

На правах рукописи



НГУЕН ВАН ТАЙ

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЖГУТОВ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ
АППАРАТОВ С УЧЕТОМ ПЕРЕКРЕСТНЫХ ПОМЕХ**

Специальность 05.09.03- Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» на кафедре «Теоретическая электротехника».

Научный руководитель: **Кириллов Владимир Юрьевич**
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теоретическая электротехника», Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (МАИ).

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

Марченко Михаил Владимирович
кандидат технических наук, начальник отдела, Московское опытно-конструкторское бюро "Марс" - филиал Федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова».

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ».

Защита состоится «**24**» мая **2022** г. в **13** часов **00** минут на заседании диссертационного совета Д 212.125.07, созданного на базе ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4 и на сайте:

https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=163910

Автореферат разослан « _____ » _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.125.07,
кандидат технических наук, доцент



Д.С. Дежин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Электрические жгуты электротехнических комплексов летательных аппаратов прокладываются по определенным трассам, которые проходят по внутренним участкам конструкции корпуса. Общая длина проводников бортовой сети летательных аппаратов может составлять значительную часть массы летательного аппарата.

Важной задачей при проектировании бортовой сети является задача минимизация общей длины проводников, и как следствие массы жгутов бортовой сети. Решение задачи минимизации общей длины проводников электрических жгутов бортовой сети заключается в нахождении оптимальных трасс прокладки жгутов в конструкции летательного аппарата.

При формировании электрических жгутов, помимо массогабаритных требований и особенностей конструкции летательного аппарата, необходимо руководствоваться требованиями электромагнитной совместимости проводников, и кабелей, объединенных в жгуты. Из-за наличия емкостных и индуктивных связей между проводниками бортовой сети возникают перекрестные электромагнитные помехи, которые могут ухудшать качество функционирования бортовых электротехнических комплексов. Проводники и кабели бортовой сети, объединенные в жгуты, не должны создавать нежелательных перекрестных электромагнитных помех.

Под электромагнитной совместимостью проводников в электрических жгутах понимается выполнение условия, при котором уровень перекрестных помех между проводниками в электрическом жгуте из-за индуктивных и емкостных связей не превышает предельно допустимого уровня кондуктивных помех, который определяется нормативными значениями стандарта. Уровень перекрестных помех может быть задан в технических условиях на проектирование электротехнического комплекса и должен контролироваться на всех этапах проектирования бортовой сети.

Вопросами перекрестных помех в линиях передачи и электрических соединителях посвящены работы таких авторов как: Л.Н Кечиев, А.Й Шваб, Н.В Балюк.

Вопросам помехозащищенности электрических жгутов электротехнических комплексов летательных аппаратов 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.B. Alexander, C.A. Clarke, W.E. Larsen, E.F. Vance, T. Kley, M. Tyni.

Для проектирования жгутов бортовой сети применяются специальные компьютерные программы, разработанные рядом предприятий промышленности. Компьютерные программы «МАКС» предприятия АО «Опытно-конструкторское бюро «Аэрокосмические системы» и «EPLAN» компании «EPLAN Software & Service» позволяют проектировать трассы электрических жгутов бортовых электротехнических комплексов, но не учитывают условия электромагнитной совместимости проводников в электрических жгутах и между жгутами в бортовой сети.

Цели и задачи

Целью диссертационной работы обеспечение электромагнитной совместимости бортовых комплексов летательных аппаратов путем применения топологической модели и алгоритма прокладывания путей электрических жгутов на графе с учетом перекрестных помех.

Для достижения поставленной цели в диссертации сформулированы следующие основные **задачи**:

- исследовать перекрестные электромагнитные помехи двухпроводных линий электрических жгутов;
- оценить соответствие теоретических расчетов и экспериментальных измерений уровней перекрестных помех в двухпроводных линиях электрических жгутов;
- предложить топологическую модель в виде графа, отображающего возможные пути прокладывания электрических жгутов в конструкции летательного аппарата;
- разработать алгоритм прокладывания путей электрических жгутов на графе с минимальной суммарной длиной проводников и с учетом перекрестных помех;
- исследовать перекрестные помехи в электрических жгутах с учетом неоднородностей экранов в виде зазоров с электропроводными соединениям;
- исследовать перекрестные помехи с учетом особенностей внутреннего пространства макетов приборных модулей и конструкционных отсеков;
- исследовать перекрестные помехи между контактами электрических соединителей бортовых жгутов;
- разработать способ определения минимального расстояния между незранированными двухпроводными линиями электрических жгутов, при которых уровень перекрестных помех соответствует заданным нормативным значениям

Научная новизна результатов диссертационной работы состоит в следующем:

- предложена топологическая модель, в виде графа, позволяющая отображать возможные пути прокладывания электрических жгутов в конструкции летательного аппарата;
- разработан алгоритм прокладывания путей электрических жгутов на графе с минимальной суммарной длиной проводников и с учетом перекрестных помех;
- результаты исследования перекрестных помех в электрических жгутах с учетом неоднородностей экранов в виде зазоров с электропроводными соединениями;
- результаты исследования перекрестных помех с учетом особенностей внутреннего пространства макетов приборных модулей и конструкционных отсеков;
- результаты исследования перекрестных помех между контактами электрических соединителей бортовых жгутов;
- способ определения минимального расстояния между проводниками электрических жгутов, при которых уровень перекрестных помех соответствует заданным нормативным значениям.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в следующем:

- алгоритм, позволяет определять пути электрических жгутов электротехнических комплексов летательных аппаратов на топологической модели в виде графа, отображающей конструкцию летательного аппарата при выполнении условия электромагнитной совместимости с учетом перекрестных помех;
- программное обеспечение, реализованное в компьютерной среде «MATLAB», реализует алгоритм определения путей прокладки электрических жгутов на графе с учетом перекрестных помех;
- перед применением электрических соединителей в жгутах рекомендовано проводить предварительные исследования резонансных свойств электрических соединителей в частотном диапазоне перекрестных помех;
- предложены рекомендации для исследования перекрестных помех между двухпроводными линиями электрических жгутов, размещаемых во внутреннем объеме модулей и конструкционных отсеках;
- предложен способ, позволяющий определять минимальные расстояния между проводниками двухпроводных линий электрических жгутов, при которых обеспечивается уровень перекрестных помех, соответствующий заданным нормативным значениям.

Методология и методы исследования: при решении сформулированных задач использовались: методы теоретической электротехники, теория графов, а также теория функций комплексного переменного.

Положения, выносимые на защиту:

- топологическая модель в виде графа, позволяющая отображать возможные пути прокладки электрических жгутов в конструкции летательного аппарата;
- алгоритм прокладки путей жгутов на графе с минимальной суммарной длиной проводников и с учетом перекрестных помех;
- исследование перекрестных помех в электрических жгутах с учетом неоднородностей экранов в виде зазоров с электропроводными соединениями;
- исследование перекрестных помех с учетом особенностей внутреннего пространства макетов приборных модулей и конструкционных отсеков;
- исследование перекрестных помех между контактами электрических соединителей бортовых жгутов;
- способ определения минимального расстояния между проводниками электрических жгутов, при которых уровень перекрестных помех соответствует заданным нормативным значениям.

Степень достоверности и апробация результатов определяется:

- корректным использованием методов и принципов теоретической электротехники, теории графов, а также теории функций комплексного переменного;
- правильной работой алгоритмов и программ, отсутствием в них логических и синтаксических ошибок;
- сопоставлением результатов расчетов, полученных разными способами с результатами экспериментов.

Публикации: основные материалы диссертационной работы опубликованы в четырех работах в журнале, рекомендуемых ВАК.

Апробация работы: результаты диссертационной работы докладывались на 18-й международной конференции «Авиация и космонавтика» (Москва, МАИ, 2019), на 26-й Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника электротехника и энергетика» (Москва, МЭИ, 2020), на 7-й Всероссийской научно-технической конференции «Техно ЭМС 2020» (Москва, 2020), на 19-й Международной конференции «Авиация и космонавтика» (Москва, МАИ, 2020), на 46-й Международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения» (Москва, МАИ, 2021).

Объем и структура работы: диссертационная работа состоит из введения, 4-х глав, заключения по работе, списка литературы и приложения. Работа содержит 140 страниц, 49 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, приводится обзор существующих результатов исследования по теме диссертации, формулируется цель работы, задачи и методы исследования, обоснована научная новизна и отмечена практическая значимость работы.

В первой главе диссертационной работы проведено исследование перекрестных помех между двухпроводными линиями в жгуте. Схема исследования перекрестных помех, распространяющихся через емкостные связи приведена на рис 1

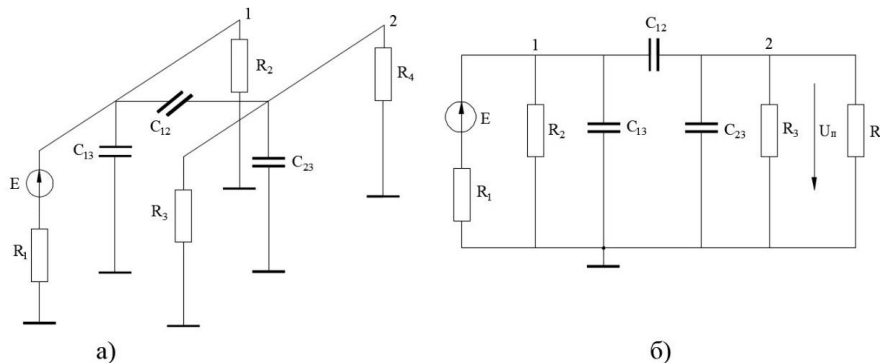


Рис. 1. Емкостные связи между неэкранированными проводниками: а – физическое представление; б – эквивалентная схема.

Напряжение перекрестной помехи U_{Π} , на двухпроводной линии 2 схемы рис 1б, рассчитывается по формуле

$$\underline{U}_{\Pi} = \frac{Rj\omega C_{12} E}{[j\omega R(C_{12} + C_{23}) + 1] \left[\frac{R_1 \{ j\omega [R(C_{12} + C_{23}) + R_2(C_{12} + C_{13})] - \omega^2 R R_2 (C_{12} C_{23} + C_{12} C_{13} + C_{13} C_{23}) + 1 \}}{R_2 [j\omega R(C_{12} + C_{23}) + 1]} + 1 \right]} \quad (1)$$

В частном случае при $R_1 \sim 0$ ($R_2 \sim \infty$) и пренебрегая емкостью C_{13} напряжение перекрестной помехи U_{Π} , на проводнике 2 схемы рис 1б, можно представить в виде формулы

$$\underline{U}_{II} = \frac{Rj\omega C_{12}}{j\omega R(C_{23} + C_{12}) + 1} E \quad (2)$$

где R – эквивалентное сопротивление $R = \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4}$

Для сравнения расчетных и экспериментальных перекрестных помех между двумя неэкранированными двухпроводными линиями были заданы следующие исходные данные для цепи (схема 1): длины проводников $l_1 = l_2 = 1$ м; радиусы проводников $a_1 = a_2 = 0,0003$ м; расстояние между прямым и обратным проводником $h=0,00045$ м; расстояние между двумя проводами $d=0,0009$ м; ЭДС источника $E=0,224$ В с частотой $f = (0,1 - 500)$ МГц; сопротивления нагрузки $R_3 = R_4 = 50$ Ом.

На основе заданных исходных данных расчетные значения емкостей $C_{12} = 2,5328 \cdot 10^{-11}$ Ф, $C_{23} = 3,8316 \cdot 10^{-12}$ Ф.

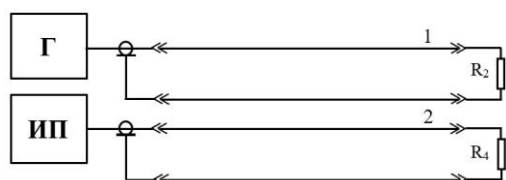


Рис. 2. Схема исследования перекрестных помех между двухпроводными линиями: Г – генератор; ИП – измерительный приемник; R_2, R_4 – сопротивления нагрузки.

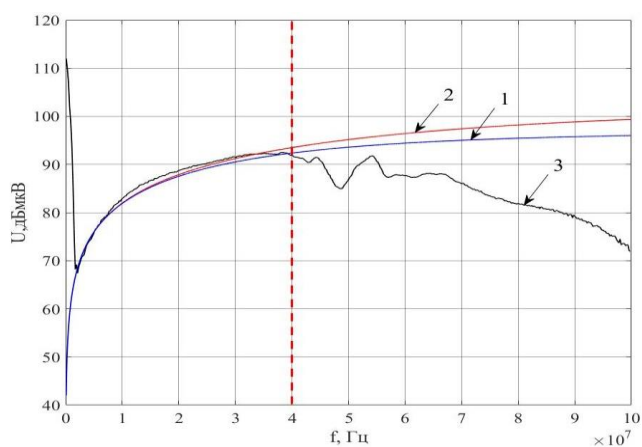


Рис. 3. Частотные диаграммы напряжений перекрестных помех между двухпроводными линиями: 1 – расчетная частотная диаграмма по формуле (1); 2 – расчетная частотная диаграмма по формуле (2); 3 – экспериментальная частотная диаграмма.

Схема экспериментального исследования перекрестных помех между двухпроводными линиями приведена на рис 2. Расчетные и экспериментальные частотные диаграммы напряжений перекрестных помех в схеме рис 1б U_{II} с сопротивлениями $R_1 = R_3 = 50$ Ом; $R_2 = R_4 = 1$ МОм приведены на рис. 2.

Из сравнительного анализа частотных диаграмм на рис 3, построенных по формулам (1) и (2) и с использованием экспериментальных результатов, следует, что использование формулы (1) для расчета напряжения перекрестных помех U_{II} на двухпроводной линии 2 схемы на рис. 1. дает меньшее отклонение от результатов эксперимента, чем использование формулы (2). Для расчета напряжения перекрестных помех U_{II} на двухпроводной линии 2 формулу (1) можно использовать только в диапазоне частот $(0,1 - 40)$ МГц. На частотах выше 40 МГц расчет по формуле (1) дает большее отклонение между значениями расчетных и экспериментальных частотных диаграмм напряжений перекрестных помех, более 12,29%.

Схемы исследования перекрестных помех, распространяющихся через емкостные и индуктивные связи приведена на рис 4 и рис 5.

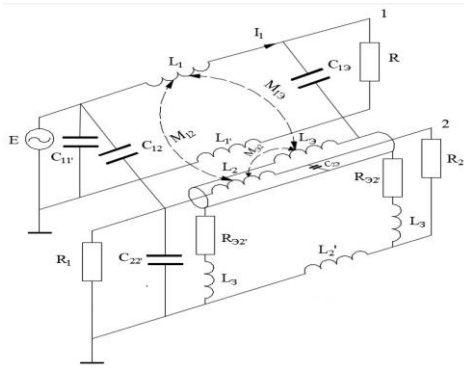


Рис. 4. Схемы физического представления распространения перекрестных помех через емкостные и индуктивные связи между неэкранированными проводниками.

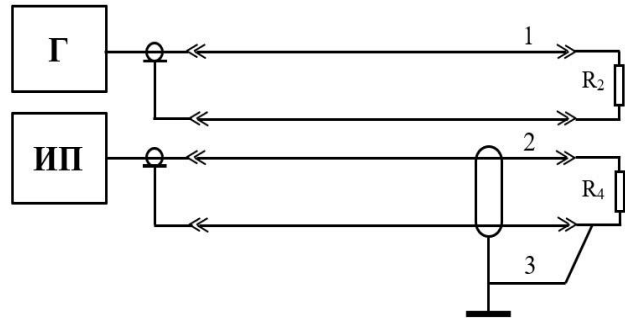


Рис. 5. Электрическая схема исследования перекрестных помех: 1 – неэкранированная двухпроводная линия; 2 – экранированная двухпроводная линия; 3 – электропроводная перемычка.

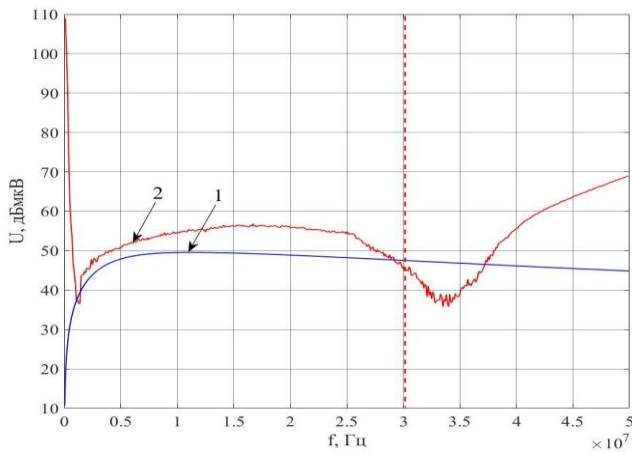


Рис. 6. Частотные диаграммы напряжений перекрестных помех через емкостные и индуктивные связи: 1 – расчетная частотная диаграмма; 2 – экспериментальная частотная диаграмма.

Из анализа частотных диаграмм следует, что для расчета напряжения перекрестных помех U_{Π} можно использовать метод расчета электрических цепях с сосредоточенными параметрами только в диапазоне частот (0,1–30) МГц. На частотах выше 30 МГц метод расчета электрических цепях с сосредоточенными параметрами использовать не рекомендуются из-за значительных отклонений расчетных частотных диаграмм перекрестных помех от экспериментальных.

Во второй главе предложена топологическая модель в виде графа, отображающего возможные пути прокладывания электрических жгутов в конструкции летательного аппарата. Разработан алгоритм определения путей прокладывания жгутов на графе с минимальной длиной проводников. Приведен пример определения путей прокладывания электрических жгутов с минимальной суммарной длиной проводников на графе. Сформулирован процесс поиска оптимальных трасс электрических жгутов в конструкции летательного аппарата. минимальной длины, который состоит из трех этапов. На первом этапе, на основе анализа геометрических особенностей конструкции летательного аппарата определяются все возможные пути прокладки электрических жгутов. На втором этапе производится отображение геометрической структуры конструкции летательного аппарата с возможными путями прокладки электрических жгутов в топологическую модель в виде ненаправленного графа. На третьем этапе, на основе разработанного алгоритма, на графе определяются оптимальные пути для

электрических жгутов с минимальной длиной проводников и кабелей. На основе оптимальных путей на графе определяются трассы для прокладки электрических жгутов в конструкции летательного аппарата.

Приведены топологические модели путей прокладки жгутов. Для построения топологической модели определяются: возможные пути прокладки жгутов в конструкции летательного аппарата; количество проводников (кабелей), подключенных к каждому устройству; количество проводников, соединяющих любые два устройства и расстояния между любыми двумя устройствами с учетом геометрической схемы конструкции летательного аппарата. На рис 7 представлен пример условной геометрической схемы, определяющей возможные трассы прокладки электрических жгутов в конструкции электротехнического комплекса летательного аппарата. Заштрихованными участками на схеме обозначены внутренние элементы конструкции, между которыми возможна прокладка трасс электрических жгутов, соединяющих бортовые приборы и устройства.

Данная схема состоит из модулей, вдоль которых могут происходить трассы электрических жгутов с боковыми жгутами-ответвлениями. Центральные электрические жгуты проходят через модули, боковые жгуты-ответвления размещаются в каждом модуле и подсоединяются к бортовым приборам и устройствам.

В общем случае геометрической схеме конструкции летательного аппарата с множеством вариантов прокладки трасс электрических жгутов можно поставить в соответствие топологическую модель в виде ненаправленного графа. На рис 8 приведен пример топологической модели в виде ненаправленного графа. Вершины графа отображают места подсоединения проводников электрического жгута к бортовым приборам и устройствам. Ветви графа соответствуют участкам конструкции для прокладки трасс электрических жгутов.

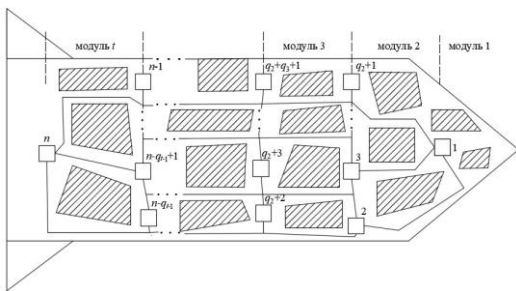


Рис. 7. Геометрическая схема возможных трасс прокладки электрических жгутов в конструкции ЛА.

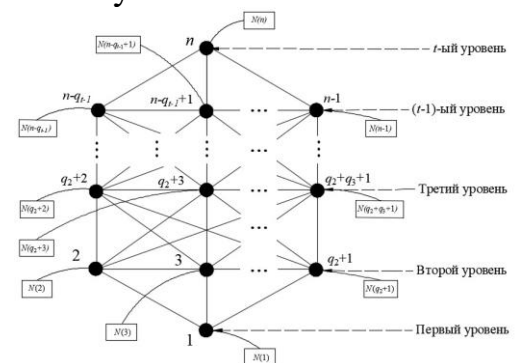


Рис. 8. Топологическая модель прокладки путей жгутов ЛА.

Весовые коэффициенты ветвей обозначают расстояния между пространственными участками, на которых размещаются бортовые приборы и устройства с подключенными к ним электрическими жгутами. Каждой вершине графа соответствует количество проводников, подключаемых к прибору или устройству. Путь, состоящий из вершин и ветвей на графе, отображает трассу жгута на геометрической схеме конструкции. Пути электрических жгутов на графе зависят от принятой схемы жгута. Такой способ определения путей на графе

зависят от принятой схемы жгута. Такой способ определения путей на графе

наиболее подходит для электротехнических комплексов летательных аппаратов и других подвижных технических средств, имеющих конструкцию, состоящую из последовательно соединенных модулей.

Обобщенная структурная схема алгоритма построения путей электрических жгутов на графе с наименьшей суммарной длиной проводников приведена на рис. 9. Исходными данными для алгоритма являются:

- A – матрица расстояний между бортовыми приборами и устройствами (вершинами) смежных уровней. $(i, j=1\dots n)$, $\{A(i, j) = a_{ij}\}$ – квадратная матрица порядка n ; $A(i, j) = A(j, i)$ – расстояние между устройствами i и j ; $A(i, j) = A(j, i) = \infty$ если в графе отсутствует некоторая дуга и $A(i, i) = \infty$ для всех вершин i ;

- N – матрица количества проводников, подключаемых к каждому устройству. $N = [n_i]$ ($i=1\dots n$), – строчная матрица порядка n ; $N(i) = n_i$ – количество подключаемых проводников к i -му прибору или устройству i ;

- L – матрица количества проводников, попарно соединяющих приборы и устройства бортовой системы. $(i, j = 1\dots n)$, $\{L(i, j) = l_{ij}\}$ – квадратная матрица порядка n , где n – количество вершин графа. $L(i, j) = L(j, i)$ – количество проводников, соединяющих между собой приборы i и j . Если прибор i не соединяет с прибором j , то $L(i, j) = 0$;

- t – количество уровней графа;

- M_k – Матрица вершин графа, содержащих приборы и устройства на k -ом уровне ($k = 1\dots t$); $M_k = [m_i]$ ($i = 1\dots q_k$), – строчная матрица порядка q_k , состоящая из вершин, которые находятся на одной горизонтальной линии (приборы, устройства вместе находятся в одном отсеке);

- q_k – количество вершин графа на k -ом уровне ($k = 1\dots t$);

- n – общее количество вершин графа;

- $H = [h_i]$ ($i=1\dots n$) – строчная матрица, состоящая из вершин, принадлежащих центральному жгуту, уровень которого не выше уровня вершины i ;

- R_i ($i=1\dots n$), $R_i = [r_i]$ ($i=1,2,\dots$) – строчная матрица, состоящая из всех вершин графа, уровень которых не выше уровня вершины i которой выполняются следующие условия: Если $i = 1$, то: $R_i = [1]$; Если $i \neq 1$ и $i \in M_k$, то: $R_i = [1 \ 2 \ \dots \ r]$; $r = M_k(q_k)$, где q_k – размерность матрицы уровня k , k – номер уровня на графе.

- Суммарная длина проводников дуги ij центрального жгута определяется по формуле:

$$b_{ij} = A(i, j) \cdot T_{ij},$$

здесь T_{ij} – количество проводников дуги ij :

$$T_{ij} = \sum_{s=1}^{s_i} N(s) - \sum_{\substack{s_1=1 \\ s_2=1}}^{s_j} L(s_1, s_2),$$

где s_i – размерность матрицы R_i ;

$L(s_1, s_2) = L(s_2, s_1)$ – количество проводников, соединяющих между собой устройства s_1 и s_2 ;

$A(i, j) = A(j, i)$ – длина дуги между вершинами i и j равна расстоянию между устройствами i и j .

- Суммарная длина проводников дуги ij бокового жгута p_{ij} определяется из условий:

если $i \in M_k$ и $j \in M_{k+1}$ при выполнении условий $j \neq M_{k+1}(1)$ и $j \neq M_{k+1}(q_{k+1})$ то:

$$p_{ij} = \sum_{s_1=M_{k+1}(1)}^{j-1} [A(s_1, s_1 + 1) \cdot \sum_{s_2=M_{k+1}(1)}^{s_1} N(s_2)] + \sum_{s_3=j}^{M_{k+1}(q_{k+1})-1} [A(s_3, s_3 + 1) \cdot \sum_{s_4=s_3+1}^{M_{k+1}(q_{k+1})} N(s_4)],$$

где q_{k+1} – размерность матрицы уровня $(k+1)$,

если $i \in M_k$ и $j \in M_{k+1}$ то:

$$p_{ij} = \sum_{s=M_{k+1}(2)}^{M_{k+1}(q_{k+1})} [A(s-1, s) \cdot \sum_{s_1=s}^{M_{k+1}(q_{k+1})} N(s_1)],$$

если $i \in M_k$ и $j = M_{k+1}(q_{k+1})$ то:

$$p_{ij} = \sum_{s=M_{k+1}(1)}^{M_{k+1}(q_{k+1})-1} [A(s, s + 1) \cdot \sum_{s_1=M_{k+1}(1)}^s N(s_1)],$$

в остальных случаях $p_{ij} = 0$.

- Квадратную матрицу порядка n суммарной длины проводников между вершинами $D = [d_{ij}]$ ($i, j = 1 \dots n$) определяется следующим образом:

$D(1, 1) = d_{11} = 0$ и $D(i, i) = d_{ii} = \infty$ для всех i , отличных от 1;

если $i \in M_k$; $j \in M_{k+1}$ и $j > i$ то: $D(i, j) = d_{ij} = b_{ij} + p_{ij}$;

В остальных случаях $D(i, j) = d_{ij} = \infty$.

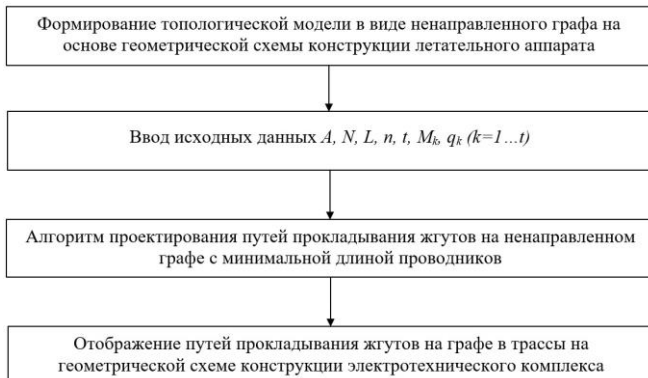


Рис. 9. Обобщенная структурная схема построения трасс электрических жгутов в конструкции летательного аппарата с наименьшей суммарной длиной проводников

После ввода исходных данных на основе геометрической схемы конструкции летательного аппарата формируется топологическая модель в виде ненаправленного графа. Построение путей электрических жгутов на графе осуществляется на основе критерия минимума суммарной длины проводников. Построение путей электрических жгутов на графе производится отображением данных путей в трассы на геометрической схеме конструкции летательного аппарата.

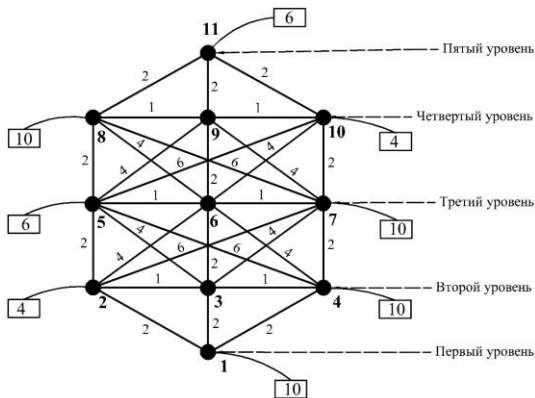


Рис. 10. Топологическая модель в виде графа отображающего пути прокладки жгутов в конструкции летательного аппарата

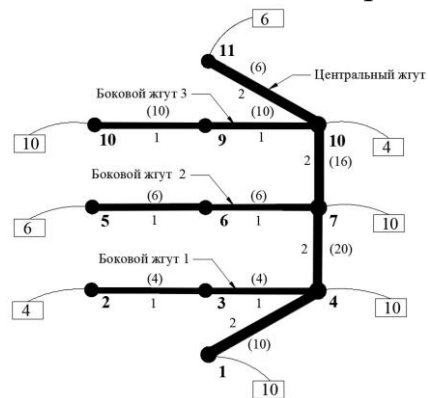


Рис. 11. Пути прокладки жгута на графе с минимальной суммарной длиной проводников

В третьей главе разработан алгоритм проектирования путей прокладки электрических жгутов в конструкции летательного аппарата с учетом перекрестных помех.

Уровни перекрестных электромагнитных помех зависят от эффективности экранирующих покрытий проводников бортовой сети и могут также зависеть от пространственной близости проводников двухпроводных линий в электрических жгутах и близости жгутов между собой. В случаях, когда уровни перекрестных помех в электрических жгутах бортовой сети летательного аппарата превышают нормативные значения, заданные стандартами, необходимо находить такие пути прокладки жгутов, при которых уровни перекрестных помех соответствуют нормативным значениям стандартов.

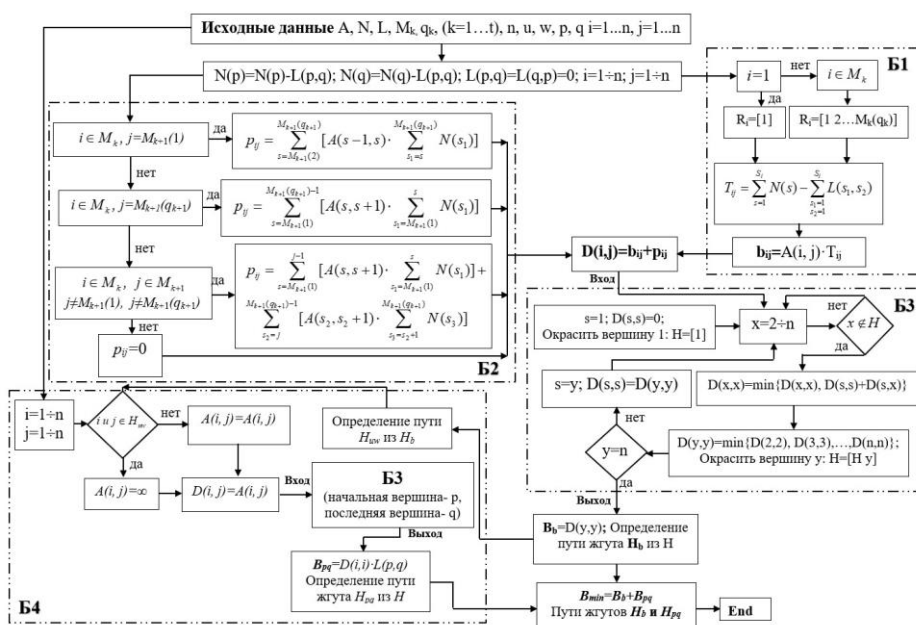


Рис. 12. Алгоритм построения путей электрических жгутов на ненаправленном графе с учетом перекрестных помех при условии, что путь прокладки жгута проводников, соединяющих устройства u и w и путь прокладки жгута проводников, соединяющих устройства p и q не могут проходить вместе.

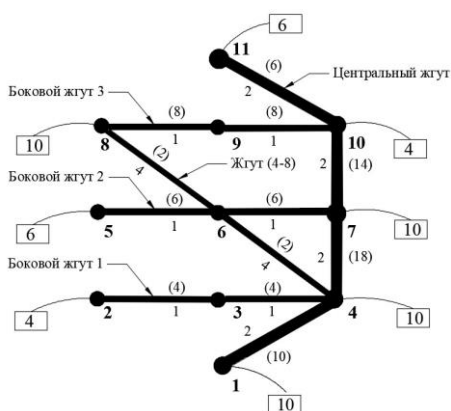


Рис. 13. Пути прокладки первого и второго жгутов на графе с учетом перекрестных помех.

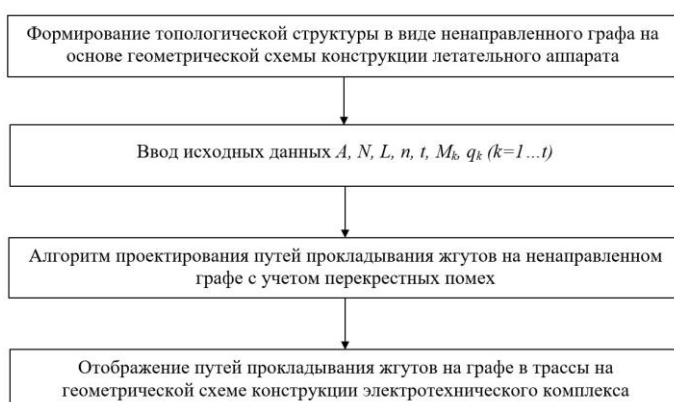


Рис. 14. Обобщенная схема построения трасс электрических жгутов в конструкции летательного аппарата с учетом перекрестных помех.

При проектировании трасс электрических жгутов бортовой сети электротехнического комплекса необходимо учитывать следующие требования. Суммарная длина проводников в электрических жгутах бортовой сети, проложенных по разрешенным путям в конструкции электротехнического комплекса, должна быть минимальна. Уровни перекрестных помех в электрических жгутах должны удовлетворять требованиям стандартов по электромагнитной совместимости. Количество электрических жгутов может зависеть от количества несовместимых по уровню перекрестных помех проводников в одном жгуте.

Структурная схема определения путей прокладывания электрических жгутов с учетом перекрестных помех при условии, что путь прокладывания жгута проводников, соединяющих устройства u и w и путь прокладывания жгута проводников, соединяющих устройства p и q не могут проходить вместе приведена на рис. 14 и состоит из следующих этапов:

1. Формирование топологической модели в виде ненаправленного графа на основе геометрической схемы конструкции летательного аппарата (на рис 8);
2. Ввод исходных данных: $A, N, L, n, M_k, q_k, (k=1 \dots t), u, w, p, q$, где A, N, L, M_k – матрицы, показанные выше; u, w, p, q – вершины графа; n – общее количество вершин графа.
3. Применение алгоритма проектирования путей прокладывания жгутов на ненаправленном графе с минимальной суммарной длиной проводников и с учетом допустимых уровней перекрестных помех между проводниками в жгутах;
4. Отображение путей прокладывания жгутов на графе в трассы на электрической схеме конструкции электротехнического комплекса.

Пути прокладывания двух жгутов, определенные с учетом перекрестных помех между подводниками изображены графе рис 13. Центральный электрический жгут, так как указанные в примере проводники несовместимы, разделен на два центральных электрических жгута. Первый центральный электрический жгут проходит по пути между вершинами 1, 4, 7, 10, 11, второй между вершинами 4, 6, 8. Боковые жгуты- ответвления проходят по уровням графа.

Суммарная длина проводников в случае с несовместимыми проводниками увеличилась и составляет 148 (144) условных единиц, что превышает суммарную длину проводников в электрическом жгуте для случая, когда все проводники совместимы. Такое превышение суммарной длины проводников является результатом разделения центрального электрического жгута с целью размещения несовместимых проводников в различных жгутах. Построенные компьютерной программой пути прокладывания электрических жгутов на графе отображаются в трассы электрических жгутов на геометрической схеме конструкции электротехнического комплекса.

В четвертой главе в разделе 4.1, приведены результаты экспериментальных исследований перекрестных помех в электрических жгутах с неоднородностями экранов.

Для ослабления перекрестных помех проводники в электрических жгутах бортовой сети экранируются. В электрическом жгуте, состоящем из экранированных проводников, эффективность ослабления перекрестных помех

между проводниками зависит от параметров экранов и от наличия неоднородностей. Неоднородности экранов проводников могут проявляться в виде зазоров между участками экранов и корпусами электрических соединителей. Наличие таких зазоров приводит к появлению неэкранированных, следовательно, и незащищенных от воздействия перекрестных помех участков проводников электрического жгута.

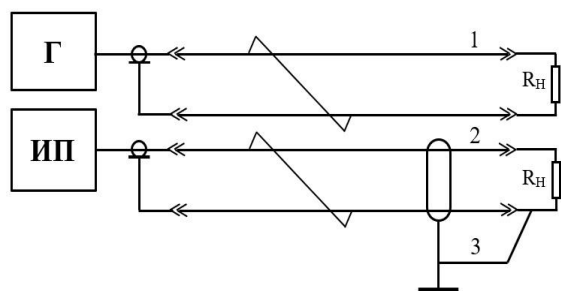


Рис. 15. Схема макета электрического жгута для исследования перекрестных помех витых пар проводников: 1 – неэкранированная витая пара проводников (витая пара 1); 2 – экранированная витая пара проводников (витая пара 2); 3 – электропроводное соединение (перемычка); R_n – сопротивление нагрузки.

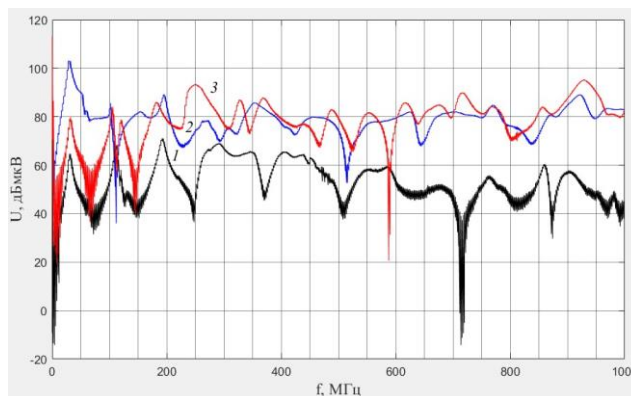


Рис. 16. Частотные диаграммы перекрестных помех витой пары макета электрического жгута: 1 – частотная диаграмма перекрестных помех экранированной витой пары 2 при отсутствии зазоров; 2 – частотная диаграмма перекрестных помех неэкранированной витой пары 2; 3 – частотная диаграмма перекрестных помех, экранированной витой пары 2 с зазором длиной 20 мм и электропроводным соединением (перемычкой).

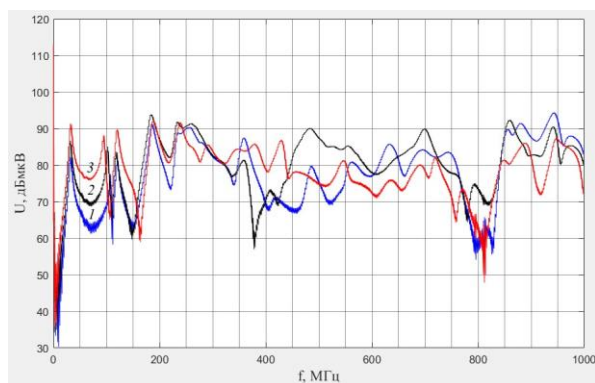


Рис. 17. Частотные диаграммы перекрестных помех витой пары 2 макета электрического жгута с зазором при наличии электропроводного соединения (перемычки) между экраном проводников электрического жгута и корпусом электрического соединителя: 1, 2, 3 – частотные диаграммы перекрестных помех экранированной витой пары 2 с зазором 20 мм, 50 мм, 100 мм.

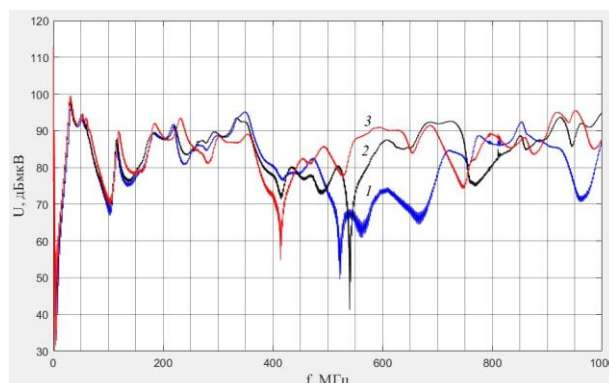


Рис. 18. Частотные диаграммы перекрестных помех витой пары 2 макета электрического жгута с зазором и без электропроводной перемычки между экраном проводников электрического жгута и корпусом электрического соединителя: 1, 2, 3 – частотные диаграммы перекрестных помех экранированной витой пары 2 с зазором 20 мм, 50 мм, 100 мм.

В связи с тем, что наличие неоднородностей экранов в виде зазоров между экранами проводников и корпусами электрических соединителей может приводить к проникновению и распространению перекрестных помех возникает необходимость

исследования в широком частотном диапазоне зависимости уровней перекрестных помех от наличия зазора и его размеров. Учитывая то, что возможны случаи отсутствия или нарушения электропроводного соединения в зазорах между экранами жгутов и корпусами электрических соединителей практическое значение имеет оценка для данных случаев уровней перекрестных помех.

Для исследования перекрестных помех был использован макет электрического жгута, схема которого приведена на рис 15. Макет электрического жгута для измерения уровней перекрестных помех составлен из двух витых пар проводников: неэкранированная витая пара проводников (витая пара 1); экранированная витая пара проводников (витая пара 2). В схеме макета жгута неэкранированная витая пара проводников жгута подключена к генератору и является источником перекрестных помех. Экранированная витая пара проводников с неоднородностью экрана в виде зазора между экраном и корпусом электрического соединителя в макете жгута является рецептором перекрестных помех и подключена к измерительному приемнику для определения уровней перекрестных помех.

Из анализа частотной диаграммы 2 на рис 16 – 18 следует, что появление зазора между экраном витой пары номер 2 и корпусом электрического соединителя даже при наличии перемычки в виде электропроводного соединения приводит к значительному возрастанию максимального значения перекрестных помех по отношению к максимальному значению перекрестных помех, экранированной витой пары 2 без зазора. Наличие электропроводного соединения, как следует из сравнения частотных диаграмм 2 и 3 на рис 16 уменьшает уровень перекрестных помех на относительно низких частотах до 150 МГц.

Из сравнения полученных частотных диаграмм на рис 17 и рис 18 следует что, при отсутствии электропроводного соединения (перемычки) экрана витой пары и корпуса электрического соединителя максимальные значения перекрестных помех возрастают.

Образование зазоров при монтаже электрических жгутов, состоящих из экранированных пар проводников, даже при наличии электропроводных перемычек между экранами витых пар проводников и электрическими соединителями приводит к появлению перекрестных помех уровни которых могут ухудшать качество функционирования бортовых приборов и устройств электротехнических комплексах летательных аппаратов.

В разделе 4.2 приведены результаты исследования перекрестных помех в электрическом соединителе.

Контакты электрических соединителей, конструктивно расположенные в изолирующем диэлектрическом корпусе, не экранированы, и емкостные связи между ними, создают пути распространения перекрестных помех, которые переходят на смежные пары проводников и распространяются по бортовой электрической сети.

Для исследования перекрестных помех был использован электрический соединитель, схема которого приведена на рис 19.

Из анализа частотной диаграммы 1 на рис 20 следует, что при увеличении расстояния между контактами электрических соединителей уменьшаются

значения уровней перекрестной помех в пределах заданного частотного диапазона (0,1 – 3000) МГц. Из-за резонансных явлений на высоких частотах имеет место значительная неравномерность частотных характеристик напряжения перекрестных помех.

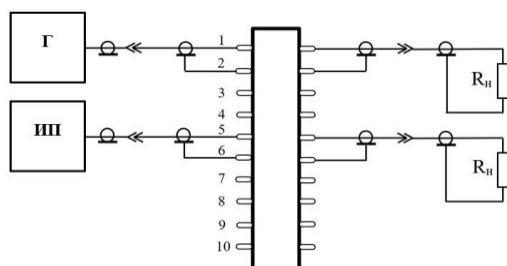


Рис. 19. Схема исследования перекрестных помех между контактами электрического соединителя РП14 – 30ЛО: Г – генератор; ИП – измерительный приемник; R_n – сопротивление экранированной нагрузки.

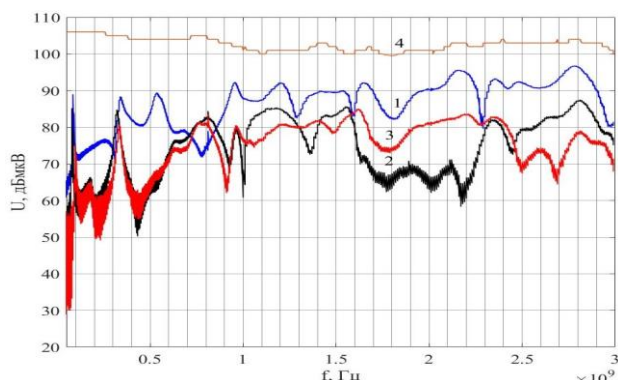


Рис. 20. Частотные диаграммы перекрестных помех между контактами электрического соединителя: 1; 2; 3 – частотные диаграммы напряжения перекрестных помех между контактами, соответственно, 1, 2 и 3, 4; 1, 2 и 5, 6; 1, 2 и 9, 10; 4 – частотная диаграмма напряжения на контактах 1, 2.

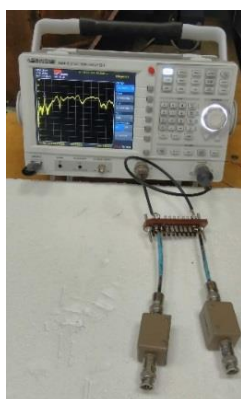


Рис. 21. фото исследования перекрестных помех между контактами электрического прямоугольного соединителя РП14 – 30ЛО.

Уровни перекрестных помех, распространяющихся через контакты электрических соединителей, могут превышать допустимые нормативные значения, заданные для чувствительных элементов бортового комплекса летательного аппарата даже при экранировании пар проводников в жгутах и самих жгутов бортовой электрической сети. Поэтому при проектировании бортовой электрической сети, состоящей из экранированных жгутов и электрических соединителей, необходимо оценивать уровни перекрестных помех, не только между проводниками электрических жгутов, но и между контактами электрических соединителей.

В разделе 4.3 приведены результаты исследования перекрестных помех во внутреннем пространстве макета бортового приборного модуля.

Изменение напряжений перекрестных помех необходимо, предварительно оценивать в лабораторных условиях, размещая электрические жгуты, приборы и устройства бортовых систем в макетах приборных модулей или макетах конструктивных отсеков летательных аппаратов. Сравнивая полученные результаты измерений напряжений перекрестных помех в макетах модулей с напряжениями перекрестных помех на открытом пространстве стола испытательного лабораторного стенда можно оценить возрастание значений напряжений во внутреннем пространстве приборного модуля или конструкции бортового отсека. Правильное оценивание напряжений перекрестных помех

необходимо производить с учетом реального размещения электрических жгутов и бортовых приборов во внутреннем пространстве закрытых приборных модулей и конструкционных отсеков летательных аппаратов. Расположение приборов и устройств в приборных модулях может существенно отличаться от расположения на лабораторных испытательных стендах.

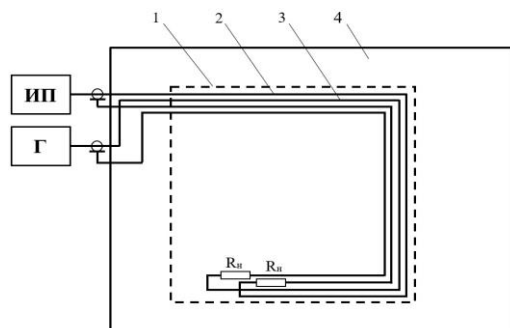


Рис. 22. Схема исследования перекрестных помех между двухпроводными линиями на столе лабораторного стенда и во внутреннем пространстве макета модуля: 1 – корпус макета модуля; 2, 3 – двухпроводные линии жгута; 4 – электропроводная пластина-имитатор элемента конструкции летательного аппарата; Г – «tracking» генератор; ИП – измерительный приемник; R_n – сопротивление нагрузки.

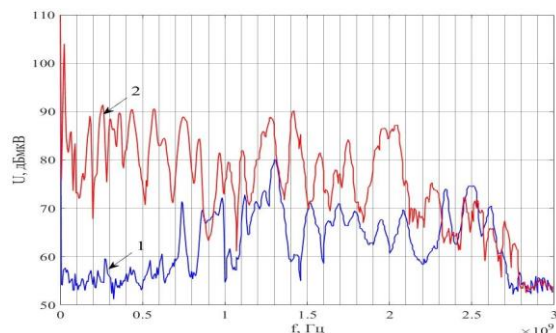


Рис. 23. Частотные диаграммы напряжения перекрестных помех между двумя двухпроводными линиями жгута: 1 – частотная диаграмма напряжения перекрестных помех на открытом пространстве стола лабораторного стенда; 2 – частотная диаграмма напряжения перекрестных помех во внутреннем пространстве макета приборного модуля.

На рис 22 приведена схема исследования перекрестных помех между двухпроводными линиями на столе лабораторного стенда и во внутреннем пространстве макета модуля. Напряжения перекрестных помех при размещении приборов, устройств и электрических жгутов во внутреннем пространстве закрытых приборных модулей могут значительно отличаться от напряжений перекрестных помех при испытаниях, проводимых на открытом пространстве столов испытательных стендов лабораторных стендов. На рис 23 изображены частотные диаграммы напряжения перекрестной помехи между двумя двухпроводными линиями жгута. Из анализа частотных диаграмм следует, что напряжение перекрестных помех во внутреннем пространстве макета модуля значительно возрастает по сравнению с напряжением перекрестной помехи на открытом пространстве стола испытательного стенда. Максимальное значение частотной диаграммы 2 на частоте 24 МГц составляет 104 дБмкВ, ($\sim 158,5$ мВ), (рис 23) максимальное значение частотной диаграммы 1 равно 80,1дБ ($\sim 10,1$ мВ) на частоте 1300 МГц. Максимальные значения частотных диаграмм 1 и 2 перекрестной помехи отличаются на 23,9 дБмкВ (в 15,7 раз).

Во внутреннем пространстве приборного модуля летательного аппарата между жгутами проводников и корпусами приборов также могут возникать перекрестные помехи. На рис 24 приведена схема исследования перекрестных помех между имитатором бортового прибора и двухпроводной линией. Частотные диаграммы напряжения перекрестных помех между имитатором бортового прибора и двухпроводной линией изображены на рис 25.

Из анализа экспериментальных частотных диаграмм следует, что максимальное значение частотной диаграммы 2 на частоте 1400 МГц равно 88,2 дБмкВ (~ 25,7 мВ). Максимальное значение частотной диаграммы 1 на частоте 1310 МГц равно 65,5 дБмкВ (~1,9 мВ). Разница максимальных значений составляет 22,7 дБмкВ (в 13,5 раз).

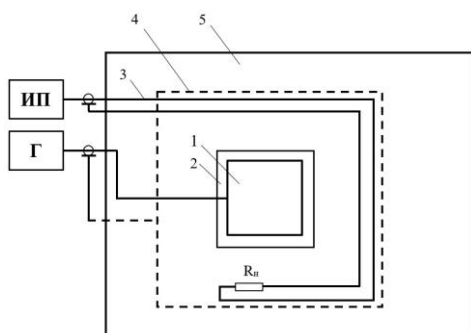


Рис. 24. Схема исследования перекрестных помех между имитатором бортового прибора и двухпроводной линией: 1 – имитатор бортового прибора; 2 – диэлектрическая подложка; 3 – двухпроводная линия; 4 – макет приборного модуля; 5 – электропроводная пластина-имитатор элемента конструкции летательного аппарата; Г – «tracking» генератор; И – измерительный приемник; R_n – сопротивление нагрузки.

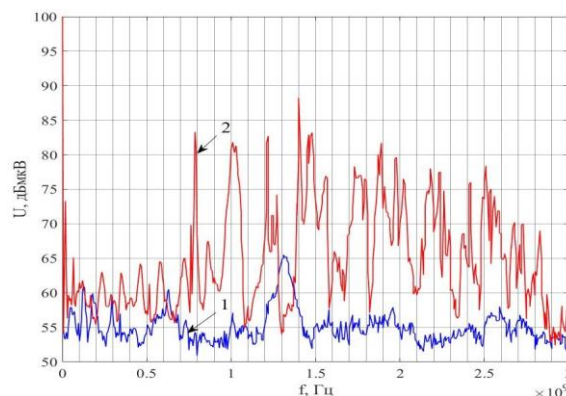


Рис. 25. Частотные диаграммы напряжения перекрестных помех между имитатором бортового прибора и двухпроводной линией: 1 – частотная диаграмма напряжения перекрестных помех на открытом пространстве стола лабораторного стенда; 2 – частотная диаграмма напряжения перекрестных помех во внутреннем пространстве макета приборного модуля.

Учитывая явление возрастания уровней перекрестных помех во внутреннем пространстве закрытых бортовых приборных модулей и конструкционных отсеков летательных, необходимо оценивать на основе экспериментальных исследований с помощью имитаторов бортовых модулей уровни напряжений перекрестных помех электрических жгутов и бортовых приборов.

В разделе 4.4 приведен способ определения минимального расстояния между двухпроводными линиями электрических жгутов для обеспечения допустимого уровня перекрестных помех.

Существует множество способов уменьшения и устранения перекрестных помех в электрических жгутах проводников, таких как: использование экранов для каждого проводника или всего жгута; разделение жгута проводников на ряд жгутов проводников, в которых каждый жгут проводников обеспечивает электромагнитную совместимость; уменьшение амплитуды и частоты сигнала источника помехи; использование фильтров.

Экраны проводников не должны иметь неоднородностей и разрывов с корпусами электрических соединителей. При экранировании жгутов возрастает суммарная масса и стоимость жгутовой сети ЛА. Время монтажа электрических жгутов также увеличится.

В ряде конкретных случаев можно использовать метод разделения проводников на допустимые расстояния в пределах конструкции ЛА для уменьшения перекрестных помех. Способ основан на том, что при увеличении расстояния между корпусом имитатора бортового прибора и двухпроводной

линией- рецептором значение напряжения помех двухпроводной линии рецептора уменьшается.

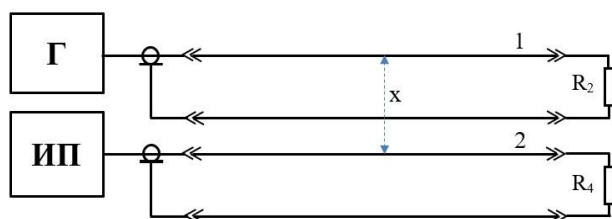


Рис. 26. Схема определения минимального расстояния между жгутом, состоящим из двухпроводных линий –рецепторов и двухпроводной линией-источника перекрестных помех: 1 – двухпроводная линия-источник перекрестных помех; 2 – электрический жгут; x – расстояние между электрическим жгутом и двухпроводной линией-источником перекрестных помех.

Для определения минимального расстояния между жгутом и двухпроводной линией-источником перекрестных помех использовалась установка, схема которой приведена на рис 26. На электропроводной поверхности размещались: макет электрического жгута, состоящий из двух двухпроводных линий; двухпроводная линия –источник перекрестной помехи. Сопротивления нагрузки двухпроводных линий $R_n=50$ Ом. Длина проводников в макете жгуте и двухпроводной линии – источника перекрестных помех равна 1м. К двухпроводной линии 1 источнику перекрестных помех подключен генератор с регулируемым выходным напряжением $E_G = 0 - 999$ мВ. Двухпроводная линия 2 в макете жгуте является рецептором перекрестных помех и подключена к измерительному приемнику HMS-X для определения уровней перекрестных помех. Исследования уровней перекрестных помех на соответствие нормативным значениям стандарта DO-160G проводились для расстояния x между двухпроводной линией- источника помех и жгутом равных 0,1 см; 25 см и 50 см.

На рис 27. изображены дискретные частотные диаграммы перекрестных помех при различных расстояниях между двухпроводными линиями источником и рецептором. Из сравнительного анализа дискретных частотных диаграмм (рис 27) следует, что по мере увеличения расстояния между двухпроводной линией источником и двухпроводной линией рецептором напряжение перекрестных помех, линии рецептора, уменьшается. Из-за явления резонанса это изменение является неравномерным, и значения напряжения перекрестной помехи на некоторых частотах, двухпроводной линии рецептора, уменьшается, например, на частоте 20 МГц, превышает допустимые значения, задаваемые стандартом, даже несмотря на то, что расстояние между двухпроводными линиями, источником и рецептором увеличены до 50 см.

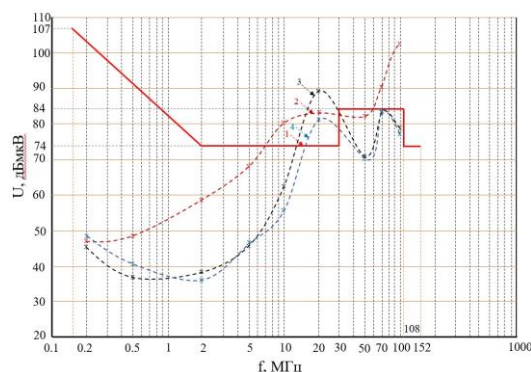


Рис. 27. Дискретные частотные диаграммы перекрестных помех при различных расстояниях между линиями источником и рецептором: 1 – частотные диаграммы напряжения нормативных значений стандарта DO – 160G; 2, 3, 4 – Дискретные частотные диаграммы перекрестных помех между двухпроводными линиями при расстоянии от линии источника до линии рецептора 0,1 см, 25 см, 50 см

Из сравнительного анализа дискретных частотных диаграмм (рис 29) следует, что при увеличении расстояния между корпусом имитатора бортового прибора и двухпроводной линией рецептором значение напряжения помех двухпроводной линии рецептора уменьшается.

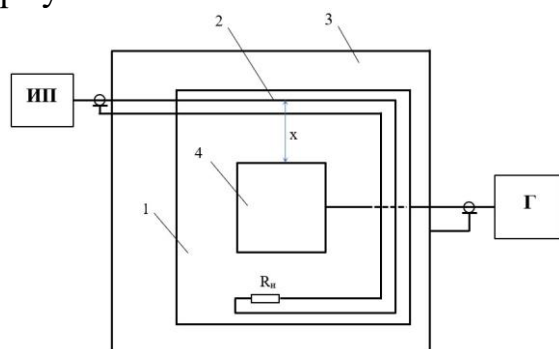


Рис. 28. Схема исследования перекрестных помех между имитатором бортового прибора и проводниками двухпроводной линии

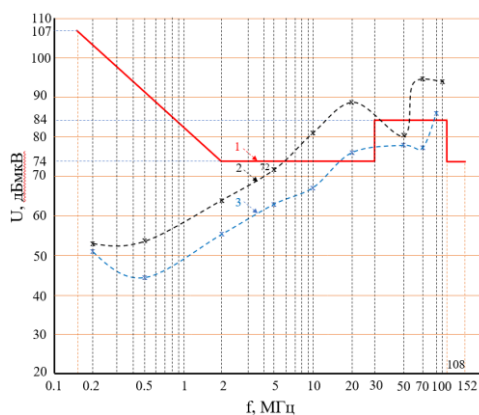


Рис. 29. Дискретные частотные диаграммы значений напряжения перекрестных помех при различных расстояниях между имитатором корпуса бортового прибора и линией рецептором: 1 – частотная диаграмма нормативных значений напряжения стандарта DO –160G; 2 и 3 – дискретные частотные диаграммы значений напряжения перекрестных помех между имитатором бортового прибора и двухпроводной линией при непосредственной близости от корпуса имитатора бортового прибора на расстоянии 0,1 см и на расстоянии 5 см;

Для определения минимального расстояния между имитатором корпуса бортового прибора и двухпроводной линией- рецептором перекрестной помехи использовалась установка, схема которой приведена на рис 28. На рис 29. изображены дискретные частотные диаграммы перекрестных помех при различных расстояниях между линиями источником и рецептором.

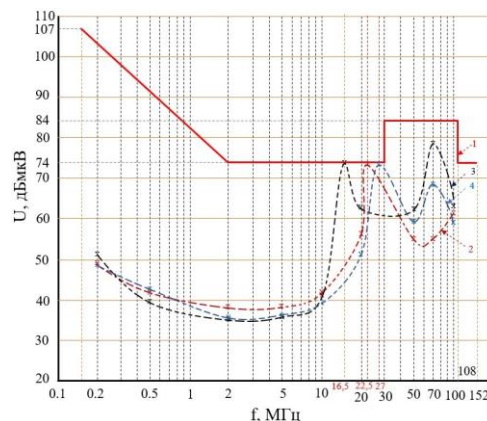


Рис. 30. Частотные диаграммы дискретных значений напряжения перекрестных помех, удовлетворяющие нормативным значениям стандарта DO – 160G при различных расстояниях между двухпроводными линиями источником и рецептором, соответствующие напряжению источника помех: 0,055В на расстоянии 0,1 см; 0,5 В на расстоянии 25 см; 0,36 В на расстоянии 50 см.

На рис 30. приведены частотные диаграммы дискретных значений напряжения перекрестных помех, удовлетворяющие нормативным значениям стандарта DO – 160G при различных расстояниях между двухпроводными линиями источником и рецептором и с значениями напряжения двухпроводной линии -источника помех: 0,055 В на расстоянии 0,1 см; 0,5 В на расстоянии 25 см; 0,36 В на расстоянии 50 см.

Таким образом, если в электрическом жгуте, состоящим из двухпроводных линий передаются высокочастотные сигналы большой амплитуды, из-за

перекрестных помех возможно нарушение требований технических условий или стандарта. В этом случае, необходимо разделять двухпроводные линии и линию источник размещать на определенном расстоянии от жгута с линиями – рецепторами, при котором выполняются нормативные требования. Но из-за ограниченного пространства конструкции отсека летательного аппарата увеличение расстояния между линиями источником и рецептором, при котором уровень перекрестной помехи уменьшается до уровня нормативного значения, определяемого стандартом затруднено. В некоторых случаях необходимо комбинировать увеличение расстояния между линиями источником и рецептором с возможным уменьшением амплитуды высокочастотного сигнала в двухпроводной линии источнике для того, чтобы обеспечить напряжение перекрестной помехи на жгутах проводников в пределах требуемых нормативными значениями технических условий или стандартов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных исследований в диссертационной работе получены следующие результаты:

1. Проведено исследование перекрестных электромагнитных помех между неэкранированными двухпроводными линиями электрического жгутах. Получены сравнительные расчетные и экспериментальные характеристики перекрестных помех между неэкранированными двухпроводными линиями электрических жгутов, распространяющихся через емкостные связи. Установлен частотный диапазон, в пределах которого можно использовать аналитические формулы для расчета перекрестных помех с типовыми значениями сопротивлений нагрузки 50 Ом и 1 МОм.

2. Получены сравнительные расчетные и экспериментальные характеристики перекрестных помех между неэкранированным и экранированным двухпроводными линиями, распространяющихся через емкостные и индуктивные связи. Определен частотный диапазон, в пределах которого расчетные значения перекрестных помех с типовыми значениями сопротивлений нагрузки 50 Ом и 1 МОм, в допустимых пределах, незначительно отличаются от экспериментальных.

3. Предложена топологическая модель в виде ненаправленного графа, отображающая геометрическую схему возможных путей прокладки электрических жгутов в конструкции летательного аппарата.

4. Разработаны алгоритмы определения путей электрического жгута на графе с минимальной суммарной длиной проводников и с учетом перекрестных помех.

5. Проведено экспериментальное исследование перекрестных помех в электрических жгутах с неоднородностями экранов в частотном диапазоне (0,1–3) МГц. Из полученных результатов исследования следует, что наличие соединения, в виде электропроводной перемычки между экраном жгута с неоднородностью в виде зазора и корпусом электрического соединителя не

приводит к уменьшению уровней перекрестных помех. Уровень перекрестных помех незначительно зависит от длины зазора между экраном жгута и корпусом электрического соединителя. Уменьшение уровней перекрестных помех не удается получить даже при малых размерах зазора между экраном жгута и корпусом электрического соединителя и при наличии электропроводной перемычки. Показано, что только при замене электропроводной перемычки непрерывным соединением экрана жгута с корпусом электрического соединителя можно значительно уменьшать уровень перекрестных помех.

6. Проведено экспериментальное исследование перекрестных помех между контактами электрических соединителей жгутов в частотном диапазоне 100 кГц–3 ГГц. Показано, перекрестные помехи между контактами электрических соединителей имеют резко выраженный резонансный характер. Это приводит к тому, что на отдельных частотах уровни перекрестных помех на контактах рецепторах могут превышать уровни помех на контактах источниках. Из полученных результатов исследования следует, что при оценивании уровней перекрестных помех в электрических жгутах бортовой сети летательных аппаратов необходимо учитывать и давать количественную оценку перекрестных помех между контактами электрических соединителей в заданном частотном диапазоне.

7. Проведено экспериментальное исследование перекрестных помех во внутреннем пространстве макета бортового приборного модуля. Показано, что значения напряжения перекрестных помех во внутреннем пространстве макета бортового приборного модуля могут значительно превышать значения напряжения перекрестных помех, измеренных на открытом пространстве стола испытательного стенда. Максимальное превышение напряжения перекрестной помехи во внутреннем объеме макета приборного стенда по сравнению с перекрестной помехой на столе испытательного стенда на частоте 24 МГц составляет 23,9 дБ (15,7 раз). Сформулированы выводы о необходимости проведения измерения уровней перекрестных помех в условиях имитирующих закрытое внутреннее пространство приборных модулей и конструкционных отсеков летательных аппаратов.

8. Предложен способ исследования зависимости перекрестной помехи между неэкранированными двухпроводными линиями электрических жгутов. Предложенный способ позволяет определять минимальные расстояния между проводниками неэкранированных двухпроводных линий, при которых уровень перекрестной помехи не превышает заданные нормативные значения. С помощью предложенного способа экспериментально определены расстояния, при которых уровни перекрестных помех не превышают значения, заданные в технических условиях или нормативные значения стандарта.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ***Публикации в научных изданиях, входящих в перечень ВАК:***

1. *Нгуен Ван Тай., Кириллов В.Ю.* Проектирование трасс электрических жгутов бортовой сети с учетом электромагнитной совместимости// Технологии электромагнитной совместимости. – 2020. – № 2. – С. 29 – 35.
2. *Нгуен Ван Тай., Кириллов В.Ю.* Исследование перекрестных помех в электрических жгутах с неоднородностями экранов// Вестник Московского энергетического института. – 2020. – № 6. – С. 76 – 81.
3. *Нгуен Ван Тай., Кириллов В.Ю.* Перекрестные помехи в электрических соединителях// Электричество. – 2021. – №3. – С. 54 – 59.
4. *Нгуен Ван Тай., Кириллов В.Ю.* Перекрестные помехи во внутреннем пространстве бортового приборного модуля// Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – №2. – С. 563 – 568.

Публикации по теме диссертации в других научных изданиях:

5. *Нгуен Ван Тай., Кириллов В.Ю.* Проектирование электрических жгутов электротехнических комплексов летательных аппаратов// Тезисы докладов 18-ой Международной конференции «Авиация и космонавтика» (г. Москва, МАИ, 18 – 22 ноября 2019г). – Москва, 2019. – С. 100 – 101.
6. *Нгуен Ван Тай., Кириллов В.Ю.* Проектирование трасс электрических жгутов летательных аппаратов с учетом электромагнитной совместимости// Тезисы докладов 26-ой Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (г. Москва, МЭИ, 12–13 марта 2020г). – Москва, 2020. – С. 381.
7. *Нгуен Ван Тай., Кириллов В.Ю.* Исследование перекрестных помех в электрических жгутах// Тезисы докладов 7-ой Всероссийской научно-технической конференции «Техно ЭМС» (г. Москва, МИЭМ, 24 – 26 марта 2020г). – Москва, 2020. – С. 13 – 15.
8. *Нгуен Ван Тай., Кириллов В.Ю.* Исследование перекрестных помех в электрических соединителях// Тезисы докладов 19-ой Международной конференции «Авиация и космонавтика» (г. Москва, МАИ, 23 – 27 ноября 2020г). – Москва, 2020. – С. 293 – 294.
9. *Нгуен Ван Тай., Кириллов В.Ю.* Исследование перекрестных помех электрических жгутов в закрытом пространстве макета приборного модуля// Тезисы докладов XLVII Международной молодёжной научной конференции «Гагаринские чтения» (г. Москва, МАИ, 20 – 23 апреля 2021г). – Москва, 2021. – С. 505.

Подписано в печать: 10.05.2022
Объем: 1,0 усл.п.л
Тираж: 100 экз. Заказ № 1839
Отпечатано в МАИ
125993, г. Москва, А-80, ГСП-3,
Волоколамское шоссе, д. 4