

На правах рукописи



Жуков Петр Александрович

**ИССЛЕДОВАНИЕ СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ
АППАРАТОВ ОТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ**

Специальность 05.09.03

Электротехнические комплексы и системы

Автореферат
диссертации на соискание ученой 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»

Крохалев Дмитрий Иванович, доктор технических наук, главный специалист Федерального государственного унитарного предприятия «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. академ. Е.И. Забабахина»

Ведущая организация Акционерное общество «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения»

Защита состоится **21 июня 2022 г. В 11 час. 00 мин.** 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, к. 57, ауд. 302.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» и на сайте www.mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=163988

Автореферат разослан _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.125.07
кандидат технических наук, доцент



Д.С. Дежин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Обеспечение электромагнитной совместимости(ЭМС) и защиты от воздействия электромагнитных помех(ЭМП) имеет огромную важность в электротехнических комплексах и системах летательных и космических аппаратов (ЛА и КА). В современных КА и ЛА практически все элементы и системы контролируются с помощью электронных устройств. Поэтому, от исправной постоянной работы электроники зависит функционирование ЛА в целом. На данный момент существуют определенные стандарты по производству оборудования и кабельных сетей, предназначенных для ЛА, а также стандартизированные методы обеспечения и проверки защиты от различных видов помех.

Повышение миниатюризации и экономичности электронных систем порождает новые проблемы ЭМС, поскольку восприимчивость электротехнических комплексов к различным видам ЭМП от внешних и внутренних источников значительно возрастает. Увеличение количества электронных устройств приводит к повышению угрозы выхода из строя ЛА при воздействии электромагнитных полей, излучаемых в первую очередь с помощью искусственных источников.

Актуальность повышения эффективности экранирования кабелей возрастает в связи с появлением устройств, предназначенных для создания искусственных электромагнитных воздействий. Существующие методы защиты не всегда полностью соответствуют условиям применения современной техники в изменяющейся электромагнитной обстановке, поэтому, требуется доработка методов защиты и испытаний оборудования на эффективность экранирования.

Летательные аппараты являются сложными многокомпонентными техническими устройствами и имеют в своей структуре множество систем. Одной из таких является бортовая кабельная сеть ЛА (БКС ЛА). БКС выполняет функцию связи между бортовыми системами и устройствами, обеспечивает электропитание и обмен информацией. Поэтому, воздействие ЭМП на БКС оказывает влияние на все элементы аппарата и, следовательно, надежность всей системы ЛА зависит от защищенности БКС от внешних воздействий. Наиболее уязвимыми для проникновения помех являются места соединения экранов кабелей с соединителями БКС.

Исследование существующих способов электромагнитного экранирования и изучение способов проникновения и путей распространения излучаемых ЭМП в конструкции ЛА позволит выявить уязвимости и слабые места. На основе результатов исследования будут разработаны новые методы оптимизации экранирования и эффективного дополнения существующих способов решения проблем ЭМС.

Вопросам решения проблем ЭМС, исследованию электромагнитных воздействий на электронную аппаратуру и обеспечению эффективного экранирования посвящен ряд работ таких авторов как: Кечиев Л.Н., Кириллов В.Ю., Клыков А.В., Нгуен В.Х., Томилин М.М., Гизатуллин З.М., Чермошенцев С.Ф., Отт Г., Армстронг Л. И многих других.

В работах Кириллова В.Ю., Клыкова А.В., Нгуена В.Х., Томилина М.М., приведены результаты исследования воздействий ЭМП на кабельную сеть и связанные с ней элементы электротехнического комплекса летательного аппарата, в работах Кечиева Л.Н., Гизатуллина З.М. приведены примеры топологии проникновения помехи, распространения помехи и топологические модели для прогнозирования помехозащищенности.

Цель диссертационной работы - разработка и исследование новых и повышение эффективности существующих методов и технических средств защиты элементов и устройств бортовых комплексов от электромагнитных помех

Для достижения поставленной цели необходимо:

- выполнить классификацию ЭМП воздействующих на элементы и устройства бортовых комплексов ЛА;
- разработать структурную топологическую схему проникновения и распространения ЭМП в электрических цепях электротехнических комплексов и внутреннем объеме конструкции ЛА;
- разработать инженерную методику нахождения путей распространения и расчета величин ЭМП в электрических цепях и конструкции ЛА;
- исследовать влияние неоднородностей экранов кабелей и переходного сопротивления на эффективность экранирования;
- исследовать частотные характеристики коэффициента отражения РПМ предназначенного для использования на космических аппаратах;

- предложить способ применения РПМ для уменьшения помехоэмиссии и ослабления резонансных явлений в приборных модулях КА;

- разработать способ применения радиопоглощающего материала для уменьшения кондуктивной помехоэмиссии в виде наведенных высокочастотных кондуктивных токов и напряжений

Предмет и объект исследования

Предметом исследования является помехозащищенность электрического комплекса от излучаемых ЭМП, проникающих во внутреннее пространство конструкции ЛА и корпусов приборов и устройств ЭТК ЛА. Объектом исследования являются элементы устройств бортовых электротехнических комплексов

Методы исследования

При решении поставленных задач использованы методы теоретической электротехники, теории экранирования, теории функций комплексного переменного, методы и технические средства экспериментальных исследований. Для проведения расчетов использованы средства MS Excel.

Научная новизна диссертационной работы

Научная новизна данной работы заключается в следующем:

1- Предложена топологическая модель проникновения и распространения ЭМП в электрических цепях и конструкции ЛА;

2- Разработана инженерная методика определения путей и расчета уровней ЭМП в электрических цепях и конструкции ЛА;

3- Получены зависимости влияния неоднородностей экранов и переходных сопротивлений экранированных жгутов на эффективность экранирования;

4- Определены частотные характеристики коэффициента отражения РПМ при воздействии экстремальных температур и вибрации аналогичных условиям открытого космоса;

5- Предложен способ применения РПМ для ослабления явлений резонансов электромагнитных полей и уменьшения помехоэмиссии в приборных модулях КА;

6- Предложен способ применения РПМ для повышения эффективности фильтрации кондуктивных помех в электрических цепях ЭТК ЛА.

Достоверность полученных результатов работы обуславливается применением аттестованных технических средств испытаний ЭМС и выполнением экспериментальных исследований в соответствии с общепринятыми методами проведения измерений физических параметров.

Практическое значение диссертационной работы

Практическое значение данной работы заключается в следующем:

1- Разработанная инженерная методика позволяет определять пути распространения и рассчитывать уровни электромагнитных помех во внутренних цепях и пространстве ЛА

2- Проведенные исследования зависимости эффективности экранирования от величины переходного сопротивления и неоднородностей экранов бортовых жгутов или кабелей определяют условия достижения необходимого уровня эффективности экранирования бортовых кабелей

3- На основе результатов исследования коэффициента отражения РПМ доказана возможность его применения на космических аппаратах;

4- Предложенный способ применения РПМ позволяет увеличить эффективность экранирования благодаря снижению помехоэмиссии и уменьшению резонансных явлений во внутреннем объеме ЛА;

5- Предложенный способ применения РПМ в электрических цепях позволяет подавлять высокочастотные кондуктивные помехи в кабельных сетях.

Основные положения, выносимые на защиту

1- методика определения путей и расчета уровней ЭМП в электрических цепях и конструкции ЛА;

2- Результаты экспериментального исследования влияния неоднородностей экранов и переходных сопротивлений экранированных жгутов на эффективность экранирования;

3- Результаты исследования частотные характеристики коэффициента отражения РПМ при воздействии экстремальных температур и вибрации аналогичных условиям открытого космоса;

4- Способ применения РПМ для увеличения эффективности экранирования благодаря снижению помехоэмиссии и уменьшению резонансных явлений во внутреннем объеме ЛА;

5- Способ применения РПМ для подавления высокочастотных кондуктивных помех в кабельных сетях ЭТК ЛА.

Реализация и внедрение основных результатов работы

Полученные результаты диссертационной работы в части исследования влияния переходного сопротивления и неоднородности экранов на эффективность экранирования были использованы в НИЭР «Исследование путей обеспечения помехозащищенности опасных цепей и стойкости аппаратуры

беспилотных летательных аппаратов при воздействии электромагнитных полей» проводимой в Московском авиационном институте (национальном исследовательском университете). Полученные результаты диссертационной работы используются в ФГУП МОКБ «Марс» (г. Москва) при проектировании экранированных кабельных жгутов для Спектр РГ. Акт о внедрении приведен в приложении 1.

Апробация работы

Положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на 15-ой международной конференции «Авиация и космонавтика – 2016 (Москва, МАИ, 2016); на научно-технической конференции «Техно-ЭМС 2017»(ВШЭ НИУ МИЭМ, 2017); на 16-ой международной конференции «Авиация и космонавтика – 2017»(Москва, МАИ, 2017); на научно-технической конференции «Техно-ЭМС 2018»(Москва, ВШЭ НИУ МИЭМ, 2018); на 17-ой международной конференции «Авиация и космонавтика – 2018»(Москва, МАИ, 2018); на научно-технической конференции «Техно-ЭМС 2019»(Москва, ВШЭ НИУ МИЭМ, 2019); на 18-ой международной конференции «Авиация и космонавтика – 2019»(Москва, МАИ, 2019); на научно-технической конференции «Техно-ЭМС 2020»(Москва, ВШЭ НИУ МИЭМ, 2020); на 2-ой международной научно-технической конференции 2020 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (Москва, МЭИ, 2020); на 19-ой международной конференции «Авиация и космонавтика – 2020»(Москва, МАИ, 2020); международная конференция «Электромагнитное поле и материалы» (фундаментальные физические исследования)(Москва, МЭИ, 2020); на V Всероссийской научно-практической конференции «Основные направления разработок и производства кабельных изделий для авиационной, космической, и радиоэлектронной техники», (Чебоксары, АО «Завод «Чувашкабель», 2018); на 3-ей международной научно-технической конференции 2021 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE), Moscow, Russia, 2021.

Публикации

По теме диссертационной работы опубликовано 20 научных работ, среди них 3 в изданиях из перечня Высшей Аттестационной Комиссии РФ, 4 в изданиях, индексируемых в базах Scopus, 2 индексированное в Web of Science.

Структура и объем диссертационной работы

Диссертация включает введение, 4 главы, заключение, список литературы из 114 наименований, приложение. Объем 141 страница, в т.ч. 54 рисунка и 4 таблицы.

Личный вклад. Непосредственное участие автора в постановке цели и задач исследования. Результаты диссертационной работы получены автором лично или при непосредственном его участии. Методики проведения экспериментальных исследований разработаны автором лично или при непосредственном участии автора. Обработка и интерпретация результатов экспериментальных исследований выполнены автором лично или совместно с соавторами.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбора темы диссертационной работы, проведен анализ существующих работ по теме, определена научная новизна и практическая ценность, дана общая характеристика работы.

В первой главе

В части 1.1 представлена классификация электромагнитных помех, способных оказывать вредное влияние на электротехнические комплексы различных летательных аппаратов.

В части 1.2 рассмотрены принципы проникновения в конструкцию и пути распространения ЭМП в электрических цепях оборудования ЛА. Приведены примеры топологии распространения помех в электрических сетях различных крупных объектов.

В части 1.3 Рассмотрена схема путей распространения ЭМП в конструкции ЛА. Показаны отличия путей распространения ЭМП в конструкции летательного аппарата от путей распространения в конструкции сетей наземных объектов. Представлена топологическая модель экранирования ЛА. Построена топологическая модель проникновения и распространения ЭМП в конструкции ЛА. При построении модели рассмотрены все возможные способы попадания энергии электромагнитной помехи от внешнего источника на чувствительный элемент - микросхему в блоке комплекса ЛА. Излучаемая электромагнитная помеха, создаваемая внешним источником, проникает во внутреннее пространство ЛА тремя способами:

- в виде электромагнитного поля через материал корпуса ЛА;
- в виде электромагнитного поля через апертуры корпуса ЛА, такие как иллюминаторы;

- в виде кондуктивной помехи по кабелям связи внешних устройств;

- в виде электромагнитного поля, создаваемого кондуктивной помехой, проходящей по кабелям связи внешних устройств.

Таким образом формируется электромагнитная обстановка внутри корпуса ЛА. Далее, электромагнитная энергия распространяется по цепям связи и во внутреннем пространстве ЛА в виде электромагнитного поля и кондуктивных помех по цепям связи и питания, а также через корпуса внутренних устройств. Таким образом, до любой выбранной точки внутри чувствительного электронного устройства энергия пройдет следующими путями:

- в виде кондуктивной помехи, наведенной на цепи внутри корпусов удаленных управляемых объектов внутри корпуса ЛА, и распространяющейся по цепям связи;

- в виде кондуктивной помехи, наведенной непосредственно на кабели связи и питания электромагнитным полем внутри корпуса;

- в виде кондуктивной помехи, наведенной на цепи внешних устройств и прошедшей по кабелю связи напрямую к чувствительному электронному элементу;

- в виде электромагнитного поля через корпус чувствительного электронного

устройства.

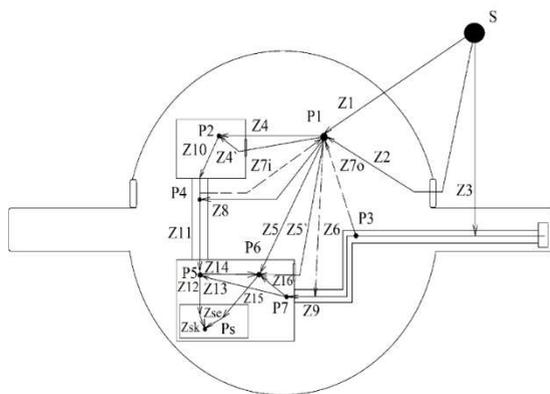


Рис. 1 Схема топологической модели распространения энергии электромагнитных помех во внутреннем объеме ЛА.

Как правило, наиболее уязвимыми для электромагнитных помех оказываются блоки устройств анализа, вычисления и управления, составляющие бортовой компьютер ЛА. Поэтому, в качестве чувствительного

электронного

устройства

подразумеваются

такой блок.

На рис. 1 и 2 приведены схема и граф топологической модели проникновения и распространения энергии ЭМП от внешнего источника электромагнитного излучения. В топологической модели

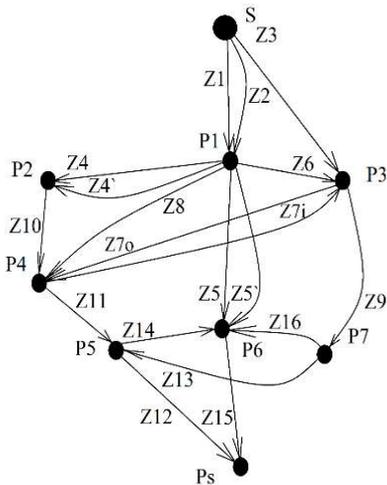


Рис. 2 Граф топологической модели распространения электромагнитной помехи во внутреннем объеме ЛА.

использованы следующие обозначения: S – внешний источник излучаемой помехи. Все точки P_i обозначают точки условного перехода энергии помехи и возможного контроля электромагнитной обстановки. Передаточные функции Z_i обозначают прохождение энергии помехи от внешнего источника по соответствующему пути.

Для определения ЭМП проникающих и распространяющихся в конструкции ЛА с помощью представленных топологических моделей разработана методика

определения путей проникновения и распространения ЭМП. Методика описывает применение топологических схем и графов для решения проблем помехозащищенности ЛА и выглядит следующим образом:

1) Для построения графа распространения ЭМП необходимо определить геометрические схемы конструкции и размещения электронных блоков бортовых устройств ЛА.

2) Определить для проведения дальнейшего расчета уровень ЭМП от внешнего источника.

3) Построить граф топологической модели для заданной конструкции. Все блоки конструкции аппарата обозначаются узлами графа. Все пути распространения ЭМП обозначаются ветвями графа.

2) Произвести расчет коэффициентов ослабления ЭМП для каждой ветви графа. Коэффициенты ослабления ветвей графа определяются свойствами среды распространения или проникновения ЭМП – материалами экранов, геометрией апертур, свойствами кабелей и т.п.

2) Определить узел графа, отображающий электронное техническое средство – рецептор (бортовой прибор, устройство, элемент электротехнического комплекса или электронного блока), для которого проводится расчет ЭМП. Помеха в узле графа, для

которого проводится расчет, является результатом наложения всех ЭМП пришедших в узел, и называется результирующей. По умолчанию, в модели рассмотрена результирующая помеха, проникающая в блок управления. Однако в качестве рассматриваемого узла может быть выбран любой узел графа, если для него требуется определить ЭМП.

3 1) Определить на графе все пути проникновения и распространения ЭМП от внешнего источника до заданного узла.

2) Каждый путь графа имеет свой совокупный коэффициент ослабления проходящей по нему ЭМП. Совокупный коэффициент ослабления пути рассчитывается по коэффициентам ветвей графа, составляющих путь. После определения всех требуемых путей следует рассчитать совокупные коэффициенты для них.

4 Рассчитать результирующую помеху в заданном узле. В качестве внешнего источника ЭМП используется воздействие, параметры которого определены выбранным стандартом, например, ГОСТ на помехозащищенность для авиационных изделий.

5 После расчета результирующей помехи сравнить ее с нормативными значениями ЭМП, заданными в выбранном стандарте.

6 Если уровень рассчитанной результирующей ЭМП превышает нормативные значения стандарта следует изменить коэффициенты ослабления ветвей графа и провести расчет заново. Изменяя коэффициенты ветвей следует учитывать, что каждая ветвь графа является отображением реального участка пути распространения ЭМП в конструкции или электрических цепях конкретного ЛА. Для некоторых участков пути в конструкции изменение коэффициента ослабления может быть конструктивно проще, чем для других. Например, для кабелей возможно замена экрана на более качественный, для апертур могут быть возможны изменения геометрических размеров, или внесение дополнительных элементов конструкции: размещение материалов, поглощающих электромагнитную энергию; закрытие апертур металлической сеткой и т.п.

7 После достижения требуемых стандартом уровней результирующей ЭМП в заданном узле следует составить рекомендации по изменению конструкции исследуемого аппарата.

Наибольшую пользу из проведения расчетов по представленной топологической модели можно получить на этапе конструирования ЛА. Расчёт уровней помех, воздействующих на чувствительные элементы бортового электротехнического комплекса, позволит

спрогнозировать помехозащищенность и определить наименее защищенные от проникновения ЭМП места конструкции. Это позволит заранее составить комплекс рекомендаций для организации ЭМС и электромагнитной защиты аппарата. Решение проблем помехозащищенности и ЭМС уже созданного ЛА с помощью данных схем также возможно, но, как правило, является более сложным технически, из-за необходимости изменения уже готовой конструкции или внесения в нее дополнительных элементов.

Представленная методика позволяет проводить расчет любых ЭМП, распространяющихся в конструкции аппарата при условии правильного составления графа и определения источника ЭМП и

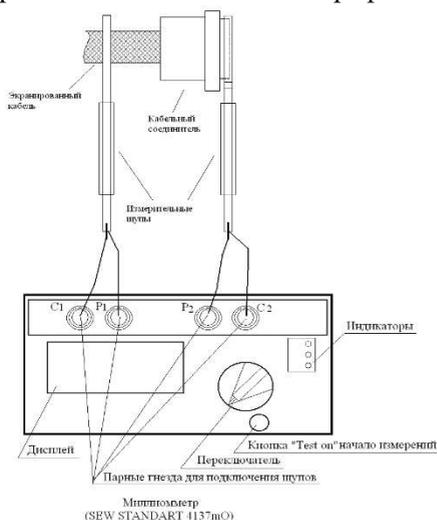


Рис. 3 Схема измерения переходного сопротивления

узла результирующей помехи.

Во второй главе исследовано влияние неоднородностей электромагнитных экранов на эффективность экранирования. Показаны причины возникновения неоднородностей в структуре кабельных экранов.

В части 2.1 рассмотрены основные параметры и характеристики экранов кабелей.

В части 2.2 представлены результаты исследования изменения переходных сопротивлений под воздействием различных внешних факторов в процессе жизненного цикла. Эксперименты по исследованию воздействия влажного теплого воздуха в климатической камере на экранированные кабели, а также последовательное охлаждение и нагревание кабельного соединителя показали значительные изменения величины переходного сопротивления, рис 3.

В процессе эксперимента, имитирующего пребывание в тропическом климате, были испытаны два образца, защищенные плетеным экраном, выполненным из медно-ниобиевой проволоки.

В эксперименте на воздействие температурных колебаний три образца электрических соединителей кабелей подвергались

термоудару посредством погружения в жидкий азот и последующим прогревом до 290°C потоком горячего воздуха. Переходное сопротивление измерялось перед началом эксперимента и на каждом его этапе.

Таблица 1. Изменение переходных сопротивлений кабельных соединителей под воздействием климатических факторов

Соединитель	Переходное сопротивление $R_{пер}$ [МОм]			
	Первый образец		Второй образец	
	Перед испытанием	После испытания	Перед испытанием	После испытания
X1	1,45	1,6	1	26
X2	1,45	8	1	8,5

Таблица 2.2. Величины переходных сопротивлений при испытании на термоудар

Переходное сопротивление на этапе эксперимента	Первый образец $R_{пер}$ [МОм]	Второй образец $R_{пер}$ [МОм]	Третий образец $R_{пер}$ [МОм]
Переходное сопротивления перед экспериментом	0.9	0.3	0.1
Переходное сопротивление при нагреве до 290°C	6	6.2	5.5
Переходное сопротивление после охлаждения в жидком азоте	0.2	0	0
Переходное сопротивление через 30 минут после окончания эксперимента	1	0.8	0.5

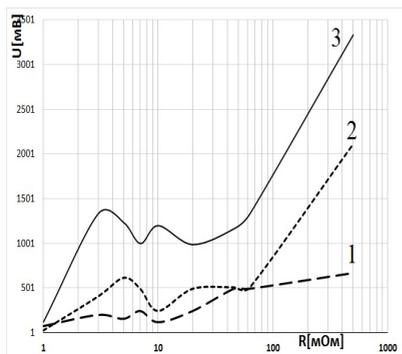


Рис. 4 Диаграмма зависимости наведенных на внутренних проводниках амплитудных значений напряжений от величин переходных сопротивлений. Электростатический разряд в: 1 – пластину заземления; 2 – в корпус имитатора бортового прибора; 3 – в центральную часть экрана кабеля.

Исследовано влияние изменения переходного сопротивления на уровни напряжения помех, наведенных на кабельные проводники внешним воздействием.

В части 2.3 продемонстрировано влияние разрывов и апертур в экране кабеля на эффективность экранирования. На рис. 4 показана зависимость напряжений помех от переходного сопротивления при воздействии электростатического разряда.

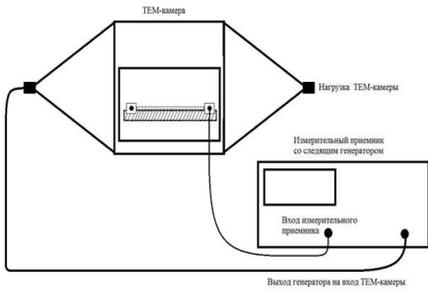


Рис. 5 Схема установки для исследования частотной диаграммы наведенных напряжений на внутренних проводниках кабеля на основе ТЕМ-камеры.

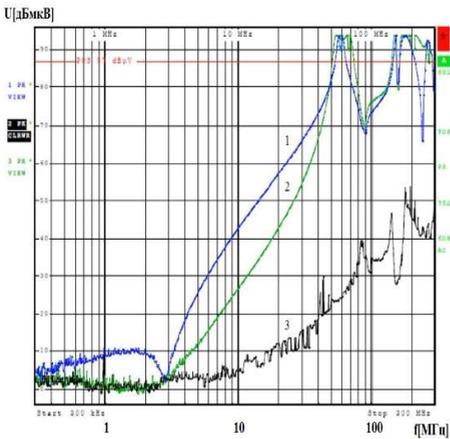


Рис. 7 Частотные диаграммы уровней наведенных напряжений: 1 – без внешнего экрана, используются только экраны витых пар; 2 – внешний экран, заделанный в один корпус соединителя; 3 – внешний экран, заделанный в корпуса обоих соединителей.

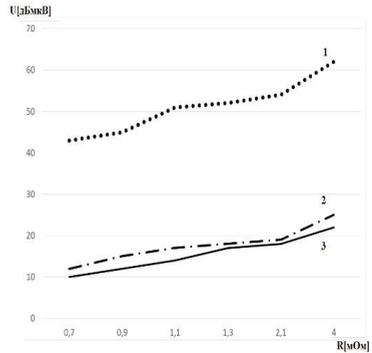


Рис. 6 Диаграмма зависимости уровня наведенного напряжения при изменении переходного сопротивления на разных частотах: 1 – на частоте 70 МГц; 2 – на частоте 30 МГц; 3 – на частоте 100 МГц;

Исследование эффективности экранирования проводилось на основе определения уровней напряжений помех на внутренних проводниках макета кабеля, наведенных внешним электромагнитным полем, рис. 5. Исследуемый макет кабеля на диэлектрической подложке размещался в рабочей зоне ТЕМ-камеры.

Электромагнитное поле ТЕМ-камеры создавалось

генератором, синхронизированным с измерительным приемником, который фиксировал частотную диаграмму ЭМП в виде напряжений на внутренних проводниках кабеля. Целью первого этапа исследования было определить – как повлияет соединение экрана с корпусом соединителя на уровень наведенного напряжения, рис. 6.

На втором этапе было рассмотрено влияние возможных зазоров между экраном кабеля и корпусом соединителя, рис. 7-9.

В третьей главе представлены результаты исследования свойств радиопоглощающих материалов в экстремальных условиях. В разделе 3.1 приведено описание РПМ и способов их применения.

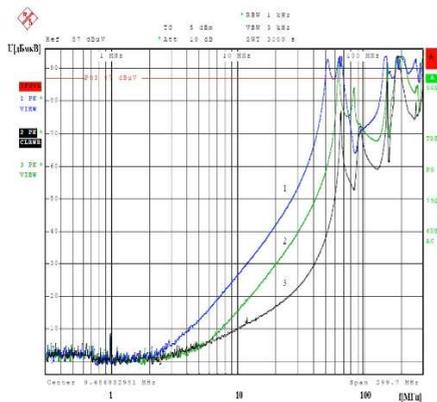


Рис. 8 Частотные диаграммы уровней наведенных напряжений: 1 – без внешнего экрана, используются только экраны витых пар; 2 – внешний экран соединен со вторым корпусом металлической проволокой; 3 – внешний экран соединен со вторым корпусом металлической косичкой.

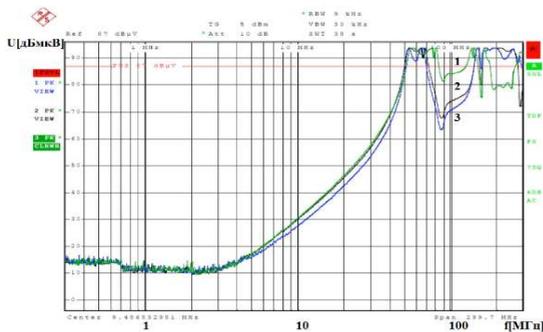


Рис. 9 Частотные диаграммы уровней наведенных напряжений при зазорах в экране различной длины: 1 – Зазор длиной 20 мм; 2 – Зазор длиной 100 мм; 3 – Зазор длиной 300 мм.

В разделе 3.3 Исследованы изменения коэффициента отражения РПМ при воздействии экстремальных температур и вибрации. Для определения влияния вибрации коэффициент отражения образца РПМ был измерен до воздействия и после испытания образца на вибростенде с параметрами перегрузки 8g в течение сорока минут для имитации вибрации взлета ракеты-носителя и вывода спутника

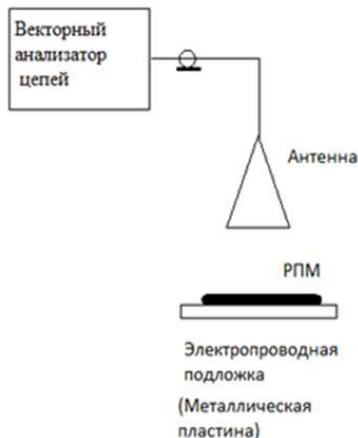


Рис. 10 Схема установки для измерения коэффициента отражения радиопоглощающих материалов

В разделе 3.2 приведены результаты исследования электрофизических свойств РПМ на основе коэффициентов прохождения и отражения электромагнитных волн, рис. 10. Измерены коэффициенты отражения радиоволн от металлического цилиндра и от цилиндра, покрытого слоем РПМ, рис. 11-12.

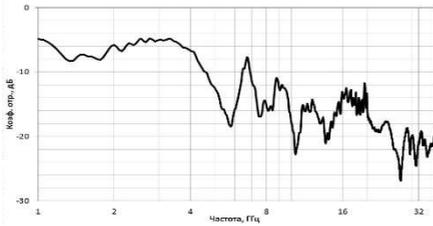


Рис. 11 Частотная диаграмма коэффициента отражения образца РПМ при использовании в качестве подложки металлической пластины

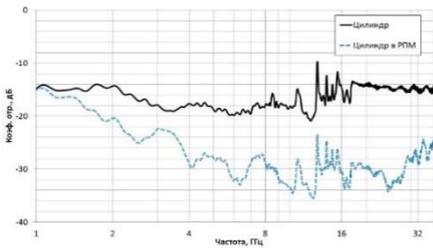


Рис. 12 Частотные диаграммы коэффициентов отражения от металлического цилиндра без РПМ и металлического цилиндра, закрытого РПМ

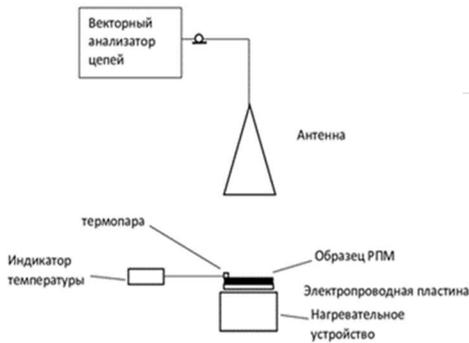


Рис. 14 Схема исследования свойств РПМ при температуре +150°C.

электромагнитной волны от металлической пластины накрытой образцом РПМ в условиях комнатной температуры и при нагреве РПМ до +150 °С, рис 14-15. Для проведения исследования поглощающих свойств РПМ в условиях сверхнизких температур была использована кювета, наполненная жидким азотом, и с размещенным внутри образцом РПМ, рис 16-17.

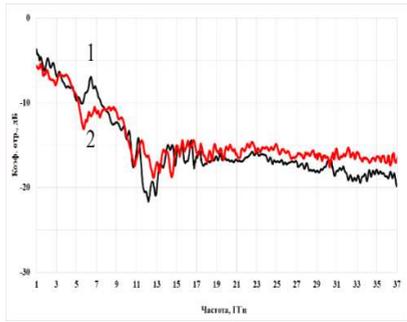


Рис. 13 Частотные диаграммы коэффициентов отражения образца РПМ до и после воздействия вибрации: 1 – образец до воздействия вибрации; 2 – образец после воздействия вибрации.

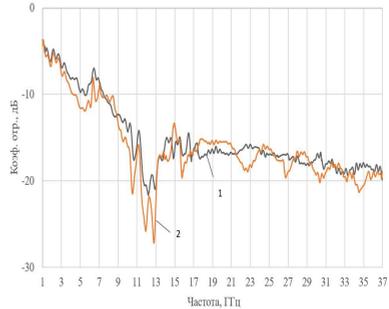


Рис. 15 Частотные диаграммы коэффициента отражения радиопоглощающего материала ТПМВ-1С при разных температурах: 1 – частотная диаграмма коэффициента отражения при температуре 25°C; 2 – частотная диаграмма коэффициента отражения при температуре 150°C.

на орбиту, рис 13. Определены изменения коэффициента отражения

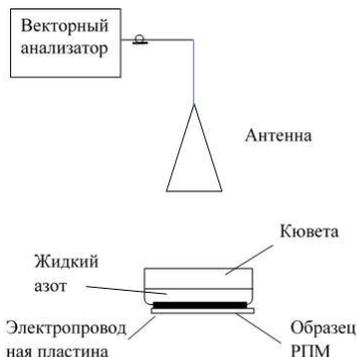


Рис. 16 Схема установки для определения коэффициента отражения РПМ при низких температурах

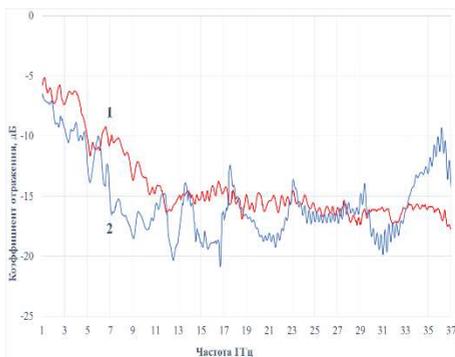


Рис. 17 Частотные диаграммы коэффициента отражения РПМ: 1 – частотная диаграмма коэффициента отражения при температуре 25°C; 2 – частотная диаграмма коэффициента отражения РПМ при температуре -196°C

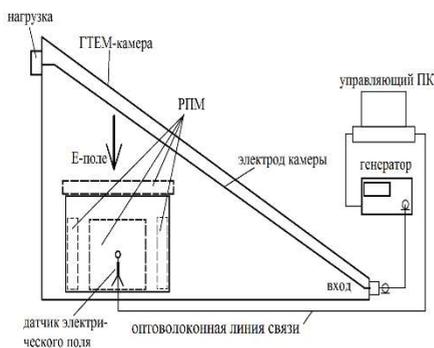


Рис. 18 Схема проведения экспериментального исследования влияния РПМ на внутренние резонансы напряженности электрического поля

металлический куб в качестве макета корпуса устройства, с тремя образцами РПМ во внутреннем пространстве. Макет подвергался воздействию внешнего электрического поля.

В разделе 4.2 показано применение РПМ для уменьшения излучаемой помехоэмиссии бортовых приборов и устройств. В процессе исследования проведены измерения напряженности электрической составляющей электромагнитного поля, излучаемого имитатором бортового прибора через апертуры макета модуля во внешнее пространство.

В качестве имитатора бортового прибора был использован электропроводный корпус кубической формы с размером ребра

В четвертой главе предложены варианты применения РПМ для повышения эффективности экранирования, уменьшения излучаемой помехоэмиссии и снижения уровней высокочастотных кондуктивных помех. В разделе 4.1 показано применение РПМ для ослабления резонансных явлений в модулях ЛА при воздействии внешних ЭМП, рис. 18-20. Использован

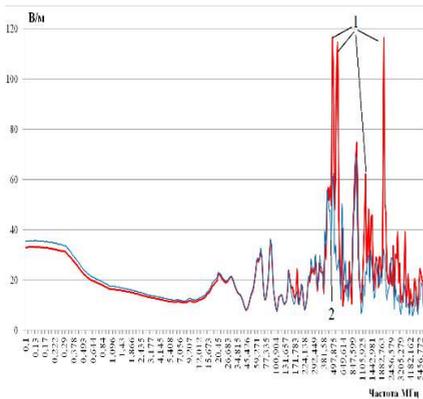


Рис. 19 Частотные диаграммы напряженности электрического поля во внутреннем объеме макета: 1 – без РПМ, с указанием резонансных явлений; 2 – размещено три панели РПМ.

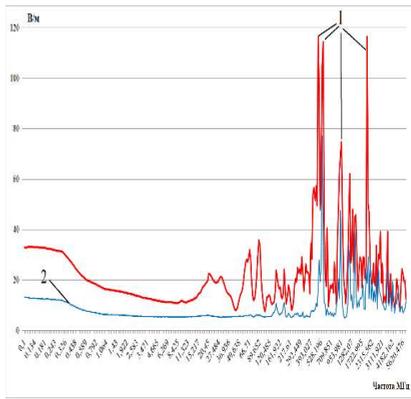


Рис. 20 Частотные диаграммы напряженности электрического поля во внутреннем объеме макета: 1 – без РПМ, с указанием резонансных явлений; 2 – один образец РПМ закрывает открытую часть макета.

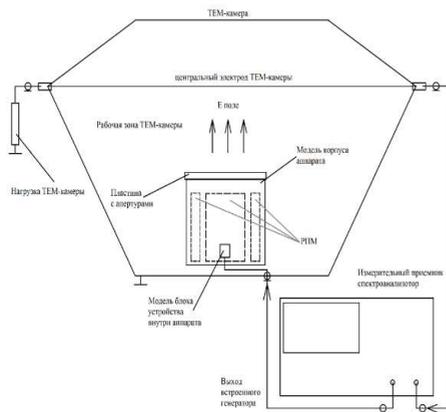


Рис. 21 Схема установки исследования помехоэмиссии макета модуля космического аппарата

100мм, подключенный к генератору высокочастотных сигналов, рис 21. Корпус имитатора бортового прибора создавал внутреннее электромагнитное поле, которое через апертуры макета модуля проникало во внешнее пространство, создавая таким образом внешнюю помехоэмиссию, рис. 22.

В разделе 4.3 предложено применение РПМ для подавления высокочастотных кондуктивных электромагнитных помех. Исследовано снижение уровней кондуктивных электромагнитных помех при применении покрытия кабеля образцом РПМ. Для устранения кондуктивных помех применяют фильтрующие элементы – ФВЧ и ФНЧ. Применение фильтров имеет свои сложности – нужно правильно подобрать место размещения фильтрующего элемента, иначе помеха может просто обойти фильтр, или фильтр может не реализовать заявленные

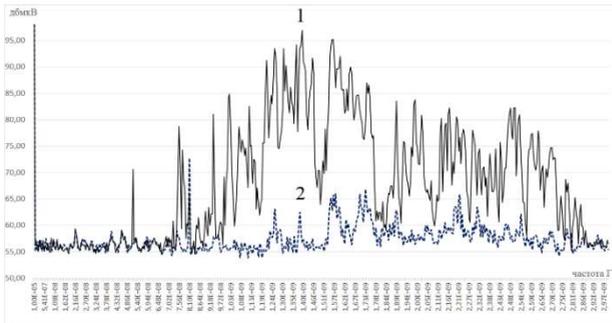


Рис. 22 Частотные диаграммы помехоэмиссии электрического поля, создаваемой макетом модуля ЛА: 1 – без радиопоглощающего материала; 2 – при размещении радиопоглощающего материала во внутреннем пространстве макета модуля.

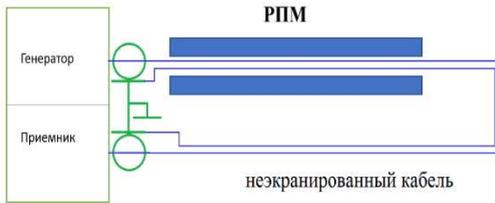


Рис. 23. Схема установки для исследования поглощения высокочастотной кондуктивной помехи с помощью образцов РПМ.

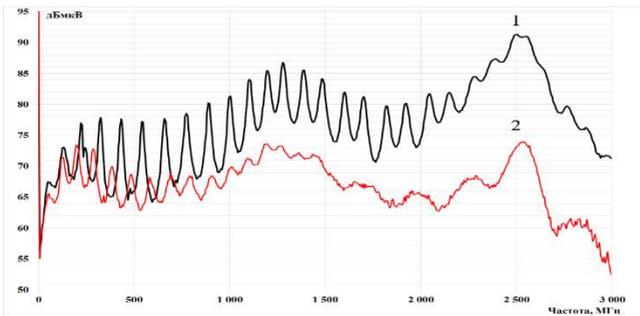


Рис. 24 Частотные Диаграммы высокочастотной помехи, проходящей по кабелю: 1 – уровень напряжения помехи без применения РПМ; 2 – уровень напряжения помехи, когда двухпроводная линия расположена между образцами РПМ.

высокочастотных кондуктивных помех в электрических цепях. При условии размещения РПМ в контакте с оболочками проводов кабельного жгута, помимо экранирующей функции РПМ может отбирать и рассеивать энергию высокочастотной электромагнитной волны, проходящей по проводам жгута, рис. 23-24.

характеристики, если был неправильно встроено в электрическую цепь.

РПМ может уменьшить излучаемую помехоэмиссию, если разместить его во внутреннем объеме конструкции блоков. Исследования показали, что РПМ может стать дополнением не только к элементам электромагнитного экранирования, но и выполнять функцию подавления

В заключении приведены основные выводы и результаты диссертационной работы:

1 Выполнена классификация электромагнитных помех способных воздействовать на электротехнические комплексы летательных аппаратов. Проведен анализ топологических структур проникновения и распространения электромагнитных помех в электрических цепях и конструкции наземных объектов.

2 Предложена топологическая модель проникновения и распространения электромагнитных помех в электрических цепях и конструкции электротехнического комплекса летательного аппарата. На основе предложенной топологической модели разработана методика определения путей распространения и расчета уровней электромагнитных помех.

3 Экспериментально исследовано влияние переходного сопротивления между экраном и кожухом кабельного электрического соединителя на эффективность экранирования кабеля. Показано изменение переходного сопротивления кабеля между экраном кабеля и кожухом электрического соединителя под воздействием климатических и температурных факторов в процессе жизненного цикла. Переходное сопротивление увеличилось в 26 раз при воздействии климатических факторов и в 6 раз при воздействии термоудара на экранированный кабель. Получена экспериментальная зависимость наведенных на внутренних проводниках амплитудных значений напряжений от величин переходных сопротивлений экранированного кабеля.

В результате проведенных исследований установлено, что увеличение переходных сопротивлений уменьшает эффективность экранирования бортовых кабелей. Сделано заключение о том, что при расчете параметров плетеных экранов исходя из заданной, в соответствии с техническими условиями эффективности экранирования, необходимо учитывать ее уменьшение под воздействием температурных и климатических факторов в процессе жизненного цикла изделия.

4 Проведено экспериментальное исследование влияния неоднородностей электромагнитных экранов кабельной сети на эффективность экранирования. Установлено, что при возникновении неоднородности в виде зазора между экраном кабеля и кожухом электрического соединителя уровень наведенной помехи зависит от самого факта наличия зазора и практически не изменяется от размеров зазора. Для зазора длиной в 20 мм и в 300 мм уровень напряжения наведенной помехи практически не изменяется.

Показано, что эффективность экранирования снижается даже при незначительных нарушениях однородности экрана.

Связь экрана кабеля с электрическим соединителем с помощью электропроводной косички или проволоки при наличии зазора между ними не позволяет обеспечить максимальную эффективность экранирования.

На основе проведенных экспериментальных исследований сформулирован вывод о том, что для создания надежной и эффективной защиты от помех необходимо присоединение экрана кабеля к кожухам электрических соединителей по всему периметру контакта кожуха и экрана.

5 Экспериментально исследованы частотные характеристики коэффициентов отражения и прохождения радиопоглощающего материала. Коэффициент отражения РПМ исследован в частотном диапазоне 1-37 ГГц. Получены частотные характеристики коэффициента прохождения в частотном диапазоне до 1000 МГц. Показано, что РПМ помимо радиопоглощающих свойств позволяет обеспечивать эффективность экранирования до 15 дБ.

6 Проведено исследование частотных характеристик коэффициента отражения РПМ в температурных условиях, аналогичных экстремальным температурным условиям космического пространства от -150°C до $+150^{\circ}\text{C}$.

Исследовано воздействие вибрации на радиопоглощающий материал, возникающей в режиме взлета ракеты-носителя и выведению спутника на околоземную орбиту. Экспериментально установлено, что РПМ сохраняет свои свойства в экстремальных температурных условиях в частотном диапазоне от 10 МГц до 37 ГГц. В температурном диапазоне $+150^{\circ}\text{C}$ и -150°C значения частотных диаграмм коэффициента отражения отличаются от значений частотных диаграмм коэффициента отражения РПМ при температуре $+25^{\circ}\text{C}$ не более чем на 2,5-3 дБ.

7 Исследовано свойство радиопоглощающего материала ослаблять резонансные явления во внутреннем пространстве корпусов бортовых приборов, вызванные воздействием внешнего электромагнитного поля. Напряженность электрического поля на резонансных частотах уменьшается от 1,8 до 4 раз.

8 Проведено исследование свойств РПМ позволяющих уменьшать помехоэмиссию бортовых приборов. Установлено что, применение РПМ позволяет уменьшать уровни напряженности электрического поля, характеризующего излучаемую

помехоэмиссию, в частотном диапазоне 100 кГц – 3 ГГц до 30-40 дБ в зависимости от частотного поддиапазона.

Показано, что применение радиопоглощающего материала служит эффективным дополнением к существующим методам ослабления резонансных явлений и уменьшения помехоэмиссии.

9 Предложен способ применения РПМ для подавления высокочастотных кондуктивных помех. Показано, что размещение двухпроводной линии между образцами РПМ позволяет снизить уровень высокочастотных кондуктивных помех на 15 дБ в частотном диапазоне от 100 МГц - 3 ГГц.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых научных журналах, входящих в перечень рекомендуемых изданий ВАК:

1. Жуков П.А., Марченко М.В., Кириллов В. Ю. Влияние переходного сопротивления на эффективность экранирования бортовой кабельной сети летательных атмосферных и космических аппаратов. // Вестник Московского авиационного института. 2017, Т.24. №3, С. 121-126.

2. Журавлев С.Ю., Кириллов В.Ю., Жуков П.А. Исследования радиопоглощающих материалов для космических аппаратов // Технологии электромагнитной совместимости. – 2018. – № 4. – С. 32-39.

3. Жуков П.А., Кириллов В.Ю., Марченко М.В. Влияние способов соединения экрана кабеля с электрическим соединителем на эффективность экранирования // Вестник МЭИ. 2019. № 2. С. 50—56. DOI: 10.24160/1993-6982-2019-2-50-56.

В изданиях, входящих в базы Scopus:

4. P. A. Zhukov, V. Yu. Kirillov, “The application of radio absorbing material to reduce interference emissions from instruments and devices of spacecraft electrical system”, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 868, 18th International Conference “Aviation and Cosmonautics” (AviaSpace-2019), Moscow, Russian Federation. 2019.

5. P. A, Zhukov, V. Yu. Kirillov, “The Use of Radio Absorbing Materials for Electronic Devices” *2020 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE)*, IEEE, pp. 1-5, 2020.

6. В. Ю. Кириллов, П. А. Жуков, С. Ю. Журавлев, М. М. Томилин Радиопоглощающие материалы для космических

аппаратов // *КОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ*, 2020, том 58, № 5, с. 1–7. DOI: 10.31857/S0023420620050064.

7. Petr A. Zhukov, Vladimir Yu. Kirillov, Maksim M. Tomilin, “Study of TPMV-1S radio absorbing material for use on spacecraft” 2021 *International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE)*, IEEE, pp., 2021.

Материалы научных конференций:

8. Испытания эффективности экранирования БКС, Жуков П.А., Кириллов В.Ю., Московская молодёжная научно-практическая конференция «Инновации в авиации и космонавтике – 2014», *Сборник тезисов докладов*. – М.: ООО «Принт-салон». Москва 2014 г.

9. Влияние переходного сопротивления на эффективность экранирования БКС ЛА и КА, Жуков П.А., Марченко М.В., 15-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2016». Москва. Тезисы. – Типография «Люксор», 2016. с. 396-397.

10. Жуков П.А. Марченко М.В., Изменение эффективности экранирования кабелей бортовой сети в процессе жизненного цикла// Сборник трудов конференции «Техно-ЭМС 2017», ВШЭ НИУ МИЭМ, 2017.

11. Жуков П.А. Влияние вариантов заделки экрана кабеля и переходного сопротивления на эффективность экранирования // тезисы конференции «Авиация и космонавтика – 2017», МАИ, 2017, – Типография «Люксор», 2017. с. 156-157.

12. Жуков П.А., Кириллов В.Ю., Томилин М.М., Исследование восприимчивости элементов бортовой кабельной сети беспилотных летательных аппаратов // Сборник трудов конференции «Техно-ЭМС 2018», ВШЭ НИУ МИЭМ, 2018.

13. Жуков П.А., Кириллов В.Ю., Журавлев С.Ю. Исследование экранирующих свойств радиопоглощающих материалов // тезисы конференции «Авиация и космонавтика – 2018», МАИ, 2018, – Типография «Люксор», 2018. с. 149-150.

14. Журавлев С.Ю., Жуков П.А., Кириллов В.Ю., Томилин М.М., Охотников Д.А.//Комплексные исследования радиопоглощающих материалов. Технологии, измерения и испытания в области электромагнитной совместимости: труды 5-й Всероссийской научно-технической конференции «ТехноЭМС-2018». М,2018. С.54-58.

15. Жуков П.А., Торлупа А.А., Применение радиопоглощающих материалов для космических аппаратов // Сборник трудов конференции «Техно-ЭМС 2019», ВШЭ НИУ МИЭМ, 2019.

16. Жуков П.А., Кириллов В.Ю., Применение радиопоглощающих материалов для уменьшения помехоэмиссии электротехнических комплексов космических аппаратов // тезисы конференции «Авиация и космонавтика – 2019», МАИ, 2019, – Типография «Люксор», 2019. с. 88-89.

17. Жуков П.А., Кириллов В.Ю., Томилин М.М., Применение радиопоглощающих материалов для уменьшения помехоэмиссии электронных приборов и устройств // Сборник трудов конференции «Техно-ЭМС 2020», ВШЭ НИУ МИЭМ, 2020.

18. Кириллов В.Ю., Торлупа А.А., Жуков П.А., Применение радиопоглощающих материалов для уменьшения помехоэмиссии электротехнических комплексов космических аппаратов // тезисы конференции «Авиация и космонавтика – 2020», МАИ, 2020, – Типография «Люксор», 2020. с. 271-272.

19. Исследование электрофизических свойств радиопоглощающего материала ТПМВ-1С, В.Ю. Кириллов, П.А. Жуков, С.Ю. Журавлев, М.М. Томилин, материалы конференции «Электромагнитное поле и материалы» (фундаментальные физические исследования), - М.: Издательство МЭИ, 2020. С. 303-307

20. Применение радиопоглощающего материала ТПМВ-1С для уменьшения помехоэмиссии и ослабления резонансных явлений радиоэлектронной аппаратуры, П.А. Жуков, В.Ю. Кириллов, материалы конференции «Электромагнитное поле и материалы» (фундаментальные физические исследования), - М.: Издательство МЭИ, 2020. С. 308-312

Печать 17 марта 2022 г. Тираж 100 экз.