

На правах рукописи



Марченко Михаил Владимирович

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
МНОГОСЛОЙНЫХ ЭКРАНОВ КОМБИНИРОВАННЫХ
ЛИНИЙ СВЯЗИ ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ БОРТОВЫХ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ.

Специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы
и системы»

Автореферат диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Москва – 2012

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

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Кириллов Владимир Юрьевич

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, лауреат премии Правительства РФ
профессор НИУ ВШЭ МИЭМ
Саенко Владимир Степанович

доктор технических наук, доцент,
директор ФГБУ «НИИ МЭИИТ»
Соколов Алексей Борисович

Ведущая организация ФГУП «Московское опытно-конструкторское бюро
«Марс»

Защита состоится "27" ноября 2012г. в 11 часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.01 при Московском авиационном институте (национальном исследовательском университете) «МАИ» по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского авиационного института (национального исследовательского университета) «МАИ»

Автореферат разослан " __ " _____ 2012г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.125.07
кандидат технических наук, доцент

 А.Б. Кондратьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертационной работы

Создание малых космических аппаратов (КА), с проектной массой 400-1200 кг, и перспективных микроспутников (10-100 кг) предъявляет жесткие массогабаритные ограничения на применяемые в их составе электротехнические комплексы. На сегодняшний день масса бортовых кабельных сетей для российских КА составляет от 15 до 35 % от общей массы КА. Для сравнения - у иностранных КА встречаются образцы с массой бортовой кабельной сети менее 3 %. Масса экранов кабельных линий электротехнических комплексов КА составляет от 3 до 19 % от их общей массы. В работе впервые решается проблема определения конструкционных характеристик экранов комбинированных бортовых кабельных сетей, обладающих минимальными массогабаритными показателями, при обеспечении комплексных требований на нормируемые уровни электромагнитных помех в информационных и/или силовых цепях. Создание методики проектирования многослойных экранов кабельных линий на основе требований по электромагнитной совместимости (ЭМС) на электротехнический комплекс КА даст возможность достичь массогабаритных показателей, сравнимых с зарубежными аналогами, а в отдельных случаях, устранить проблему недостаточного экранирования критических цепей, встречающуюся в промышленности.

Объект исследования: комбинированные линии связи с многослойным расщепленным экранированием, объединяющие питающие и информационные кабели, применяемые в составе бортовых электротехнических комплексов.

Предмет исследования: минимизация массогабаритных показателей экранов комбинированных линий связи при ограничениях на уровни электромагнитных помех в информационных цепях и создание алгоритмов для их оптимального проектирования.

Проблемам электромагнитной совместимости и стойкости электротехнических систем посвящены работы Л.Н. Кечиева, В.П. Булекова, Н.В. Балюк, Е.Д. Пожидаева, В.С. Саенко, С.И. Комягина, А.Б. Соколова, С.Б. Резникова, В.В. Бочарова, В.Ю. Кириллова, Л.О. Мыровой, Б.Б. Акбашева, П.В. Степанова, Э. Вэнса, Т. Уилльямса, Дж. Барнса.

Цель диссертационной работы

Целью диссертационной работы является разработка методика проектирования многослойных экранов комбинированных линий связи, которые при минимальной массе обеспечивают стойкость бортовых электротехнических комплексов КА, работающих в сложной электромагнитной обстановке.

Для достижения поставленной цели:

- исследована физическая природа проникновения, распространения и воздействия электромагнитных помех на бортовой электротехнический комплекс; сформулированы обобщенные исходные данные по электромагнитной обстановке на борту КА; требование по стойкости бортовых электротехнических систем сформулированы в терминах вероятностно-параметрического подхода;
- классифицированы применяемые экраны для бортовой кабельной сети и исследованы резонансные свойства экранированных линий связи;
- на основе математической модели экранов бортовых кабелей с распределенными параметрами исследованы переходные процессы токов в них при воздействии электромагнитных полей;
- разработаны: методика определения параметров плетеных многослойных экранов кабелей и методика проектирования плетеных многослойных экранов комбинированных кабелей с расщепленным экранированием на основе требований электромагнитной совместимости;

- исследованы зависимости эффективности экранирования бортовых кабелей от величины переходного сопротивления;
- экспериментально исследована и расчетно-экспериментальным путем подтверждена стойкость бортового комплекса управления к воздействию электростатических разрядов на примере конкретного космического аппарата.

Методы исследования

При решении сформулированных задач использовались: методы теоретической электротехники, теория электромагнитной совместимости технических средств, теория вероятностей, методы оптимизации, а также теория дифференциальных уравнений и операционное исчисление.

Научная новизна диссертационной работы

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Получена аналитическая зависимость, описывающая переходные процессы, возникающие в экране бортового кабеля, образующего относительно металлических конструкций КА цепь с распределенными параметрами, при воздействии однородного магнитного поля.
2. Разработана методика определения параметров плетеных многослойных экранов кабелей на основе ограничений по амплитуде напряжения и энергии электромагнитных помех в их линиях связи. Входными данными алгоритма является электромагнитная обстановка, заданная в виде индуцированных токов, возникающих на экранах кабелей под воздействием электромагнитных помех - периодических полей и токов, а так же электромагнитных импульсов.
3. Разработана методика проектирования плетеных многослойных экранов комбинированных кабелей с расщепленным экранированием, предназначенная для минимизации массы при обеспечении стойкости бортовых электротехнических комплексов к электромагнитным воздействиям (см. п. 2). В соответствии с методикой определяются параметры внутренних экранов

для требуемого количества питающих и/или информационных линий и параметры внешнего экрана комбинированного бортового кабеля.

4. Исследована зависимость эффективности экранирования бортовых кабелей от технологии соединения экрана и разъемов при воздействии электростатических разрядов.

5. Разработана методика экспериментальных исследований стойкости систем космических аппаратов при воздействии электростатических разрядов.

Достоверность научных положений и выводов диссертации подтверждена использованием известных аналитических соотношений и хорошим согласованием результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Практическая полезность работы

1. Разработано программное обеспечение, реализующее методики определения параметров плетеных многослойных экранов комбинированных кабелей. Программное обеспечение использовано для определения параметров экранирующих оболочек бортовой кабельной сети, обладающих минимально возможной массой, на этапе технического проектирования космического аппарата.

2. Создан и аттестован стенд, позволяющий с низкой погрешностью измерять параметры, определяющие эффективность экранирования образцов бортовых кабелей при воздействии электростатических разрядов и уровни наведенных электромагнитных помех.

3. В результате проведенных исследований получены зависимости эффективности экранирования бортовых кабелей от величины переходного сопротивления экран-разъем для кабелей с различной технологией заделки при воздействии на них электростатических разрядов. На основании результатов исследований сформулированы практические рекомендации по технологии

изготовления бортовой кабельной сети ряда КА («KazSat-2», «Экспресс МД2» и др.).

4. В соответствии с разработанной методикой в результате многоэтапных испытаний подтверждена стойкость бортового комплекса управления КА «KazSat-2» к электростатическим разрядам, возникающим на космическом аппарате при натурной эксплуатации.

Реализация и внедрение основных результатов работы

Научные результаты диссертационной работы внедрены в технологии проектирования и испытания космической техники на предприятиях ФГУП «МОКБ «Марс» и ФГУП «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева» при создании космических аппаратов «KazSat-2», «Экспресс МД2».

Апробация работы

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

- научно-технической конференции "Системы управления беспилотными космическими и атмосферными летательными аппаратами", ФГУП "МОКБ "Марс", 2010г.;
- 9-ом Международном симпозиуме по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии ЭМС-2011 (Санкт-Петербург, 2011г.);
- на двух заседаниях секции "Бортовые кабельные сети, материалы и оборудование" Международной ассоциации участников космической деятельности (IASP) (Москва, 06.12.2011г., 29.03.2012г.)

Публикации

Основные научные и практические результаты диссертационной работы опубликованы в 7 печатных работах, в том числе в трех статьях, опубликованных в журнале, включенном в перечень, рекомендованный ВАК РФ.

Структура диссертационной работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка использованных источников, включающего 103 наименования, и приложения. Объем работы 148 стр.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи диссертации, определены ее научная новизна и практическая ценность, приведена структура работы.

В первой главе проведен анализ электромагнитной обстановки на борту КА, которую формирует совместная работа следующих электротехнических комплексов: бортового комплекса управления (БКУ), бортового радиотрансляционного комплекса, плазменных двигателей, целевой аппаратуры, и воздействие внешних электромагнитных помех от электростатических разрядов. Электромагнитная обстановка на борту КА определяется стандартами ракетно-космической отрасли, стандартами предприятий и технической документацией на конкретный КА.

Проанализирована топологическая структура проникновения и распространения электромагнитных помех КА. Анализ показал, что для стойкости электротехнических комплексов КА решающее значение имеют величины электромагнитных помех, проникающие через экраны бортовых кабелей. В терминах вероятностно-параметрического подхода рассмотрен вопрос стойкости управляющих комплексов при воздействии электромагнитных помех.

Вторая глава посвящена исследованию конструкционных свойств экранов кабелей КА и аналитическому описанию индуцированных на экранах токов.

Рассмотрены технологии производства экранов и дана классификация конструкционных параметров существующих плетеных экранов. Проведено расчетное сравнение сопротивления связи применяющихся плетеных экранов.

Получена математическая модель бортового кабеля, представленная в виде длинной линии, параметры которой соответствуют стандартам передачи информации SpaceWire и МПИ ГОСТ Р 52070-2003. С ее использованием

проведены теоретические исследования резонансных свойств бортовых кабелей КА.

Получены аналитические выражения, описывающие индуцированные магнитным и электрическим полями токи на экранах бортовых кабелей. В общем случае ток, протекающий по экрану бортового кабеля, который находится в переменном магнитном поле, описывается выражением:

$$I(x, p) = \frac{e^{\gamma(l-x)}}{e^{-\gamma l} + e^{\gamma l}} \left(I_E(p) - \frac{p \cdot z_0}{r + L \cdot p} B(p) \right) + \frac{e^{\gamma(x-l)}}{e^{-\gamma l} + e^{\gamma l}} \left(I_E(p) - \frac{p \cdot z_0}{r + L \cdot p} B(p) \right) + \frac{p \cdot z_0}{r + L \cdot p} B(p)$$

То же в электрическом поле:

$$U(x, p) = - \frac{(1 + Z_2(p)(G + C \cdot p)) \left(\frac{p \cdot C \cdot z_0}{G + C \cdot p} E(p) - U_E(p) \right) e^{\gamma(l-x)} - \frac{p \cdot C \cdot z_0}{G + C \cdot p} E(p) e^{-\gamma x}}{(1 + Z_2(p)(G + C p)) e^{\gamma l} - (1 - Z_2(p)(G + C p)) e^{-\gamma l}} + \\ + \frac{(1 - Z_2(p)(G + C \cdot p)) \left(\frac{p \cdot C \cdot z_0}{G + C \cdot p} E(p) - U_E(p) \right) e^{\gamma(x-l)} - \frac{p \cdot C \cdot z_0}{G + C \cdot p} E(p) e^{\gamma x}}{(1 + Z_2(p)(G + C p)) e^{\gamma l} - (1 - Z_2(p)(G + C p)) e^{-\gamma l}} + \frac{p \cdot C \cdot z_0}{G + C \cdot p} E(p)$$

Получена аналитическая зависимость, описывающая переходные процессы в виде импульсных токов, возникающих на экране бортового кабеля, образующего относительно металлических конструкций КА цепь с распределенными параметрами, при воздействии однородного магнитного поля, источником которого на КА может являться, например, система создания кинетического момента за счет взаимодействия с магнитным полем Земли:

$$i(x, t) = z_0 B_m \omega_B \left[j \frac{sh(\gamma(j\omega_B) \cdot (l - \frac{x}{2})) \cdot sh(\gamma(j\omega_B) \cdot \frac{x}{2})}{(j \cdot r - L \cdot \omega_B) \cdot ch(\gamma(j\omega_B) \cdot l)} e^{j\omega_B t} + \right. \\ \left. j \frac{sh(\gamma(-j\omega_B) \cdot (l - \frac{x}{2})) \cdot sh(\gamma(-j\omega_B) \cdot \frac{x}{2})}{(j \cdot r + L \cdot \omega_B) \cdot ch(\gamma(-j\omega_B) \cdot l)} e^{-j\omega_B t} + \frac{1}{l^2 \cdot L \cdot C} e^{-\alpha t} \sum_{s=0}^{\infty} (-1)^s \frac{K(2S+1)\pi}{\beta_s} \times \right. \\ \left. \frac{(r - \alpha \cdot L + L \cdot \beta_s)(\alpha - \beta_s) e^{-\beta_s t} - (r - \alpha \cdot L - L \cdot \beta_s)(\alpha + \beta_s) e^{\beta_s t}}{((r - \alpha \cdot L)^2 - L^2 \cdot \beta_s^2)(\alpha^2 - \beta_s^2)} \right],$$

Где $\gamma(j\omega_B) = \sqrt{r \cdot G + j\omega_B(L \cdot G + C \cdot r) - \omega_B^2 L \cdot C}$, $\gamma(-j\omega_B) = \sqrt{r \cdot G - j\omega_B(L \cdot G + C \cdot r) - \omega_B^2 L \cdot C}$,

$K = \sin\left(\frac{2S+1}{2} \pi \left(1 - \frac{x}{2l}\right)\right) \cdot \sin\left(\frac{2S+1}{2} \pi \frac{x}{2l}\right)$, $\alpha = \frac{1}{2} \left(\frac{r}{L} + \frac{G}{C}\right)$, $\beta_s = \sqrt{\alpha^2 - \frac{1}{L \cdot C} \left[r \cdot G + \left(\frac{2S+1}{2l} \pi\right)^2\right]}$

В приведенных выше выражениях:

p - собственное значение оператора Лапласа; γ - коэффициент распространения; l - длина бортового кабеля; x - координата вдоль бортового кабеля; z_0 - расстояние между проводами витой пары; r, L, C, G - первичные параметры длинной линии; $I_E(p), U_E(p)$ - источники кондуктивных электромагнитных помех, распространяющихся в экране; Z_2 - комплексное сопротивление металлизации экрана; $B(p), E(p)$ - воздействующие поля от электромагнитных помех.

Третья глава содержит описание методик определения параметров плетеных многослойных экранов комбинированных кабелей.

В отличие от существующих методик проектирования бортовой кабельной сети впервые предложена методика, предназначенная для проектирования многослойных комбинированных кабелей, учитывающая весь спектр электромагнитных воздействий, описываемых электромагнитной обстановкой на борту КА. Методика позволяет обеспечить электромагнитную стойкость бортовых электротехнических комплексов за счет проектирования электромагнитных экранов для его наиболее восприимчивой к помехам части – бортовой кабельной сети.

Конструкция любого плетеного экрана характеризуется следующими параметрами:

d - диаметр проволоки, из которой плетется экран;

$N_{жс}$ - число жгутов, образующих экран;

N_n - число проволок в каждом жгуте;

α - угол плетения, т.е. угол между жгутом и осью экрана;

a - диаметр экрана.

Разработана методика (рисунок 1) определения параметров плетеных многослойных экранов кабелей на основе ограничений по амплитуде напряжения и энергии электромагнитных помех в их линиях связи. Входными данными алгоритма является электромагнитная обстановка, заданная в виде ин-

дуцированных токов, возникающих на экранах кабелей под воздействием электромагнитных помех - периодических гармонических и негармонических полей и токов, а так же электромагнитных импульсов. В общем случае для кабеля с n-слойным экраном рассматривается система неравенств:

$$\left\{ \begin{array}{l} \left| \frac{I(f) \cdot Z_2 \prod_{m=1}^{n-1} \frac{Z_{ce}^{(m)}(f)}{Z_1^{(m)} + Z_2^{(m)} + r^{(m)} + 2j\pi f L^{(m)}}}{Z_1 + Z_2} \right| < U_{don}(f) \\ \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \left| \frac{Sf_1(\omega) \cdot Z_2 \prod_{m=1}^{n-1} \frac{Z_{ce}^{(m)}(\omega)}{Z_1^{(m)} + Z_2^{(m)} + r^{(m)} + j\omega L^{(m)}}}{Z_1 + Z_2} \right|^2 < E_1 \\ \dots \\ \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \left| \frac{Sf_k(\omega) \cdot Z_2 \prod_{m=1}^{n-1} \frac{Z_{ce}^{(m)}(\omega)}{Z_1^{(m)} + Z_2^{(m)} + r^{(m)} + j\omega L^{(m)}}}{Z_1 + Z_2} \right|^2 < E_k \end{array} \right. \quad (1)$$

$$\mathbf{K}_{\min} \leq \mathbf{K} \leq 1$$

$$\mathbf{N}_{ж,\min} \leq \mathbf{N}_{ж} \leq \mathbf{N}_{ж,\max}$$

$$\mathbf{N}_{н,\min} \leq \mathbf{N}_{н} \leq \mathbf{N}_{н,\max}$$

$$\mathbf{D}_{\min} \leq \mathbf{D} \leq \mathbf{D}_{\max}$$

$$\mathbf{A}_{\min} \leq \mathbf{A} \leq \mathbf{A}_{\max}$$

для которой производится оптимизация – находится минимум целевой функции:

$$Vi = \sum_{i=1}^n \frac{a^{(i)2} N_n^{(i)} N_{ж}^{(i)}}{\cos(\alpha^{(i)})}$$

В приведенных выше выражениях:

$I(p)$ – суперпозиция токов, протекающих по внешнему экрану бортового кабеля, токов от периодических воздействий электромагнитной обстановки; $Sf(\omega)$ – модуль спектральной функции тока импульсного воздействия; k – количество учитываемых импульсных воздействий, описываемых $Sf(\omega)$; $Z_{ce}^{(m)}$ – сопротивление связи, по модели Венса, между экраном m-1 и экраном m бортового кабеля; $r^{(m)}$, $L^{(m)}$ – активное сопротивление и внутренняя индуктивность экрана m; Z_1 , Z_2 – комплексные сопротивления нагрузок линии связи бортового кабеля; $Z_1^{(m)}$ и $Z_2^{(m)}$ – комплексные сопротивления металлизации экрана m бортового кабеля, для любого m $Z_1^{(m)} \ll Z_1$ и $Z_2^{(m)} \ll Z_2$;

$N_{ж}, N_{п}, D, A, K$ - вектор-столбцы, размерностью n , описывающие варьируемые параметры набора из n плетенок, причем оптическая плотность i -го экрана:

$$K^{(i)} = \frac{N_n^{(i)} N_{ж}^{(i)} d^{(i)}}{2\pi a^{(i)} \cdot \cos \alpha^{(i)}} - \left(\frac{N_n^{(i)} N_{ж}^{(i)} d^{(i)}}{4\pi a^{(i)} \cdot \cos \alpha^{(i)}} \right)^2.$$

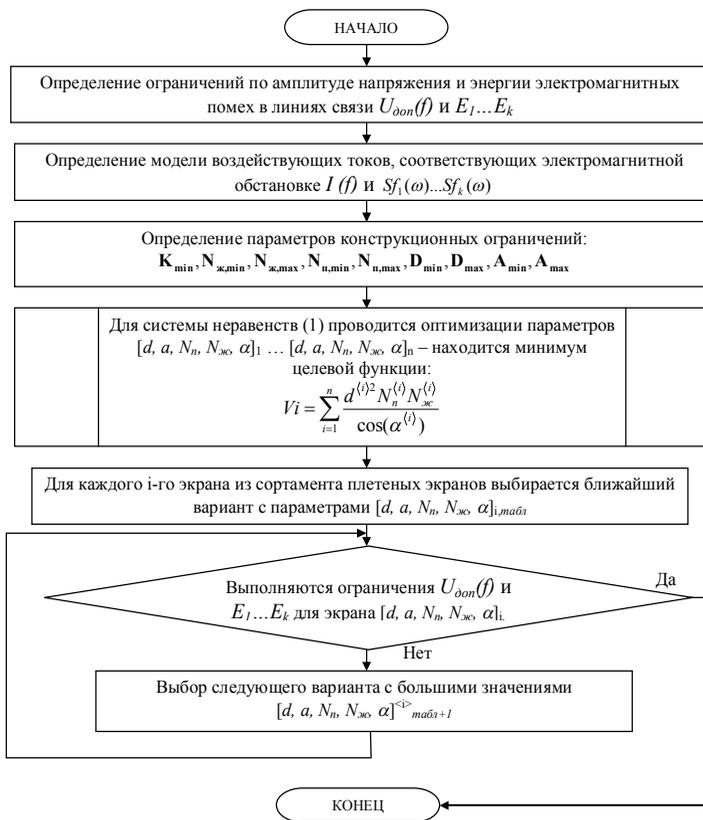


Рисунок 1. Алгоритм методики определения параметров плетеных многослойных экранов.

На основе методики определения параметров плетеных многослойных экранов разработана методика проектирования плетеных многослойных экранов комбинированных кабелей с расщепленным экранированием, предназначенная для минимизации массы при обеспечении стойкости бортовых электротехнических комплексов к электромагнитным воздействиям. В соот-

ветствии с методикой определяются параметры внутренних экранов для требуемого количества питающих и/или информационных линий и параметры внешнего экрана комбинированного бортового кабеля. Методика включает следующие основные положения:

1. Для n силовых и/или информационных линий, входящих в состав бортового кабеля, составляются матрицы ограничений $M_1 \dots M_n$, описывающие чувствительность к сбоям и отказам устройств электротехнических комплексов по амплитудам напряжений в интересующих диапазонах частот и энергиям электромагнитных помех.

2. Для самых чувствительных цепей m и k (по напряжению и энергии, соответственно) производится определение параметров внешнего экрана бортового кабеля. Из двух полученных вариантов выбирается вариант, который удовлетворяет всей совокупности ограничений.

3. После выполнения оптимизации внешнего экрана, параметры внешнего экрана фиксируются, и последовательно выполняется оптимизация n внутренних экранов или определяется возможность отказа от использования внутреннего экрана для каждой конкретной линии связи.

4. Для определения уровней ограничений, при которых предлагается отказаться от использования внутреннего экрана, проводится контрольный расчет для линии связи, помещенной только во внешний экран.

5. На основании найденных при оптимизации параметров внешнего и внутренних экранов производится выбор ближайших вариантов плетеных экранов, производимых промышленностью. Для выбранных вариантов плетеных экранов проводится проверочный расчет ограничений матриц $M_1 \dots M_n$ для силовых и/или информационных линий бортового кабеля.

Для подтверждения методики на первом этапе были проведены экспериментальные исследования при гармонических воздействиях. Функция ограничений $U_{дон}(f)$ была представлена кусочно-линейной функцией: на частотном диапазоне от 100 кГц до 6,3 МГц напряжение помехи не должно пре-

вышать 2 мВ, в диапазоне от 6,3 МГц до 12,5 МГц не должно превышать линейного возрастания с 2 мВ до 20 мВ, в диапазоне от 12,5 МГц до 50 МГц не должно превышать линейного возрастания с 20 мВ до 80 мВ. Воздействующая электромагнитная помеха в приведенном выше диапазоне частот была задана в виде протекающего по экрану бортового кабеля тока с амплитудой 1 А. В результате использования методики проектирования получены следующие параметры экранов. Внутренний экран (экран витой пары) обладает следующими, полученными теоретически, конструкционными параметрами: $d = 125$ мкм; $a = 0,9$ мм; $N_n = 4$; $N_{жс} = 16$; $\alpha = 18^\circ$; погонная масса экрана 7,47 грамм/м. Внешний экран - $d = 70$ мкм; $a = 8$ мм; $N_n = 3$; $N_{жс} = 65$; $\alpha = 28,8^\circ$; погонная масса 7,7 грамм/м. Экспериментальный образец изготовлен из материалов, серийно выпускаемых промышленностью, с конструкционными параметрами наиболее близкими к теоретическим расчетам. Линии связи в экспериментальном образце выполнены витой парой КВФСМ-75. Внешний экран изготовлен из плетенки ПОМС, обладающей следующими конструкционными параметрами: $d = 72$ мкм; $a = 8$ мм; $N_n = 3$; $N_{жс} = 60$; $\alpha = 29^\circ$; погонная масса 7,4 грамм/м.

Для экспериментальной проверки был создан стенд, в котором изготовленный экспериментальный образец бортового кабеля располагался как центральный проводник коаксиальной системы. Схема стенда приведена в диссертационной работе. В результате эксперимента зафиксировано, что экспериментальные значения измеренного напряжения превышают, на некоторых частотах, заданный при проектировании уровень не более, чем на 38 %.

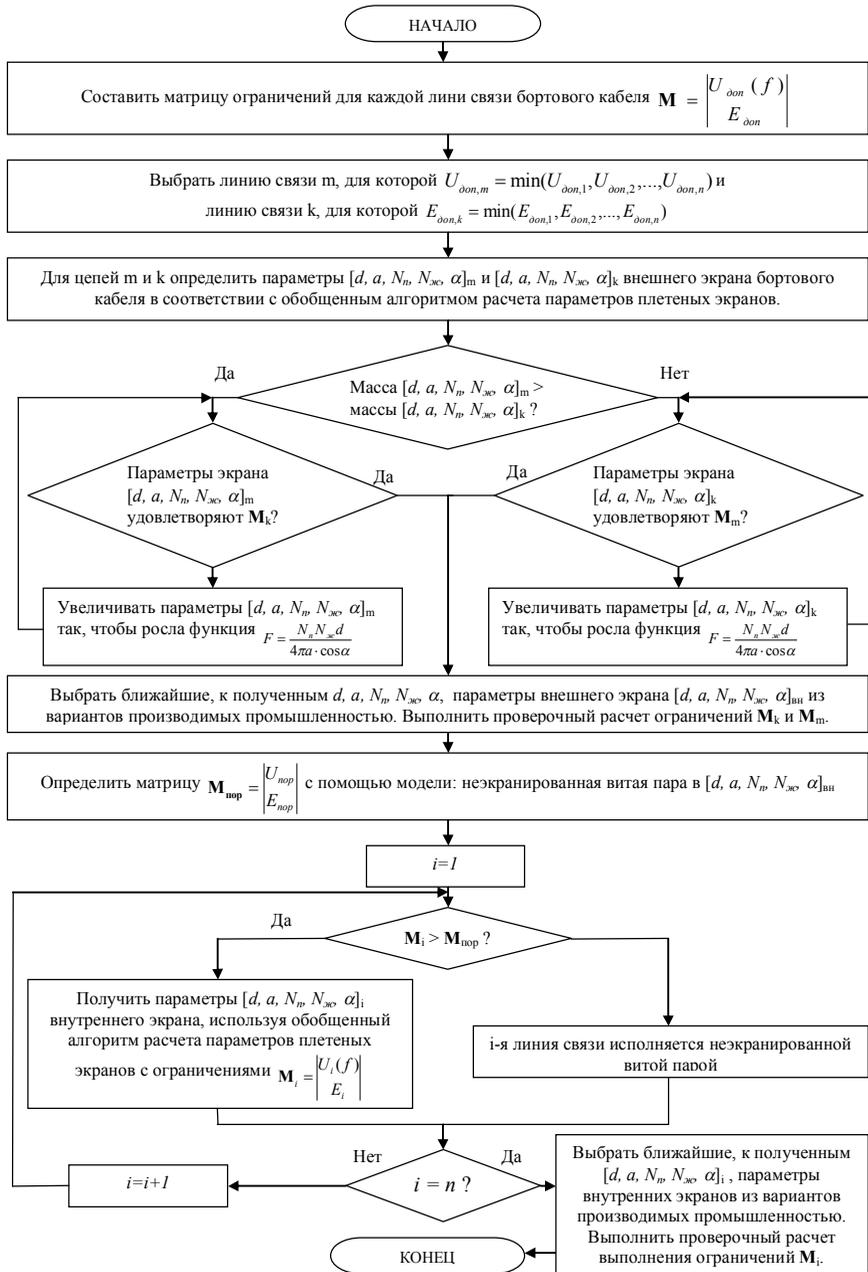


Рисунок 2. Схема методики проектирования экранов бортовых кабелей.

На втором этапе экспериментального подтверждения методик, при проектировании экранов кабелей бортовой кабельной сети КА «KazSat-2», электромагнитная обстановка задавалась в виде протекающего по экрану импульсного тока электростатического разряда, имеющего экспоненциальную форму, амплитудой 133 А. Ограничение энергии, прошедшей на входные цепи - не более $E_{оэп} = 10^{-9}$ Дж.

В результате использования методики проектирования получены следующие конструкционные параметры экранов. Внутренний экран (экран витой пары): $d = 125$ мкм; $a = 0,9$ мм; $N_n = 4$; $N_{жс} = 16$; $\alpha = 18^\circ$; погонная масса 7,47 грамм/м. Внешний экран: $d = 50$ мкм; $a = 8$ мм; $N_n = 6$; $N_{жс} = 88$; $\alpha = 30^\circ$; погонная масса 10,3 грамм/м. Теоретическая оценка энергии, проникающей в такой бортовой кабель, $E_{теор} = 4,4 \cdot 10^{-10}$ Дж/м, что меньше 10^{-9} Дж/м.

Экраны бортовых кабелей КА "KazSat-2" были изготовлены из материалов, серийно выпускаемых промышленностью, с конструктивными параметрами, выбранными на основе полученных результатов проектирования. Линии связи выполнены экранированной витой парой КВФСМ-75. Внешний экран изготовлен из плетенки ПМСН: $d = 72$ мкм; $a = 8$ мм; $N_n = 3$; $N_{жс} = 60$; $\alpha = 29^\circ$; погонная масса 18,3 грамм/м. Энергия электромагнитных помех в линиях бортового кабеля не более $E_{теор} = 1,83 \cdot 10^{-9}$ Дж.

В результате проведенной серии экспериментальных измерений получена верхняя оценка энергии на входе бортового прибора, учитывающая погрешности измерения, $E_{max} = 2,5 \cdot 10^{-9}$ Дж, средняя оценка $E_{экс} = 1,6 \cdot 10^{-9}$ Дж. Различие между верхней оценкой экспериментально измеренных значений энергии и теоретическим значением не более 37 %. Такое различие объясняется неоднородностью прокладки, разделки и экранирования витых пар в бортовом кабеле, наличием погрешности параметров генерируемых электростатических разрядов.

Далее в работе проведено экспериментальное исследование, позволившее установить зависимость эффективности экранирования бортовых кабе-

лей от величины переходного сопротивления экран-разъем для кабелей с различной технологией заделки при воздействии электростатических разрядов. На рисунке 3 представлена зависимость напряжения электромагнитных помех в кабеле от переходного сопротивления. На основании результатов исследования сформулированы практические рекомендации по увеличению эффективности экранирования бортовых кабелей при импульсных электромагнитных воздействиях, путем применяя технологий, обеспечивающих минимальное переходное сопротивление экран-разъем.

Четвертая глава посвящена экспериментальному подтверждению стойкости бортового комплекса управления КА «KazSat-2» с кабельной сетью, параметры экранов которой были выбраны на основе разработанной методики проектирования комбинированных кабелей, к воздействию электростатических разрядов с учетом отсутствия эффекта отложенного отказа.

Разработана методика испытаний автономно функционирующих систем КА на стойкость к электростатическим разрядам, в соответствии с которой были проведены испытания БКУ КА "KazSat-2". Испытания отдельных систем космических аппаратов на этапе предварительных испытаний по экономическим и временным затратам выгоднее, чем проведение испытаний на устойчивость к электростатическим разрядам на собранном космическом аппарате, как это предусмотрено сейчас нормативными документами.

Испытания БКУ КА на стойкость к электростатическим разрядам проходят в три этапа:

1. определение уровней помеховых сигналов при воздействии электростатических разрядов на комбинированные кабели бортовой кабельной сети, нагруженные на имитаторы бортовых устройств;
2. определение уровней помеховых сигналов при воздействии электростатических разрядов на выключенный бортовой комплекс управления;
3. проверка сохранения качества функционирования БКУ космического аппарата при воздействии серий электростатических разрядов.

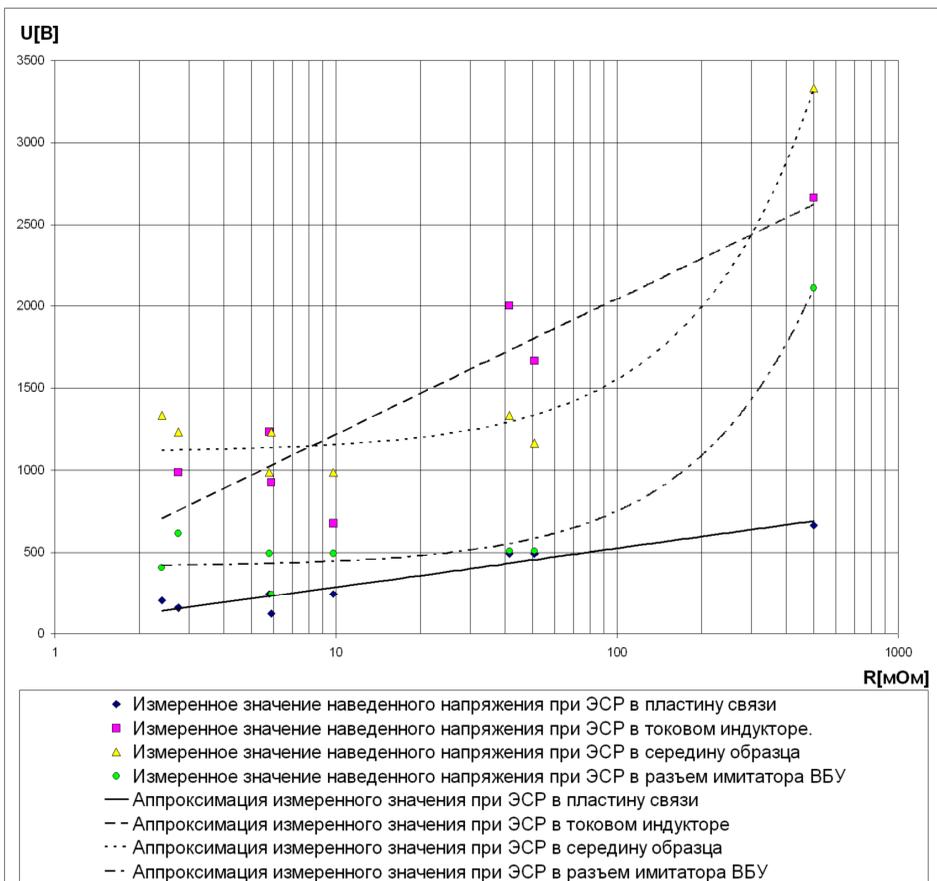


Рисунок 3. Зависимость напряжения электромагнитных помех в кабеле от переходного сопротивления.

На рисунке 4 изображен фрагмент испытательного стенда для измерения уровней помеховых сигналов в соответствии с первым этапом методики, результаты измерений приведены в таблице 1.

На рисунке 5 изображена схема стендовых испытаний БКУ КА в соответствии с третьим этапом методики. Бортовой комплекс управления, реализованный на стенде, полностью повторяет БКУ, устанавливаемый на КА, в части: аппаратной конфигурации; сертификации применяемых полупроводниковых элементов; длин и технологии изготовления бортовой кабельной

сети, соединяющей блоки БКУ; программного обеспечения; контроля работоспособности системы управления. Датчики и исполнительные устройства, не входящие в БКУ, были реализованы в виде имитаторов смежных систем, которые по электрическим характеристикам аналогичны реальным приборам.

Проведенные многоэтапные испытания по подтверждению стойкости к электростатическим разрядам БКУ КА «KazSat-2», позволили количественно оценить величины наведенных напряжений электромагнитных помех от электростатических разрядов на входах блоков БКУ и других систем (таблица 1). Измеренные уровни помеховых сигналов не приводят к разрушению входных цепей, в том числе, не могут привести к возникновению отложенных отказов, поскольку не превышают логические уровни информационных сигналов. Сохранение качества функционирования БКУ КА «KazSat-2» позволяет сделать заключение о правильности выбранной технологии изготовления бортовой кабельной сети данного КА. На заключительном этапе, расчетно-экспериментальным путем, в соответствии с теорией планирования эксперимента, с помощью метода Босса, подтверждена стойкость бортового комплекса управления КА «KazSat-2» к электростатическим разрядам, возникающим на космическом аппарате при натурной эксплуатации, с вероятностью не менее 0,97 за срок активного существования КА.

Таблица 1. Результаты измерения уровней помеховых сигналов.

Группа кабелей	Тип воздействующего электростатического разряда	Максимальная амплитуда помехового сигнала в кабеле
Группа 1. Кабели цифровой последовательной шины обмена.	Контактный искровой разряд (воздушный). Амплитуда 20 кВ.	110 мВ
	Контактный разряд. Амплитуда 20 кВ.	300 мВ
	Воздействие импульсным полем через провод-индуктор (бесконтактный безыскровой разряд в контуре 20 кВ).	312 мВ
Группа 2. Кабели аналоговых измерительных цепей.	Все виды воздействий. Амплитуда 20 кВ.	1 В
Группа 3. Кабели системы электроснабжения.	Все виды воздействий. Амплитуда 20 кВ.	1 В

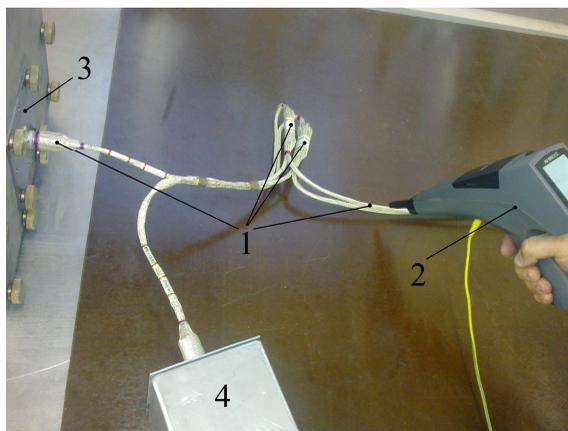


Рисунок 4. Воздействие электростатических разрядов на испытываемый бортовой кабель.

1 – места воздействия искровым и безыскровым контактными электростатическими разрядами на испытываемый кабель; 2 – генератор ESD 30N; 3 – автономный измерительный блок; 4 – имитатор бортового устройства.

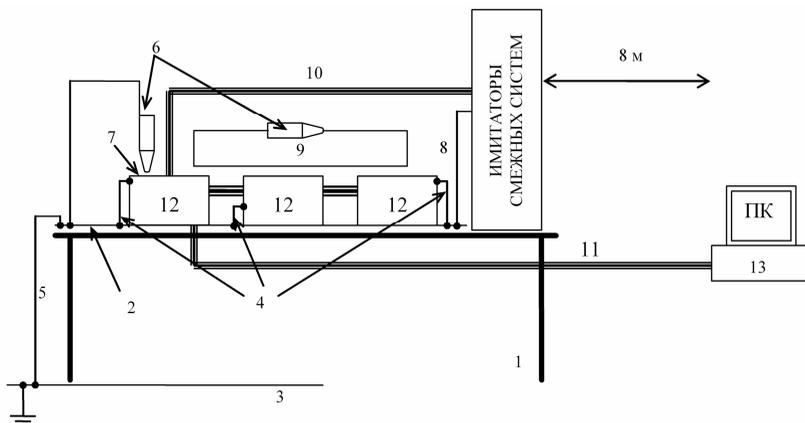


Рисунок 5. Схема стендовых испытаний БКУ КА.

1 – диэлектрический стол; 2 – плоскость заземления; 3 – шина заземления; 4 – переключка металлизации; 5,8 – кабели заземления; 6 – генератор электростатических разрядов; 7 – место воздействия искровыми и безыскровыми контактными электростатическими разрядами; 9 – воздействие электростатических разрядов через токовый индуктор; 10 – кабели, соединяющие имитаторы с блоками БКУ; 11 – кабель телеметрической информации; 12 – блоки БКУ; 13 – регистратор телеметрической информации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В диссертационной работе получены следующие основные результаты:

1. Получена аналитическая зависимость, описывающая переходные процессы, возникающие в экране бортового кабеля, образующего относительно металлических конструкций КА цепь с распределенными параметрами, при воздействии однородного магнитного поля.

2. Разработана методика определения параметров плетеных многослойных экранов кабелей на основе ограничений по амплитуде напряжения и энергии электромагнитных помех в их линиях связи.

3. Разработана методика проектирования плетеных многослойных экранов комбинированных кабелей с расщепленным экранированием, предназначенная для минимизации массы при обеспечении стойкости бортовых электротехнических комплексов к электромагнитным воздействиям.

4. Разработано программное обеспечение, реализующее методики определения параметров плетеных многослойных экранов комбинированных кабелей. Программное обеспечение использовано для определения параметров экранирующих оболочек бортовой кабельной сети, обладающих минимально возможной массой, на этапе технического проектирования космического аппарата «KazSat-2».

5. Исследована зависимость эффективности экранирования бортовых кабелей и напряжения помех в них при воздействии электростатических разрядов от технологии соединения экрана и разъемов. На основании результатов исследования сформулированы практические рекомендации по увеличению эффективности экранирования бортовых кабелей при импульсных электромагнитных воздействиях путем применения технологий, обеспечивающих минимальное переходное сопротивление экран-разъем.

6. Разработана методика экспериментального исследования стойкости систем к воздействию электростатических разрядов возникающих на косми-

ческих аппаратах во время орбитальной эксплуатации. В соответствии с разработанной методикой подтверждена стойкость бортового комплекса управления КА «KazSat-2» к воздействию электростатических разрядов.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

7. Марченко М.В. Современные проблемы внутренней радиационной электризации. – М.: Научно-техническая конференция "Системы управления беспилотными космическими и атмосферными летательными аппаратами", ФГУП "МОКБ "Марс" 25-27.10.2010г.
8. Кириллов В.Ю., Марченко М.В. Зависимость эффективности экранирования кабелей от переходного сопротивления при воздействии ЭСР. Труды симпозиума. – С. Петербург: ЭМС 2011, 2011. – С. 129-132.
9. Кириллов В.Ю., Марченко М.В. Алгоритм оптимального определения параметров плетеного экрана кабеля с учетом ограничения напряжения на внутренних проводниках. – М.: Технологии ЭМС, 2011, №4(39). – С. 62-66.
10. Марченко М. В., Малистин А. И. Экспериментальное исследование уровней помех в бортовой кабельной сети от ЭСР для обеспечения функционирования систем космического аппарата. Труды симпозиума. – С. Петербург: ЭМС 2011, 2011. – С. 437-440.
11. Кириллов В.Ю., Малистин А.И., Марченко М.В. Испытания бортовой системы управления космического аппарата KazSat-2 на помехоустойчивость к электростатическим разрядам. – М.: Технологии ЭМС, 2012, №1(40). – С. 3-9.
12. Кириллов В.Ю., Марченко М.В. Зависимость эффективности экранирования кабелей от переходного сопротивления при воздействии электростатического разряда. – М.: Технологии ЭМС, 2012, №1(40). – С. 10-14.
13. Кириллов В.Ю., Шмелев В.П., Марченко М.В., Томилин М.М. Разработка методики испытаний БКС на воздействие имитационного электроста-

тического разряда сложной структуры. Отчет о НИР. – М.:МАИ. Шифр темы
«Электростатика –МАИ», Гос. рег. № Ф40836, 2012г. – 235 с.