

На правах рукописи



Нгуен Ван Хой

**РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭКРАНОВ
КАБЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ
АППАРАТОВ**

Специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва - 2014

Работа выполнена на кафедре «Теоретическая электротехника» Московского авиационного института (национального исследовательского университета) «МАИ».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой 309 МАИ
Кириллов Владимир Юрьевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор ВШЭ (НИУ)
Саенко Владимир Степанович;

кандидат технических наук,
начальник отдела ФГУП МОКБ «Марс»
Марченко Михаил Владимирович.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики" (МГТУ МИРЭА)

Защита состоится "18" декабря 2014 г. в 11:00 на заседании диссертационного совета Д 212.125.07 при Московском авиационном институте (национальном исследовательском университете) «МАИ» по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4., зал заседаний Ученого Совета МАИ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Московского авиационного института (национального исследовательского университета) МАИ.

Автореферат разослан " " октября 2014 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 212.125.07
канд. тех. наук



Степанов В.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Электромагнитные помехи представляют опасность для летательных аппаратов. Наведенные в кабельных сетях электромагнитные помехи воздействуют на электронные элементы и устройства электротехнических комплексов, ухудшают качество функционирования и в ряде случаев могут приводить их к выходу из строя.

Бортовые кабели летательных аппаратов являются наиболее чувствительными рецепторами электротехнического комплекса к воздействию электромагнитных помех. Анализ их восприимчивости и повышение помехозащищенности являются важной научно-технической задачей, решение которой обеспечит функционирование электротехнических комплексов летательных аппаратов в условиях сложной электромагнитной обстановки.

Для защиты от воздействия электромагнитных помех на бортовые кабели электротехнического комплекса летательного аппарата необходимо обеспечить не только заданную эффективность экранирования, но и минимальную массу кабеля, которая в немалой степени зависит от массы экрана. Проектирование экранов бортовых кабелей летательного аппарата производится на основе анализа заданной электромагнитной обстановки. Параметры экрана кабеля должны поределяться таким образом, чтобы ограничение на спектр напряжения на внутренних проводниках кабеля выполнялось на всем исследуемом диапазоне частот, а также выделяемая энергия не приводила к искажению передаваемых сигналов и не вызывала ухудшения качества функционирования бортовых систем. Разработка методики проектирования многослойных экранов кабелей летательных аппаратов, на основе требований по электромагнитной совместимости для электротехнических комплексов, позволяет достичь минимальной массы экрана и высокой помехозащищенности путем применения методов оптимизации. На основе полученных в результате применения методов оптимизации параметров экрана из известного ряда выбирается кабель с

параметрами экрана, близкими к оптимальным или технологически изготавливается экран с полученными параметрами.

Вопросам проектирования экранов бортовых кабелей летательных аппаратов посвящен ряд работ таких авторов как: Т. Клей; В.Ю. Кириллов; М.В. Марченко; М.М. Томилин и др.

В работах указанных авторов были приведены алгоритмы и результаты проектирования одноэкранных кабелей при воздействии синусоидальных электромагнитных помех на внешние экраны кабелей. Данная работа является развитием предыдущих работ и заключается в решении задач анализа и проектирования двух или более экранов кабелей при воздействии на внешние экраны импульсных кондуктивных электромагнитных помех при заданном уровне помехозащищенности.

Цель диссертационной работы

Целью диссертационной работы является разработка алгоритмов проектирования многослойных экранов бортовых кабелей, которые при минимальной массе обеспечивают защиту электротехнических комплексов летательных аппаратов от воздействия кондуктивных электромагнитных помех.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих задач

- исследовать физическую природу проникновения и распространения электромагнитных помех в электрических цепях и конструкции летательных аппаратов, и воздействия электромагнитных помех на бортовые кабели электротехнических комплексов летательных аппаратов;
- разработать математические модели воздействия кондуктивных электромагнитных помех на внешние экраны и внутренние проводники экранированных кабелей;
- разработать методику расчета токов и напряжений на экранах кабелей при воздействии кондуктивных электромагнитных помех;
- разработать методику расчета напряжений на внутренних проводниках экранированного кабеля при воздействии кондуктивных электромагнитных помех;

- разработать алгоритм проектирования сплошных экранов кабелей электротехнических комплексов летательных аппаратов, для защиты от воздействия импульсных кондуктивных электромагнитных помех;
- разработать алгоритм проектирования оплеточных экранов кабелей с одинарным экранированием для защиты электротехнических комплексов летательных аппаратов от воздействия импульсных кондуктивных электромагнитных помех;
- разработать алгоритм проектирования оплеточных экранов кабелей с двойным экранированием для защиты электротехнических комплексов летательных аппаратов от воздействия импульсных кондуктивных электромагнитных помех.

Методы исследования

При решении сформулированных задач использовались: методы теоретической электротехники, теория приближений, численные методы оптимизации, а также теория функций комплексного переменного и операционное исчисление.

Научная новизна диссертационной работы

Научная новизна данной работы заключается в следующем:

- 1 - построены математические модели воздействия кондуктивных электромагнитных помех на экранированные кабели;
- 2 - разработана методика расчета импульсных синфазных напряжений на внутренних проводниках экранированных кабелей при воздействии кондуктивных электромагнитных помех;
- 3 - получены аналитические зависимости, описывающие переходные процессы, возникающие в экранах кабелей с одинарным и двойным экранированием при воздействии импульсных кондуктивных электромагнитных помех;
- 4 - разработан алгоритм проектирования сплошных экранов кабелей при воздействии импульсных кондуктивных электромагнитных помех;

5 - разработан алгоритм проектирования оплеточных экранов кабелей с одинарным экранированием для обеспечения требуемых уровня помехозащищенности и минимальной массы при воздействии импульсных кондуктивных электромагнитных помех;

6 - разработан алгоритм проектирования оплеточных экранов кабелей с двойным экранированием для обеспечения требуемых уровня помехозащищенности и минимальной массы при воздействии импульсных кондуктивных электромагнитных помех.

Практическое значение диссертационной работы

Практическое значение данной работы заключается в следующем:

1 - предложенная методика расчета переходных процессов на внутренних проводниках позволяет моделировать реакцию экранированного кабеля на воздействие импульсных кондуктивных электромагнитных помех;

2 - разработано программное обеспечение, реализующее процесс проектирования сплошных экранов бортовой кабельной сети летательных аппаратов с требуемыми помехозащищенностью и массовыми показателями;

3 - реализованный алгоритм в компьютерной среде «MATLAB» позволяет автоматизировать процесс проектирования оплеточных экранов кабелей с одинарным и двойным экранированием в соответствии с требуемыми исходными данными.

Основные положения, выносимые на защиту

- модели воздействия на экранированные кабели кондуктивных электромагнитных помех;
- методика расчета импульсных синфазных напряжений на внешних экранах и внутренних проводниках экранированных кабелей;
- алгоритм проектирования сплошных экранов кабелей при воздействии импульсных кондуктивных электромагнитных помех;
- алгоритм проектирования оплеточных экранов кабелей с одинарным экранированием и методика выбора параметров экранов кабелей;

- алгоритм проектирования оплеточных экранов кабелей с двойным экранированием.

Апробация работы и публикации

По теме диссертационной работы опубликовано 4 печатных работ, из них 3 в изданиях, рекомендованных ВАК. Научные и прикладные результаты докладывались и обсуждались на Московской молодежной научно-практической конференции «Инновация в авиации и космонавтике - 2013».

Личный вклад автора

Личный вклад автора состоит в разработке моделей воздействия кондуктивных электромагнитных помех на экранированные кабели и методики расчета импульсных синфазных напряжений на внутренних проводниках, разработке алгоритмов проектирования сплошных и оплеточных экранов кабелей с одинарным и двойным экранированием.

Структура и объем диссертационной работы

Диссертационная работа изложена на ста тридцати восьми машинописных страницах и состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников, включающего пятьдесят шесть наименований и приложения. Иллюстрационный материал содержит пятьдесят один рисунок и три таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование актуальности темы диссертационной работы, сформированы цели исследования, аргументирована научная новизна, показана практическая значимость полученных результатов и представлены положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведена классификация электромагнитных помех, систематизированы источники электромагнитных помех и их параметры. Проведено исследование физической природы возникновения, распространения и воздействия кондуктивных электромагнитных помех в конструкции и электрических цепях электротехнических комплексов летательных аппаратов.

Распространяясь в пространстве (в проводящей или непроводящей среде), электромагнитные помехи воздействуют на элементы и устройства электротехнических комплексов летательных аппаратов (рис. 1).

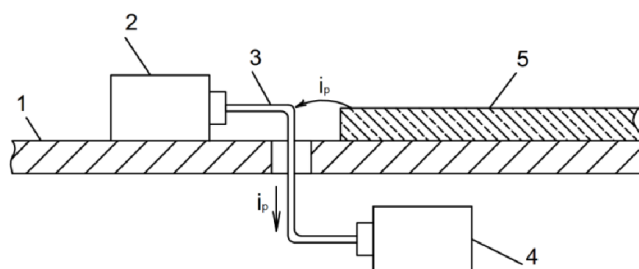


Рис. 1. Кондуктивные электромагнитные помехи в виде тока от электростатического разряда на кабель, соединяющий наружный и внутренний бортовые приборы: 1 – корпус летательного аппарата; 2 – наружный бортовой прибор; 3 – бортовой кабель, соединяющий наружный и внутренний бортовые приборы; 4 – внутренний бортовой прибор; 5 – диэлектрическое покрытие; i_p – ток электростатического разряда.

Проникновение внешних электромагнитных помех может происходить через кабели, соединяющие наружные и внутренние бортовые приборы или через антенны. Внутренние помехи создаются электрическими бортовыми устройствами и распространяются по электрическим цепям бортовой кабельной сети летательного аппарата.

Кондуктивные электромагнитные помехи воздействуют на электропроводные элементы конструкции летательного аппарата, экраны кабелей, на их центральные проводники и проявляются в виде импульсных токов в конструкции и в бортовой кабельной сети. Конструкционные токи, протекая по экранам кабелей, через емкостные и индуктивные связи индуцируют в центральных проводниках импульсные токи, и соответственно, напряжения на входе бортовых приборов (рис. 2).

Распространяясь по электрическим цепям бортовых кабелей, кондуктивные электромагнитные помехи проникают через кабельные разъемы приборов и устройств электротехнического комплекса на проводящие дорожки печатных плат и через выводы полупроводниковых приборов и интегральных микросхем воздействуют на их внутреннюю структуру.

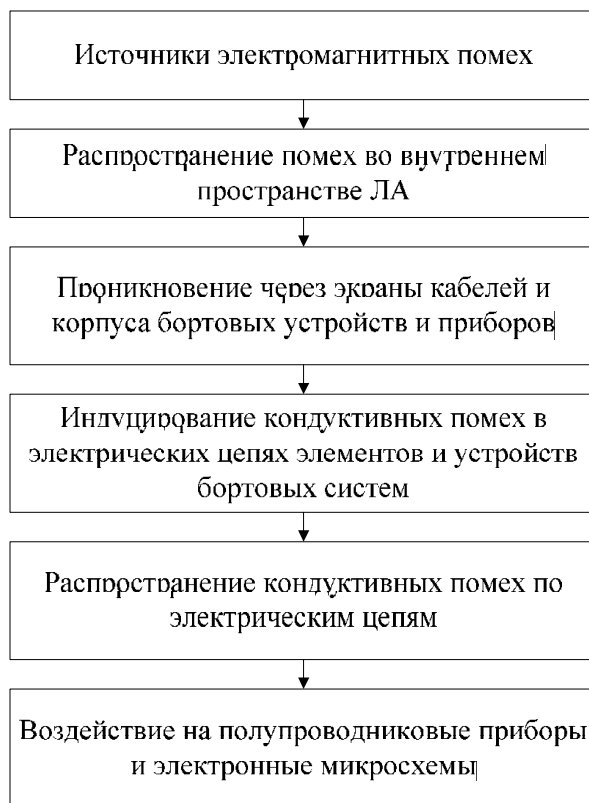


Рис. 2. Схема проникновения и распространения электромагнитных помех во внутреннем пространстве конструкции ЛА.

Работоспособность электронной аппаратуры при воздействии импульсных кондуктивных электромагнитных помех зависит от помехозащищенности бортовых кабелей электротехнического комплекса летательного аппарата.

Во второй главе приведены эквивалентные схемы и математические модели воздействия кондуктивных электромагнитных помех на экраны и внутренние проводники экранированных кабелей, представленных как электрически коротких, так и электрически длинных цепей.

Воздействие импульсных кондуктивных электромагнитных помех на кабели электротехнического комплекса летательного аппарата приводит к появлению на внешних экранах импульсных токов и напряжений, которые индуцируют токи и напряжения на внутренних экранах и, соответственно, токи и напряжения на внутренних проводниках (рис. 3).

В случае если длительность фронта импульса кондуктивного тока, протекающего по экрану кабеля, намного больше времени его распространения по длине кабеля, то кабель считается электрически коротким, т.е. методы расчета ведутся для цепей с сосредоточенными параметрами.

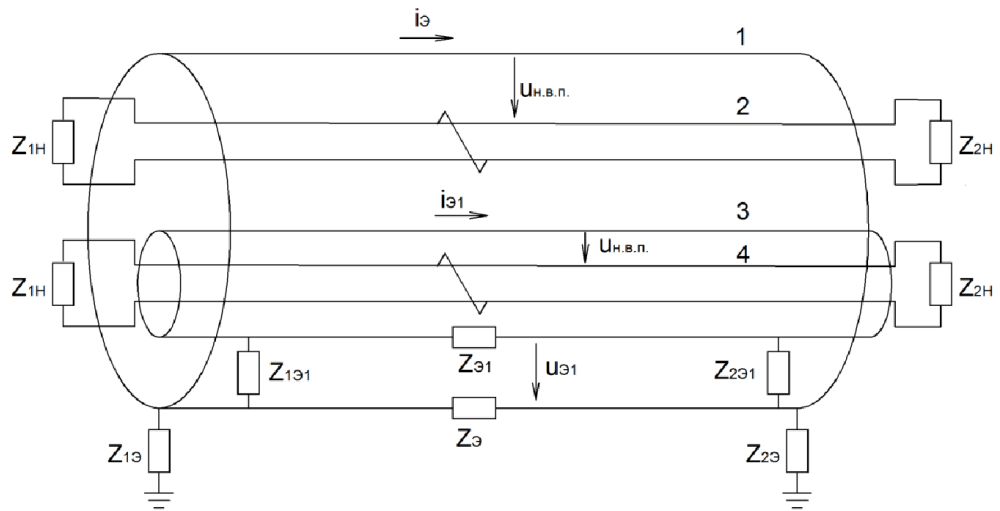


Рис. 3. Схема экранированного кабеля при воздействии кондуктивного тока: 1 – внешний экран кабеля; 2 – неэкранированная витая пара; 3 – экран витой пары; 4 – неэкранированная витая пара; $i_{э}$ – индуцированный ток на внешнем экране; $i_{э1}$ – ток на экране витой пары; $Z_{н.1}, Z_{н.2}$ – сопротивление нагрузки витой пары; $Z_{1.э}, Z_{2.э}$ – сопротивления заземления внешнего экрана кабеля; $Z_{1.э1}, Z_{2.э1}$ – сопротивления соединений экрана витой пары и внешнего экрана кабеля; $Z_{э}, Z_{э1}$ – сопротивления соответственно внешнего и внутреннего экранов.

Напряжения на внутреннем проводнике кабеля с одинарным $U_{в.н.}(p)$ и двойным экранированием $U_{в.н.1}(p)$ выражаются соответственно по формулам

$$U_{в.н.}(p) = I_{э}(p) \cdot Z_{св.}(p) \cdot \ell,$$

$$U_{в.н.1}(p) = I_{э}(p) \cdot \frac{Z_{св.} \cdot Z_{св.1}}{(Z_{э} + Z_{э1} + Z_{1э1} + Z_{2э1} + pL_{12})} \cdot \ell,$$

где, ℓ – длина кабеля; $Z_{св.}(p), Z_{св.1}(p)$ – сопротивления связи; $Z_{1э1}, Z_{2э1}$ – внутренние сопротивления заземления внутреннего экрана; $Z_{1э}, Z_{2э1}$ – сопротивления экранов; $L_{12} = (\mu_0 / 2\pi) \ln(a_1 / a_2)$ – взаимная индуктивность зазора между экранами; a_1 – внутренний радиус внешнего экрана; a_2 – внешний радиус внутреннего экрана; $I_{э}(p)$ – кондуктивный ток на внешнем экране.

В случае если длительность фронта импульса кондуктивного тока соизмерима со временем распространения импульса тока по длине кабельной сети, то кабельную сеть следует рассматривать как цепь с распределенными

параметрами, а токи и напряжения определять с использованием методов расчета цепей с распределенными параметрами (рис. 4).

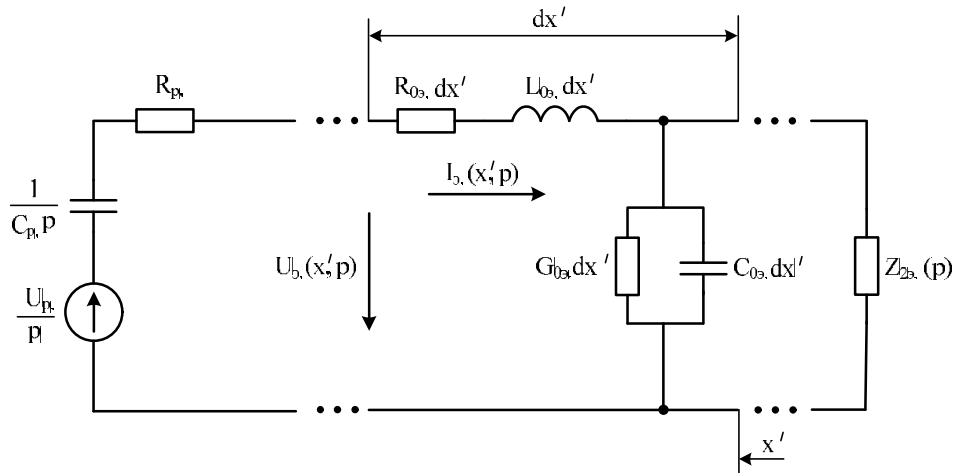


Рис. 4. Эквивалентная схема в операторной форме в случае воздействия кондуктивного тока на внешний экран кабеля: R_p – сопротивление плазменного канала разряда; C_p – ёмкость разряда; U_p – напряжение разряда; $R_{0э}$, $L_{0э}$, $G_{0э}$, $C_{0э}$ – распределённые параметры внешнего экрана кабеля; $Z_{2э}(p)$ – сопротивление заземления внешнего экрана.

Напряжение $U_э(x', p)$ и ток $I_э(x', p)$ на внешнем экране определяются из решения системы уравнений при заданных начальных условиях

$$\begin{cases} \frac{d^2 U_э(x', p)}{dx'^2} = \gamma_э^2(p) \cdot U_э(x', p), \\ \frac{d^2 I_э(x', p)}{dx'^2} = \gamma_э^2(p) \cdot I_э(x', p), \end{cases}$$

где $\gamma_э(p) = \sqrt{(R_{0э} + pL_{0э}) \cdot (G_{0э} + pC_{0э})}$ – коэффициент распространения в операторной форме.

Напряжение $U_{э.н.}(x', p)$ и ток $I_{э.н.}(x', p)$ на внутреннем проводнике кабеля с одинарным экранированием в соответствии с рис. 5 находятся из решения уравнений

$$\begin{aligned} \frac{d^2 U_{э.н.}(x', p)}{dx'^2} - \gamma_{э.н.}^2(p) \cdot U_{э.н.}(x', p) &= \frac{dI_{э.н.}(x', p)}{dx'} \cdot Z_{св.}(p) - \\ &- U_{э.н.}(x', p) \cdot (R_{0э.н.} + pL_{0э.н.}) \cdot Y_{св.}(p). \end{aligned} \quad (1)$$

$$\frac{d^2 I_{\text{в.н.}}(x', p)}{dx'^2} - \gamma_{\text{в.н.}}^2(p) \cdot I_{\text{в.н.}}(x', p) = \frac{dU_{\text{э.}}(x', p)}{dx'} \cdot Y_{\text{св.}}(p) - I_{\text{э.}}(x', p) \cdot (G_{0\text{в.н.}} + pC_{0\text{в.н.}}) \cdot Z_{\text{св.}}(p), \quad (2)$$

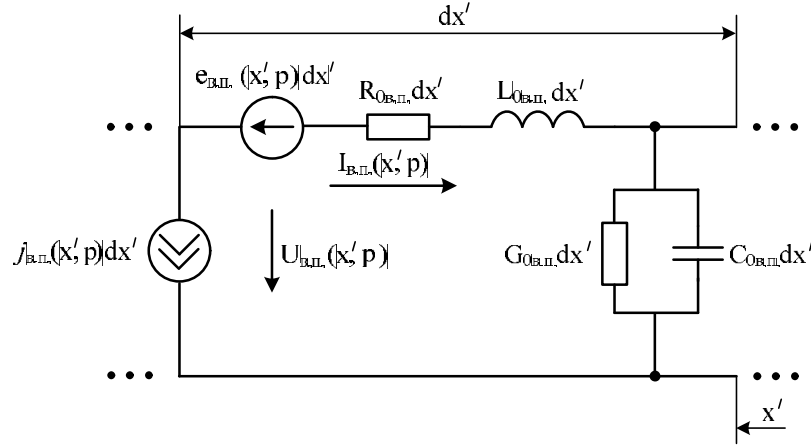


Рис. 5. Эквивалентная схема внутреннего проводника кабеля с одинарным экранированием при воздействии кондуктивного тока на внешний экран: $R_{0\text{в.н.}}$, $L_{0\text{в.н.}}$, $G_{0\text{в.н.}}$, $C_{0\text{в.н.}}$ – распределённые параметры внутреннего проводника; $e_{\text{в.н.}}(x', p) = Z_{\text{св.}}(p) \cdot I_{\text{э.}}(x', p)$ – ЭДС на элементарном участке внутреннего проводника в операторной форме; $j_{\text{в.н.}}(x', p) = Y_{\text{св.}}(p) \cdot U_{\text{э.}}(x', p)$ – источник тока на элементарном участке внутреннего проводника в операторной форме.

Формулы для расчета токов и напряжений на внутренних проводниках кабелей с двойным экранированием аналогичны уравнениям (1) и (2).

В третьей главе проведен расчет синфазных наведенных токов и напряжений на экранах и внутренних проводниках экранированных кабелей при воздействии импульсных кондуктивных электромагнитных помех на внешние экраны.

Сопротивления связи плетеного экрана $Z_{\text{св.}}(\omega)$ определяются по формуле

$$Z_{\text{св.}}(\omega) = \frac{4(1+j) \cdot d}{\pi d^2 N_{\text{жс.}} \cdot N_n \cdot \sigma_{\text{э.}} \cdot \delta(\omega) \cdot \cos \alpha \cdot \text{sh} \left[\frac{(1+j) \cdot d}{\delta(\omega)} \right]} + j\omega M. \quad (3)$$

где $\sigma_{\text{э.}}$ – удельная проводимость материала, из которого изготовлен экран; $\delta(\omega) = \sqrt{2 / (\omega \cdot \mu_a \cdot \sigma_{\text{э.}})}$ – толщина скин-слоя материала, из которого изготовлен

экран; d – диаметр проволоки, из которой изготовлен экран; $\mu_a = \mu_r \cdot \mu_0$ – абсолютная магнитная проницаемость; μ_r – относительная магнитная проницаемость; $\mu_0 \approx 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\Gamma H}{M}$ – магнитная постоянная; $N_{ж.}$ – число жгутов в оплётке; N_n – число проволок в жгуте; $\alpha = \arctg(4\pi r_0 P / N_{ж.})$ – угол плетения; r_0 – радиус экрана бортового кабеля.

Для расчёта токов и напряжений на экранах и проводниках экранированного кабеля модуль частотной характеристики сопротивлений связи необходимо аппроксимировать, преобразуя к виду, более удобному для определения временных характеристик тока и напряжения. После аппроксимации, сопротивление связи плетеного экрана определяется по формуле

$$Z_{св.} = \frac{R_0}{\sum_{n=0}^N \frac{\tau_s^n}{(2n+1)!} \cdot p^n} + pM, \quad (4)$$

где $R_0 = 4 / (\pi d^2 N_{II} N_{Ж} \sigma_C \cos \alpha)$ – сопротивление плетеного экрана постоянному току на единицу длины; $\tau_s = \mu_0 \sigma_C d^2$ – постоянная времени проникновения через экран; N – натуральное число, при котором имеет место допустимая погрешность между исходной и аппроксимирующей функциями.

Результат аппроксимации модуля сопротивления связи (3) модулем функции (4) при $p = j\omega$ представлен на рис. 5 для плетеного экрана со следующими параметрами: $r_0 = 2 \text{ мм}$, $d = 0,1 \text{ мм}$, $\sigma_3 = 5,556 \cdot 10^7 \text{ См / м}$, $N_{II} = 5$, $N_{Ж} = 40$, $\alpha = 30^\circ$.

Распространенный вид кондуктивного тока, протекающего по внешнему экрану кабеля, описывается формулой

$$i(t) = I_m (e^{-\delta_1 t} - e^{-\delta_2 t}) \doteq I_m \frac{\delta_2 - \delta_1}{(p + \delta_1)(p + \delta_2)}, \quad (5)$$

где, например, $I_m = 60 \text{ А}$ – амплитуда кондуктивного тока; $\delta_1 = 0,0138 \text{ с}^{-1}$, $\delta_2 = 1,6248 \text{ с}^{-1}$ – параметры, характеризующие форму импульсного тока.

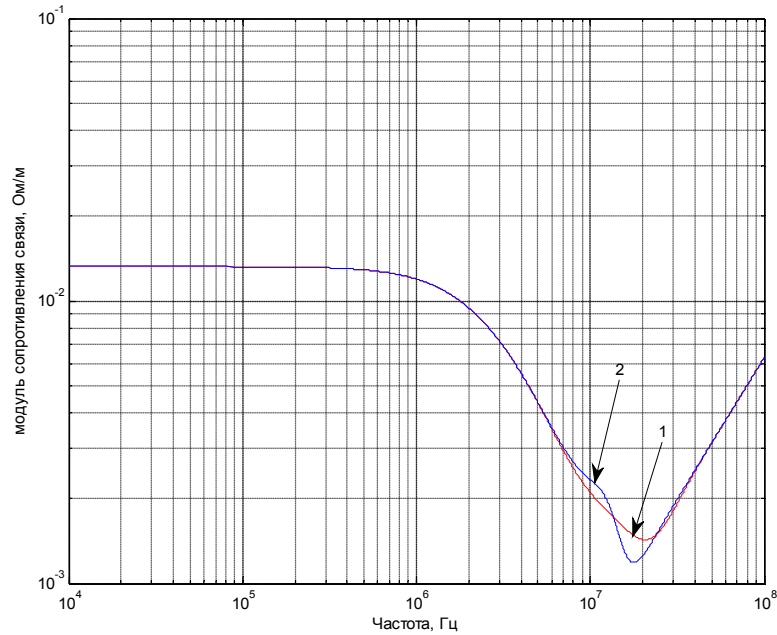


Рис. 5. Аппроксимация модуля сопротивления связи (3) функцией (4) при $N = 5$ для плетеного экрана со следующими параметрами: $r_0 = 2\text{мм}$, $d = 0,1\text{мм}$, $\sigma_э = 5,556 \cdot 10^7 \text{См/м}$, $N_{II} = 5$, $N_{Ж} = 40$, $\alpha = 30^\circ$

1 – теоретическая кривая, построенная по (3);

2 – аппроксимирующая кривая, построенная по (4).

Если кабель можно считать электрически коротким, то при воздействии импульсных кондуктивных электромагнитных помех на внешний экран кабеля с одинарным экранированием, временная зависимость напряжения на внутреннем проводнике определяется по формуле

$$u_{в.н.}(t) = I_m (\delta_2 - \delta_1) \ell [R_{0э} \sum_{i=1}^{N+2} \frac{e^{-p_i t}}{\frac{d}{dp} [(p + \delta_1)(p + \delta_2)] \sum_{n=0}^N \frac{\tau_s^n}{(2n+1)!} \cdot p^n} \Big|_{p=p_i} +$$

$$+ M_э \sum_{j=1}^2 \frac{p_j e^{-p_j t}}{\frac{d}{dp} [(p + \delta_1)(p + \delta_2)] \Big|_{p=p_j}}].$$

Временная зависимость напряжения на внутреннем проводнике кабеля с двойным экранированием определяется по формуле

$$\begin{aligned}
u_{\text{в.н.}}(t) = & I_m(\delta_2 - \delta_1)\ell \left[M_{\text{э.}} M_{\text{э.1}} \sum_{i=1}^3 \frac{p_j^2 e^{-p_j t}}{\frac{d}{dp} [(p + \delta_1)(p + \delta_2)(Z_{\text{э.э.1}} + Z_{12\text{э.1}} + pL_{12})]} \Big|_{p=p_i} + \right. \\
& + M_{\text{э.}} R_{0\text{э.1}} \sum_{i=1}^{M+3} \frac{p_i e^{-p_i t}}{\frac{d}{dp} [(p + \delta_1)(p + \delta_2)(Z_{\text{э.э.1}} + Z_{12\text{э.1}} + pL_{12}) \sum_{m=0}^M \frac{\tau_{\text{СЭ.1}}^m}{(2m+1)!} \cdot p^m]} \Big|_{p=p_i} + \quad (6) \\
& + M_{\text{э.1}} R_{0\text{э.}} \sum_{i=1}^{N+3} \frac{p_i e^{-p_i t}}{\frac{d}{dp} [(p + \delta_1)(p + \delta_2)(Z_{\text{э.э.1}} + Z_{12\text{э.1}} + pL_{12}) \sum_{n=0}^N \frac{\tau_{\text{СЭ.}}^n}{(2n+1)!} \cdot p^n]} \Big|_{p=p_i} + \\
& \left. + \sum_{i=1}^{M+N+3} \frac{R_{0\text{э.}} R_{0\text{э.1}} e^{-p_i t}}{\frac{d}{dp} [(p + \delta_1)(p + \delta_2)(Z_{\text{э.э.1}} + Z_{12\text{э.1}} + pL_{12}) \sum_{n=0}^N \frac{\tau_{\text{СЭ.}}^n}{(2n+1)!} \cdot p^n \sum_{m=0}^M \frac{\tau_{\text{СЭ.1}}^m}{(2m+1)!} \cdot p^m]} \Big|_{p=p_i} \right].
\end{aligned}$$

На рис. 6 представлена временная диаграмма напряжения на внутреннем проводнике кабеля с двойным экранированием в соответствии с формулой (6).

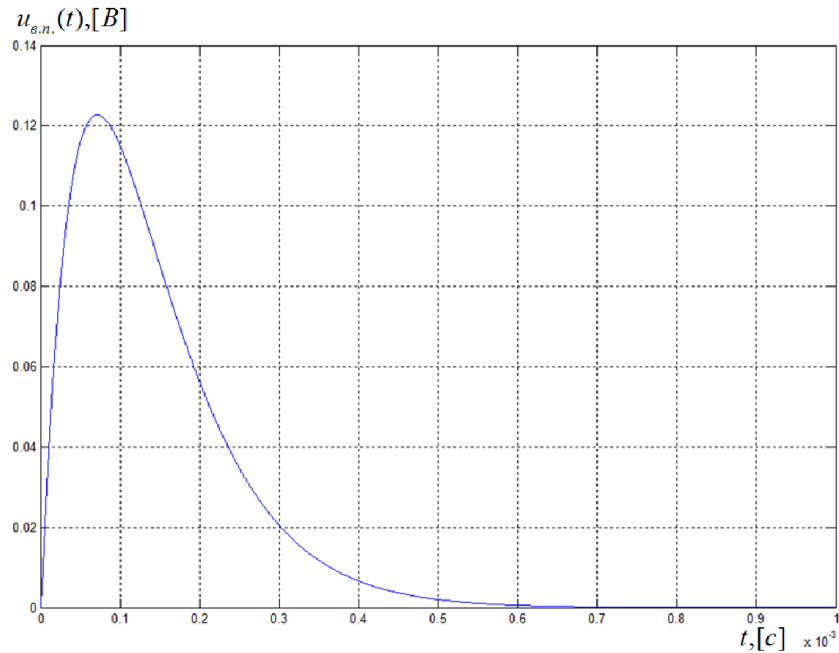


Рис. 6. Временная диаграмма синфазного напряжения на внутреннем проводнике кабеля с двойным экранированием длиной $\ell = 1\text{ м}$ с параметрами внешнего кабеля: $r_0 = 6\text{ мм}$, $d = 0,25\text{ мм}$, $N_{\text{II}} = 3$, $N_{\text{Ж}} = 54$, $\alpha = 12,8^\circ$ и внутреннего кабеля $r_0 = 4\text{ мм}$, $d = 0,052\text{ мм}$, $N_{\text{II}} = 7$, $N_{\text{Ж}} = 50$, $\alpha = 70^\circ$ при протекании импульсного кондуктивного тока виде (5) по внешнему экрану с параметрами $I_m = 60\text{ А}$, $\delta_1 = 0,0138 \cdot 10^6\text{ с}^{-1}$, $\delta_2 = 1,6248 \cdot 10^6\text{ с}^{-1}$.

Если кабель нужно рассматривать как электрически длинный, под воздействием импульсных кондуктивных электромагнитных помех (7), на внешнем экране кабеля, временные зависимости напряжения и тока определяются по формулам

$$\begin{aligned}
 U_{\text{в}}(x', p) \doteq u_{\text{в}}(x', t) &= \sum \frac{I_m \cdot (\delta_2 - \delta_1) \cdot A_{1\text{в}}(p) \cdot e^{p \cdot t}}{(2p + \delta_1 + \delta_2) B_{\text{в}}(p)} \Bigg|_{\substack{p=-\delta_1 \\ p=-\delta_2}} + \\
 &+ \sum_{i=1; j=1}^n \frac{I_m \cdot (\delta_2 - \delta_1) \cdot A_{1\text{в}}(p)}{(p + \delta_1) \cdot (p + \delta_2) \cdot \frac{\partial}{\partial p} B_{\text{в}}(p)} \cdot e^{p \cdot t} \Bigg|_{\substack{p=p_i; \\ p=p_j}}, \quad (7) \\
 I_{\text{в}}(x', p) \doteq i_{\text{в}}(x', t) &= \sum \frac{I_m \cdot (\delta_2 - \delta_1) \cdot A_{2\text{в}}(p) \cdot e^{p \cdot t}}{(2p + \delta_1 + \delta_2) B_{\text{в}}(p)} \Bigg|_{\substack{p=-\delta_1 \\ p=-\delta_2}} + \\
 &+ \sum_{i=1; j=1}^n \frac{I_m \cdot (\delta_2 - \delta_1) \cdot A_{2\text{в}}(p)}{(p + \delta_1) \cdot (p + \delta_2) \cdot \frac{\partial}{\partial p} B_{\text{в}}(p)} \cdot e^{p \cdot t} \Bigg|_{\substack{p=p_i; \\ p=p_j}},
 \end{aligned}$$

где

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

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

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

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial}{\partial p} B_{\text{в}}(p) &= \left[pL_{2\text{в}} - \frac{1}{p^2 \cdot C_{2\text{в}}} \right] \cdot \gamma_{\text{в}}(p) \cdot \text{sh}[\gamma_{\text{в}}(p) \cdot \ell] + \\
 &+ Z_{2\text{в}}(p) \cdot [\text{sh}[\gamma_{\text{в}}(p) \cdot \ell] + \ell \cdot \gamma_{\text{в}}(p) \cdot \text{ch}[\gamma_{\text{в}}(p) \cdot \ell]] \cdot \frac{\partial}{\partial p} B_{0\text{в}}(p) + \\
 &+ L_{0\text{в}} \cdot \text{ch}[\gamma_{\text{в}}(p) \cdot \ell] + \ell \cdot (R_{0\text{в}} + pL_{0\text{в}}) \cdot \text{sh}[\gamma_{\text{в}}(p) \cdot \ell] \cdot \frac{\partial}{\partial p} B_{0\text{в}}(p),
 \end{aligned}$$

$$\frac{\partial}{\partial p} B_{0\text{в}}(p) = \frac{L_{0\text{в}} \cdot (G_{0\text{в}} + pC_{0\text{в}}) + C_{0\text{в}} \cdot (R_{0\text{в}} + pL_{0\text{в}})}{2 \cdot \gamma_{\text{в}}(p)}.$$

$$Z_{2э.}(p) = R_{2э.} + pL_{2э.} + \frac{1}{pC_{2э.}}; R_{2э.}, L_{2э.}, C_{2э.} - \text{соответственно сопротивление,}$$

индуктивность и ёмкость заземления экрана кабеля;

Пример временной диаграммы напряжения $u_{э.}(x', t)$, построенной на основе формулы (7), приведен на рис. 7.

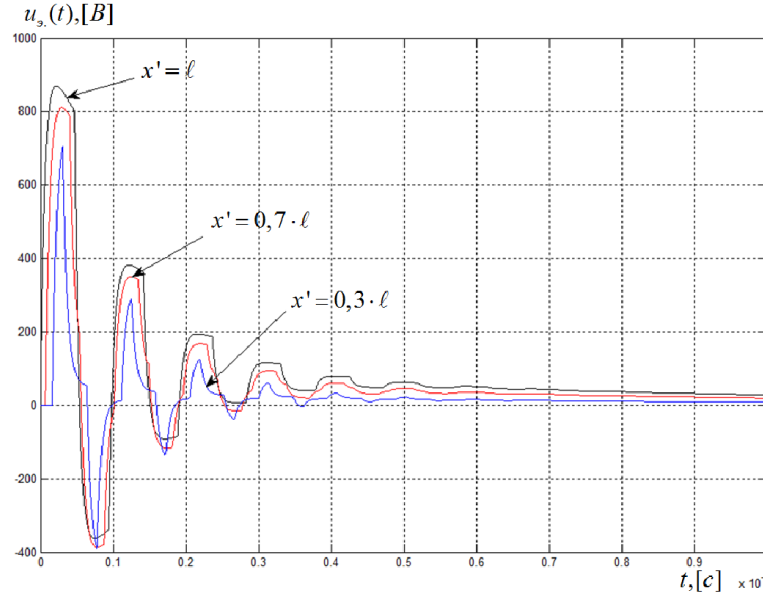


Рис. 7. Временная диаграмма импульсного напряжения (7) при воздействии на экран кабеля длиной $\ell = 50 \text{ м}$ кондуктивного тока (5) с параметрами $I_m = 60 \text{ А}$; $\delta_1 = 0,0138 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$; $\delta_2 = 1,6248 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$ на внешнем экране кабеля с параметрами $Z_{2э.} = 0$; $R_{0э.} \approx 0,048 \text{ Ом/м}$; $L_{0э.} \approx 77 \cdot 10^{-8} \text{ Гн/м}$; $G_{0э.} \approx 4 \cdot 10^{-4} \text{ См/м}$; $C_{0э.} \approx 29 \cdot 10^{-10} \text{ Ф/м}$ в точках $x' = \ell$, $x' = 0,7\ell$ и $x' = 0,3\ell$.

Для электрически длинного кабеля с одинарным экранированием операторное напряжение $U_{э.н.}(x', p)$ на внутреннем проводнике определяется в виде

$$U_{э.н.}(x', p) = \hat{U}_{э.н.}(x', p) + U_{э.н.}^*(x', p),$$

$$\hat{U}_{э.н.}(x', p) = \frac{U_{э.н.}(0, p) \operatorname{ch}[\gamma_{э.н.}(p)(x' - \ell)] + U_{э.н.}(\ell, p) \operatorname{sh}[\gamma_{э.н.}(p)x']}{\operatorname{sh}[\gamma_{э.н.}(p)\ell]},$$

Частное решение $U_{э.н.}^*(x', p)$ является суммой двух частных операторных решений

$$U_{э.н.}^*(x', p) = U_{1э.н.}^*(x', p) + U_{2э.н.}^*(x', p)$$

$$U_{1\varepsilon.n.}^*(x', p) = \frac{Z_{св.}(p)\gamma_{\varepsilon.}(p)}{\gamma_{\varepsilon.}^2(p) - \gamma_{\varepsilon.n.}^2(p)} [D_1 sh[\gamma_{\varepsilon.}(p)x'] + D_2 sh[\gamma_{\varepsilon.}(p)x']].$$

$$U_{2\varepsilon.n.}^*(x', p) = -\frac{Y_{св.}(p)(R_{\varepsilon.n.} + pL_{\varepsilon.n.})}{\gamma_{\varepsilon.}^2(p) - \gamma_{\varepsilon.n.}^2(p)} [D_3 sh[\gamma_{\varepsilon.}(p)x'] + D_4 ch[\gamma_{\varepsilon.}(p)x']].$$

$$\text{где } D_3 = \frac{U_p Z_{2\varepsilon.}(p)}{pB_{\varepsilon.}(p)}; D_4 = D_3 \frac{Z_{\varepsilon.\varepsilon.}(p)}{Z_{2\varepsilon.}(p)} = D_1 \frac{Z_{\varepsilon.\varepsilon.}^2(p)}{Z_{2\varepsilon.}(p)};$$

$U_{\varepsilon.n.}(\ell, p)$ и $U_{\varepsilon.n.}(0, p)$ определяются из граничных условий

$$U_{\varepsilon.n.}(\ell, p) = I_{\varepsilon.}(\ell, p)Z_{св.}(p); U_{\varepsilon.n.}(0, p) = I_{\varepsilon.}(0, p)Z_{св.}(p).$$

В четвертой главе приведены алгоритмы проектирования сплошных и плетеных экранов кабелей для защиты электротехнических комплексов летательных аппаратов от воздействия импульсных кондуктивных электромагнитных помех, а также результаты экспериментальных исследований сопротивления связи и эффективности экранирования кабеля.

Импульсный ток, протекающий по экрану кабеля, индуцирует на внутренних проводниках импульс напряжения, амплитуда и форма которого не должны приводить к нарушению работы устройств, соединяемых кабельной сетью.

Разработанные алгоритмы проектирования экранов кабелей позволяет обеспечить требуемую помехозащищенность в сочетании с достижением минимальной массы экрана.

При проектировании экранов кабелей начальным условием являются следующие исходные данные:

- параметры импульсного кондуктивного тока, протекающего по экрану бортовой кабельной сети летательного аппарата;
- ограничения на амплитуду и форму импульса внутреннего синфазного напряжения на заданном частотном диапазоне;
- заданная максимально допустимая величина массы проектируемого экрана m_0 на единицу длины.

На рис. 8 представлена блок-схема алгоритма проектирования плетеного экрана.

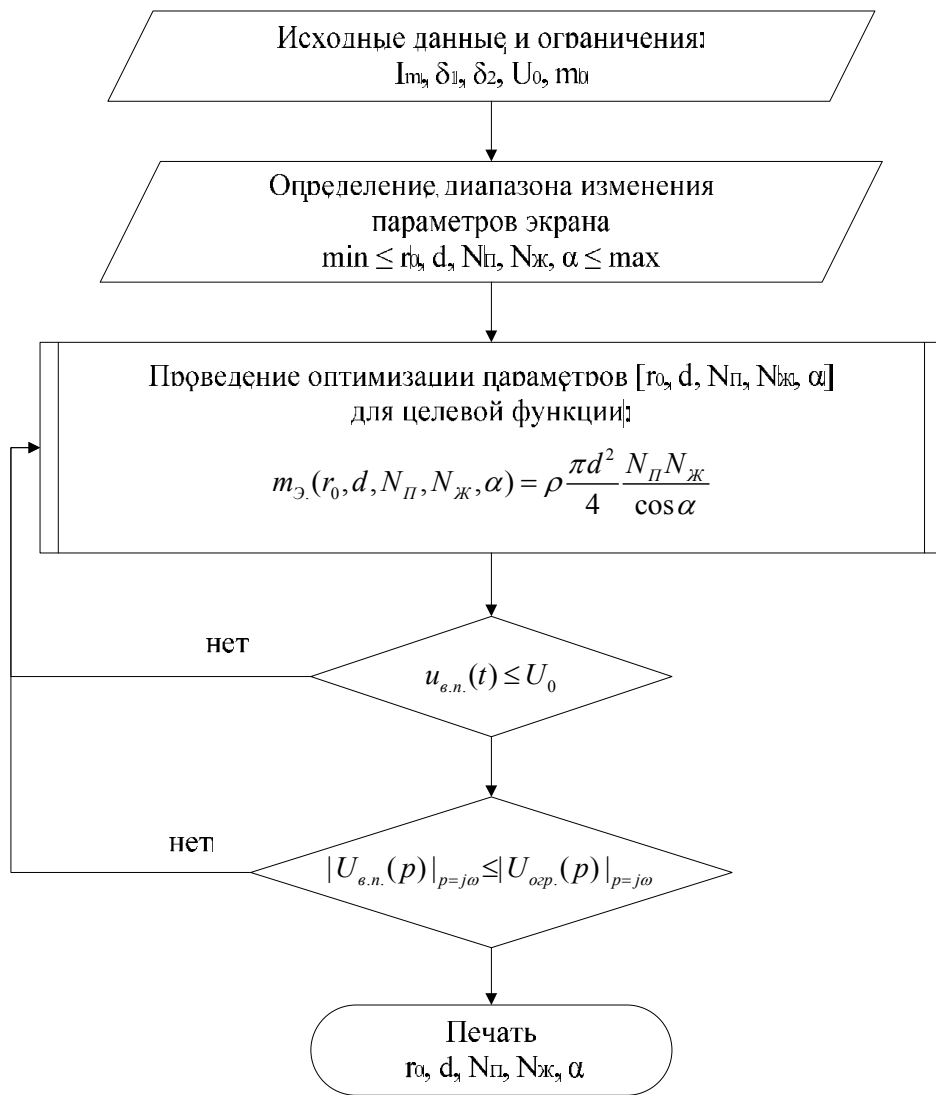


Рис. 8. Блок-схема работы алгоритма, определяющего оптимальные параметры плетеного экрана кабеля с одинарным экранированием.

Применение разработанного алгоритма для определения параметров плетеного экрана позволяет получить следующие результаты.

По экрану кабеля длиной $\ell = 1 \text{ м}$ при протекании импульсного кондуктивного тока (5) и выполнении ограничения на амплитудное значение синфазного напряжения на внутреннем проводнике $U_0 \leq 0,1B$, параметры экрана кабеля имеют вид:

$$r_0 = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \quad d = 0,24 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \quad N_{\text{п}} = 7; \quad N_{\text{ж}} = 37; \quad \alpha = 10^0;$$

$$m = 99,4 \text{ г / м}; \quad W = \frac{u_{\text{в.н.}}^2(t)}{R_{\text{н}}} = 7,05 \cdot 10^{-9} \text{ Дж}$$

На рис. 9 представлена графическая зависимость массы экрана от амплитудного значения синфазного напряжения на внутреннем проводнике

кабеля, предназначенная для выбора наиболее подходящего варианта из используемых на практике плетеных экранов. Расположение точек на рис. 9 определяется значениями синфазных напряжения внутренних проводников и массами экранов кабелей различных марок. В данном случае не один из указанных кабелей не удовлетворяет ограничению на синфазное напряжение $U_0 = 0,1B$.

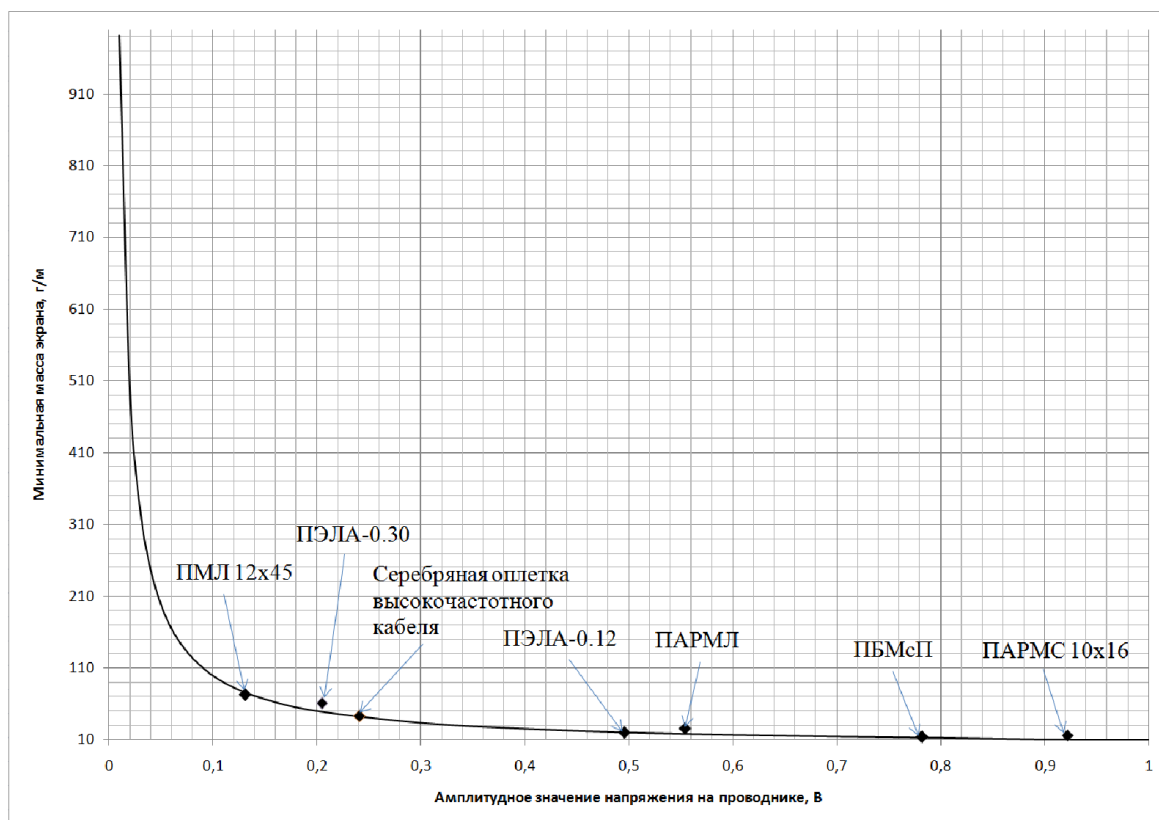


Рис. 9. графическая зависимость массы плетеного экрана от амплитудного значения синфазного напряжения на внутреннем проводнике кабеля.

На рис. 10 представлена блок-схема работы алгоритма проектирования кабеля с двойным экранированием.

При ограничении амплитудного значения синфазного напряжения $U_0 = 0,01B$ применение алгоритма на рис. 10 при условии, что ток на внешнем экране определяется формулой (5) позволяет получить следующие параметры экрана.

$$r_{0\varepsilon} = 8,3\text{мм}; d_{\varepsilon} = 0,1\text{мм}; N_{\text{ПЭ}} = 6; N_{\text{ЖЭ}} = 90; \alpha_{\varepsilon} = 10^0; m_{\varepsilon} = 43,01\text{г}$$

$$r_{0\varepsilon.1} = 1,3\text{мм}; d_{\varepsilon.1} = 0,48\text{мм}; N_{\text{ПЭ.1}} = 5; N_{\text{ЖЭ.1}} = 5; \alpha_{\varepsilon.1} = 10^0; m_{\varepsilon.1} = 44,6\text{г}$$

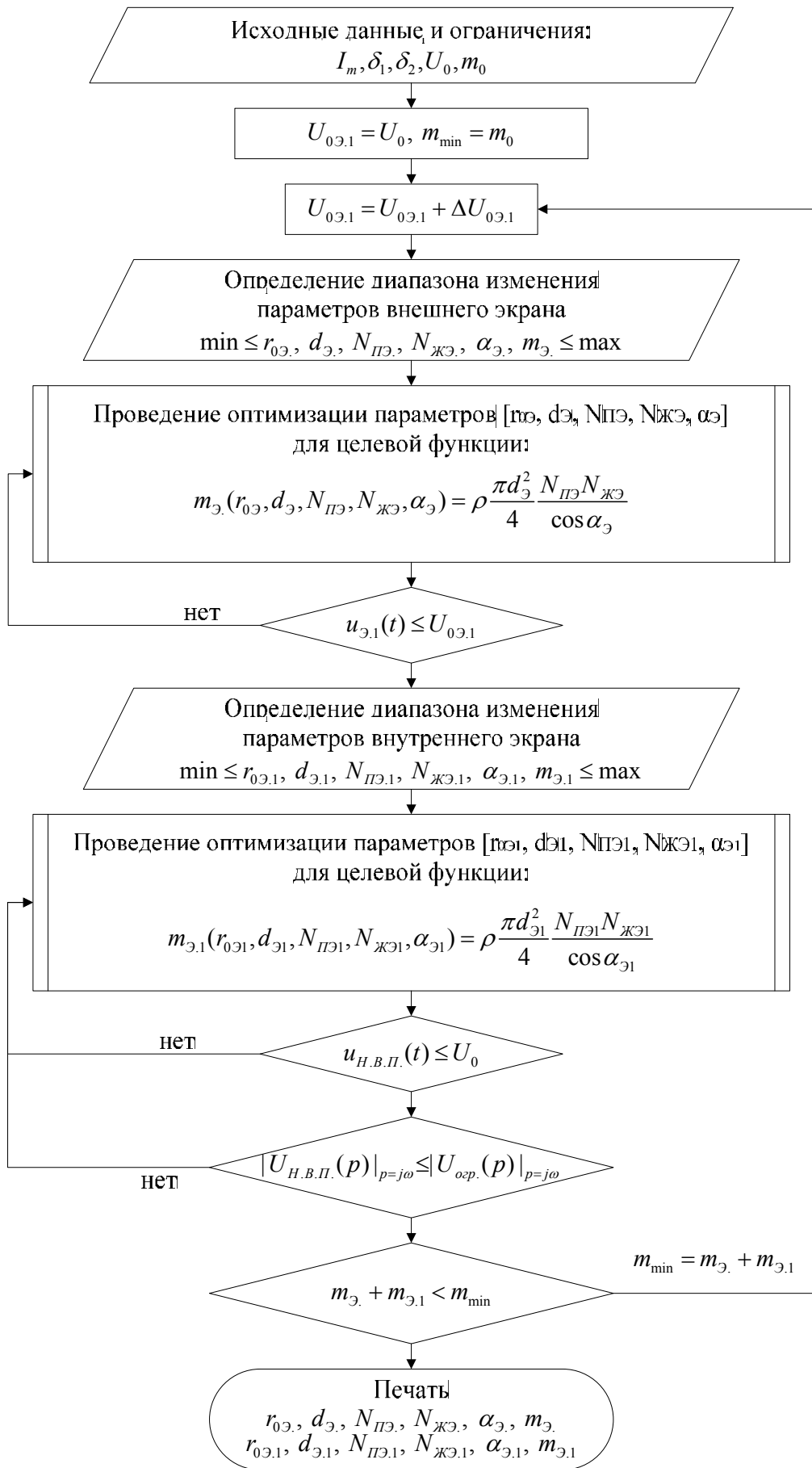


Рис. 10. Блок-схема работы алгоритма, определяющего оптимальные параметры плетеных экранов кабеля с двойным экранированием.

При экспериментальном исследовании сопротивления связи и эффективности экранирования, ток протекающий по экрану кабеля определяется по формуле

$$I_9[\text{дБмкА}] = U_G - 20Lg\sqrt{(R_n + r_9)^2 + (\omega L)^2},$$

где U_G – напряжение на выходе генератора; R_n – сопротивление нагрузки; r_9 – активное сопротивление экрана; L_9 – индуктивность экрана кабеля; $\omega = 2\pi f$.

В случае, когда индуктивность экрана кабеля недостаточно точно определена, величину тока экрана кабеля целесообразно измерять с помощью высокочастотного токосъемника. При исследовании сопротивления связи экранированных кабелей метровой длины, в частотном диапазоне до 1-3 МГц индуктивным сопротивлением экрана кабеля можно пренебречь. Ток экрана кабеля с достаточной для инженерной практики точностью при $R_n=50\text{Ом}$ можно вычислить по формуле

$$I_9[\text{дБмкА}] = U_G - 34, \quad (8)$$

где I_9 – ток экрана; U_G – напряжение на выходе генератора.

На рис. 11 приведены частотные диаграммы тока на экране кабеля, соответственно рассчитанная по формуле (8) (диаграмма 1) и измеренная с помощью токосъемника (диаграмма 2)

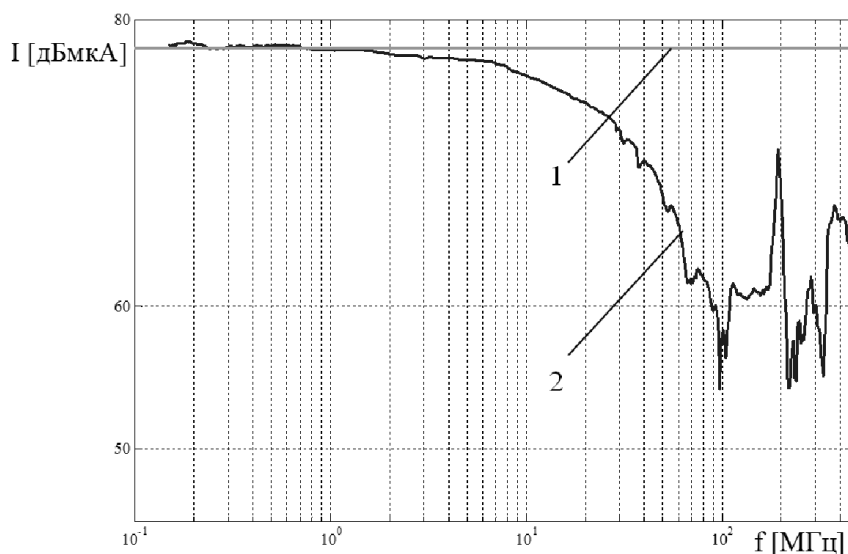


Рис. 11. Частотные диаграммы тока на экране кабеля:

1 – частотная диаграмма тока на экране кабеля, рассчитанного по формуле (8);

2 - частотная диаграмма значений тока на экране кабеля измеренного токосъемником

Эффективность экранирования в частотном диапазоне до 1-3 МГц можно вычислить по формуле

$$S = 34 - 20 \text{Lg} Z_{св}, \quad (9)$$

На более высоких частотах для повышения точности на основе результатов, полученных на установке по коаксиальной схеме эффективность экранирования, следует определять по формуле

$$S[\text{дБ}] = I_3 - I_1 = I_3 - U_{ВП} + 34, \quad (10)$$

$U_{ВП}$ - напряжение между внутренним проводником и экраном кабеля;

I_3 - ток на экране кабеля, измеренный токосъемником; I_1 - ток на внутреннем проводнике кабеля; $U_{ВП}$ - напряжение между внутренним проводником и экраном кабеля.

На рис. 12 приведены частотные диаграммы эффективного экранирования кабеля, для которых ток на экране определяется по формуле (9) (диаграмма 1) и формуле (10) (диаграмма 2)

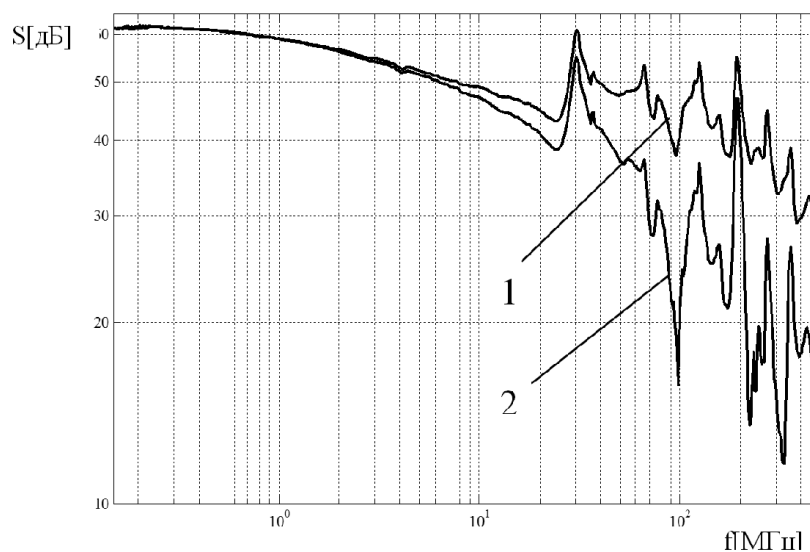


Рис. 51. Частотные диаграммы эффективности экранирования:

- 1 - частотная диаграмма эффективности экранирования, построенная по формуле (81);
- 2 - частотная диаграмма эффективности экранирования, построенная по формуле (82) при условии, что значения тока были получены на основе измерений токосъемником.

Из сравнения диаграмм для кабелей длиной 1 м на рис. 12 следует, что на частотах свыше 3 МГц применение формулы расчета эффективности экранирования (9) приводит к появлению погрешности. Для более точного

определения эффективности экранирования на высоких частотах ток экрана необходимо измерить с помощью токосъемника.

Заключение

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы

1. Проведено исследование физической природы проникновения и распространения электромагнитных помех в электрических цепях кабельной сети и конструкции летательного аппарата, и воздействия электромагнитных помех на бортовые кабели электротехнических комплексов летательных аппаратов, позволяющее разработать адекватные модели воздействия импульсных кондуктивных электромагнитных помех на бортовые кабели.

2. Предложены эквивалентные схемы и разработаны математические модели воздействия кондуктивных электромагнитных помех на внешние экраны и внутренние проводники экранированных кабелей, позволяющие производить расчет синфазных напряжений на внутренних проводниках кабелей.

3. Разработана методика расчета импульсных синфазных напряжений на внутренних проводниках экранированных кабелей при воздействии на внешние экраны кондуктивных электромагнитных помех, предназначенная для определения уровней внутренних помех бортовых кабельных сетей летательных аппаратов.

4. Разработан алгоритм проектирования сплошных экранов кабелей для защиты электротехнических комплексов летательных аппаратов от воздействия импульсных кондуктивных электромагнитных помех, позволяющий обеспечивать требуемую помехозащищенность в сочетании с минимальной массой экрана.

5. Разработан алгоритм проектирования плетеных экранов кабелей с одинарным и двойным экранированием для защиты от воздействия импульсных кондуктивных электромагнитных помех на внешние экраны при заданных ограничениях на уровни внутренних синфазных электромагнитных помех и массу экранов.

6. Проведено экспериментальное исследование сопротивления связи и эффективности экранирования экранированного кабеля. На основе проведенных исследований предложены рекомендации, позволяющие более точно определять сопротивление связи и эффективность экранирования для кабелей длиной один метр и более на частотах свыше 3 МГц.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных перечнем ВАК:

1. Кириллов В.Ю., Клыков А.В., Нгуен В.Х. Моделирование воздействия мощных электромагнитных помех на электротехнический комплекс самолета. Москва, «Труды МАИ», выпуск № 71.

2. 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. Москва, «Труды МАИ», выпуск № 75.

3. Кириллов В.Ю., Клыков А.В., Нгуен В.Х., Томилин М.М. Исследование сопротивления связи и эффективности экранирования бортовых кабелей летательных аппаратов. Москва, «Технология ЭМС 2014», № 2 (49).

В других изданиях:

1. Нгуен В.Х. Моделирование вольт-секундных характеристик защитных разрядников электротехнических комплексов летательных аппаратов. Московская молодежная научно-практическая конференция «Инновация в авиации и космонавтике - 2013». 16 – 18 апреля 2013 года. Москва. Сборник тезисов докладов. – М.: ООО «Принт-салон».