^2(p) \cdot U_{э,1}(x', p) = \frac{dI_{э,1}(x', p)}{dx'} \cdot Z_{а,св,1}(p) - U_{э,1}(x', p) \cdot (R_{э,1} + pL_{э,1}) \cdot Y_{а,св,1}(p),$$

где $\gamma_{э,1}(p) = \sqrt{(R_{э,1} + pL_{э,1}) \cdot (G_{э,1} + pC_{э,1})}$ – коэффициент распространения экрана витой пары в операторной форме.

Выражения для определения тока $I_{э,1}(x', p)$ и напряжения $U_{э,1}(x', p)$ на внешнем экране электрического жгута при воздействии на него излучаемой МЭМП в виде электрического и магнитного полей, распределённых в области пространства, размеры которого соизмеримы или больше длины электрического жгута, имеют вид:

при воздействии электрического поля

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 I_{\text{э}}(x', p)}{\partial x'^2} - \gamma_{\text{э}}^2(p) \cdot I_{\text{э}}(x', p) = -pC_{0\text{э}} \cdot \frac{\partial}{\partial x'} \int_0^{z_0} E_{\text{зн.}}(x', z, p) dz; \\ \frac{\partial^2 U_{\text{э}}(x', p)}{\partial x'^2} - \gamma_{\text{э}}^2(p) U_{\text{э}}(x', p) = -pC_{0\text{э}} \left[R_{0\text{э}} \int_0^{z_0} E_{\text{зн.}}(x', z, p) dz + pL_{0\text{э}} \int_0^{z_0} E_{\text{зн.}}(x', z, p) dz \right], \end{cases}$$

при воздействии магнитного поля

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 I_{\text{э}}(x', p)}{\partial x'^2} - \gamma_{\text{э}}^2(p) \cdot I_{\text{э}}(x', p) = -pG_{0\text{э}} \int_0^{z_0} B_{\text{вп.}}(x', z, p) dz - p^2C_{0\text{э}} \int_0^{z_0} B_{\text{вп.}}(x', z, p) dz; \\ \frac{\partial^2 U_{\text{э}}(x', p)}{\partial x'^2} - \gamma_{\text{э}}^2(p) \cdot U_{\text{э}}(x', p) = -p \frac{\partial}{\partial x'} \int_0^{z_0} B_{\text{вп.}}(x', z, p) dz, \end{cases}$$

где $E_{\text{зн.}}(x', z, p)$ – напряженность электрического поля в операторной форме; $B_{\text{вп.}}(x', z, p)$ – индукция магнитного поля в операторной форме; $R_{\text{э}}, L_{\text{э}}, G_{\text{э}}, C_{\text{э}}$ – распределённые параметры внешнего экрана, $\gamma_{\text{э}}(p)$ – коэффициент распространения для внешнего экрана электрического жгута в операторной форме.

Эквивалентная схема проводника незранированной и экранированной витых пар экранированного электрического жгута для соответствующих индексов при воздействии магнитного и электрического полей отражена на рисунке 6.

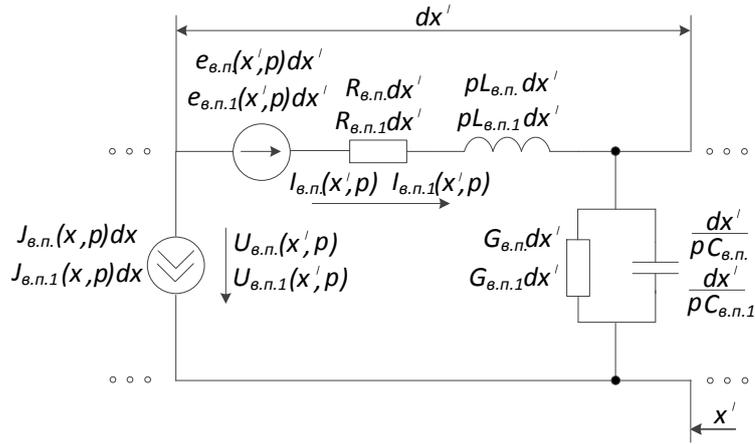
Ток $I_{\text{вп.}}(x', p)$ и напряжение $U_{\text{вп.}}(x', p)$ на внутреннем проводнике незранированной витой пары электрического жгута определяются из уравнений второго порядка:

$$\frac{d^2 I_{\text{вп.}}(x', p)}{dx'^2} - \gamma_{\text{вп.}}^2(p) \cdot I_{\text{вп.}}(x', p) = \frac{dU_{\text{э}}(x', p)}{dx'} \cdot Y_{\text{а.св.}}(p) - I_{\text{э}}(x', p) \cdot (G_{\text{вп.}} + pC_{\text{вп.}}) \cdot Z_{\text{а.св.}}(p); \quad (5)$$

$$\frac{d^2 U_{\text{вп.}}(x', p)}{dx'^2} - \gamma_{\text{вп.}}^2(p) \cdot U_{\text{вп.}}(x', p) = \frac{dI_{\text{э}}(x', p)}{dx'} \cdot Z_{\text{а.св.}}(p) - U_{\text{э}}(x', p) \cdot (R_{\text{вп.}} + pL_{\text{вп.}}) \cdot Y_{\text{а.св.}}(p), \quad (6)$$

где $\gamma_{\text{вп.}}(p)$ – коэффициент распространения внутренних проводников в операторной форме; $Z_{\text{а.св.}}(p)$, $Y_{\text{а.св.}}(p)$ – операторные функции, модули которых аппроксимируют модули частотных характеристик сопротивления и проводимости связи между внешним экраном и внутренними проводниками незранированной витой пары электрического жгута соответственно.

Ток $I_{\text{вп.1}}(x', p)$ и напряжения $U_{\text{вп.1}}(x', p)$ на внутренних проводниках экранированной витой пары электрического жгута определяются из уравнений (5) и (6) с заменой переменных: $I_{\text{э}}(x', p) \rightarrow I_{\text{э.1}}(x', p)$; $U_{\text{э}}(x', p) \rightarrow U_{\text{э.1}}(x', p)$; $\gamma_{\text{вп.}}(p) \rightarrow \gamma_{\text{вп.1}}(p)$; $Z_{\text{а.св.}}(p) \rightarrow Z_{\text{а.св.2}}(p)$; $Y_{\text{а.св.}}(p) \rightarrow Y_{\text{а.св.2}}(p)$; $R_{\text{вп.}} \rightarrow R_{\text{вп.1}}$; $L_{\text{вп.}} \rightarrow L_{\text{вп.1}}$; $G_{\text{вп.}} \rightarrow G_{\text{вп.1}}$; $C_{\text{вп.}} \rightarrow C_{\text{вп.1}}$, где $Z_{\text{а.св.2}}(p)$, $Y_{\text{а.св.2}}(p)$ – операторные функции, модули которых аппроксимируют модули частотных характеристик сопротивления и проводимости связи между экраном и внутренними проводниками экранированной витой пары электрического жгута соответственно.



$e_{в.п.}(x', p) = I_{э.}(x', p) \cdot Z_{а.св.}(p)$ – ЭДС на элементарном участке внутреннего проводника неэкранированной витой пары в операторной форме; $e_{в.п.1}(x', p) = I_{э.1}(x', p) \cdot Z_{а.св.2}(p)$ – ЭДС на элементарном участке внутреннего проводника экранированной витой пары в операторной форме; $J_{в.п.}(x', p) = U_{э.}(x', p) \cdot Y_{а.св.}(p)$ – источник тока на элементарном участке внутреннего проводника неэкранированной витой пары в операторной форме; $J_{в.п.1}(x', p) = U_{э.1}(x', p) \cdot Y_{а.св.2}(p)$ – источник тока на элементарном участке внутреннего проводника экранированной витой пары в операторной форме; $R_{в.п.}$, $L_{в.п.}$, $G_{в.п.}$, $C_{в.п.}$ – распределенные параметры внутреннего проводника неэкранированной витой пары; $R_{в.п.1}$, $L_{в.п.1}$, $G_{в.п.1}$, $C_{в.п.1}$ – распределенные параметры внутреннего проводника экранированной витой пары

Рисунок 6 – Эквивалентная схема внутреннего проводника неэкранированной и экранированной витых пар экранированного электрического жгута ЭТК ЛА

В четвертой главе приведена методика расчета наведенных синфазных кондуктивных ЭМП на внешнем экране и внутренних проводниках экранированного электрического жгута при воздействии излучаемых МЭМП в виде электрического и магнитного полей.

Схема вариантов расчета кондуктивных ЭМП при воздействии излучаемых МЭМП в виде электрического и магнитного полей на экраны и внутренние проводники электрических жгутов ЭТК ЛА приведена на рисунке 7.

Выражения для определения напряжений и токов на внешнем экране электрического жгута под воздействием импульсного магнитного поля имеют вид:

$$U_{э.}(x', p) = \frac{k_1 \cdot p \cdot \omega_1}{(p + \sigma)^2 + \omega_1^2} \cdot \frac{A_{1э.}(p)}{B_{1э.}(p)}; \quad (7)$$

$$I_{э.}(x', p) = \frac{k_1 \cdot p \cdot \omega_1}{(p + \sigma)^2 + \omega_1^2} \cdot \frac{A_{2э.}(p)}{B_{1э.}(p)},$$

где $k_1 = 2\mu_0 \ell \cdot h \cdot H_m$;

$$A_{1э.}(p) = Z_{2э.}(p) \cdot \gamma_{э.}(p) \cdot \text{ch}[\gamma_{э.}(p) \cdot x'] + (R_{0э.} + pL_{0э.}) \cdot \text{sh}[\gamma_{э.}(p) \cdot x'];$$

$$A_{2z.}(p) = \frac{1}{Z_{B.z.}(p)} \cdot [Z_{2z.}(p) \cdot \gamma_{z.}(p) \cdot \text{sh}[\gamma_{z.}(p) \cdot x'] + (R_{0z.} + pL_{0z.}) \cdot \text{ch}[\gamma_{z.}(p) \cdot x']];$$

$$B_{1z.}(p) = Z_{2z.}(p) \cdot \gamma_{z.}(p) \cdot \text{ch}[\gamma_{z.}(p) \cdot \ell] + (R_{0z.} + pL_{0z.}) \cdot \text{sh}[\gamma_{z.}(p) \cdot \ell];$$

H_m – амплитудное значение напряженности магнитного поля; μ_0 – магнитная постоянная; l – длина электрического жгута; h – среднее расстояние между экраном электрического жгута и конструкцией ЛА.

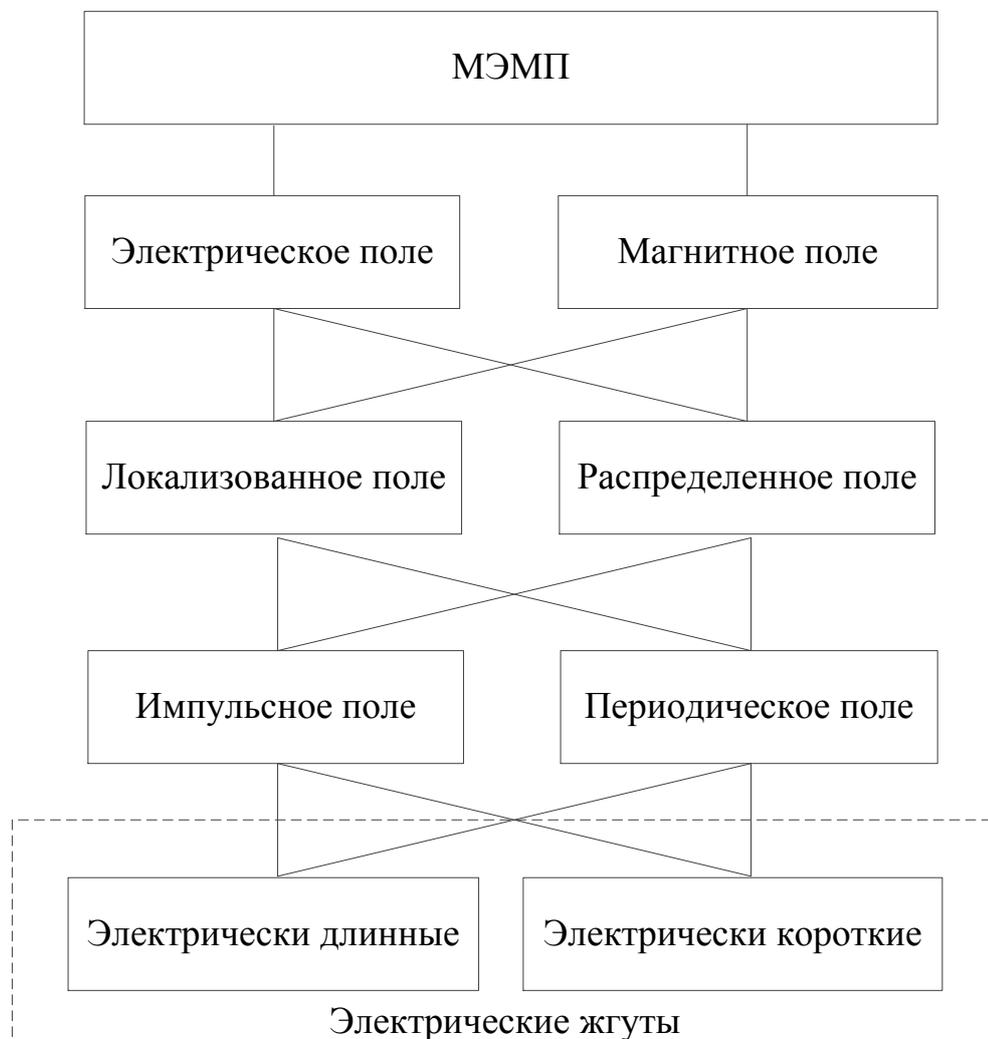


Рисунок 7 – Схема вариантов расчета

Мгновенные значения токов и напряжений на внешнем экране электрического жгута под воздействием импульсного магнитного поля имеют вид:

$$U_{z.}(x', p) \doteq U_{z.}(x', t) = \sum \frac{k_1 \cdot p \cdot \omega_1 \cdot A_{1z.}(p) \cdot e^{p \cdot t}}{2(p + \sigma) B_{1z.}(p)} \Bigg|_{\substack{p = -\sigma - j\omega_1 \\ p = -\sigma + j\omega_1}} +$$

$$+ \sum_{i=1}^n \frac{k_1 \cdot p \cdot \omega_1 \cdot A_{1z.}(p)}{[p^2 + k^2 \omega^2] \cdot \frac{\partial}{\partial p} B_{1z.}(p)} \cdot e^{p \cdot t} \Bigg|_{p=p_i};$$

$$I_{\text{э.}}(x', p) \doteq I_{\text{э.}}(x', t) = \sum \frac{k_1 \cdot p \cdot \omega_1 \cdot A_{2\text{э.}}(p) \cdot e^{p \cdot t}}{2(p + \sigma) B_{1\text{э.}}(p)} \Bigg|_{\substack{p = -\sigma - j\omega_1 \\ p = -\sigma + j\omega_1}} + \\ + \sum_{i=1}^n \frac{k_1 \cdot p \cdot \omega_1 \cdot A_{2\text{э.}}(p)}{\left[(p + \sigma)^2 + \omega_1^2 \right] \cdot \frac{\partial}{\partial p} B_{1\text{э.}}(p)} \cdot e^{p \cdot t} \Bigg|_{p=p_i},$$

где $\frac{\partial}{\partial p} B_{1\text{э.}}(p) = pL_{2\text{э.}} \cdot \gamma_{\text{э.}}(p) \cdot \text{ch}[\gamma_{\text{э.}}(p) \cdot \ell] +$
 $+ Z_{2\text{э.}}(p) \cdot [\text{ch}[\gamma_{\text{э.}}(p) \cdot \ell] + \ell \cdot \gamma_{\text{э.}}(p) \cdot \text{sh}[\gamma_{\text{э.}}(p) \cdot \ell]] \cdot \frac{\partial}{\partial p} B_{0\text{э.}}(p) + L_{\text{э.}} \cdot \text{sh}[\gamma_{\text{э.}}(p) \cdot \ell] +$
 $+ \ell \cdot (R_{\text{э.}} + pL_{\text{э.}}) \cdot \text{ch}[\gamma_{\text{э.}}(p) \cdot \ell] \cdot \frac{\partial}{\partial p} B_{0\text{э.}}(p);$
 $\frac{\partial}{\partial p} B_{0\text{э.}}(p) = \frac{L_{\text{э.}} \cdot (G_{\text{э.}} + pC_{\text{э.}}) + C_{\text{э.}} \cdot (R_{\text{э.}} + pL_{\text{э.}})}{2 \cdot \gamma_{\text{э.}}(p)}.$

Токи и напряжения на внешнем экране электрического жгута в любой его точке определяются из нахождения корней $p = p_i$ следующих трансцендентных уравнений:

$$B_{1\text{э.}}(p) = 0 \Leftrightarrow \text{th}[\gamma_{\text{э.}}(p) \cdot \ell] = -Z_{2\text{э.}}(p) \cdot \frac{\sqrt{(R_{\text{э.}} + pL_{\text{э.}}) \cdot (G_{\text{э.}} + pC_{\text{э.}})}}{R_{\text{э.}} + pL_{\text{э.}}};$$

$$B_{2\text{э.}}(p) = 0 \Leftrightarrow \text{th}[\gamma_{\text{э.}}(p) \cdot \ell] = -\frac{1}{Z_{2\text{э.}}(p)} \cdot \frac{R_{\text{э.}} + pL_{\text{э.}}}{\sqrt{(R_{\text{э.}} + pL_{\text{э.}}) \cdot (G_{\text{э.}} + pC_{\text{э.}})}}.$$

Пример временной диаграммы импульсного напряжения на внешнем экране, индуцированного при воздействии магнитного поля, приведен на рисунке 8.

Операторное напряжение между проводником неэкранированной витой пары и внешним экраном электрического жгута $U_{\text{в.п.}}(p)$ имеет вид:

$$U_{\text{в.п.}}(p) = I_{\text{э.}}(p) Z_{\text{а.св.}}(p) \ell,$$

В случае воздействия на внешний экран электрического жгута магнитного поля операторные напряжения на внутренних проводниках неэкранированной витой пары $U_{\text{в.п.}}(p)$ определяется решением уравнений (7) - (10).

Уравнения для определения операторного напряжения на проводнике неэкранированной витой пары электрического жгута, полученные в работе, имеют вид:

$$\frac{d^2 U_{\text{в.п.}}(x', p)}{dx'^2} - \gamma_{\text{в.п.}}^2(p) \cdot U_{\text{в.п.}}(x', p) = \frac{dI_{\text{э.}}(x', p)}{dx'} \cdot Z_{\text{а.св.}}(p); \quad (8)$$

$$\frac{d^2 U_{\text{в.п.}}(x', p)}{dx'^2} - \gamma_{\text{в.п.}}^2(p) \cdot U_{\text{в.п.}}(x', p) = -U_{\text{э.}}(x', p) \cdot (R_{\text{в.п.}} + pL_{\text{в.п.}}) \cdot Y_{\text{а.св.}}(p); \quad (9)$$

$$U_{\text{в.п.}}(x', p) = \hat{U}_{\text{в.п.}}(x', p) + U_{\text{в.п.}}^*(x', p),$$

$$\frac{d^2 \hat{U}_{\text{в.п.}}(x', p)}{dx'^2} - \gamma_{\text{в.п.}}^2(p) \cdot \hat{U}_{\text{в.п.}}(x', p) = 0; \quad (10)$$

где $\hat{U}_{\text{в.п.}}(x', p)$ – операторное решение уравнения (10); $U_{\text{в.п.}}^*(x', p)$ – соответствующее операторное частное решение уравнения (8) или (9).

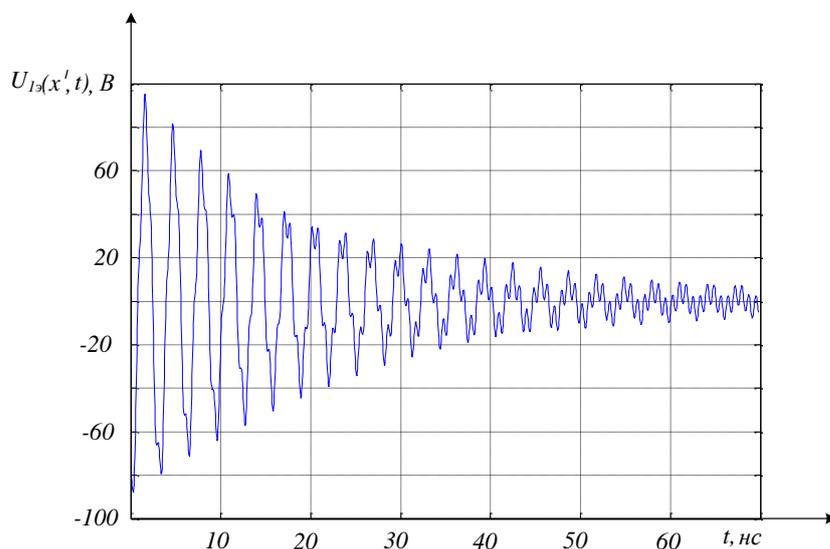


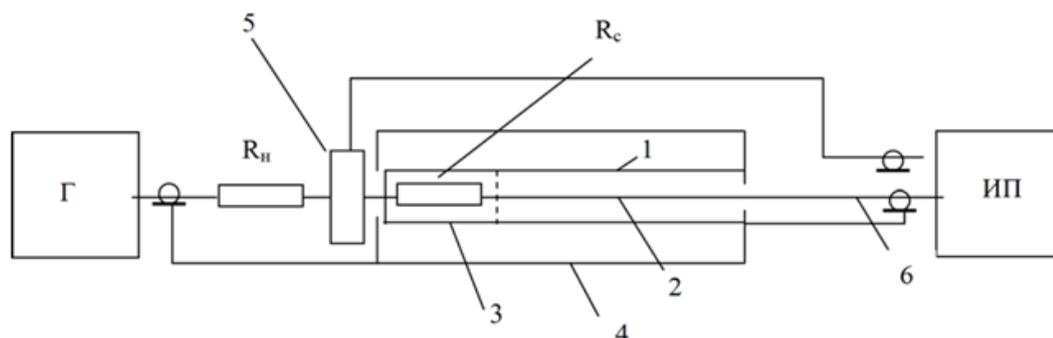
Рисунок 8 – Временная диаграмма импульсного напряжения, индуцированного при воздействии магнитного поля с параметрами $H_m = 3 \frac{\text{А}}{\text{М}}$; $\sigma = 5 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$; $\omega_1 = 2 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}$ на внешнем экране электрического жгута при $\ell = 5 \text{ м.}$; $h = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$; $Z_{23} = 0$; $R_3 \approx 0,167 \frac{\text{Ом}}{\text{М}}$; $L_3 \approx 1,198 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Гн}}{\text{М}}$; $G_3 \approx 2,333 \cdot 10^{-3} \frac{\text{См}}{\text{М}}$; $C_3 \approx 9,277 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Ф}}{\text{М}}$ с учётом $n = 90$ пар корней в точке: $x' = 0,2\ell$.

Результирующий операторный ток $I_{\text{в.п.}}(x', p)$ на любом участке проводника незэкранированной витой пары получен аналогично выражениям (8) – (10).

Остальные математические модели расчета уровней импульсных и периодических токов и напряжений на экранах и внутренних проводниках электрических жгутов для случаев воздействия: распределенных импульсных и периодических электрического и магнитного полей; локализованных импульсных и периодических электрического и магнитного полей, – на экраны и внутренние проводники экранированных электрических жгутов приведены в диссертационной работе.

В пятой главе проведено сравнение экспериментальных и расчетных частотных характеристик сопротивлений связи и эффективности экранирования экранов электрических жгутов, а также – моделирование воздействия кондуктивных ЭМП, наведенных в электрических жгутах внешними излучаемыми МЭМП, на приборы и устройства ЭТК ЛА.

Экспериментальные исследования сопротивления связи и эффективности экранирования электрического жгута с внешним металлическим плетеным экраном проведены с помощью установок, спроектированных по коаксиальной и триаксиальной схемам, с использованием высокочастотного токосъемника. Схема триаксиальной установки представлена на рисунке 9. Фотография установки для исследования сопротивления связи на основе триаксиальной схемы приведена на рисунке 10.



- 1 – экран электрического жгута; 2 – внутренний проводник электрического жгута;
 3 – дополнительный внутренний экран; 4 – дополнительный внешний экран; 5 – высокочастотный токосъемник; 6 – измерительный коаксиальный кабель; Г – генератор;
 ИП – измерительный приемник; R_n – сопротивление нагрузки генератора;
 R_c – согласующее сопротивление

Рисунок 9 – Схема триаксиальной установки

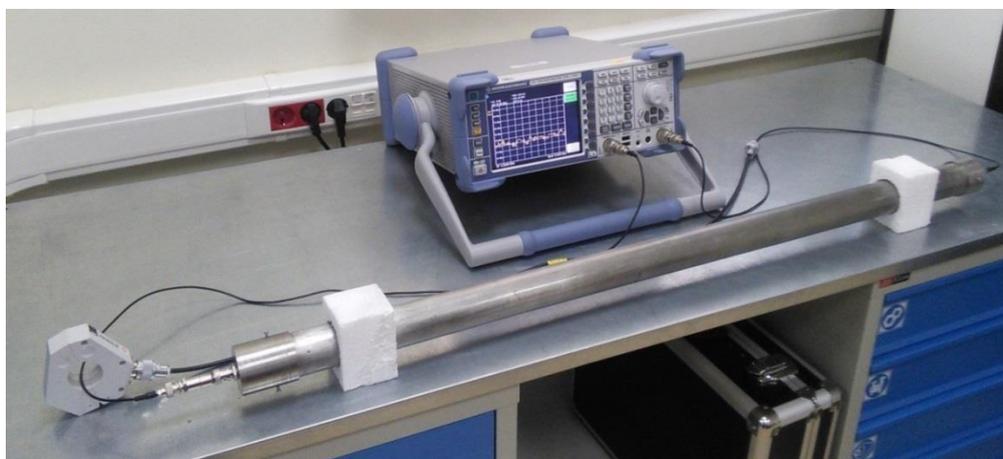


Рисунок 10 – Фотография триаксиальной установки

При проведении экспериментальных исследований сопротивление связи (поверхностное переходное сопротивление) экранированного электрического жгута определяется в соответствии с ОСТ 1 01205-2012 выражением:

$$Z_{св} = \frac{U_{вп}}{I_3 \cdot l} = \frac{U_{вп} \cdot R_n}{U_\Gamma \cdot l}, \text{ Ом/м}, \quad (11)$$

где $U_{вп}$ – напряжение между внутренним проводником и экраном электрического жгута, дБ мкВ; I_3 – ток, протекающий по экрану электрического жгута, дБ мкА; U_Γ – напряжение на выходе генератора, дБ мкВ; R_n – сопротивление нагрузки, Ом; l – длина экранирован-

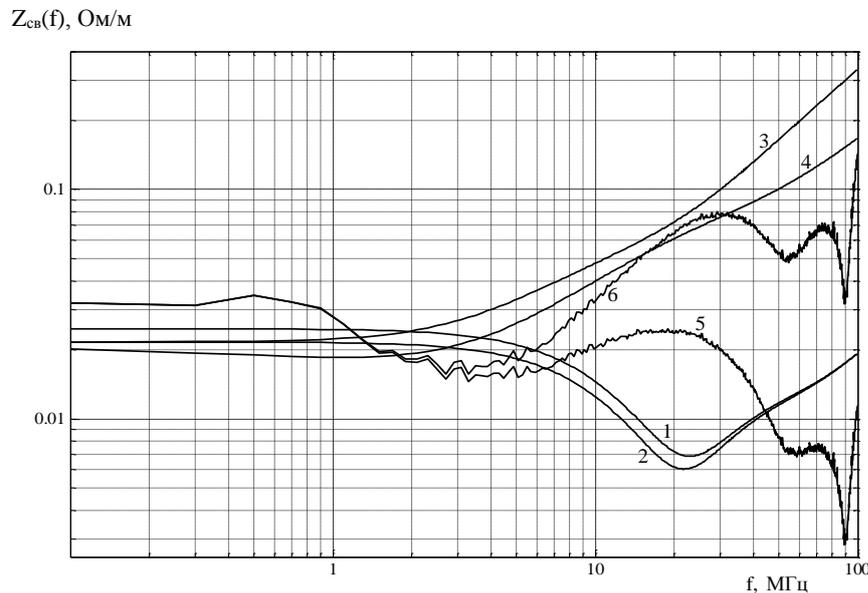
ного электрического жгута, м.

Для более точного определения сопротивления связи необходимо с помощью высокочастотного токосъемника (5 на рисунке 9) измерять ток, протекающий по экрану, или использовать выражение вида:

$$Z_{св} = \frac{U_{вп}}{U_{г} \cdot l} \cdot \sqrt{(R_n + r_э)^2 + (\omega L_э)^2}, \text{ Ом/м}, \quad (12)$$

где $r_э$ – активное сопротивление экрана; $L_э$ – индуктивность экрана; $\omega = 2\pi f$.

На рисунке 11 приведены частотные характеристики сопротивления связи, построенные в компьютерной среде MATLAB, для электрического жгута длиной 1 м с экраном марки ПМу-Л 6,5 ($R_n \approx 0,05$ Ом; $L_э \approx 1$ мкГн) с параметрами: $R_n = 50$ Ом; $N_{ж} = 36$ – количество прядей; $N_n = 14$ – количество нитей в пряди; $d = 50 \cdot 10^{-6}$ м – толщина нити; $r_0 = 2,5 \cdot 10^{-3}$ м – радиус экрана; $\alpha = 25^\circ$ – угол плетения; $\sigma_э = 51,55$ МСм/м – удельная проводимость материала, из которого изготовлен экран, – построенные с использованием математических моделей сопротивления связи, рассмотренных в главе 3, совместно с диаграммами сопротивления связи, полученными на основе экспериментальных измерений в триаксиальной установке. Частотные характеристики сопротивления связи (кривые 5, 6) рассчитаны на основе экспериментальных данных по выражениям (11) и (12) соответственно.



1, 2, 3, 4 – характеристики, построенные с использованием математических моделей сопротивления связи, рассмотренных в главе 3

Рисунок 11 – Частотные характеристики сопротивления связи

Из анализа приведенных частотных характеристик следует, что частотные характеристики сопротивления связи различаются в зависимости от выбора математической модели, приведенной в главе 3. Кривые 1, 2, 3, 4 имеют незначительные отличия $\sim 5 \dots 7$ мОм/м в частотной обла-

сти до 3 МГц. При этом кривые 1 и 2 имеют максимальное отличие $\sim 2...3$ мОм/м в частотном диапазоне от 3 до 100 МГц. Максимальное отличие между кривыми 3 и 4 составляет ~ 150 мОм/м. Частотные характеристики сопротивления связи, полученные по выражениям (11) и (12) на основе экспериментальных данных (кривые 5, 6) существенно отличаются от характеристик, построенных на основе математических моделей. Возрастание частотной характеристики сопротивления связи (кривая 6) обусловлено уменьшением тока на экране с ростом частоты.

Экспериментальные исследования показали, что при оценке помехозащищённости электрических жгутов ЭТК ЛА для более точного определения сопротивления связи и эффективности экранирования на частотах более 3 МГц необходимо учитывать индуктивное сопротивление экрана. Сравнение частотных характеристик математических моделей сопротивления связи (кривые 1-4) и экспериментальных частотных характеристик сопротивления связи (кривые 5-6) позволяет выбрать модель сопротивления связи для расчета наведенных токов и напряжений на экранах и внутренних проводниках электрических жгутов ЭТК ЛА.

Для моделирования воздействия ЭМП, наведенных в электрических жгутах внешними МЭМП, на приборы и устройства ЭТК ЛА рассмотрен случай воздействия на микропроцессор, управляющий модулем усилителя тока двигателя (УТД) системы рулевого привода (СРП) ЛА, наведенных кондуктивных ЭМП, превышающих уровень восприимчивости микропроцессора. Превышение уровня восприимчивости микропроцессора может привести к изменению закона управления затворами транзисторов и к искажению токов в фазных обмотках трехфазного исполнительного синхронного двигателя с постоянными магнитами и возможному ухудшению его качества функционирования. Структурная схема воздействия ЭМП на блок управления СРП приведена на рисунке 12.

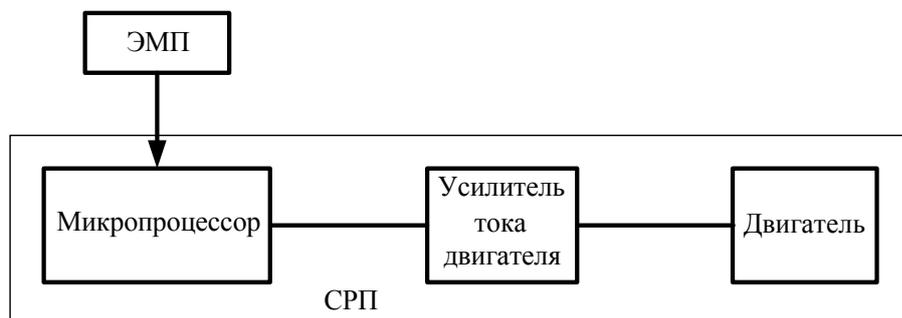


Рисунок 12 – Структурная схема воздействия ЭМП на СРП ЛА

В качестве рабочего инструмента для моделирования воздействия ЭМП на модуль УТД, выбрана программа OrCad 9.2. Схема замещения УТД в компьютерной среде OrCad 9.2 приведена на рисунке 13.

Временные диаграммы фазных токов в обмотке двигателя при различных ЭМП в виде измененных законов управления затворами транзисторов приведены на рисунках 14, 15.

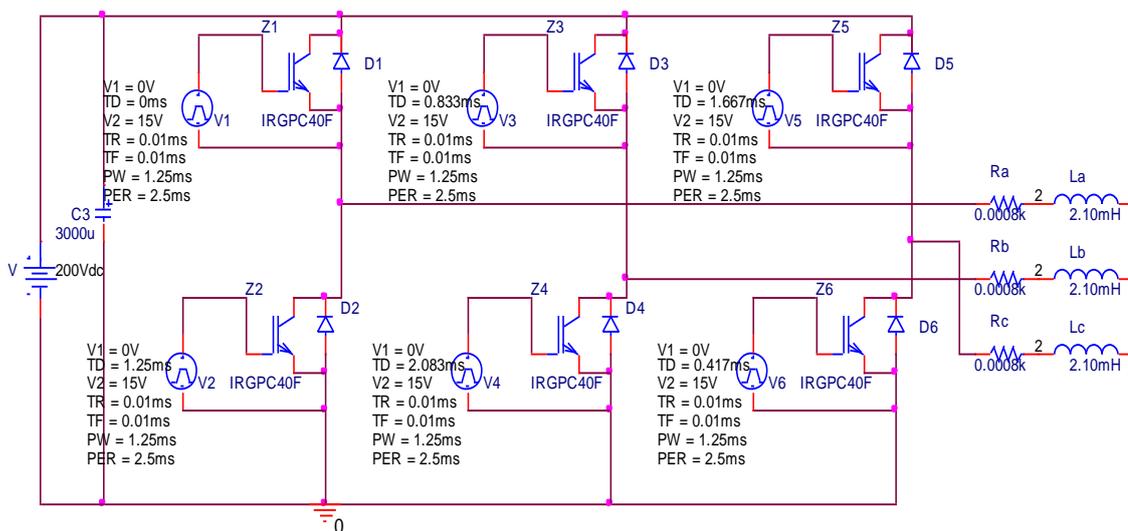


Рисунок 13 – Схема замещения УТД

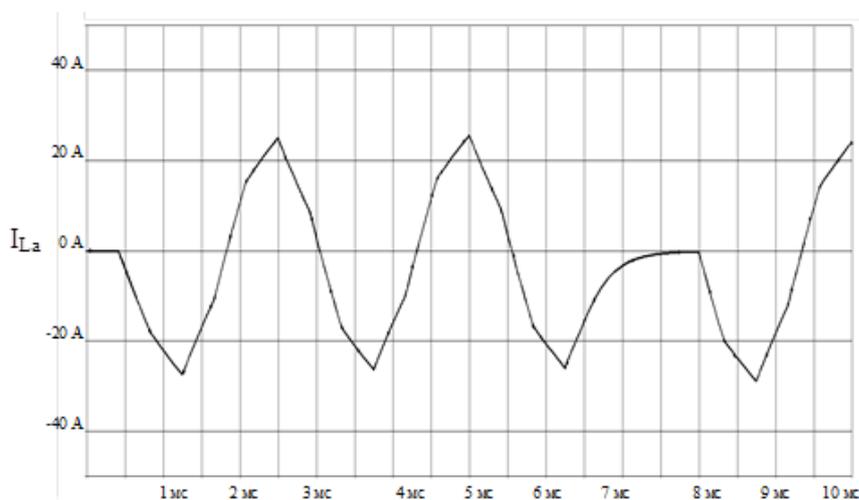


Рисунок 14 – Временная диаграмма фазного тока в обмотке I_{La} для режима работы двигателя при воздействии ЭМП в виде изменения закона управления затворами шести транзисторов (VT1-VT6) длительностью 1,5 мс напряжением 15 В в момент времени 6,5 мс

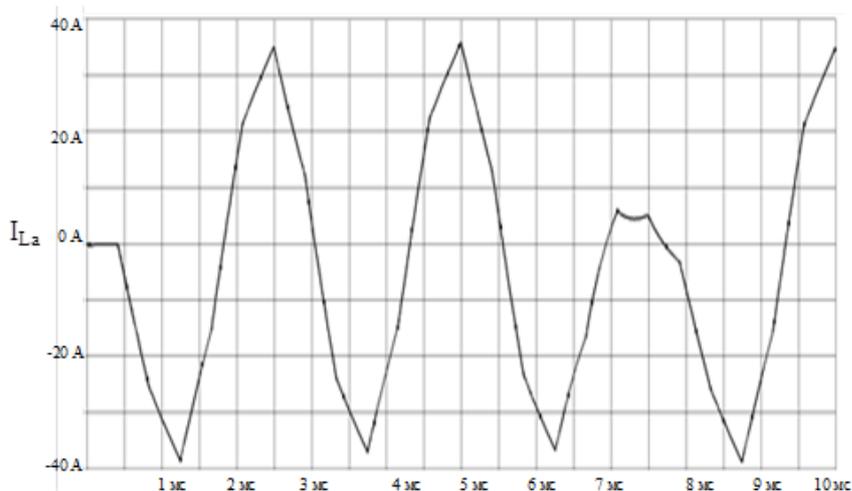


Рисунок 15 – Временная диаграмма фазного тока в обмотке I_{La} для режима работы двигателя при воздействии ЭМП в виде ошибок последовательности импульсов на двух затворах транзисторов (VT1,VT3) в момент времени 7,25 мс

На основе результатов моделирования можно заключить, что воздействие кондуктивных ЭМП на микропроцессор, управляющий затворами транзисторов модуля УТД, приводит к искажению токов в фазных обмотках исполнительного синхронного двигателя с постоянными магнитами и ухудшению качества функционирования СРП в целом, что может отрицательно повлиять на динамику полета ЛА.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработаны математическая модель и методика расчета спектральных характеристик и энергий импульсных излучаемых МЭМП, проникающих через апертуры во внутреннее пространство конструкции ЛА, корпусов приборов и устройств ЭТК ЛА.

2. Разработаны математические модели и методика расчета воздействия периодических и импульсных излучаемых МЭМП на экраны электрических жгутов ЭТК ЛА.

3. Разработаны математические модели и методика расчета наведенных излучаемыми МЭМП кондуктивных ЭМП на внутренних проводниках экранированных электрических жгутов ЭТК ЛА.

4. Проведено сравнение экспериментальных и расчетных частотных характеристик помехозащищенности электрических жгутов ЭТК ЛА.

5. Проведено моделирование воздействия кондуктивных ЭМП, наведенных на внутренних проводниках экранированных электрических жгутов излучаемыми МЭМП, на устройство ЭТК ЛА.

6. Разработано программное обеспечение, позволяющее рассчитывать проникновение импульсных МЭМП через апертуры во внутреннее пространство конструкции ЛА, корпусов приборов и устройств ЭТК ЛА.

7. Создан стенд, позволяющий измерять эффективность экранирования и сопротивление связи экранов электрических жгутов с учетом полного сопротивления экранов. Результаты измерений сопротивлений связи и эффективностей экранирования в сравнении с математическими моделями их расчетов позволяют выбрать математическую модель расчета сопротивления связи и эффективности экранирования экранов и использовать ее при проектировании экранов электрических жгутов.

Полученные в диссертационной работе результаты можно использовать для поэтапного расчета влияния излучаемых МЭМП на качество функционирования приборов и устройств ЭТК ЛА. Данный расчет состоит из следующих этапов: расчет проникновения излучаемых МЭМП через апертуры во внутреннее пространство конструкции ЛА, корпусов приборов и устройств ЭТК ЛА; расчет воздействия МЭМП, ослабленных конструкцией ЛА и (или) корпусами приборов и устройств ЭТК ЛА, на экраны и внутренние проводники электрических жгутов ЭТК ЛА; моделирование воздействия кондуктивных ЭМП,

наведенных на внутренних проводниках экранированных электрических жгутов внешними излучаемыми МЭМП, на приборы и устройства ЭТК ЛА.

Направление дальнейших исследований связано с: исследованием спектральных функций импульсных излучаемых МЭМП, проникающих через апертуры во внутреннее пространство конструкции ЛА, корпусов приборов и устройств ЭТК ЛА, для перехода от изображений спектральных функций к их оригиналам, что вызывает необходимость аппроксимации суммарного коэффициента экранирования экрана с апертурами; экспериментальным исследованием наведенных излучаемыми МЭМП кондуктивных импульсных ЭМП на экранах и внутренних проводниках экранированных электрических жгутов ЭТК ЛА.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

В журналах, входящих в утвержденный ВАК РФ Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций:

1. Кириллов В.Ю., Клыков А.В. Возможности компьютерного моделирования при решении задач электромагнитной совместимости бортовых кабельных сетей самолетов // Электронный журнал «Труды МАИ». 2012. № 57. 9 с.

2. Кириллов В.Ю., Клыков А.В., Нгуен В.Х. Моделирование воздействия мощных электромагнитных помех на электротехнический комплекс самолета // Электронный журнал «Труды МАИ». 2013. № 71. 14 с.

3. Кириллов В.Ю., Клыков А.В., Жегов Н.А., Нгуен В.Х., Томилин М.М. Исследование частотных характеристик моделей сопротивлений связи бортовых кабелей летательных аппаратов // Электронный журнал «Труды МАИ». 2014. № 75. 10 с.

4. Кириллов В.Ю., Клыков А.В., Нгуен В.Х., Томилин М.М. Исследование сопротивления связи и эффективности экранирования бортовых кабелей летательных аппаратов // Журнал «Технологии электромагнитной совместимости». 2014. № 2 (49). с. 3-8.

5. Кириллов В.Ю., Клыков А.В., Нгуен В.Х., Томилин М.М. Математическая модель воздействия электростатических разрядов на бортовую кабельную сеть космического аппарата // Журнал «Вестник Московского авиационного института». № 3, 2014, т.21. с. 118-127.

6. Жегов Н.А., Кириллов В.Ю., Клыков А.В., Марченко М.В., Томилин М.М. Сравнение методов исследования эффективности экранирования бортовых кабелей летательных аппаратов // Журнал «Технологии электромагнитной совместимости». 2015. № 1 (52). с. 44-48.

7. Жегов Н.А., Кириллов В.Ю., Клыков А.В., Томилин М.М. Сравнение расчётных и экспериментальных частотных характеристик эффективности экранирования бортовых

кабелей летательных аппаратов // Журнал «Вестник Московского авиационного института». № 4, 2015, т.22. с. 142-148.

В других изданиях:

8. Дутов М.А., Клыков А.В. Моделирование восприимчивости бортового кабеля ЛА к мощным электромагнитным воздействиям // Московская молодёжная научно-практическая конференция «Инновации в авиации и космонавтике – 2013». Сборник тезисов докладов. с. 50-51.

9. Клыков А.В. Сравнение результатов расчетов и измерений частотных характеристик сопротивлений связи плетеных экранов бортовых кабелей ЛА // Московская молодёжная научно-практическая конференция «Инновации в авиации и космонавтике – 2014». Сборник тезисов докладов. с. 34-35.

10. Жегов Н.А., Кириллов В.Ю., Клыков А.В., Томилин М.М. Эффективность экранирования бортовых кабелей летательных аппаратов. Сравнение методов исследования // Технологии, измерения и испытания в области электромагнитной совместимости. Труды II Всероссийской научно-технической конференции «Техно-ЭМС 2015». с. 63-64.

11. Кириллов В.Ю., Клыков А.В., Томилин М.М. Расчет эффективности экранирования экранов с апертурами при воздействии импульсных излучаемых помех // Технологии, измерения и испытания в области электромагнитной совместимости. Труды III Всероссийской научно-технической конференции «Техно-ЭМС 2016». с. 25-26.

Личный вклад автора в работах, опубликованных в соавторстве заключается в следующем: в [1, 8] проведено компьютерное моделирование наведенного напряжения на внутренних проводниках электрического жгута при воздействии МЭМП; в [2] произведен анализ видов и источников МЭМП, воздействующих на ЭТК ЛА, и осуществлен расчет токов и напряжений, протекающих по экранам электрических жгутов при воздействии электрического и магнитного полей грозового разряда; в [3] проведено сравнение теоретических частотных характеристик сопротивлений связи электрических жгутов; в [4, 6, 7, 10] создана триаксиальная установка для измерений сопротивлений связи и эффективности экранирования экранов электрических жгутов, осуществлены экспериментальные исследования сопротивлений связи и эффективностей экранирования для различных типов экранов электрических жгутов, проведено сравнение с результатами измерений в ТЕМ-камере и с расчетными значениями; в [5] предложена математическая модель воздействия кондуктивных ЭМП на внутренние проводники электрических жгутов; в [11] предложены математические модели и методики расчета спектральных характеристик и энергий импульсных излучаемых МЭМП в виде электрического и магнитного полей, проникающих во внутреннее пространство конструкции ЛА и корпусов приборов и устройств ЭТК ЛА.