

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ
(национальный исследовательский университет)»**

Жуков Петр Александрович



**Исследование средств защиты электротехнических комплексов летательных
аппаратов от электромагнитных воздействий**

Специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы»

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
Доктор технических наук, профессор
Владимир Юрьевич Кириллов

Москва
2022г.

Оглавление

Введение

1. Электромагнитные помехи в конструкции летательного аппарата	12
1.1 Классификация электромагнитных помех, действующих на летательный аппарат.	12
1.2 Структурная схема проникновения и распространения ЭМП в электрических цепях электротехнических комплексов наземных объектов.	18
1.2.1 Распространение электромагнитных помех через неоднородности экрана	
1.2.2 Проникновение помех в наземные объекты.	18
1.3 Проникновение и распространение электромагнитных помех в конструкции и электрических цепях электротехнического комплекса летательного аппарата.	26
1.3.1 Схемы путей распространения помех в конструкции ЛА.	26
1.3.2 Топологическая модель проникновения и распространения ЭМП в конструкции ЛА.	29
1.3.3 Методика определения путей проникновения, распространения и расчета электромагнитных помех в электрических цепях и конструкции летательного аппарата на основе топологической модели.	40
2. Исследование эффективности экранирования бортовых кабелей.	51
2.1 Параметры и характеристики экранов кабелей.	51
2.2 Зависимость эффективности экранирования кабеля от переходного сопротивления между экраном и кожухом электрического соединителя.	56
2.3 Исследование восприимчивости кабеля с неоднородностями экрана.	66
3. Исследование свойств радиопоглощающих материалов в экстремальных условиях.	74

3.1	Описание радиопоглощающих материалов и способов их применения.	74
3.2	Исследование коэффициентов отражения и прохождения радиопоглощающего материала.	79
3.3	Исследование коэффициента отражения радиопоглощающего материала при экстремальных температурах и вибрации.	95
4	Применение радиопоглощающих материалов для повышения эффективности экранирования	105
4.1	Применение радиопоглощающего материала для ослабления резонансных явлений в модулях ЛА при воздействии внешних ЭМ полей.	105
4.2	Применение радиопоглощающего материала для уменьшения излучаемой помехоэмиссии бортовых приборов и устройств	111
4.3	Применение радиопоглощающего материала для фильтрации наведенных высокочастотных кондуктивных помех.	117
	Заключение	122
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	125
	АКТ О ВНЕДРЕНИИ	
	Приложение	

Введение.

Актуальность работы.

Обеспечение электромагнитной совместимости (ЭМС) и защиты от воздействия электромагнитных помех имеет огромную важность в электротехнических комплексах и системах летательных и космических аппаратов (ЛА и КА). В современных КА и ЛА бортовые приборы и устройства и системы могут быть подвержены электромагнитным воздействиям, которые ухудшают качество их функционирования и могут приводить к долговременным сбоям и отказам. От исправного функционирования бортовых приборов и устройств зависит работоспособность летательного аппарата в целом. На данный момент существуют определенные стандарты по производству оборудования и кабельных сетей, предназначенных для летательных аппаратов, а также стандартизированные методы обеспечения и проверки защиты от различных видов помех.

Однако технологии постоянно развиваются, и значительная часть усилий направлена на снижение энергопотребления и уменьшение габаритов электронных элементов. Миниатюризация и экономичность электронных систем, в свою очередь, порождает новые проблемы ЭМС и сильно обостряет старые, поскольку восприимчивость электротехнических комплексов к различным видам электромагнитных воздействий от внешних и внутренних источников значительно возрастает. Кроме того, количество внешних искусственных источников электромагнитных воздействий вокруг постоянно увеличивается. Это приводит к резкому повышению вероятности выхода из строя ЛА от электромагнитных воздействий в виде электромагнитных полей, излучаемых не только естественными, природными, но и в первую очередь искусственными источниками.

Возрастание чувствительности бортовой электронной аппаратуры к электромагнитным воздействиям требует более внимательного отношения к вопросам повышения помехоустойчивости и помехозащищенности. [1-30,107,110].

Существующие методы обеспечения помехоустойчивости и помехозащищенности не всегда обладают достаточной эффективностью в сложной

электромагнитной обстановке, создаваемой современными техническими средствами генерирования электромагнитных воздействий.

Для повышения помехоустойчивости и помехозащищенности требуется дополнительные исследования технических параметров, таких как переходные сопротивления и эффективность экранирования, исследования путей проникновения и распространения электромагнитных воздействий в конструкции и электрических цепях летательных аппаратов.

Летательные аппараты являются сложными многокомпонентными техническими устройствами и имеют в своей структуре множество систем. Одной из таких является бортовая кабельная сеть ЛА (БКС ЛА). Бортовая кабельная сеть выполняет функцию связи между бортовыми системами и устройствами, обеспечивает электропитание и обмен информацией. Электромагнитные воздействия оказывают влияние через кабельную сеть на все бортовые приборы и устройства электротехнического комплекса летательного аппарата и, следовательно, на качество функционирования всех систем летательного аппарата. Наиболее уязвимыми для проникновения помех являются места соединения экранов кабелей с электрическими соединителями бортовой кабельной сети. [44-48, 66, 83,90,106-111].

Исследование существующих способов электромагнитного экранирования и изучение путей проникновения и распространения электромагнитных воздействий в виде высокочастотных электромагнитных полей в конструкции ЛА позволяет оценить эффективность применяемых технических средств защиты и разработать рекомендации по повышению помехоустойчивости и помехозащищенности. Результаты исследования позволяют разработать методы и технические средства повышения эффективности экранирования путем дополнения существующих традиционных способов новыми подходами к решению проблем защиты от электромагнитных воздействий.

Вопросам решения проблем защиты от электромагнитных воздействий которые заключаются в исследовании электромагнитных воздействий на электронную аппаратуру и обеспечении 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 [1-30, 40-43, 47, 48, 81, 89, 90] приведены результаты исследования электромагнитных воздействий на кабельную сеть и связанные с ней элементы электротехнического комплекса летательного аппарата, в [82, 31, 32, 78, 80] приведены примеры топологии проникновения помехи, распространения помехи и топологические модели для прогнозирования помехозащищенности.

Целью диссертационной работы является исследование эффективности существующих методов и технических средств защиты и разработка новых методов и средств защиты приборов и устройств бортовых электротехнических комплексов для повышения помехоустойчивости и помехозащищенности летательных аппаратов от электромагнитных воздействий.

Для достижения поставленной цели необходимо:

- выполнить классификацию электромагнитных воздействий на приборы и устройства бортовых комплексов ЛА;

- разработать топологическую модель проникновения и распространения электромагнитных воздействий в виде излучаемых и кондуктивных помех в электрических цепях электротехнических комплексов и внутреннем объеме конструкции ЛА;

- предложить методику нахождения путей проникновения, распространения и расчета величин электромагнитных помех в электрических цепях и конструкции ЛА;

- исследовать зависимость эффективности экранирования от неоднородностей экранов кабелей и переходного сопротивления между экранами и кожухами электрических соединителей;

- исследовать частотные характеристики коэффициента отражения радиопоглощающего материала, предназначенного для использования в электротехнических комплексах летательных и космических аппаратах;

- предложить способ применения радиопоглощающего материала для уменьшения помехоэмиссии и ослабления резонансных явлений в приборных модулях космических аппаратов;

- предложить способ применения радиопоглощающих материалов для фильтрации наведенных высокочастотных кондуктивных помех в электрических цепях электротехнических комплексов ЛА

Предмет и объект исследования

Предметом исследования является помехозащищенность электрического комплекса от электромагнитных воздействий в виде излучаемых и кондуктивных помех, 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 и методы и технические средства экспериментальных исследований. Для проведения расчетов использованы средства MS Excel.

Научная новизна диссертационной работы

Научная новизна данной работы заключается в следующем:

- предложена топологическая модель проникновения и распространения электромагнитных воздействий в виде излучаемых и кондуктивных помех в электрических цепях и конструкции ЛА;
- предложена методика определения путей проникновения, распространения и расчета электромагнитных помех в электрических цепях и конструкции ЛА;
- получены зависимости эффективности экранирования от неоднородностей экранов кабелей и переходного сопротивления между экранами кабелей и кожухами электрических соединителей;

- определены частотные характеристики коэффициента отражения радиопоглощающего материала (РПМ) при экстремальных температурах и вибрации;
- предложен способ применения радиопоглощающих материалов для ослабления явлений резонансов электромагнитных полей и уменьшения помехоэмиссии в корпусах приборов и устройств, приборных модулях и конструкционных отсеках ЛА;
- предложен способ применения радиопоглощающих материалов для фильтрации наведенных высокочастотных кондуктивных помех в электрических цепях электротехнических комплексов 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:

- предложенная методика позволяет определять пути проникновения и распространения и рассчитывать электромагнитные помехи во внутренних цепях и пространстве ЛА;
- проведенные исследования зависимости эффективности экранирования от неоднородностей экранов бортовых кабелей и величины переходного сопротивления между экранами и кожухами электрических соединителей определяют условия достижения необходимого уровня эффективности экранирования бортовых кабелей;
- на основе результатов исследования коэффициента отражения радиопоглощающего материала при экстремальных температурах и вибрации доказана возможность его применения на космических аппаратах;
- предложенный способ применения радиопоглощающего материала позволяет увеличить эффективность экранирования благодаря снижению помехоэмиссии и

уменьшению резонансных явлений в корпусах приборов, устройств, приборных модулях и конструкционных отсеках ЛА;

- предложенный способ применения радиопоглощающего материала в электрических цепях позволяет осуществлять фильтрацию высокочастотные кондуктивные помехи в электрических цепях

Основные положения, выносимые на защиту

1. Топологическая модель проникновения и распространения электромагнитных воздействий в виде излучаемых и кондуктивных помех в электрических цепях и конструкции ЛА;
2. Методика определения путей проникновения, распространения и расчета электромагнитных помех в электрических цепях и конструкции летательного аппарата;
3. Результаты экспериментального исследования влияния неоднородностей экранов и переходных сопротивлений экранированных жгутов на эффективность экранирования;
4. Результаты исследования частотных характеристик коэффициента отражения радиопоглощающего материала при экстремальных температурах и вибрации.
5. Способ применения радиопоглощающих материалов для увеличения эффективности экранирования благодаря уменьшению помехоэмиссии и ослаблению резонансных явлений в корпусах приборов, устройств, приборных модулях и конструкционных отсеках ЛА;
6. Способ применения радиопоглощающего материала для фильтрации наведенных высокочастотных кондуктивных помех в электрических цепях электротехнического комплекса 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 и внедрены в учебный процесс кафедры 309 МАИ.

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 137 страниц, 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.

1. Электромагнитные помехи в конструкции летательного аппарата

1.1 Классификация электромагнитных помех, воздействующих на летательный аппарат

Источники ЭМП, воздействующих на бортовое оборудование летательного аппарата.

Помехи, воздействующие на ЛА можно подразделить на помехи естественного происхождения и помехи искусственного происхождения. На рис.1.1 приведены основные источники ЭМП. К источникам естественных ЭМП, воздействующих на ЛА относятся грозовые разряды [80-82], электростатические разряды и электромагнитные излучения атмосферы и космоса, а так же НЛО.

Источники искусственных ЭМП, в свою очередь, делятся на источники преднамеренных и помех. В число непреднамеренных источников ЭМП входят различные транспортные, промышленные и индустриальные системы, системы связи и навигации, различные радиопередающие и радиолокационные станции. Источниками преднамеренных ЭМП относятся к категории средства РЭБ (радиоэлектронной борьбы), применяются для целенаправленного вывода из строя технических средств ЛА. Это могут быть генераторы сверхкоротких импульсов или взрывомагнитные генераторы (генераторы сверхширокополосных импульсов).

В число непреднамеренных источников можно отнести помехи, создаваемые некоторыми техническими средствами ЛА, воздействующими на другие.

Естественные источники ЭМП

Грозовые разряды

Грозовой разряд – наиболее опасное для летательных аппаратов природное явление. Грозовой разряд является источником мощных электромагнитных помех в виде импульсного тока (молнии) в атмосфере и сопутствующего ему электромагнитного поля. [58-60].

Грозовой разряд начинается с лидерной стадии, которая возникает при напряженностях порядка $1-3 \cdot 10^6$ В/м и следующим за ней главным разрядом, который и является основным источником мощного импульсного электромагнитного поля. Часто разряды бывают многократными (в среднем до 15)

с интервалами времени 0,001- 0,5с причем последующие разряды слабее п
Электростатические разряды

Электростатические разряды могут возникать на борту атмосферных и космических летательных аппаратов вследствие их общего или (и) дифференциального заряжения вследствие трибоэлектрического эффекта, т.е. трения проводящих и диэлектрических поверхностей его конструкции о воздух, частиц атмосферных осадков (снег, дождь), пыли.

Коронные разряды представляют собой импульсы с амплитудным значением $\sim 10\text{мА}$, фронтом $\sim 10\text{нс}$ и длительностью $\sim 100\text{нс}$. Коронные разряды создают широкополосные излучаемые электромагнитные помехи, которые могут существенно ухудшать работу радиоэлектронных средств. Излучаемые помехи, возникающие от искровых пробоев диэлектрических поверхностей с частотным спектром $\sim 10\text{-}1000\text{ МГц}$ также могут оказывать влияние на работу радиоэлектронных устройств летательных аппаратов.

Заряжение космических аппаратов происходит в условиях пролета через области космической плазмы с высокой концентрацией элементарных частиц, обладающими энергией $\sim 10\text{-}100\text{ кэВ}$. Накопление электрических зарядов на проводящей конструкции космического аппарата приводит к общему заряжению, неодинаковое распределение зарядов на поверхностях и в объеме диэлектрических материалов вызывает дифференциальное заряжение, что приводит к возникновению различных типов электростатических разрядов [61].

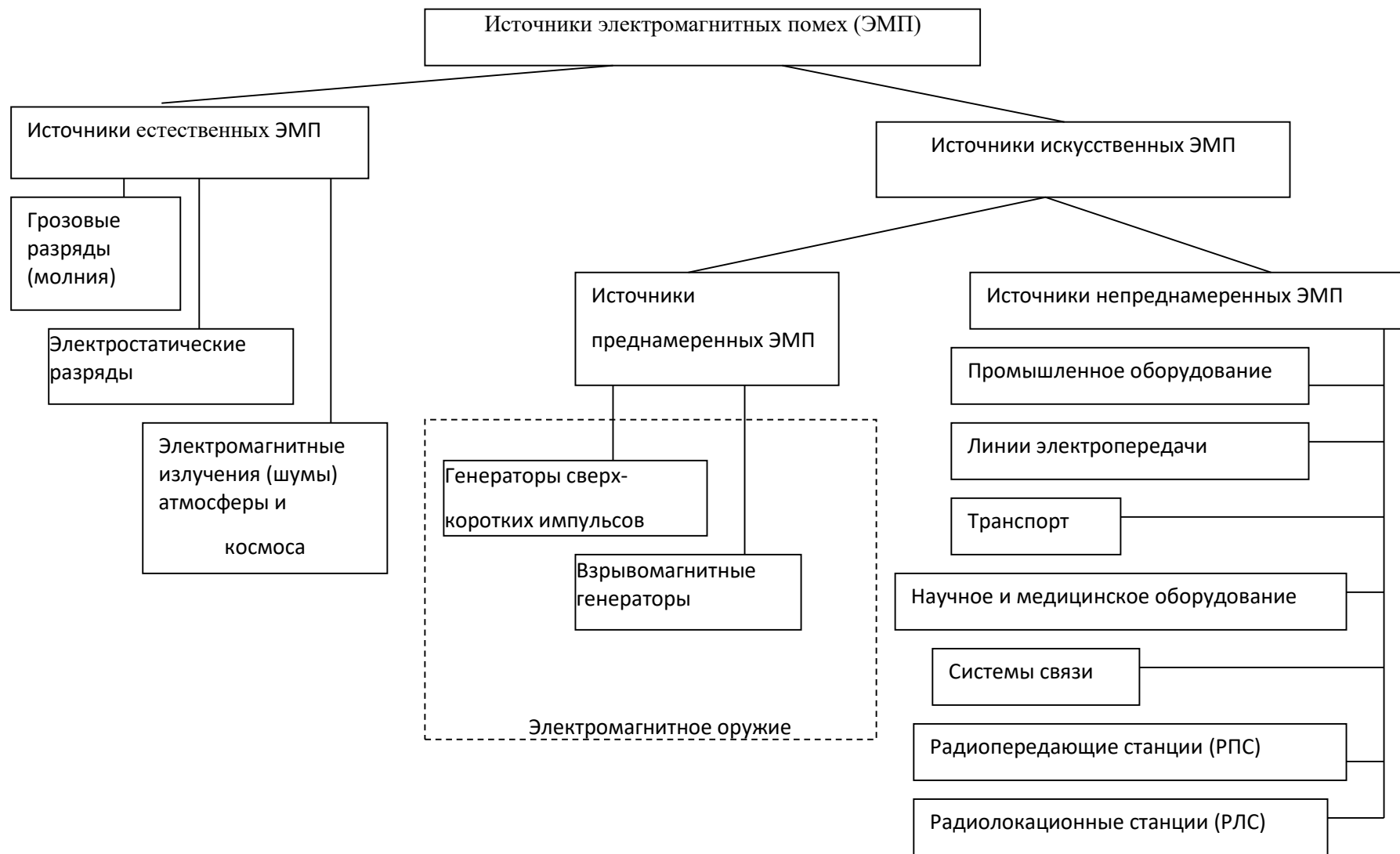


Рис. 1.1 Источники электромагнитных помех

Геомагнитные возмущения

Геомагнитные возмущения возникают в результате солнечной активности, период которой составляет приблизительно 12 лет. Выбрасываемые Солнцем в период наибольшей активности элементарные частицы (электроны, протоны), поток которых в космическом пространстве называют «солнечным ветром» при приближении к Земле захватывается ее магнитным полем. В результате в магнитосфере Земли образуются области высокой концентрации элементарных частиц. Высокочастотное излучение областей околоземного космического пространства с высокой концентрацией элементарных частиц, спектр которого лежит в пределах 100 МГц-1000 МГц может значительно ухудшать радиосвязь и работу бортовых радиоэлектронных приборов и систем [61].

Неопознанные летающие объекты.

Неопознанные летающие объекты, предположительно, в ряде случаев представляют собой плазменные образования конечных размеров, диско или сигарообразной формы, перемещающиеся в пространстве по сложным траекториям. При описании случаев пролета на близком расстоянии от неопознанных летающих объектов пилоты отмечали отличное от нормального поведение бортовых приборов, а также временное нарушение радиосвязи. Несмотря на то, что специальных исследований, в силу случайности встречи летательных аппаратов с неопознанными летающими объектами не проводилось, можно сделать предположение о том, что указанные объекты на близком расстоянии создают сильное электромагнитное поле, достаточное для того чтобы существенно ухудшить качество функционирования бортовых приборов и систем летательных аппаратов.

Искусственные источники электромагнитных помех.

Электромагнитный импульс ядерного взрыва

Ядерный взрыв является источником мощного импульсного электромагнитного поля, так называемого электромагнитного импульса ядерного взрыва (ЭМИ ЯВ) [62, 63]. Электромагнитный импульс создается

импульсным электронным током, образующимся внутри взрыва в силу происходящих там физических процессов преобразования ядерной энергии в электромагнитную. Электрическая и магнитная составляющие электромагнитного поля изменяются во времени приближенно по апериодическому закону.

Параметры электромагнитного импульса зависят от мощности, высоты взрыва (если он высотный), расстояния от центра взрыва. Многообразие параметров сведены к набору стандартных параметров для электрического и магнитного полей. Параметры ЭМИ ЯВ [63]

$$E=50 \text{ [кВ/м];}$$

$$H=133 \text{ [кА/м];}$$

Длительность фронта – 2,3 нс;

Длительность импульса – 23нс.

Индустриальные источники электромагнитных помех

К основным индустриальным источникам электромагнитных помех относят: высоковольтные научно-исследовательские и производственные установки; высоковольтные линии электропередач; контактная сеть железнодорожного и электрического транспорта[64-68]. Перечисленные источники представляют опасность только для низколетящих атмосферных аппаратов, несмотря на то, что они могут создавать импульсные поля с большими напряженностями электрического и магнитного поля. Электромагнитные поля создаваемые указанными источниками имеют локальный характер, их напряженность уменьшается при увеличении расстояния R от источника по закону $\sim (1/R^2 \div 1/R^3)$ и помимо этого их появление может носить случайный характер. Поэтому поля таких источников могут представлять опасность для низколетящего аппарата, находящегося в момент их возникновения, например, в случае аварийного режима, на расстоянии в несколько десятков метров от источника.

Следует отметить, что маршруты полета самолетов планируются с учетом расположения передающих антенн радиовещательных станций и соответственно вне областей, где напряженности электромагнитного поля превышает допустимые для бортовых систем значения.

Электромагнитное оружие и средства РЭБ

Электромагнитным оружием называются технические средства, предназначенные для создания преднамеренных электромагнитных помех в виде импульсных электромагнитных полей и полей высоких и сверхвысоких частот с целью ухудшения качества функционирования, нарушения режимов работы, полному нарушению работоспособности и выходу из строя электронных элементов, устройств приборов и систем летательных аппаратов.

К основным типам электромагнитного оружия относят: взрывомагнитные генераторы; установки сверхширокополосных импульсов; установки излучения в микроволновом диапазоне [69-73].

Взрывомагнитные генераторы являются одноразовыми устройствами, позволяющими на основе энергии используемого взрывчатого вещества в течение нескольких микросекунд изменить параметры индуктивной части специально сконструированного R, L, C контура, что позволяет увеличить первоначально протекающий в контуре ток до значений 10^7 А и таким образом создать сверхсильное магнитное поле с высокой плотностью энергии, достигающей 1 кДж/см^3 , мощностью до 10 ГВт. Создаваемое импульсное сверхсильное электромагнитное поле является ненаправленным и локальным и поэтому деструктивно воздействует на бортовые электронные приборы и системы летательных аппаратов в радиусе от нескольких десятков до сотен метров. Использование взрывомагнитного генератора, с целью деструктивного воздействия на бортовую электронную аппаратуру связано с необходимостью его установки на средствах доставки его к летательному аппарату на траектории его полета.

Установки сверхширокополосных импульсов состоят из генераторов импульсов малой длительности и излучающих антенн. Различные типы

существующих установок позволяют создавать направленное импульсное электромагнитное поле в следующем диапазоне параметров: [73]

-длительность импульсов $(0,1-3) \cdot 10^{-9}$ с;

-длительность фронта импульса $(85-250) \cdot 10^{-12}$ с;

-амплитудное значение импульсного электромагнитного поля 56кВ/м на расстоянии 100м (у наиболее совершенных установок)

-частоты генерирования импульсов для различных установок могут варьироваться от сотен герц до нескольких килогерц.

Импульсы передаются групповыми последовательностями (пачками) длительностью (1-30) с интервалом 1с.

Воздействие электромагнитного поля от установок сверхширокополосных импульсов на бортовые системы летательных аппаратов по сравнению с электромагнитным импульсом ядерного взрыва, при сопоставимых амплитудных напряженностях электрического поля более эффективно в смысле ухудшения качества функционирования и потери работоспособности вследствие меньших значений длительности фронта импульсов и их повторяемостью.

Установки микроволнового излучения создают направленное электромагнитное поле с относительно большой напряженностью на значительном расстоянии. Установка с генератором, работающем на частоте 3ГГц с выходной мощностью 2 кВт, подключенном к излучающей антенне площадью 93,5 м² создает направленное электромагнитное поле с напряженностью электрической составляющей $E=600$ В/м на расстоянии 10 км от антенны. Нахождение летательных аппаратов в зоне действия установки микроволнового излучения может представлять опасность для бортовых электронных систем, в частности для работы бортового вычислительного комплекса.

Косвенным подтверждением может служить следующий факт. Облучение персонального компьютера электромагнитным полем в частотном диапазоне от 1 до 3 ГГц с напряженностью электрической составляющей 100

В/м приводит к потере данных, ошибках при выполнении программы и необходимости перезагрузки.

Электромагнитное оружие на основе установок микроволнового излучения и генераторов сверхширокополосных импульсов может эффективно применяться в военных целях против летательных аппаратов различного назначения.

1.2 Структурная топологическая схема проникновения и распространения ЭМП в электрических цепях электротехнических комплексов наземных объектов.

1.2.1 Распространение электромагнитных помех через неоднородности экрана.

Идеальный электромагнитный экран – это полностью замкнутая непрерывная поверхность с бесконечной проводимостью. Внутри идеального экрана полностью отсутствуют помехи от внешних источников. Для реальных устройств идеальное экранирование не достижимо. Проводимость материала всегда конечна, а экран неоднороден – в нем присутствуют отверстия, щели, крышки, люки и иные апертуры. К идеальной модели можно приблизиться при условии, если минимальная длина волны помехи значительно превышает размеры экрана с апертурами, но при повышении частоты и особенно для сверхширокополосных сигналов это не соблюдается. [71,73]

Реальные экраны всегда имеют апертуры для проникновения в экранированную область кабелей, проводов, оптоволоконных линий связи, а также трубопроводов для систем жизнеобеспечения. Эти элементы становятся путями проникновения помех в экранированный объем – рис. 1.2.

Если проникающие извне помехи меньше помех, создаваемых устройствами внутри экранированного объема – данный экран эффективно непроницаем.

Межсистемная ЭМС подразумевает наличие источников помех вне системы. В этом случае следует обеспечивать совместную работу системы с источниками помех, рис. 1.3. При этом, электромагнитное воздействие проходит через ряд барьеров системного и внутрисистемного уровней, и для рассмотрения данного процесса можно построить топологическую модель.

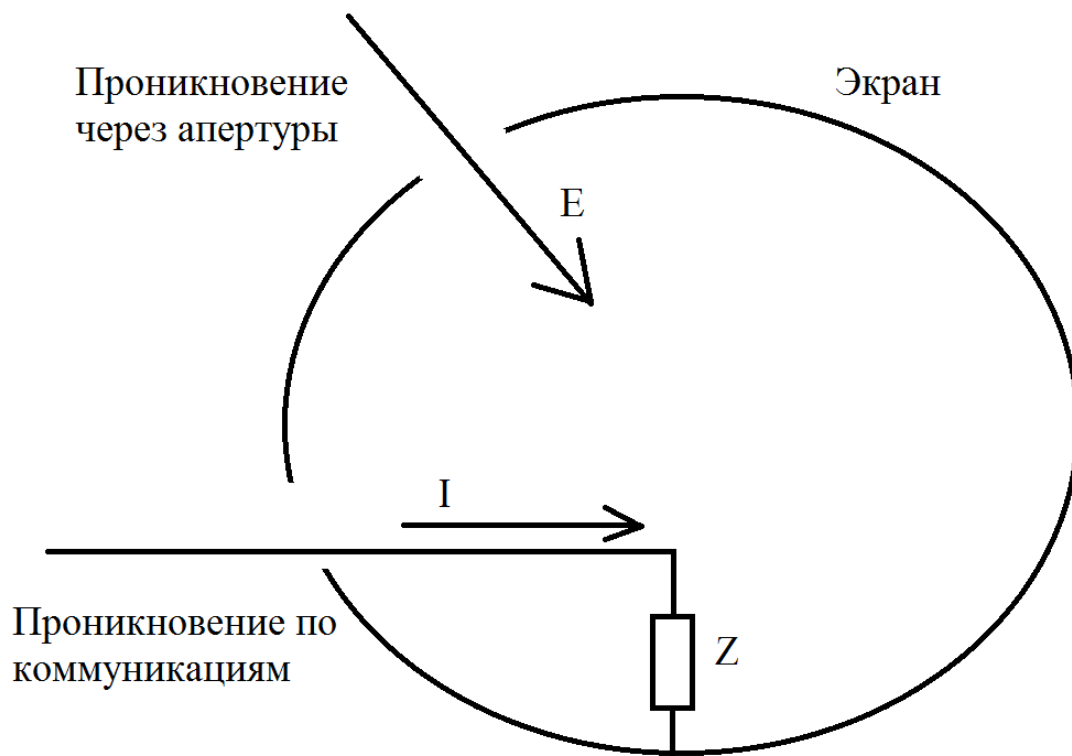


Рис. 1.2 Неоднородный экран с апертурой и отверстием для коммуникаций

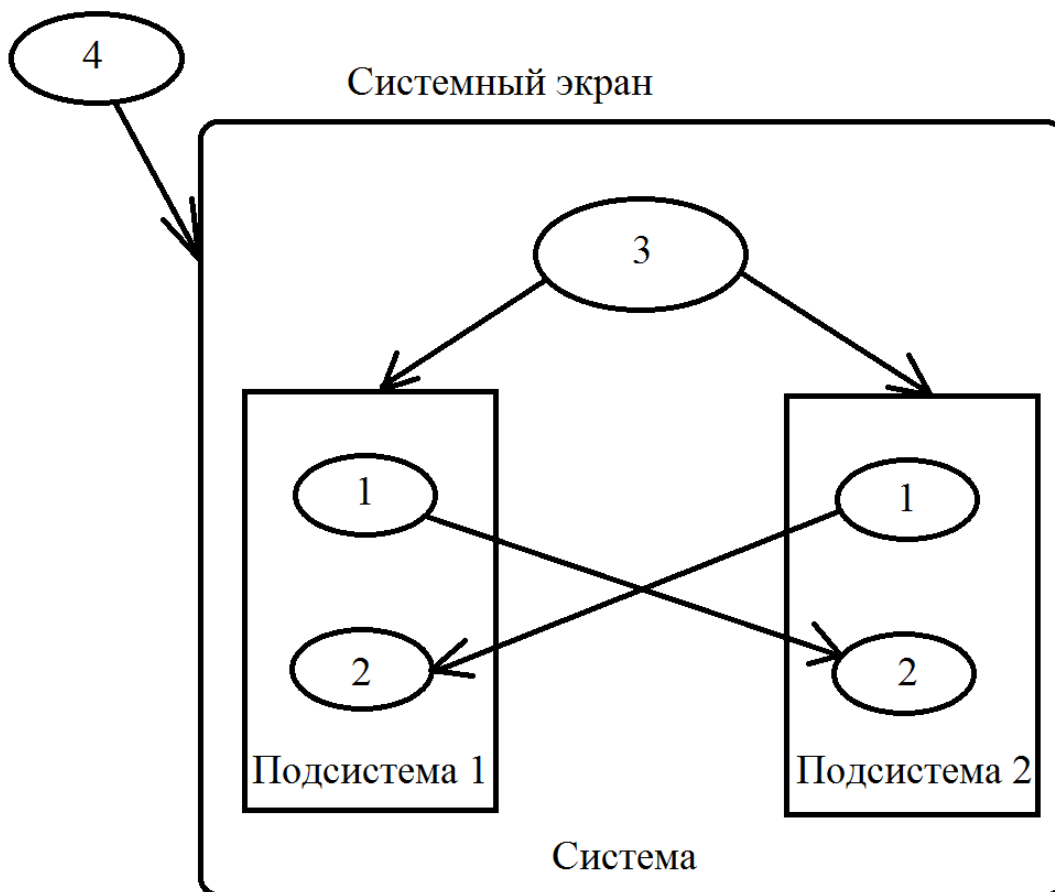


Рис. 1.3 Иллюстрация межсистемной ЭМС, система, подсистемы, 1 – внутрисистемные источники помех, 2 – внутрисистемные рецепторы помех, 3 – общий системный источник помех, 4 – источник помех вне системы.

Распространение электромагнитной энергии происходит по двум каналам: по проводникам – кондуктивный канал; и в виде поля – канал электромагнитной эмиссии. В первом случае каналом становятся все кабели, соединяющие аппаратуру с другими системами. Во втором случае энергия помехи распространяется в виде электромагнитного поля через окружающую среду, частично создавая наведенные кондуктивные помехи в кабелях, и частично проникая через неидеальные экраны корпусов напрямую.

В данных работах [31, 63, 74–78] применяются топологические структуры для анализа путей распространения электромагнитных помех в электрических цепях и конструкциях электротехнических комплексов различных объектов.

1.2.2 Проникновение помех в наземные объекты.

На рис. 1.4 приведена обобщенная и упрощенная топологическая система, заключенная в ограниченном объеме. Внутри объема выделены зоны, разделенные экранами. Внешняя поверхность соответствует, например, стене здания, состоит из различных материалов (бетон кирпич, металл и т.д.) и пронизана каналами проникновения обоих видов. Электрооборудование размещается в разных местах объема и связано электропроводкой. Корпуса оборудования также пронизаны отверстиями для кабелей и вентиляции.

Существует два подхода – глобальное и специализированное экранирование. Глобальное подразумевает использование замкнутого экрана для всей системы. В таком случае даже все апертуры должны быть защищены экранами, а глобальный экран может быть выполнен в стене здания или уменьшен непосредственно до объема чувствительного оборудования. Специализированное экранирование предназначено для защиты конкретного оборудования и выполняется в соответствии с требованиями для конкретных случаев.

В целом, для случая с электрооборудованием в здании можно построить следующую схему топологии проникновения помех от внешнего источника – рис. 1.5. [80]

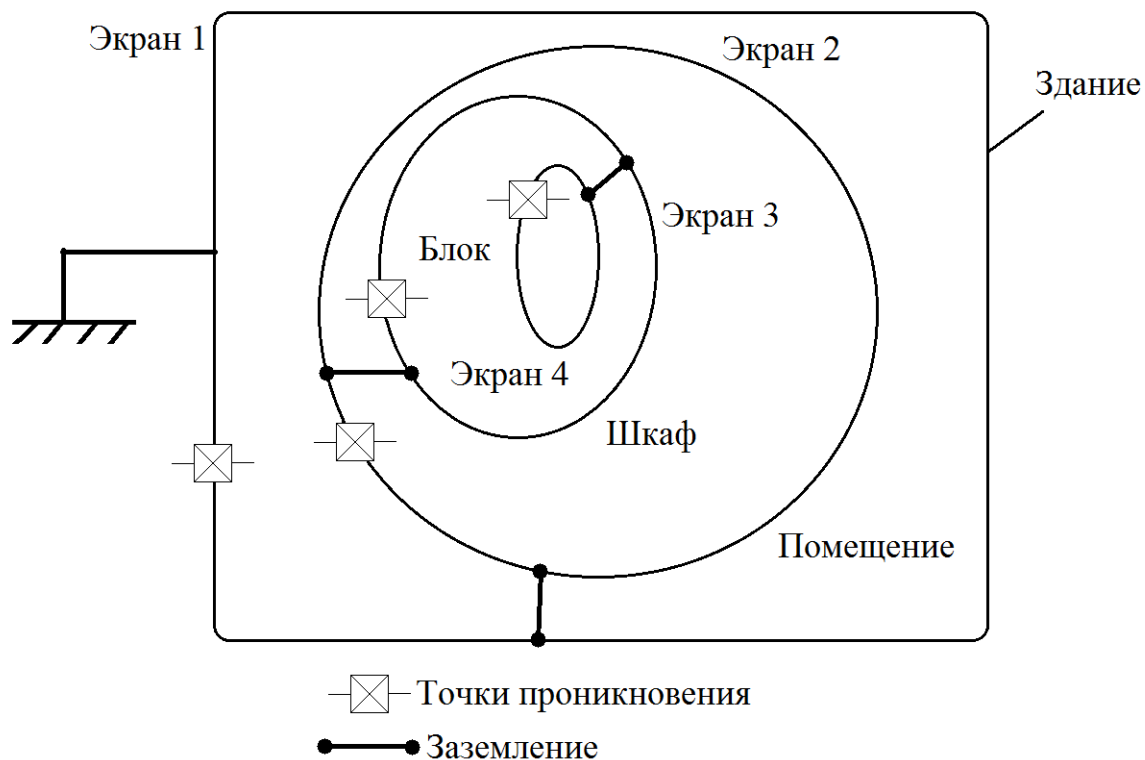


Рис. 1.4 Топологическая модель системы зонального экранирования для наземных систем

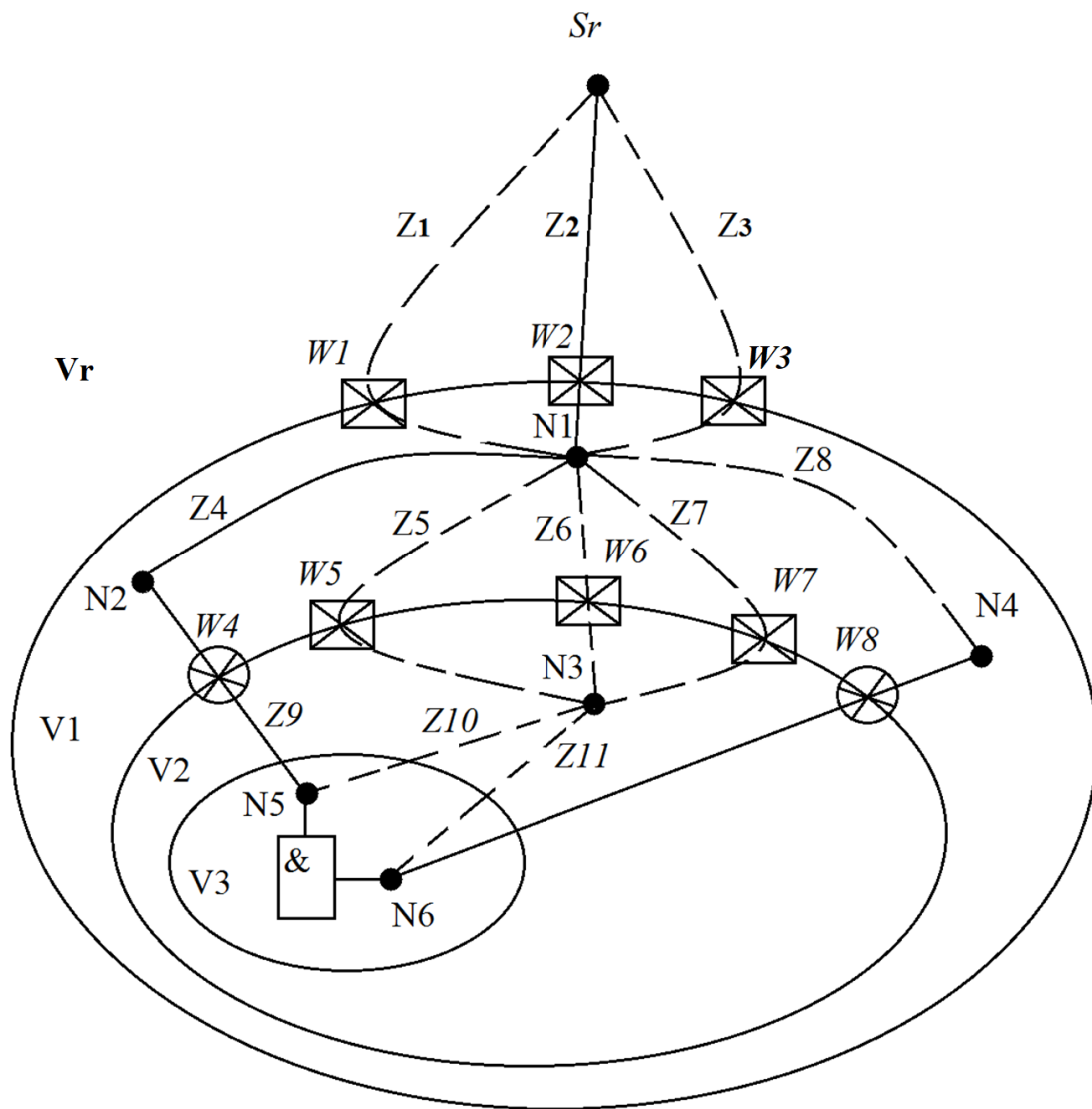


Рис. 1.5 Топологическая схема для прогнозирования помехоустойчивости СВТ внутри здания

На данной схеме использованы следующие обозначения:

S_r – Источник ЭМ воздействия, расположенный за пределами здания;

V_r, V_1, V_2, V_3 – области модели, соответствующие зонам: вне здания, внутри здания, внутри корпуса электрического устройства и на чувствительном электрическом элементе – печатной плате.

N_{1-6} – точки наблюдения за электромагнитной обстановкой: 1 – внутри здания; 2 – в сети электропитания здания; 3 – внутри корпуса электрического устройства; 4 – в информационном кабеле; 5 – в сети питания элементов электрического устройства; 6 – в информационных линиях элементов электрического устройства.

Z_{1-11} – передаточные функции путей взаимодействия: 1 – через основной материал стены здания; 2 – через армирующий материал стены здания; 3 – через оконный проем в стене здания; 4 – электромагнитного поля внутри здания с линиями электропередачи; 5 – электромагнитного поля через корпус электрического устройства; 6 – электромагнитного поля внутри здания через отверстия вентиляции в корпусе электрического устройства; 7 – электромагнитного поля внутри здания через конструкционные отверстия в корпусе электрического устройства; 8 – электромагнитного поля внутри здания с информационными линиями связи; 9 – кондуктивных помех в сети электропитания с элементами электрического устройства; 10 – электромагнитного поля внутри корпуса с линиями питания элементов электрического устройства; 11 – электромагнитного поля внутри корпуса с информационными линиями элементов электрического устройства.

& – цифровой элемент электрического устройства, чувствительный элемент.

W_1 – основной материал стены здания; W_2 – армирующий материал стены здания; W_3 – оконный проем в стене здания; W_4 – вход электропитания электрического устройства; W_5 – основной материал корпуса электрического устройства; W_6 – вентиляционные отверстия в корпусе; W_7 – конструкционные отверстия в корпусе; W_8 – информационный вход электрического устройства.

Математическая модель для описания общей передаточной функции Z , для представленной на рис. 1.5 топологической схемы, выглядит следующим образом

$$Z = (Z_1+Z_2+Z_3)*Z_4*Z_9 + (Z_1+Z_2+Z_3)*(Z_5+Z_6+Z_7)*Z_{10} + (Z_1+Z_2+Z_3)*(Z_5+Z_6+Z_7)*Z_{11}+(Z_1+Z_2+Z_3)*Z_8$$

Данная модель иллюстрирует проникновение электромагнитной помехи от внешнего источника в чувствительный элемент некоего электрического устройства, расположенного внутри обычного здания. В модели выделены зоны с различной электромагнитной обстановкой – зона внутри здания, зона внутри корпуса электрического устройства, и зона где расположен чувствительный элемент, например, непосредственно на печатной плате.

1.3 Проникновение и распространение электромагнитных помех в конструкции и электрических цепях электротехнического комплекса летательного аппарата.

1.3.1 Схемы путей распространения помех в конструкции ЛА

Между случаями «на земле» и для случаев с ЛА есть отличия. Первое из них – заземление. В случае с наземными системами его следует учитывать, как показано на рисунке 1.2.3. Для определенных видов помех заземление играет значительную роль. В случае с летательными и космическими аппаратами заземление невозможно, вместо этого можно говорить об «общем контакте или потенциале». Пример экранирования бортового устройства рассмотрен в [32]

При составлении модели [32] считается, что практически всегда можно использовать систему так называемого зонирования – разделение на некоторое количество зон. Зоны могут различаются уровнем экранирования или просто отделять приборы различных типов. Например, разделять аналоговые, цифровые, силовые и информационные приборы. Идеальный случай – когда

можно выделить следующие зоны: 1 – коммутационная плата, защищенная основанием и крышкой; 2 – устройства питания – защищены металлическим кожухом, для соединения используются кабели с соединителями, после соединителя установлены фильтры для предотвращения проникновения помех; 3 – вычислительное устройство – содержит чувствительные цепи, отделено от силовых цепей, соединяется с коммутационной платой через соединитель («чистая зона»); 4 - «грязная зона».

«Чистая зона» применяется для электроники, которая должна быть экранирована от внешних воздействий. Все возможные апертуры данной зоны следует контролировать самым тщательным образом. Данная зона максимально защищена от внешних электромагнитных воздействий.

«Грязная зона» зона с низким экранированием, где размещены малочувствительные к помехам устройства.

Топологическая модель экранирования КА представлена на рис. 1.6. На данной схеме автор разбивает КА на несколько зон с различными уровнями защищенности.

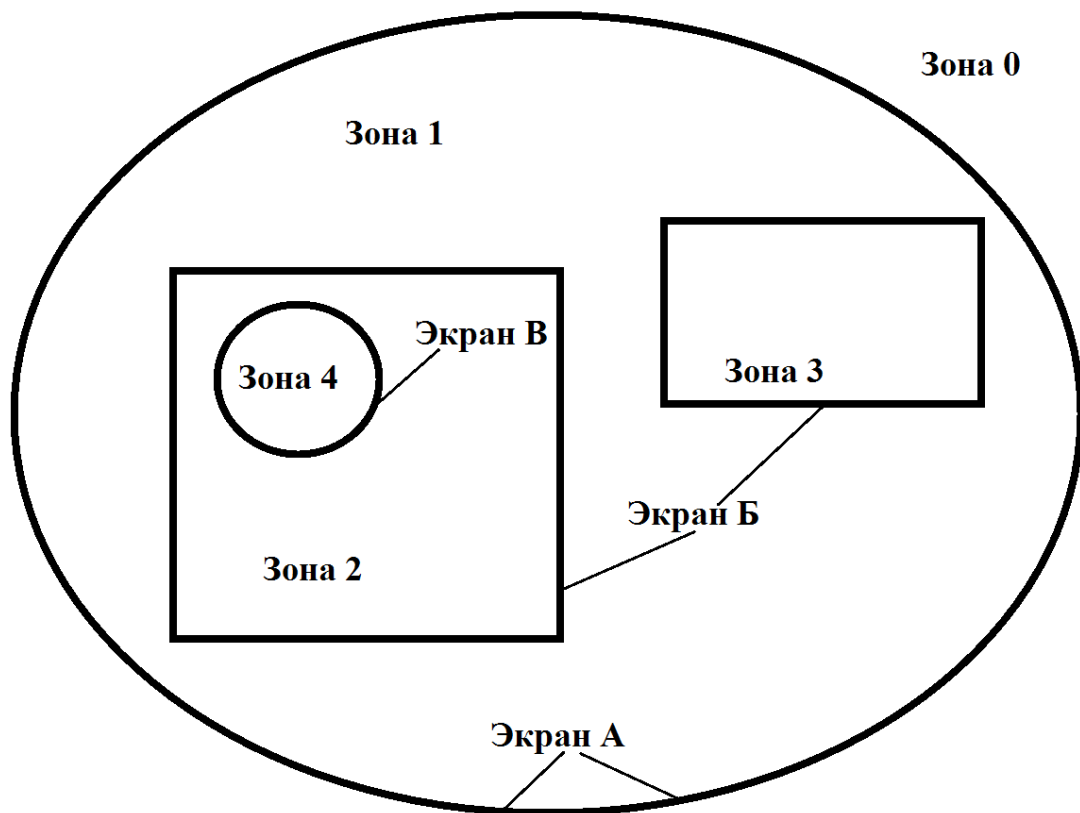


Рис. 1.6 Условная топологическая модель экранирования ЛА.

Зона 0 – космическое пространство. В этой зоне присутствуют все типичные для космоса виды ЭМП. Экран А – содержит защиту от электростатики и радиации, и является опорной плоскостью для других экранов. Зона 1 – слабо защищенная зона. В ней могут содержаться устройства на которые влияние ЭМП будет наименьшим. Зона 2 – защищённая зона, в которой располагают чувствительные аналоговые устройства и неэкранированные жгуты. Зона 3 – защищенная зона, выделенная для устройств с высоким уровнем помехоэмиссии. Экран Б это хорошо проработанный экран, должен в том числе обеспечивать защиту от электростатики и магнитных полей. Зона 4 – зона повышенной защищенности, обычно это экранирование на уровне печатной платы (Экран В).

Бортовые системы ЛА и КА отличаются от систем наземного размещения более жесткими требованиями к массогабаритным параметрам, необходимостью защиты от радиации и электростатических разрядов. Экран А, зоны 0 имеет апертуры в виде отверстий для антенн, датчиков и иных устройств. В целом, внешняя оболочка должна выполнять функции несущей конструкции и тепловой и радиационной защиты. Основные функции экранирования должны нести экраны различных зон.

1.3.2 Топологическая модель проникновения и распространения ЭМП в конструкции ЛА

Приведенные ранее модели являются в большей степени теоретическими и представляют собой наиболее идеальные варианты конфигурации систем КА и ЛА. В случае с реальными объектами становятся очевидны значительные различия от общих и идеализированных моделей.

Наиболее значительное отличие заключается в невозможности четко выделить различные зоны экранирования в электротехническом комплексе конкретного КА или ЛА. Кроме того, часто именно внешняя оболочка – корпус ЛА, обозначенный как Экран А на рис. 1.6, может быть вовсе

единственным электромагнитным экраном ЛА. Роль Экранов Б выполняют металлические корпуса внутренних блоков и экраны кабелей и кабельных жгутов, которые также могут иметь свои апертуры. Наиболее часто встречаемый пример уязвимости экрана Б – кабельные соединители, через которые осуществляется подключение электрических цепей от других блоков комплекса КА. В соединителе также требуется правильно объединить экран кабеля, корпус соединителя и корпус блока, что создает неоднородность и нарушает общее экранирование на данном уровне.

Специальные зоны для чувствительного оборудования или оборудования имеющего высокую помехоэмиссию выделяют редко, а обеспечение данным зонам особого экранирования связано с большими сложностями, поскольку эти устройства, как правило, не могут быть автономно отделены и развязаны от устройств в других зонах и должны быть соединены с ними теми же кабелями. Кабели и жгуты внутри КА прокладываются рядом по одному и тому же пути и также могут оказывать воздействие между собой.

Обеспечение дополнительного экранирования на уровне печатных плат практически не применяется в связи с экономией места и массы.

Для построения модели рассмотрим все возможные способы попадания энергии ЭМП от внешнего источника до некоего чувствительного электрического элемента – микросхемы на печатной плате любого блока в электротехническом комплексе ЛА, при условии, что источник ЭМП расположен за пределами корпуса ЛА. Как уже было сказано, экранирование корпуса не может быть идеальным.

Но все возможные варианты проникновения энергии ЭМП можно описать тремя путями, рис. 1.7(а). Во-первых, некоторое количество энергии пройдет напрямую через металлическую стенку корпуса КА, поскольку экран имеет ограниченную толщину и проводимость. Во-вторых, в корпусе всегда будут апертуры в виде технологических отверстий, иллюминаторов, и неоднородностей в местах соединения деталей корпуса. По этим путям ЭМП

будет распространяться в виде электромагнитного поля. В-третьих, на внешней стороне корпуса или за его пределами как правило расположены различные датчики, например оптические, астродатчики, или передатчики – приемопередающие антенны. По кабелям, связывающим внешние устройства с внутренними блоками ЛА энергия ЭМП пройдет внутрь корпуса в виде кондуктивной помехи.

Таким образом, для любого экранированного объекта, имеющего связь с внешней средой, будут наблюдаться данные три способа проникновения ЭМП: два в виде поля – через корпус и через апертуры; и один в виде кондуктивной помехи – по кабелям связи и питания.

Во внутреннем объеме ЛА формируется собственная электромагнитная обстановка. Часть ЭМП внутри ЛА создается блоками электротехнического комплекса ЛА, часть проникает извне. Кондуктивные ЭМ помехи проникающие по кабелям связи от внешних устройств излучаются в виде ЭМ полей от проводников внутри ЛА. В свою очередь, излучаемые помехи, проникшие во внутренний объем ЛА в виде ЭМ полей через корпус и апертуры создают кондуктивные помехи на кабелях электротехнического комплекса ЛА.

Но во внутреннее пространство любого блока электротехнического комплекса ЭМ помехи будут проникать теми же тремя способами – через кабельную сеть, через корпус, и через апертуры корпуса, рис. 1.7(б).

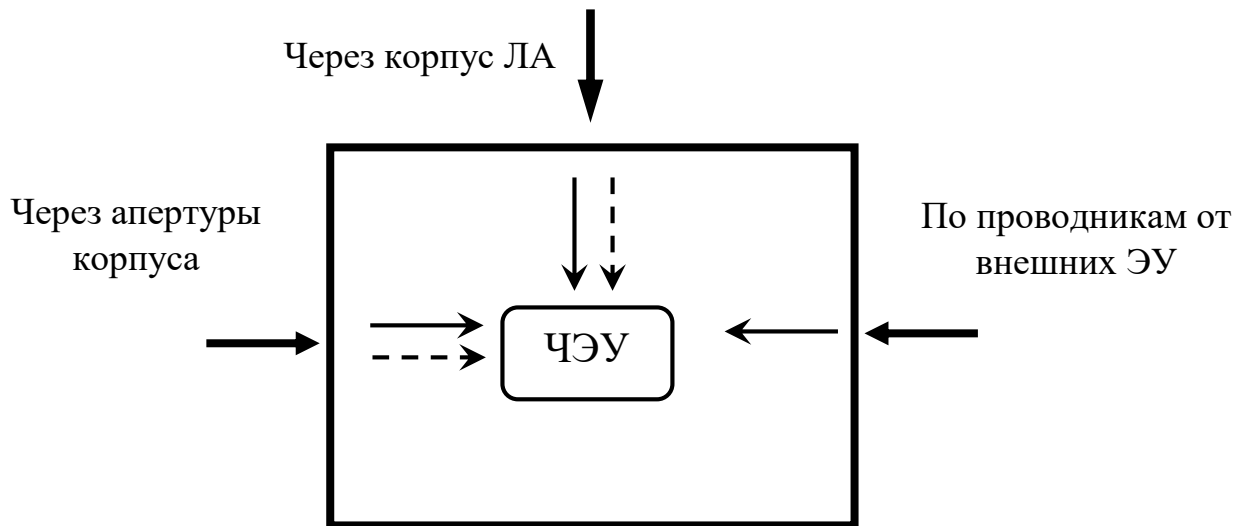


Рис. 1.7(а) Схема проникновения излучаемой помехи через корпус объекта

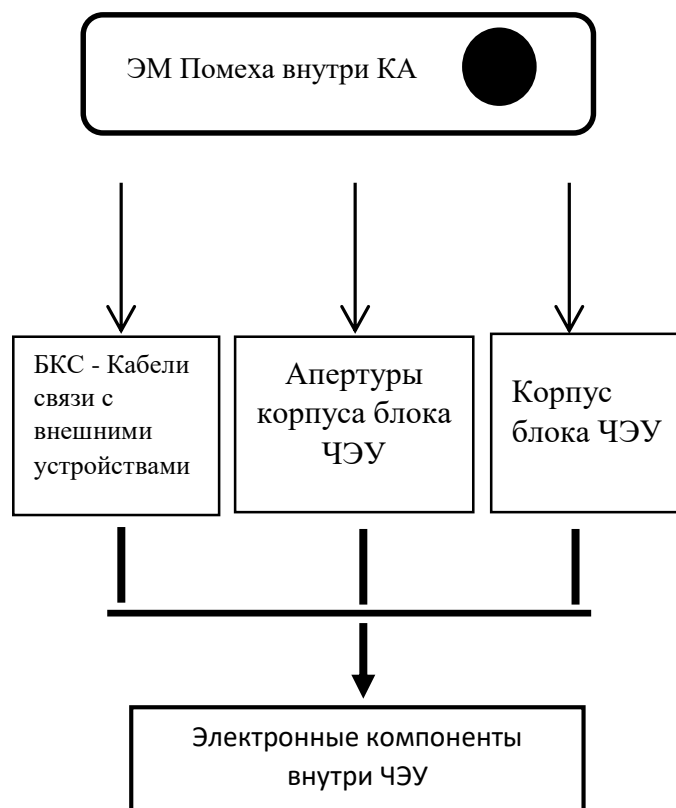


Рис. 1.7(б) Структурная схема перемещения излучаемой помехи внутри конструкции ЛА.

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.

Это показано на рис. 1.7(а)

Таким образом формируется электромагнитная обстановка в точке T_1 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 точки T_2 внутри чувствительного электронного устройства энергия пройдет следующими путями (рис. 1.7(б)):

- 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.

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. 1.8 приведена схема проникновения и распространения энергии электромагнитной помехи от внешнего источника электромагнитного излучения. В данной модели рассмотрена топология проникновения и распространения энергии электромагнитной помехи во внутреннем объеме летательного аппарата излученной внешним источником электромагнитного поля. При составлении модели были учтены все основные пути проникновения помехи через электромагнитные экраны и все основные пути распространения помехи после проникновения. В качестве источника рассматривается условный внешний источник излучаемых помех.

В топологической модели использованы следующие обозначения: S – внешний источник излучаемой помехи. (Например, излучение радиолокационной станции, РЭБ, грозовые разряды, промышленные помехи, линии электропередач для беспилотного аппарата) Все точки P_i обозначают точки условного перехода энергии помехи и возможного контроля электромагнитной обстановки:

P_1 – область формирования суммарной электромагнитной обстановки, создаваемой сложением излучаемых помех внутри общего корпуса ЛА.

P_2 – область перехода электромагнитной энергии излучаемых помех в кондуктивные помехи воздействующих на удаленные управляемые устройства ЛА.

P_3 – область преобразования энергии излучаемой электромагнитной помехи в кондуктивную в кабелях, соединяющих внешние устройства ЛА с блоком управления ЛА и обратного преобразования кондуктивной в излучаемую.

P_4 – область преобразования энергии излучаемой электромагнитной помехи в кондуктивную в кабелях, соединяющих удаленные управляемые устройства ЛА и блок управления ЛА и обратного преобразования кондуктивной в излучаемую.

P_5 – область преобразования энергии излучаемой электромагнитной помехи в кондуктивную в цепях подключения к блоку управления кабелей

удаленных устройств и обратного преобразования кондуктивной в излучаемую.

P_6 – область формирования электромагнитной обстановки внутри корпуса блока управления ЛА.

P_7 – область формирования электромагнитной обстановки в соединительных кабелях между блоком управления и внешними устройствами ЛА.

P_8 – область формирования суммарной помехи на плате вычислительного процессора блока управления ЛА.

Передаточные функции Z_i обозначают прохождение энергии помехи от внешнего источника по соответствующему пути.

Z_1 – функция передачи электромагнитной энергии излучаемой помехи от внешнего источника через корпус ЛА.

Z_2 – функция передачи электромагнитной энергии излучаемой помехи от внешнего источника через апертуры корпуса ЛА.

Z_3 – функция передачи электромагнитной энергии помехи от внешнего источника в виде наведенной кондуктивной помехи на кабели, соединяющие внешние устройства корпуса ЛА и блок управления.

Z_4 – функция передачи электромагнитной энергии излучаемой помехи от внешнего источника через корпус удаленных устройств.

Z_4' – функция передачи электромагнитной энергии излучаемой помехи от внешнего источника через апертуры корпуса удаленных устройств.

Z_5 – функция передачи электромагнитной энергии излучаемой помехи от внешнего источника через корпус блока управления ЛА.

Z_5' – функция передачи электромагнитной энергии излучаемой помехи от внешнего источника через апертуры корпуса блока управления ЛА.

Z_6 – функция передачи энергии излучаемой помехи внутри корпуса ЛА, на кабели связи блока управления ЛА и внешних устройств корпуса ЛА.

Z_{7i} и Z_{7o} – функции взаимной передачи энергии перекрестных излучаемых помех между кабелями внутри ЛА.

Z_8 – функция передачи энергии излучаемых помех внутри корпуса ЛА на кабели связи удаленных устройств с блоком управления ЛА.

Z_9 – функция передачи электромагнитной энергии кондуктивной помехи проходящей внутрь корпуса блока управления ЛА по цепям связи с устройствами на внешней стороне корпуса ЛА.

Z_{10} – функция передачи электромагнитной энергии кондуктивной помехи созданной на цепях связи удаленных устройств с блоком управления ЛА электромагнитными полями внутри корпуса удаленных устройств.

Z_{11} – функция передачи электромагнитной энергии кондуктивной помехи на входе блока управления от внешних устройств.

Z_{12} – функция передачи электромагнитной энергии кондуктивной помехи на входе блока управления ЛА.

Z_{13} – функция передачи электромагнитной энергии излучаемой помехи, образованной кондуктивными помехами, пришедшими на вход блока управления от внешних устройств корпуса ЛА, на соседние контакты блока управления.

Z_{14} – функция передачи электромагнитной энергии излучаемой помехи, образованной кондуктивными помехами от удаленных устройств, на соседние контакты блока управления.

Z_{15} – функция передачи электромагнитной энергии излучаемой помехи воздействующей на устройство управления.

Z_{16} – функция передачи электромагнитной энергии излучаемой помехи во внутренний объем корпуса блока управления от кабелей внешних устройств корпуса ЛА.

Z_{se} – результирующая функция излучаемых помех пришедших на уязвимый элемент блока управления. Соответствует функции Z_{12} .

Z_{sk} – результирующая функция кондуктивных помех пришедших на уязвимый элемент блока управления. Соответствует функции Z_{15} .

На основе данной топологической модели построен граф – рис. 1.9.

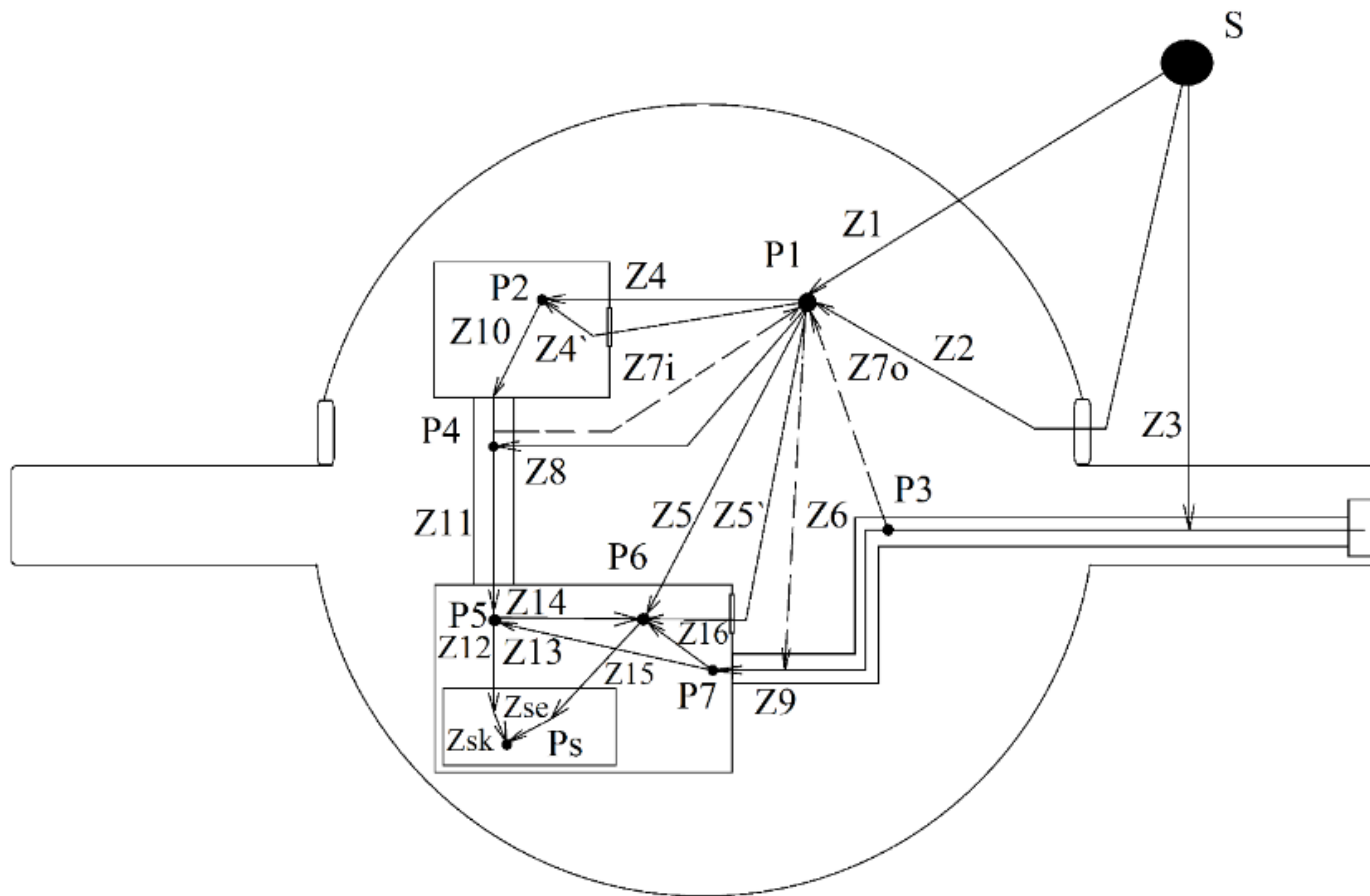


Рис. 1.8 Схема топологической модели распространения энергии электромагнитных помех во внутреннем объеме ЛА.

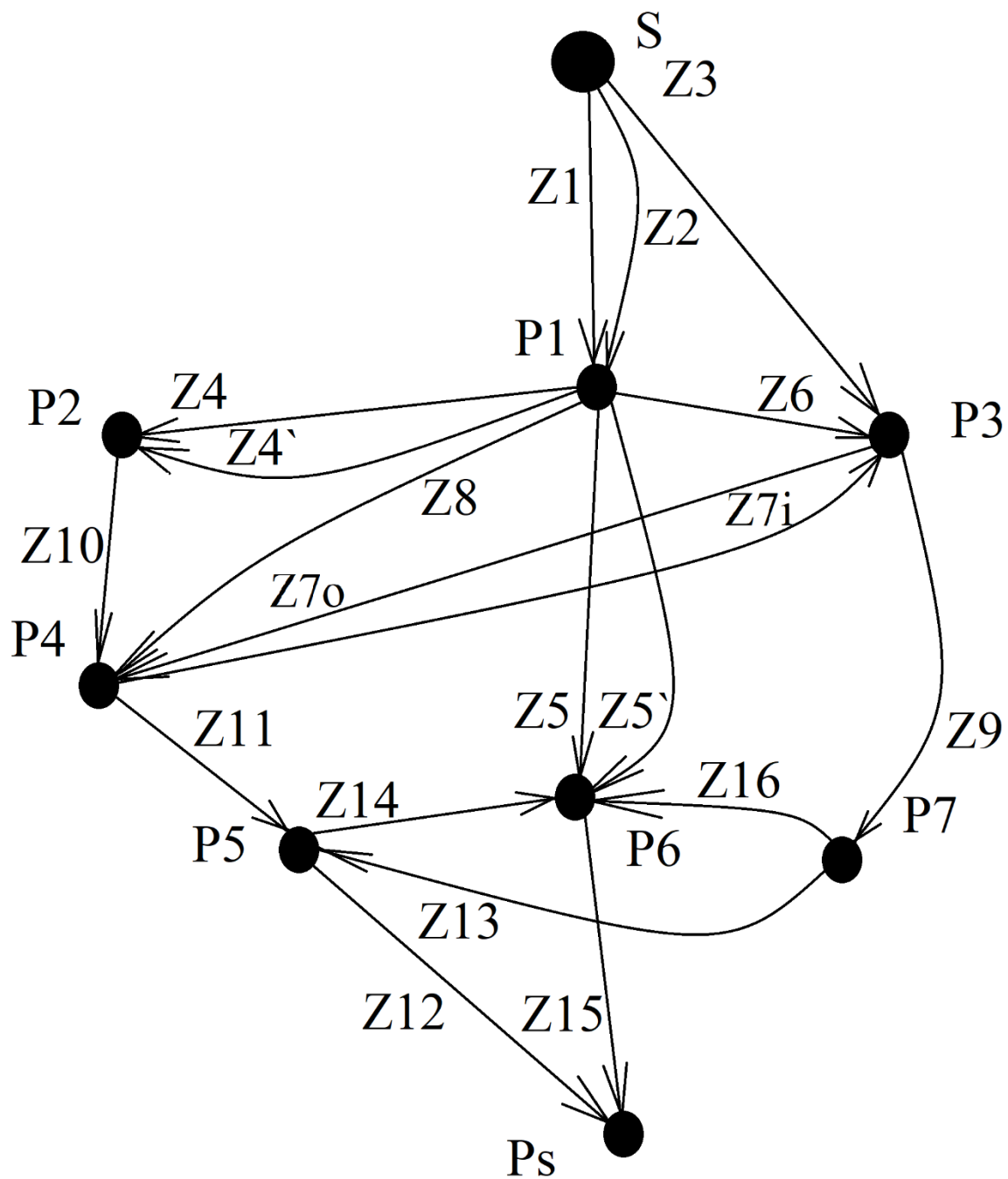


Рис. 1.9 Граф топологической модели распространения электромагнитной помехи во внутреннем объеме ЛА.

При построении данной топологической модели рассматривалось максимально возможное количество путей проникновения и распространения электромагнитной помехи от внешнего источника во внутреннем объеме корпуса ЛА. Энергия электромагнитного поля после проникновения через корпус ЛА может распространяться как в виде излучаемых, так и в виде кондуктивных помех. Кондуктивные помехи, возникшие таким образом также могут создавать излучаемые помехи, однако первичный источник – внешнее электромагнитное поле. Внутри корпуса ЛА различные устройства могут также быть источниками помех. В данной модели внутренние источники помех не учитываются, но пути распространения помех, создаваемых внутренними источниками, будут аналогичны.

Следует отметить, что в каждом конкретном случае пути распространения помех определяются особенностями конкретной конструкции ЛА. Некоторые ветви графа вполне могут быть объединены, например, Z_1 и Z_2 , Z_4 и Z_4 , Z_5 и Z_5 показывают излучаемые помехи проникающие через корпуса ЛА или устройств. В зависимости от материала корпуса и количества апертур одной из компонент можно пренебречь. Например, если использован сплошной однородный металлический корпус, не имеющий очевидных апертур, таких как иллюминаторы, вентиляционные отверстия, отверстия для устройств ввода/вывода и т.п., можно рассматривать только непосредственное проникновение поля через металл корпуса.

В случае наличия явных апертур, уровни излучаемые помехи на данном пути проникновения будут значительно выше уровней помех, проходящих через сплошной корпус.

Функции Z_{7i} , Z_{7o} зависят от расположения кабелей во внутреннем объеме ЛА. При условии минимальной связи между кабелями перекрестные помехи можно не учитывать.

Передаточные характеристики ветвей графа показывают коэффициенты ослабления помех, при прохождении участков модели. Чем большее количество участков включено в путь прохождения помехи, тем меньшее

значение будет иметь итоговая помеха при учете влияния на чувствительное электронное устройство внутри блока управления ЛА.

1.3.3 Методика определения путей проникновения, распространения и расчета электромагнитных помех в электрических цепях и конструкции летательного аппарата на основе топологической модели.

На рис. 1.8, 1.9 показан принцип определения топологии проникновения и распространения ЭМП от внешнего источника во внутреннем объеме ЛА. Для проведения расчета помехи, воздействующей на некое устройство электротехнического комплекса ЛА требуется сформировать детальный граф для конкретной конструкции рассматриваемого аппарата. При этом, будет использован тот же принцип, что и на рис. 1.8. Практически любую конструкцию ЛА можно отобразить графом (рис. 1.9). Для уточнения оценок ЭМП следует использовать более разветвленный граф, соответствующий детально описанной заданной конструкции, с учетом всех путей распространения ЭМП.

При проведении расчета ЭМП на основе топологической модели можно выявить пути распространения, по которым проходит наибольшая часть энергии ЭМП. Такие пути можно назвать опасными. Использование дополнительных мер защиты от ЭМП опасных путей позволяет повысить помехозащищенность бортовых приборов и устройств с минимальным изменением конструкции ЛА.

На рис. 1.10 представлена блок-схема методики расчета результирующей помехи. 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
- 1) 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 узла результирующей помехи.

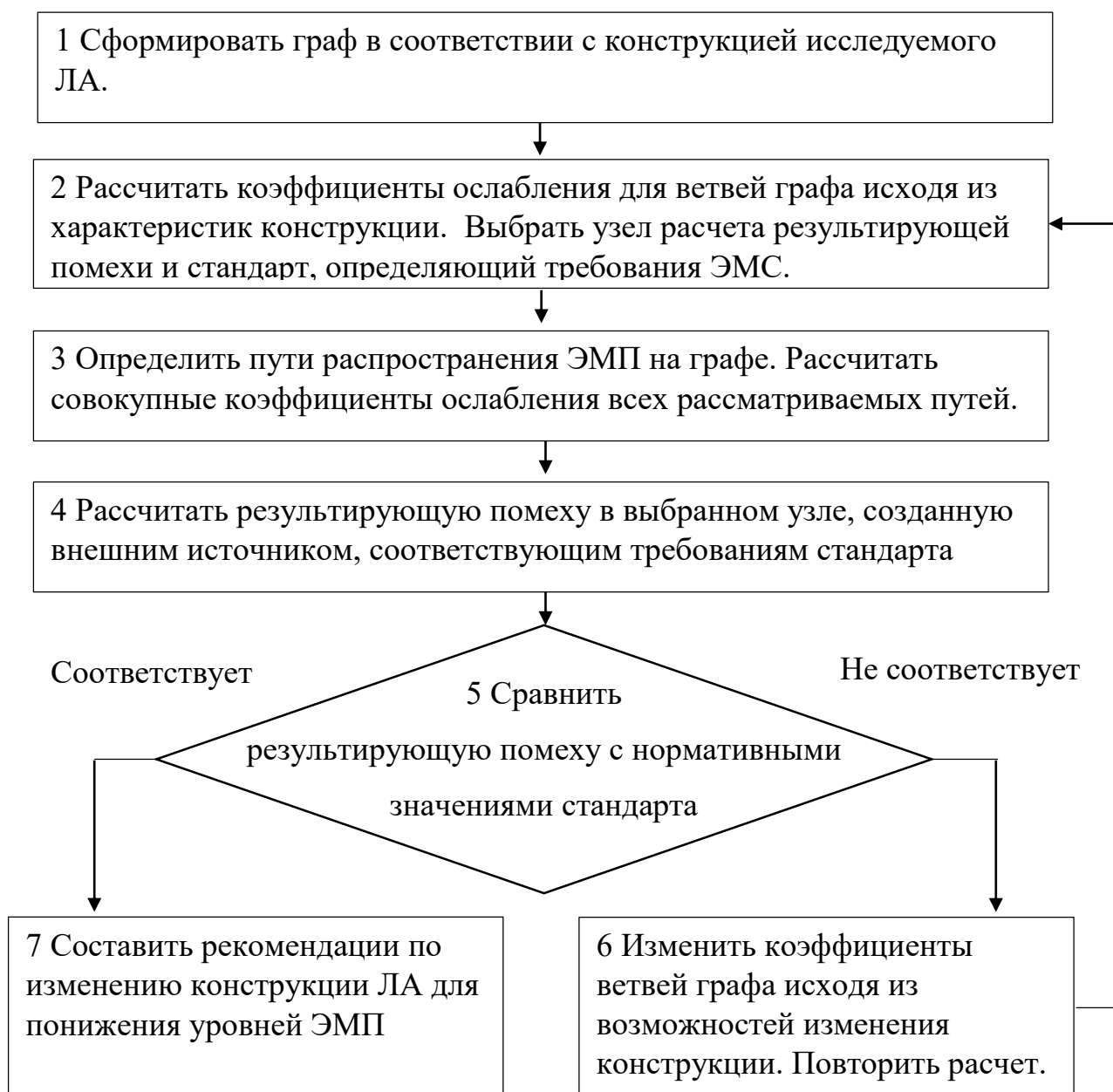


Рис. 1.10 Блок-схема методики расчета результирующей помехи и решения проблем ЭМС с помощью топологической структуры в виде графа распространения энергии внутри ЛА

Рассмотрим пример оценки наведенной помехи от внешнего источника электромагнитного излучения.

Наиболее короткий маршрут проникновения помехи содержит ветви Z_1 , Z_2 , Z_5 , Z_5' , Z_{15} . Это соответствует проникновению излучаемой помехи от внешнего источника через корпуса ЛА и блока управления ЛА а также через апертуры соответствующих корпусов. Наиболее полный вид общей функции:

$$F = (Z_1 + Z_2) * (Z_5 + Z_5') * Z_{15}$$

Где Z_1 и Z_5 функции ослабления излучения при прохождении через экран,

Z_2 и Z_5' функции проникновения излучения через апертуры экрана,

Z_{15} передаточная функция наведения кондуктивной помехи на чувствительном элементе или его контактах.

Если в качестве ЛА рассматривать аппарат с металлическим корпусом, способным выполнять функции электромагнитного экрана, то в формуле следует рассмотреть только передаточные функции апертур:

$$F_a = Z_2 * Z_5' * Z_{15}$$

Следует рассмотреть еще один вероятный случай. Если на внешней стороне корпуса размещено некое электронное устройство, которое необходимо связать с блоком управления максимально коротким способом, то возможно наличие кабеля, проходящего напрямую к блоку управления от внешней, незранированной зоны. В общем виде передаточная функция такого маршрута выглядит следующим образом:

$$F_k = Z_3 * Z_9 * Z_{13} * Z_{12},$$

Но если на участках Z_9 , Z_{13} , Z_{12} путь помехи пролегает по одному единому кабелю, то функция примет следующий вид:

$$F_k = Z_3 * Z_9.$$

В данной формуле Z_3 это функция наведенного напряжения на экранированный кабель, соединяющий устройство на внешней стороне корпуса ЛА, Z_9 – соответствует ослаблению сигнала при прохождении по кабелю до контактов чувствительного устройства.

Использование модели позволяет описать распространение помехи в конструкции в общем виде. Для получения численной оценки наведенных напряжений и токов следует заменить коэффициенты ветвей на формулы расчета необходимых величин – электрического поля, токов и напряжений.

Для примера рассмотрим простую модель проникновения помехи от внешнего источника электрического поля E_0 и наведения напряжения на чувствительном элементе внутри блока – напряжения U_n , рис. 1.11. Поле E_1 это поле, проникшее через апертуру – круглое отверстие в алюминиевом корпусе, радиусом r_0 . Ток I_0 наведен на экран кабеля – оплетку. Этот ток создает напряжение помехи на нагрузке – U_0 .

Для оценки поля E_1 можно использовать различные методы – расчет поля по формулам [60], или коэффициентный метод [31,32].

При использовании коэффициентного [31] метода требуется определить коэффициенты потерь на поглощение, отражение и поправку для апертуры и коэффициенты потерь для эффективности экранирования целостного экрана.

Для расчета потери эффективности экранирования в апертуре в виде круглого отверстия используют формулы потерь на поглощение $A_{\text{погл}}$, на отражение $R_{\text{отр}}$ и поправочный коэффициент $B_{\text{попр}}$.

$A_{\text{погл}} = 32 * \frac{t}{D}$ [дБ], где t – толщина стенки экрана в мм, D диаметр апертуры в мм.

$R_{\text{отр}} = 102 - 20Lg(D * f)$ [дБ], где f – частота внешнего электрического поля в МГц.

$$B_{\text{попр}} = 20 * Lg \left(1 - 10^{-\frac{A_{\text{погл}}}{10}} \right), \text{ [дБ]}$$

После чего следует определить суммарный коэффициент для апертуры

$$S_{\text{ап}} = A_{\text{погл}} + R_{\text{отр}} + B_{\text{попр}} \text{ [дБ]}$$

Затем определяются коэффициенты для цельного экрана:

$A_{\text{экp}} = 131.4 * t \sqrt{f * \mu_r * \sigma_r}$, [дБ] где μ_r и σ_r магнитная проницаемость и проводимость для материала относительно меди. 1 и 0,63 соответственно.

$R_{\text{экp}} = 108,1 - 10Lg\left(\frac{\mu_r * f}{\sigma_r}\right)$, [дБ] где f – частота внешнего электрического поля.

Далее суммарный коэффициент для экрана

$$S_{\text{экp}} = A_{\text{экp}} + R_{\text{экp}}[\text{дБ}]$$

Суммарная эффективность экранирования для экрана с одной круглой апертурой вычисляется по формуле:

$$S_{\text{экp с ап.}} = -20 * Lg\left(\frac{1}{10^{\frac{S_{\text{ап}}}{20}}} + \frac{1}{10^{\frac{S_{\text{экp}}}{20}}}\right)[\text{дБ}]$$

Величина изменения внешнего поля в численном масштабе следующая:

$$S_{\text{числ}} = 10^{\frac{S_{\text{экp с ап.}}}{20}},$$

$E_1 = \frac{E_0}{S_{\text{числ}}}$ [В/м], где E_0 – напряженность внешнего электрического поля, E_1 – напряженность электрического поля внутри экрана.

В качестве образца расчета наведенного напряжения помехи рассмотрим максимально упрощенную задачу со следующими условиями, рис. 1.11.

Условия задачи: Рассмотрим модель металлического корпуса некоего аппарата имеющая одну апертуру имеет следующие параметры - толщина стенки корпуса $t=1$ мм, форма – параллелепипед, апертура – окружность с диаметром $D= 50$ мм, материал корпуса - алюминий с параметрами μ_r и σ_r составляющими 1 и 0,63 соответственно. На модель воздействует внешнее переменное синусоидальное электрическое поле, расчет производим для следующих параметров – частота поля $f=150$ МГц, напряженность поля $E_0 = 200$ В/м. Во внутреннем пространстве расположен кабель, состоящий из

внутреннего проводника, однослойного экрана в виде медной плетенки. Диаметр экрана кабеля $2a=0,005\text{м}$, толщина оболочки кабеля $d=0,0001\text{м}$, удельная проводимость меди $\sigma=58100000\text{ См/м}$; $\mu=1,26\text{E-}06$; волновое сопротивление кабеля $Z_{\text{в}}=140\text{ Ом}$, длина $l=5\text{м}$, расстояние от заземленной поверхности до экрана кабеля $h=0,005\text{м}$. Задача – используя приведенные ранее формулы, рассчитать поле проникающее во внутренний объем корпуса модели через апертуру и напряжение помехи $U_{\text{п}}$ на нагрузке кабеля, наводимое внешним полем E_0 .

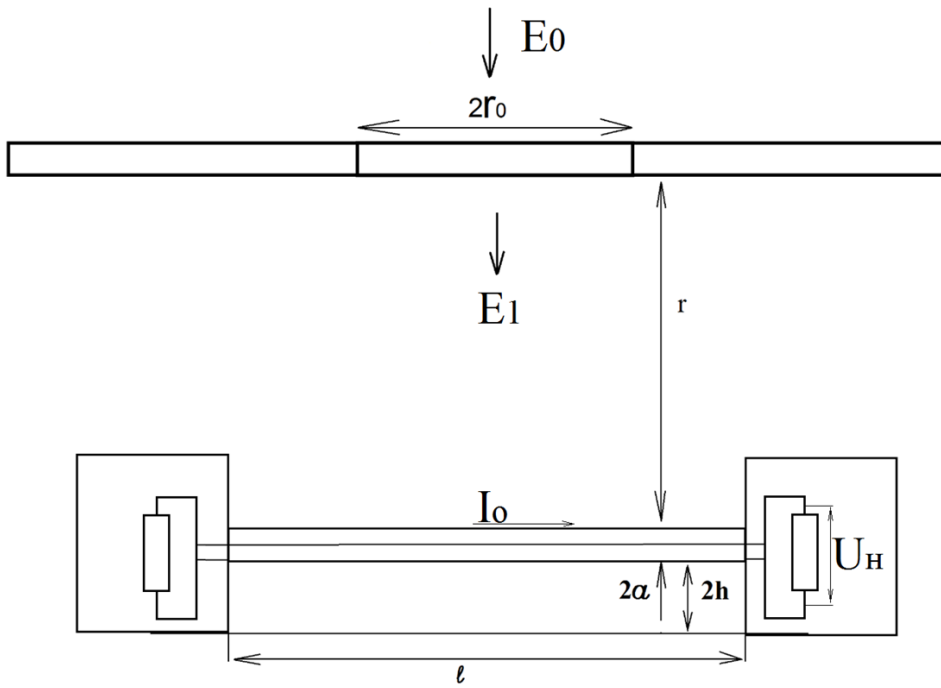


Рис. 1.11(а) Модель блока ЛА для примера расчета.

S - $E_0 = 200 \text{ В/м}$

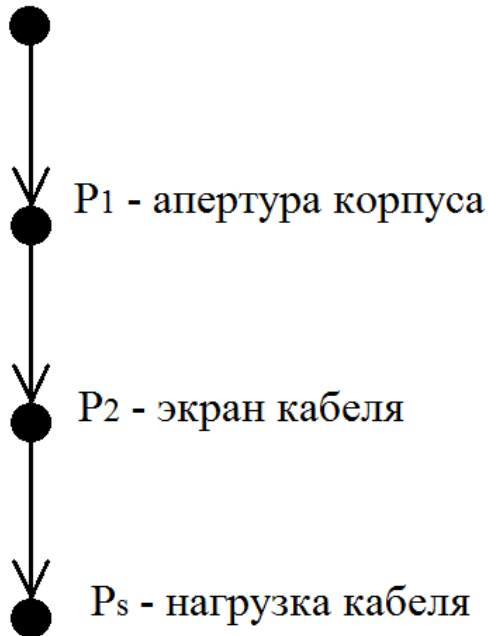


Рис. 1.11(б) Граф проникновения помехи для примера расчета.

Используя коэффициентный метод расчета проникновения электрического поля через апертуру корпуса, подставим данные в формулы и получим следующие величины:

Таблица 1.1 Коэффициентный расчет эффективности экранирования экрана с апертурой.

Параметр [дБ]	$A_{\text{погл}}$	$R_{\text{отр}}$	$B_{\text{попр}}$	S
Коэффициент ы экрана	1277,354	84,33	-	1361,686
Коэффициент ы апертуры	0,64	24,4988	-17,26	7,8745

Суммарное значение эффективности экранирования для экрана с апертурой составит:

$$S_{\text{экр с ап.}} = 7,87, \text{ [дБ];}$$

И в численном значении:

$$S_{\text{числ}} = 2,48, \text{ [дБ].}$$

Таким образом, расчётное электрическое поле внутри модели:

$$E_1 = E_0 / S_{\text{числ}} = 80,78 \text{ [В/м].}$$

После определения проникшего электрического поля E_1 проведем расчет напряжения помехи, наведенного на чувствительный элемент (нагрузку). Для этого следует рассчитать внутреннюю емкость линии связи C_{12} и ток в оболочке кабеля I_0 , а также определить сопротивление связи экрана оплетки $Z_{\text{св экр опл.}}$.

$$C_{12} = \frac{\pi * \xi}{\ln\left(\frac{2 * h}{a}\right)} \text{ [Ф];}$$

$$I_0 = 2 * C_{12} * l * h * \frac{dE_1(t)}{dt} = 2 * C_{12} * l * h * E_1 * \omega * \cos\omega t \text{ [А];}$$

В данных формулах E – электрическое поле, действующее на кабель; l – длина кабеля; $2a$ – диаметр кабеля; h – расстояние между кабелем и корпусом

модели. Кабель расположен на расстоянии r от апертуры, через которую проникает поле.

Напряжение помехи, создаваемое полем на нагрузке через экран кабеля рассчитывается через произведение тока на экране I_0 и сопротивления связи экрана с оплеткой. Сопротивление связи экрана с оплеткой это сумма сопротивления сплошного экрана и сопротивления связи оплетки. Сопротивление связи определим по формуле:

$$Z_{св} = \frac{1+j}{2*\pi*a*\sigma*\delta*sh[(1+j)*\frac{d}{\delta}]} [\text{Ом}]$$

Здесь: a – радиус оболочки кабеля, м; σ – удельная проводимость материала оболочки, См/м; $\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}}$ – толщина скинслоя оболочки кабеля, м; d – толщина оболочки кабеля, м. Сопротивление связи экрана состоит из сопротивления связи металла и сопротивления связи оплетки :

$$Z_{св.опл} = Z_{св} + j * \omega * M = Z_{св} + j * \omega * Z_{в} * 98.5 * 10^{-12}$$

Таким образом, напряжение, наведенное на нагрузку от внешнего электрического поля составит

$$U_{навед} = Z_{св.опл} * I_0$$

Следует учитывать, что для высокочастотного сигнала и сплошного экрана $Z_{св.}$ имеет очень маленькое значение. Наибольший вклад проникновение помехи имеет сопротивление $Z_{св опл.}$. Для приблизительной оценки наведенного напряжения помехи можно использовать только сопротивление оплетки.

В качестве образца чувствительного элемента рассмотрим кабель в одной оплетке имеющий следующие параметры: длина кабеля $l = 5\text{м}$, $h = 0.005\text{м}$; диаметр экрана кабеля $a=0,0025\text{м}$, удельная проводимость оплетки $\sigma = 5,81 * 10^7$, волновое сопротивление оплетки $Z_{в}=140 \text{ Ом}$.

Получим таблицу 1.2, расчет параметров экранированного кабеля

C_{12} [Ф]	I_0 [А]	$Z_{св}$ [Ом]	$Z_{св. опл.}$ [Ом]
--------------	-----------	---------------	---------------------

$2,0056 \cdot 10^{-11}$	0,076	$(2,356 + i4.476) \cdot 10^{-9}$	$2,356 \cdot 10^{-9} + i12.997$
-------------------------	-------	----------------------------------	---------------------------------

Таким образом, напряжение кондуктивной помехи наведенной на нагрузку кабеля (чувствительном элементе) составит:

$$U_{\text{навед}} = I_0 * Z_{\text{св.опл.}} = 1,799 * 10^{-10} + i0,99 \text{ [В]}.$$

Действительная часть числа соответствует активной нагрузке, которая крайне мала при частота в 150МГц. Мнимая часть — это напряжение на реактивной нагрузке, возникающее при воздействии высокочастотного электромагнитного поля. В данном примере расчета показано, что при проникновении электромагнитного поля с напряженностью 200 В/м, через апертуру 50 мм мы получили напряжение помехи на нагрузке ~1 В.

Это пример расчета упрощенной модели проникновения электромагнитного поля в корпус летательного аппарата, и наведения кондуктивной помехи на нагрузку. Напряженность поля 200В/м соответствует напряженности заданной стандартами ГОСТ и МЭК. Напряжение помехи 1 В является достаточным для выведения аппарата из строя для значительного количества цепей бортового электротехнического комплекса.

Таким образом, расчет показывает необходимость изменить параметры экрана кабеля и модифицировать корпус для уменьшения поля, проникшего через апертуру – например, уменьшить диаметр или установить экранирующую сетку.

2. Исследование эффективности экранирования бортовых кабелей

2.1 Параметры и характеристики экранов кабелей

Атмосферные и космические летательные аппараты (ЛА и КА) эксплуатируются в сложной электромагнитной обстановке. Для бесперебойного функционирования электронного оборудования бортовые кабели защищают от помех с помощью электромагнитных экранов, изготавливаемых по различным технологиям и из различных материалов [1-30]. Идеальным вариантом экрана является сплошной металлический корпус для блоков оборудования и сплошные металлические трубчатые экраны для бортовых кабелей.

Для кабелей применяемых в конструкции ЛА практически всегда встречается важное требование по обеспечению проводящей оболочки или металлизации внешней поверхности. [83]. Металлизация – это внешний экран кабеля ЛА - элемент конструкции бортового кабеля, выполняемый из проводящих материалов, предназначен для общего экранирования цепей бортового кабеля и обеспечения общей металлизации его внешней поверхности с электропроводной частью конструкции летательного аппарата.

Экраны бортовых кабелей конструктивно могут быть выполнены в виде сплошных тонкостенных труб, витых металлических лент, металлических и металлизированных тканей, сплетенных из металлических нитей оплеток (плетенок) или их комбинаций.

Тонкостенные трубы и ленты [84] обычно изготавливаются из меди, меди покрытой серебром, для обеспечения лучшего магнитного экранирования, стали, стали покрытой с обеих сторон медью. Сплошные экраны обеспечивают максимально возможное экранирование электромагнитных помех, но обладают большим удельным весом, механической жесткостью. Механическая жесткость и хрупкость сплошных экранов заставляет использовать специальную оснастку и придерживать определенную последовательности при сборке изделия. Сплошные трубчатые

экраны неустойчивы к разрушению вследствие механических резонансов при вибрационных нагрузках.

Перспективным вариантом применения ленточного экранирования является использование алюминиевой и медной гофрированной или гладкой фольги с нанесенным проводящим клеем. Электрическое соединение между витками ленты осуществляется через электропроводный клей и выступы гофрировки, которые в процессе обмотки продавливают клей между слоями.

Подобные экраны могут применяться как дополнительные экраны кабелей ЛА, дополняющие основной экран. Основным недостатком экранов из фольги – малая механическая прочность.

Еще один вид экранов, имеющий высокую технологичность монтажа на бортовой кабель, легкость и высокую механическую стойкость – это металлизированные ткани, создаваемые методом электровакуумного напыления металла (меди, никеля, серебра, золота или медно-никелевых сплавов) на тканевую основу. Недостатки таких экранов – малая толщина металлического слоя и, следовательно, низкая эффективность экранирования из-за присутствия скин-эффекта.

Компромисс между эффективностью экранирования, удельной массой, удобством применения и механическими свойствами являются плетеные экраны, то есть экраны кабеля из сплетенных проволочных оплеток. Поэтому, на практике для уменьшения массы и придания гибкости, кабели покрывают плетеными экранами с различными параметрами плетения (рис. 2.1) [108]. Гибкие плетеные экраны являются менее эффективными, но более технологичными [112, 47]. На рис. 2.1 приведены примеры бортовых экранированных кабелей с плетеными электромагнитными экранами.



а) Кабель бортовой сети КА с блоком устройства трансформаторной развязки



б) образец №1 кабеля, использованный при проведении климатических испытаний

Рис. 2.1 Кабели бортовой сети с плетеными экранами.

1- X1; 2- X2 электрические кабельные соединители.

Существует большое количество различных видов плетеных экранов. ПМЛ - хорошо зарекомендовавшая себя плетенка из медных луженных оловом проволок, например, ПМЛОО, ПОМС [85] и ПМСН - медные покрытые серебром плетенки применяются в современных бортовых кабелях.

Плетенки ПАРМС, ПАРМЛ [86], ПБМсП [87] из арамидных нитей или базальтовых нитей обвитых металлической микронной лентой, разрабатывались отечественной промышленностью в 80-х годах для применения в космической промышленности, но в связи с отказом от использования гермоконтейнеров и тенденции к созданию космических аппаратов без металлического корпуса применение таких плетенок не рекомендуется. ПЭЛА - плетенка экранирующая сверхлегкая, перспективная плетенка изготовленная из луженой алюминиевой проволоки.

Конструкция плетеных экранов характеризуется числом прядей N_n , образующих экран, числом проволок N_n в каждой пряди и числом пересечений P прядей на единицу длины, а также углом плетения α – т.е. углом между прядью и осью экрана рис. 2.2.

Эффективность экранирования кабелей зависит от выбора перечисленных параметров, характеризующих конструкцию экрана. Например, большой угол плетения приводит к увеличению эффективности экранирования, но увеличивает суммарную массу кабеля. Оптимальное проектирование заключается в выборе наилучшего соотношения эффективности экранирования и массы.

Все экранированные кабели проектируются исходя из данного соотношения. Однако, не смотря на оптимальный выбор параметров экрана, эффективность экранирования может быть резко уменьшена из-за наличия или возникновения неоднородностей экрана и увеличения переходного сопротивления между экраном кабеля и кожухом электрического соединителя в процессе эксплуатации аппарата.

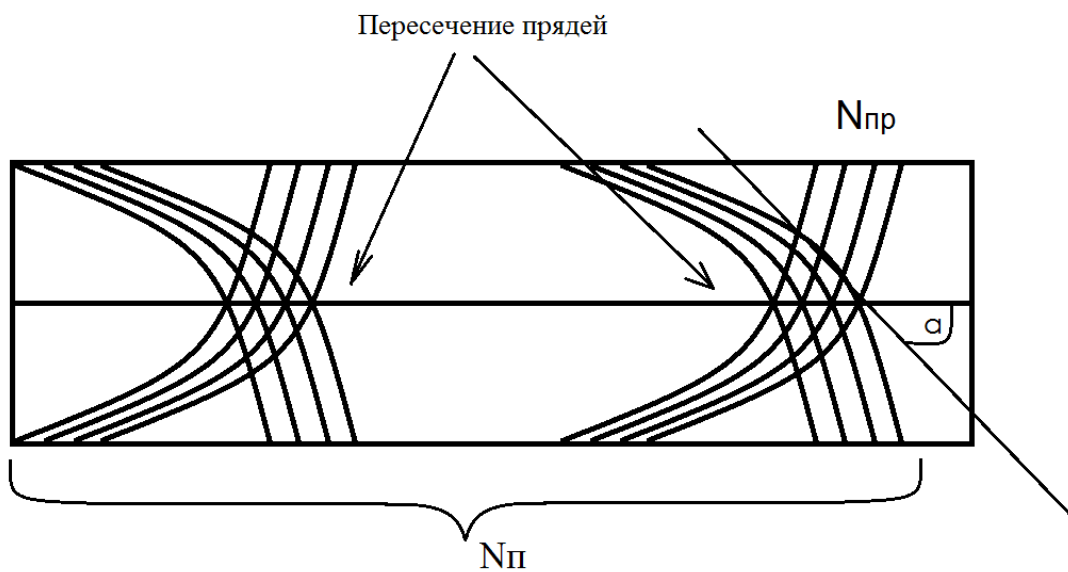


Рис. 2.2 Параметры плетеного экрана: $N_{пр}$ -число проволок в пряди; $N_{п}$ -число прядей; α -угол плетения.

2.2 Зависимость эффективности экранирования от переходного сопротивления между экраном и кожухом электрического соединителя

Электромагнитные экраны кабелей имеют неоднородности в виде разрывов и нарушений структуры. Неоднородности электромагнитного экрана возникают на участках поверхностей при соединении: экрана кабеля и кожуха кабельного электрического соединителя; кожуха электрического соединителя с корпусом соединителя; кабельного электрического соединителя и его ответной части, и электрического соединителя и корпуса бортового прибора, рис. 2.3а. Переходные сопротивления между различными неоднородными участками экранов кабелей и электрических соединителей влияют на эффективность экрана [44, 45, 109]. Высокая эффективность экранирования может быть обеспечена только при минимальных величинах переходных сопротивлений. Максимальная допустимая величина переходных сопротивлений задана [83] и составляет 2 мОм.

Для измерения переходных сопротивлений бортовых кабельных сетей применяются электронные миллиомметры со специальными измерительными клещами, работающие по четырехпроводной измерительной схеме. Измерительные клещи для проведения измерений подключаются к экрану и электрическому соединителю кабеля, рис. 2.3б.

Величина переходного сопротивления не является постоянной [109], и может значительно изменяться в процессе жизненного цикла изделия под воздействием различных факторов: способы крепления и соединения экранов и корпусов; температурные и климатические факторы; условия эксплуатации. Все эти факторы могут приводить как к постепенным, так и к резким увеличениям переходных сопротивлений, что может значительно уменьшить эффективность экранирования, и, соответственно, увеличить уровень наведенных электромагнитных помех в виде токов и напряжений на внутренних проводниках до опасных значений, при воздействии электромагнитных полей.

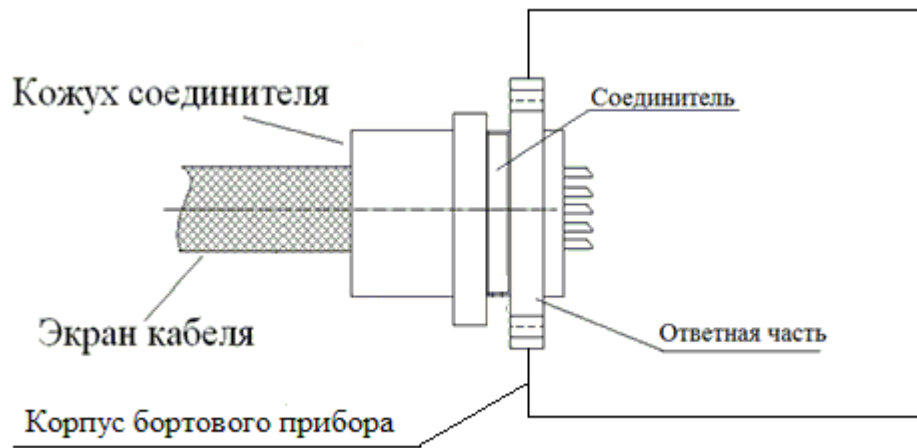


Рис. 2.3(а) Схема соединения экрана кабеля с электрическим кабельным соединителем.

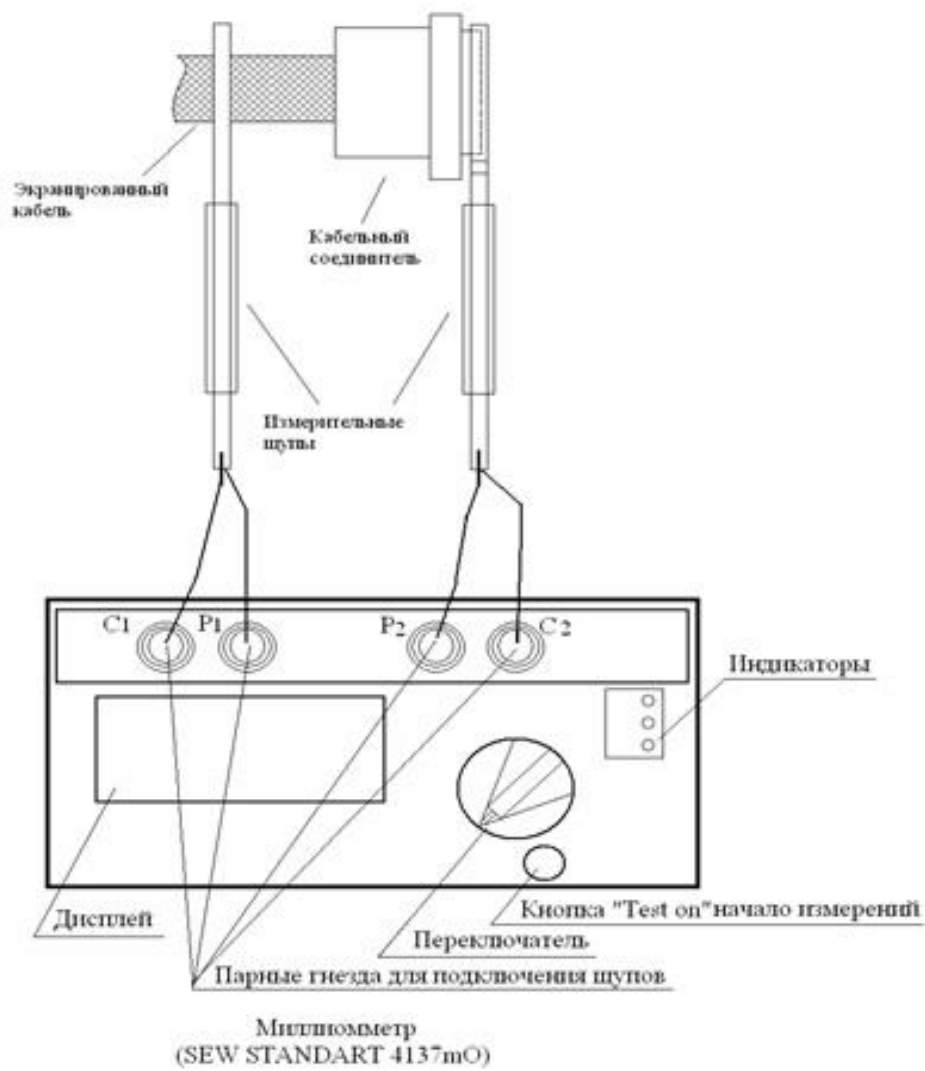


Рис. 2.3(б) Схема измерения переходного сопротивления с помощью миллиомметра

Эксперименты по исследованию воздействия влажного теплого воздуха в климатической камере на экранированные кабели, а также последовательное охлаждение и нагревание кабельного соединителя, проведенные с целью показать возможные причины изменения переходного сопротивления, показали значительные изменения величины переходного сопротивления.

В процессе эксперимента, имитирующего пребывание в тропическом климате, были испытаны два образца, защищенные плетеным экраном, выполненным из медно-ниобиевой проволоки. Первый образец имел однослойный экран, рис. 2.2(б), второй – двуслойный медно-ниобиевый плетеный экран. Оба образца были подвержены воздействию воздуха температурой 60°C и влажностью 95% в климатической камере в течении 5 суток. Величины переходных сопротивлений каждого из электрических соединителей исследованных кабелей приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1. 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

Как следует из таблицы 2.1 величина переходного сопротивления соединителя X2 возросла в 5,5 раз, а в случае с соединителем X1 второго образца произошло значительное увеличение в 26 раз. Результаты данного эксперимента показывают, что при климатических воздействиях – тепла и влаги, возможны резкие увеличения переходных сопротивлений.

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: в охлажденном состоянии изделия; в горячем состоянии; через фиксированное время $t=30$ мин. после окончания эксперимента. Результаты показаны в таблице 2.2.

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

Как показывают результаты эксперимента приведены в таблице 2.2, переходное сопротивление нагретого соединителя более чем в 6 раз превышает переходное сопротивление того же соединителя при нормальных условиях.

Во всех экспериментах наблюдаются значительные изменения величин переходных сопротивлений. При этом видно, что после окончания эксперимента величины переходных сопротивлений не возвращаются к

прежним значениям. Причинами этого являются остаточные деформации формы деталей из-за термических расширений и сжатий материалов, нарушение контакта деталей из-за появления окисленного слоя. Подобным воздействиям кабели подвергаются в течении всего жизненного цикла кабельной сети – при монтаже, в процессе сборки летательных и космических аппаратов, хранении на складах, транспортировке и при эксплуатации.

Представленные результаты наиболее наглядно демонстрируют ухудшение переходных сопротивлений, но не являются единственными и исключительными возможностями возникновения неоднородностей экранов.

Для оценки влияния переходного сопротивления на эффективность экранирования проводились испытания бортовых кабелей с различными переходными сопротивлениями. Эффективность экранирования оценивалась сравнением уровней напряжений, наведенных на внутренние проводники, при воздействии электростатических разрядов (ЭСР) на электромагнитные экраны бортовых кабелей.

Для исследования влияния величины переходного сопротивления на уровень наводимого напряжения помех на экранированный кабель проведены эксперименты по двум вариантам воздействий.

Первое – воздействие электростатическим разрядом до 20кВ [90]. ЭСР вызывает импульсный ток на заземленном электропроводном экране кабеля, который проходя по экрану, наводит кондуктивные помехи в виде напряжений и токов на внутренних проводниках кабеля. Как показывают результаты исследований величина переходного сопротивления между экраном и электрическим соединителем существенно влияет на уровни наводимых напряжений на внутренних проводниках и, соответственно, на нагрузке подключенного к кабелю имитатора бортового прибора.

Экспериментально было исследовано девять образцов бортовых кабелей с различными величинами переходных сопротивлений. Каждый образец подвергался воздействию электростатических разрядов на различные участки испытательного стенда и экраны кабелей: пластина заземления; корпус

имитатора бортового прибора; центральная часть экрана кабеля. По полученным результатам измерений, наведенных на внутренних проводниках кабелей амплитудных значений напряжений составлена диаграмма, рис. 2.4. Приведенная диаграмма иллюстрирует зависимость амплитудных значений, наведенных на внутренних проводниках напряжений от величин переходного сопротивления.

Из диаграммы следует, что при увеличении переходного сопротивления возрастает амплитудное значение наведенных импульсных напряжений на внутренних проводниках экранированных бортовых кабелей. В случае воздействия электростатического разряда в центральную часть экрана кабеля увеличение переходного сопротивления с 1мОм до 3мОм амплитудное значение наведенного напряжения возрастает до 1417мВ.

Второй вариант эксперимента проведен для оценивания влияния изменения величины переходных сопротивлений на уровень наводимых помех при воздействии внешнего электрического поля. Специально подготовленный макет кабеля позволял плавно и контролируемо менять величину переходных сопротивлений между экраном кабеля и корпусами электрических соединителей. Изменение переходного сопротивления осуществлялось с помощью резьбы 5 на рис. 2.5. Макет показан на рис. 2.5. Макет кабеля был размещен в ТЕМ-камере. Для создания электрического поля и измерения уровней наведенных в кабеле напряжений использован измерительный приемник со встроенным генератором. Схема приведена на рис. 2.6.

На рис. 2.7 приведены графики изменения уровней наведенных напряжений при повышении переходных сопротивлений от 0.7 мОм до 4мОм.

Из диаграммы следует, что уровень напряжения помех на внутренних проводниках кабеля, наведенных внешним электромагнитным полем имеет очевидную зависимость от величины переходного сопротивления.

Контроль переходных сопротивлений производился на обоих соединителях с помощью электронного миллиметра по отработанной методике.

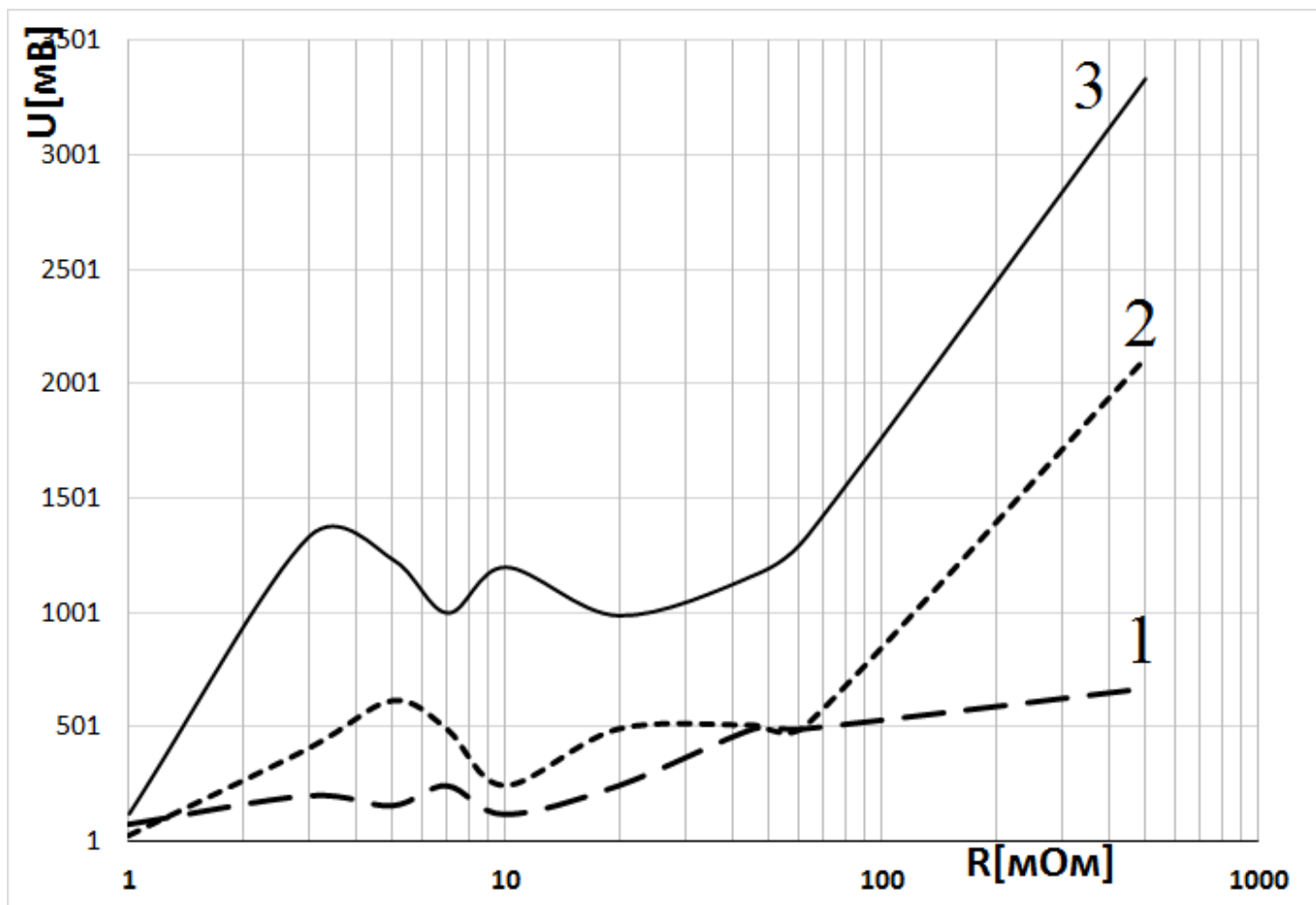


Рис. 2.4 Диаграмма зависимости наведенных на внутренних проводниках амплитудных значений напряжений от величин переходных сопротивлений. Электростатический разряд в:

- 1 – пластину заземления;
- 2 – в корпус имитатора бортового прибора;
- 3 – в центральную часть экрана кабеля.

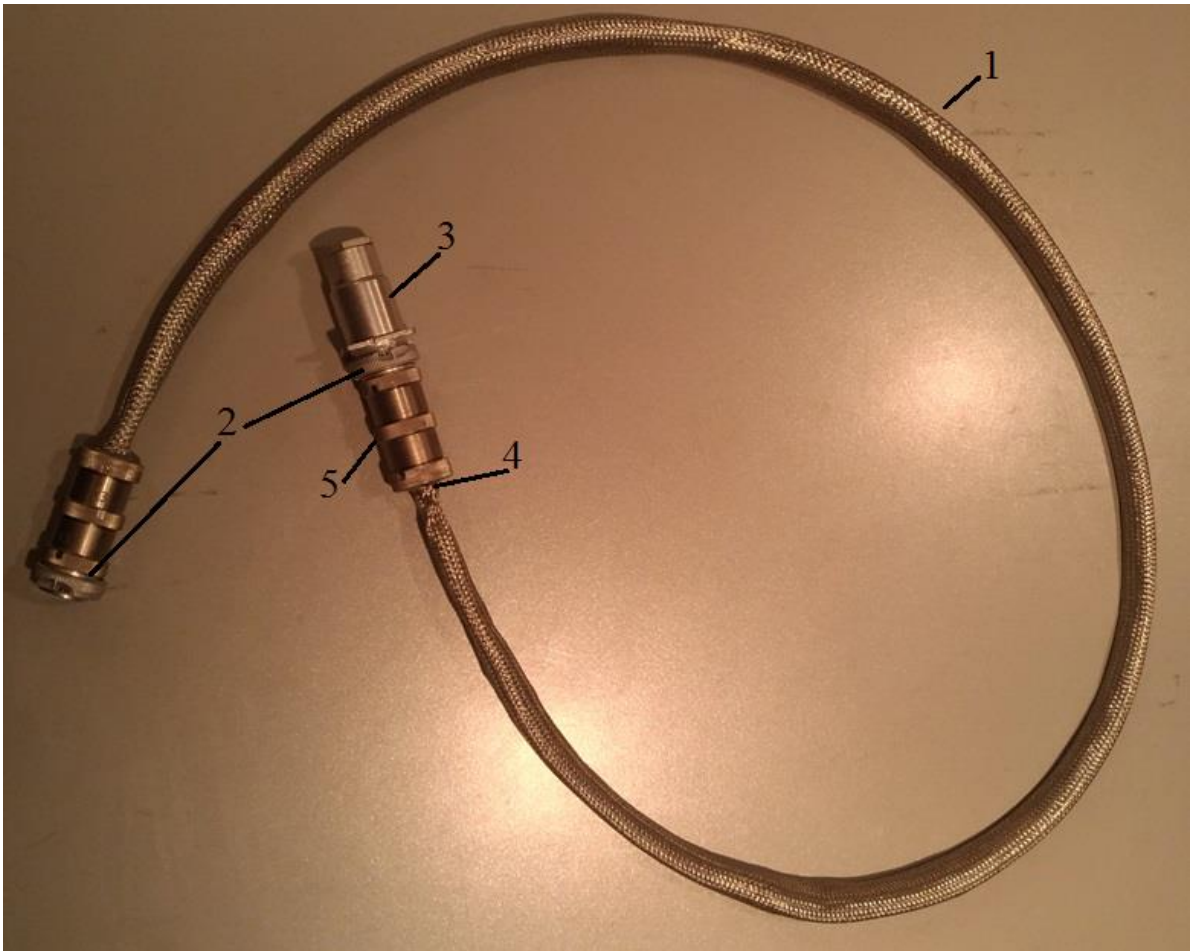


Рис. 2.5 Маект кабеля с заделанным внешним экраном и контролируемым переходным сопротивлением.

- 1 – Экран кабеля;
- 2 – электрические соединители;
- 3 – имитатор нагрузки, состоящий из ответного соединителя, резисторов и кожуха;
- 4 – заделка экрана кабеля в корпус соединителя;
- 5 – резьбовое соединение на корпусе соединителя.

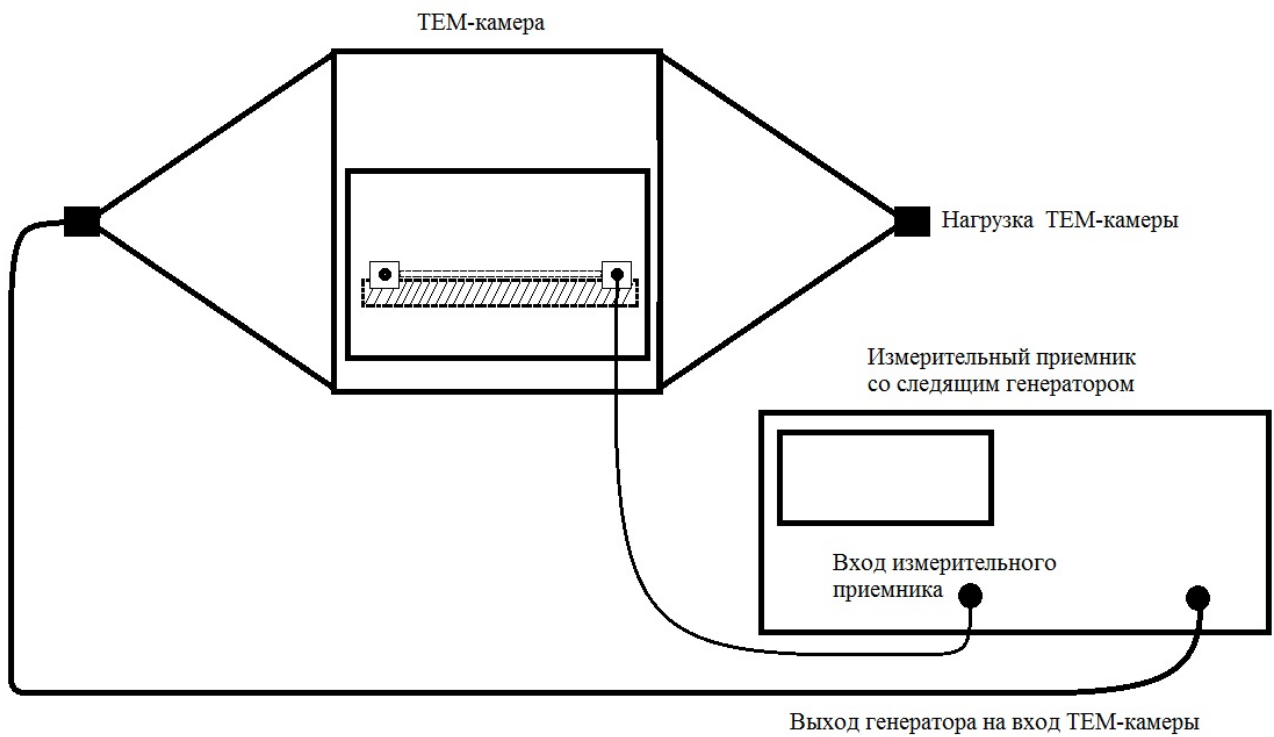


Рис. 2.6 Схема установки для исследования частотной диаграммы наведенных напряжений на внутренних проводниках кабеля на основе ТЕМ-камеры.

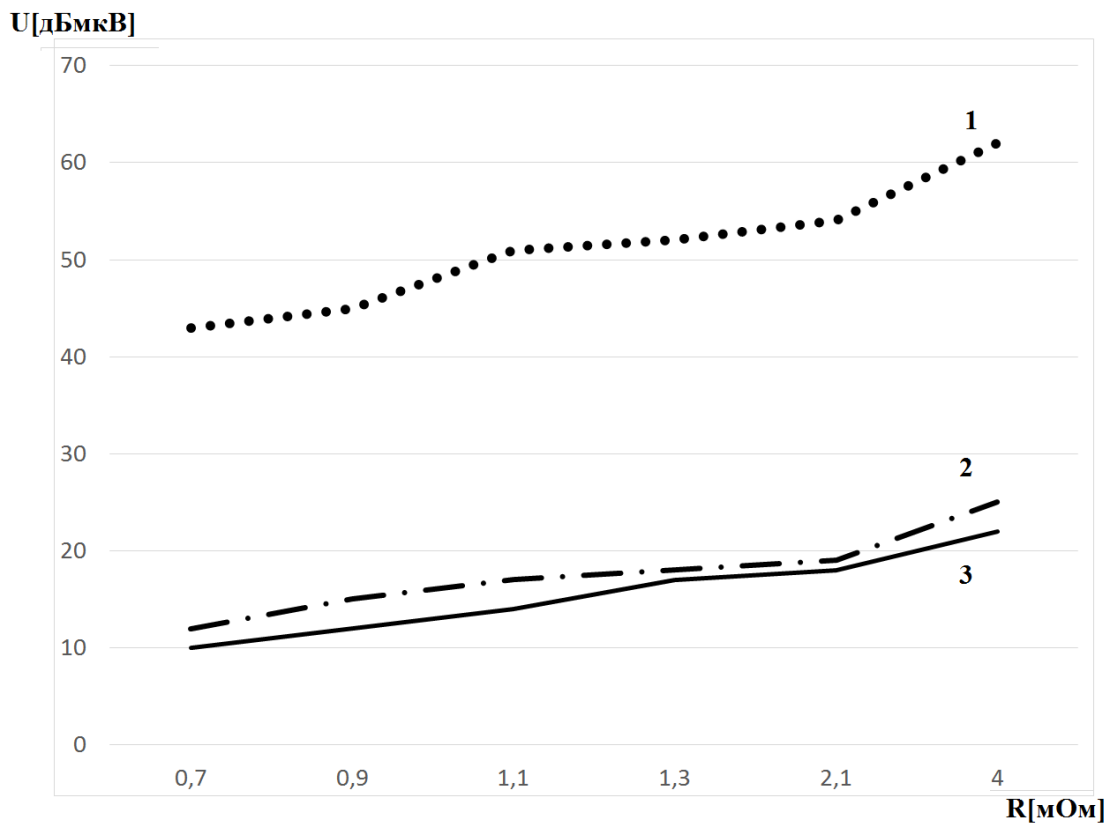


Рис. 2.7 Диаграмма зависимости уровня наведенного напряжения при изменении переходного сопротивления на разных частотах:

- 1 – на частоте 70 МГц;
- 2 – на частоте 30 МГц;
- 3 – на частоте 100 МГц;

2.3 Исследование восприимчивости кабеля с неоднородностями экрана

В предыдущем разделе рассмотрены исследования изменений характеристик экранов бортовых кабелей в процессе жизненного цикла. Изменения переходных сопротивлений показывают возможность возникновения неоднородностей в электромагнитном экране, которые нарушают его целостность.

Таким образом, наибольшие проблемы обеспечения эффективного экранирования возникают из-за появления неоднородностей в экране кабелей или неэкранированных участков. Стандарт [83] и отраслевые стандарты устанавливают требования к металлизации и заземлению кабельных сетей.

Возможные варианты соединения экрана с корпусом соединителя можно классифицировать следующим образом:

- экран кабеля прочно закреплен в металлическом корпусе электрического соединителя кабеля или кабельного жгута, как показано на рис. 2.8;
- экран кабеля соединен с корпусом соединителя или соединителей металлической косичкой;
- экран соединен с корпусом соединителя и не соединен с остальными соединителями.

При этом переходные сопротивления [113, 114, 31] и величины зазоров в экране кабеля, и, как следствие – неоднородности экрана, зависят от примененного способа соединения кабельного экрана с корпусом соединителя.



Рис. 2.8 Общий вид электрических соединителей с качественно закрепленным электромагнитным экраном.

Следует учитывать, что при наличии соединения экрана кабеля с корпусом соединителя металлической косичкой измеренное переходное сопротивление может полностью удовлетворять требованиям стандартов, однако, фактически, кабель может оказаться не защищен, поскольку появляется участок кабеля, открытый для проникновения внешних ЭМП и наведения на внутренних проводниках кондуктивных ЭМП в виде токов и напряжений [63, 83,47,109,48,110,111].

Наличие неоднородностей экрана кабеля в местах соединения экрана и корпуса электрического соединителя и появление, вследствие этого, на внутренних проводниках кондуктивных ЭМП приводит к необходимости исследования влияния способов соединения на защитные свойства экрана.

Для исследования данного вопроса были проведены две серии экспериментов на макетах экранированного кабеля.

Исследование эффективности экранирования проводилось на основе определения уровней напряжений помех на внутренних проводниках макета кабеля, наведенных внешним электромагнитным полем. 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. Схема исследования приведена на рис. 2.6. Некоторые варианты исследовательских установок описаны в [44, 114, 19, 65, 47,110,111].

Целью первого этапа исследования было определить – как повлияет соединение экрана с корпусом соединителя на уровень наведенного напряжения.

На втором этапе было рассмотрено влияние возможных зазоров между экраном кабеля и корпусом соединителя. Для этого был использован макет кабеля, где экран соединялся описанными ранее способами:

- экран соединен с двумя корпусами соединителей по всему периметру контакта
- экран соединен с одним корпусом и не имел непосредственного контакта со вторым, но соединен с ним проволокой или металлической плетенкой.

На всех этапах исследования переходное сопротивление в точке полного соединения экрана по всему периметру контакта с корпусом соединителя, и сопротивление между экраном и корпусом через проволоку или перемычку составляло 1,1 мОм, что полностью удовлетворяет ограничениям стандарта в 2мОм [83]. Результаты исследований в виде частотных диаграмм наведенных напряжений показаны на рис. 2.9 и 2.10.

Из полученных на этом этапе данных видно, что наличие плетеной перемычки действительно снижает наводимые напряжения, в среднем, на 10дБ, для проволоки, и для плетеной косички на 20дБ, однако тот же экран, при соединении со всеми корпусами по всему периметру контакта позволяет снизить уровень наведенных напряжений более чем на 40дБ во всем частотном диапазоне.

Следующим этапом был рассмотрен случай, когда экран соединен только с одним корпусом, имея зазор возле второго, рис 2.11. Величина зазора при измерениях составила 20мм, 100мм и 300мм. Частотные диаграммы уровней наведенных напряжений при разных величинах зазора показаны на рисунке 2.12.

Измеренные частотные диаграммы показывают, что на уровни наведенных напряжений и, следовательно, на эффективность экрана влияет сам факт наличия зазора, в то время как его величина не имеет значения.

Представленные результаты показывают значительное влияние любых неоднородностей экрана, в том числе возникающих в процессе эксплуатации, на эффективность экранирования.

U[дБмкВ]

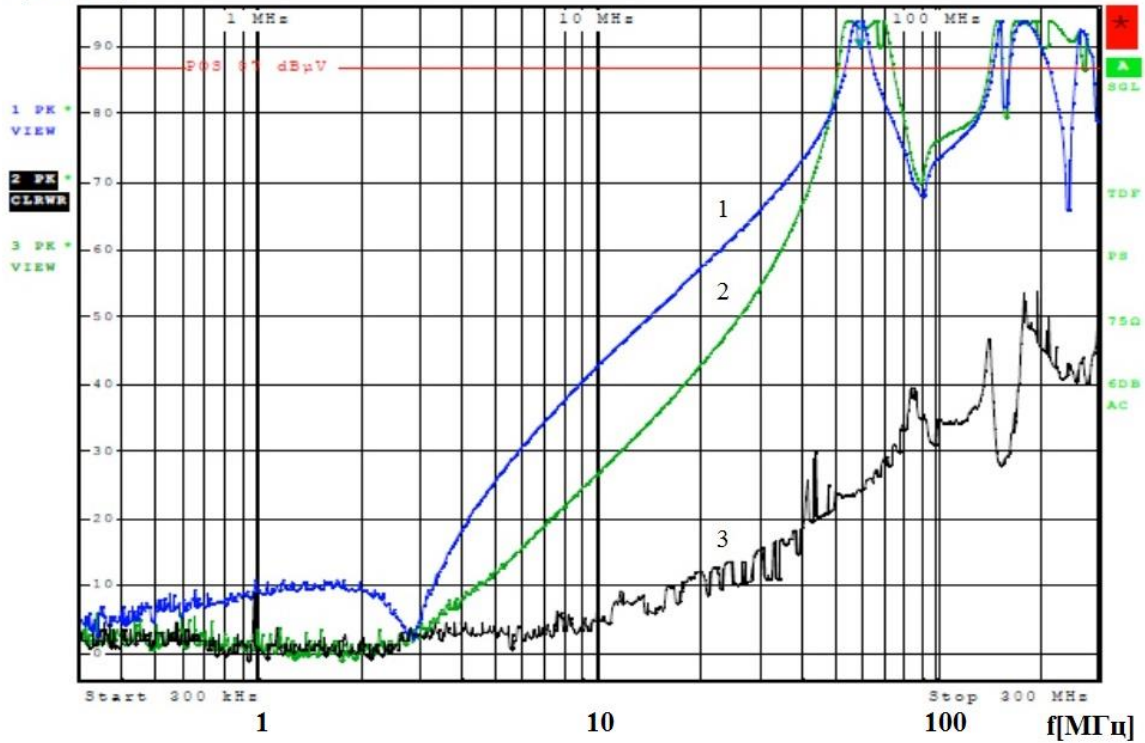


Рис. 2.9 Частотные диаграммы уровней наведенных напряжений:

- 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.

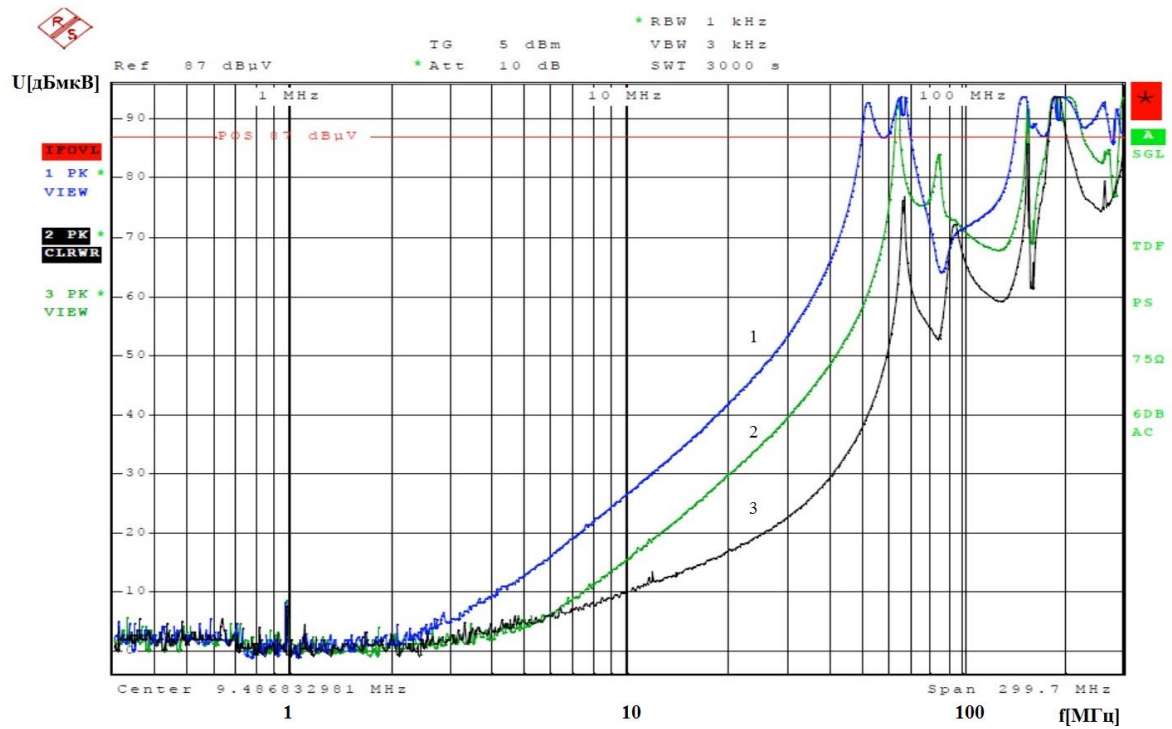


Рис. 2.10 Частотные диаграммы уровней наведенных напряжений:

- 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. 2.11 Демонстрация кабеля с зазором между экраном и корпусом соединителя:

1 – Корпус соединителя;

2 – зазор между экраном кабеля и соединителем;

3 – экран кабеля.

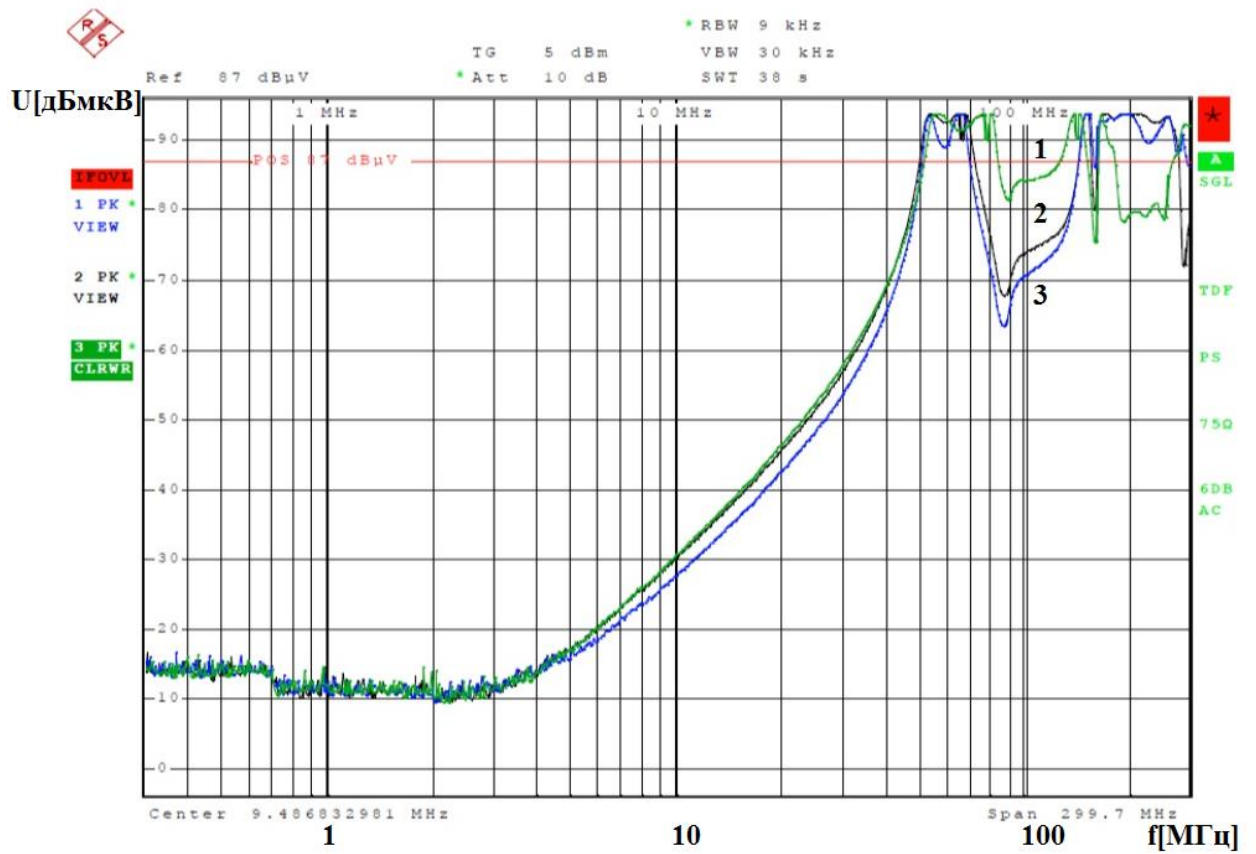


Рис. 2.12 Частотные диаграммы уровней наведенных напряжений при зазорах в экране различной длины:

- 1 – Зазор длиной 20 мм;
- 2 – Зазор длиной 100 мм;
- 3 – Зазор длиной 300 мм.

3 Исследование свойств радиопоглощающих материалов в экстремальных условиях

3.1 Описание радиопоглощающих материалов и способов их применения

Проводящие экранирующие материалы, такие как металлические прокладки, ткани и пены становятся менее эффективными при росте частоты. Кроме того, экранирование источника помех может создавать проблемы для самого экранированного устройства из-за отраженного высокочастотного сигнала. Поэтому, для обеспечения нужд ЭМС находят свое применение радиопоглощающие материалы (РПМ) - абсорберы, способные обеспечивать решение этих проблем. Нанесение РПМ на внутреннюю поверхность экрана избавляет от отраженных сигналов.

В качестве абсорберов могут использоваться:

- Микроволновые поглотители для свободного пространства на основе интерференции падающих и отраженных волн – резонансные поглотители;
- композиционные листовые материалы с металлическими и ферритовыми наполнителями – полостные поглотители;
- радиопоглощающие краски с наполнителями.

Абсорберы могут принимать множество форм – эластичные эластомеры, вспененные материалы, пластмассы и эпоксидные смолы. Могут предназначаться для различных экстремальных условий.

Эффект поглощения электромагнитной энергии обеспечивается сочетанием материалов с высокими магнитными и/или диэлектрическими потерями. Существуют различные разновидности РПМ – микроволновые поглотители, резонансные, пирамидальные, поглотители для замкнутых полостей, магнитные, диэлектрические абсорберы, радиопоглощающие краски. Для решения конкретной задачи ЭМС могут применяться материалы одного вида, нескольких, или материал сочетающий свойства разных видов.

Микроволновые поглотители поглощают энергию СВЧ микроволн. Для них выполняются три условия. Полное сопротивление материала равно волновому сопротивлению среды. Абсолютные магнитная и диэлектрическая проницаемость равны. Затухание волны при распространении в поглощающей среде, то есть материал должен рассеивать энергию волны.

Резонансные поглотители формируются из подобранных материалов волнового поглощения и имеют определенную структуру размещения. Выполняются в виде слоев Далленбаха, Яумана или экрана Сэлисбери, рис. 3.1.

В таких поглотителях используется тонкий материал и не согласованное сопротивление. ЭМ энергия не поглощается полностью и создается отраженная волна в противофазе. Если оптическое расстояние, пройденное прошедшими волнами кратно четному числу полуволн то отраженные волны будут в противофазе, а если их амплитуды равны, то суммарная амплитуда будет равна 0.

Пирамидальные поглотители обычно представляют собой конические или пирамидальные структуры из РПМ установленные перпендикулярно поверхности. Поглощение обеспечивается постепенным переходом сопротивления среды в сопротивление поглотителя. Размерные параметры таких поглотителей могут быть рассчитаны на конкретный диапазон частот, позволяя более эффективно рассеивать энергию за счет переотражения волны между отдельными пирамидами. Главный недостаток – хрупкость и требуемый объем.

Поглотители для замкнутых полостей ориентированы на стоячие волны. Здесь не так важна толщина материала поскольку эффект резонанса не является целью. Как правило применяются материалы с высокой диэлектрической и магнитной проницаемостью, преобразующие ЭМ энергию в тепло.

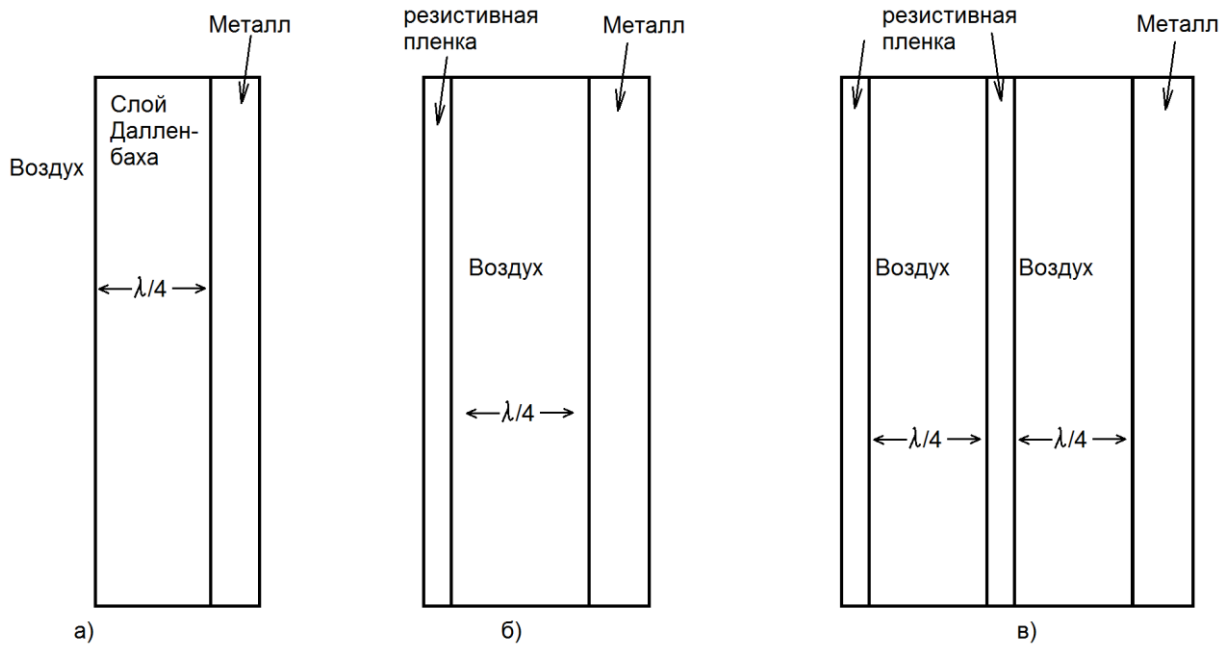


Рис. 3.1 Резонансные поглотители на основе слоев Далленбаха (а), экранов Сэлисбери (б) и слоев Яумана(в).

Основная сфера применения РПМ – создание безэховых камер. [33-39, 49-57] Это экранированные помещения в которых проводятся испытания радиооборудования и возможно получение чистого сигнала без посторонних шумов и электромагнитного эха отраженного сигнала. РПМ используют как прокладки внутри корпуса электронного устройства для изменения реверберационной картины электромагнитного поля в замкнутом объеме металлического корпуса. Однако, применение РПМ может послужить дополнительной мерой обеспечения электромагнитной совместимости. Это полезно для ЛА и КА, особенно если применяемый РПМ способен сохранять свои электрофизические свойства в экстремальных условиях, при воздействии вибрации и в широком диапазоне температур.

Электрофизические свойства РПМ определяют диапазон, в пределах которого происходит ослабление отраженных излучаемых ЭМП и коэффициент отражения. На космических аппаратах могут эффективно применяться радиопоглощающие материалы, сохраняющие свои свойства в широком температурном диапазоне, и при резком перепаде температур от аномально высоких к аномально низким и наоборот. [88-105]

Такие радиопоглощающие материалы, представляют собой негорючие плиты переменной толщины, выполненные в виде многослойного минерального волокна с проводящим наполнителем – вибродробленным графитом. Фото образца радиопоглощающего материала, выдерживающего аномальные колебания температуры приведено на рис.3.2

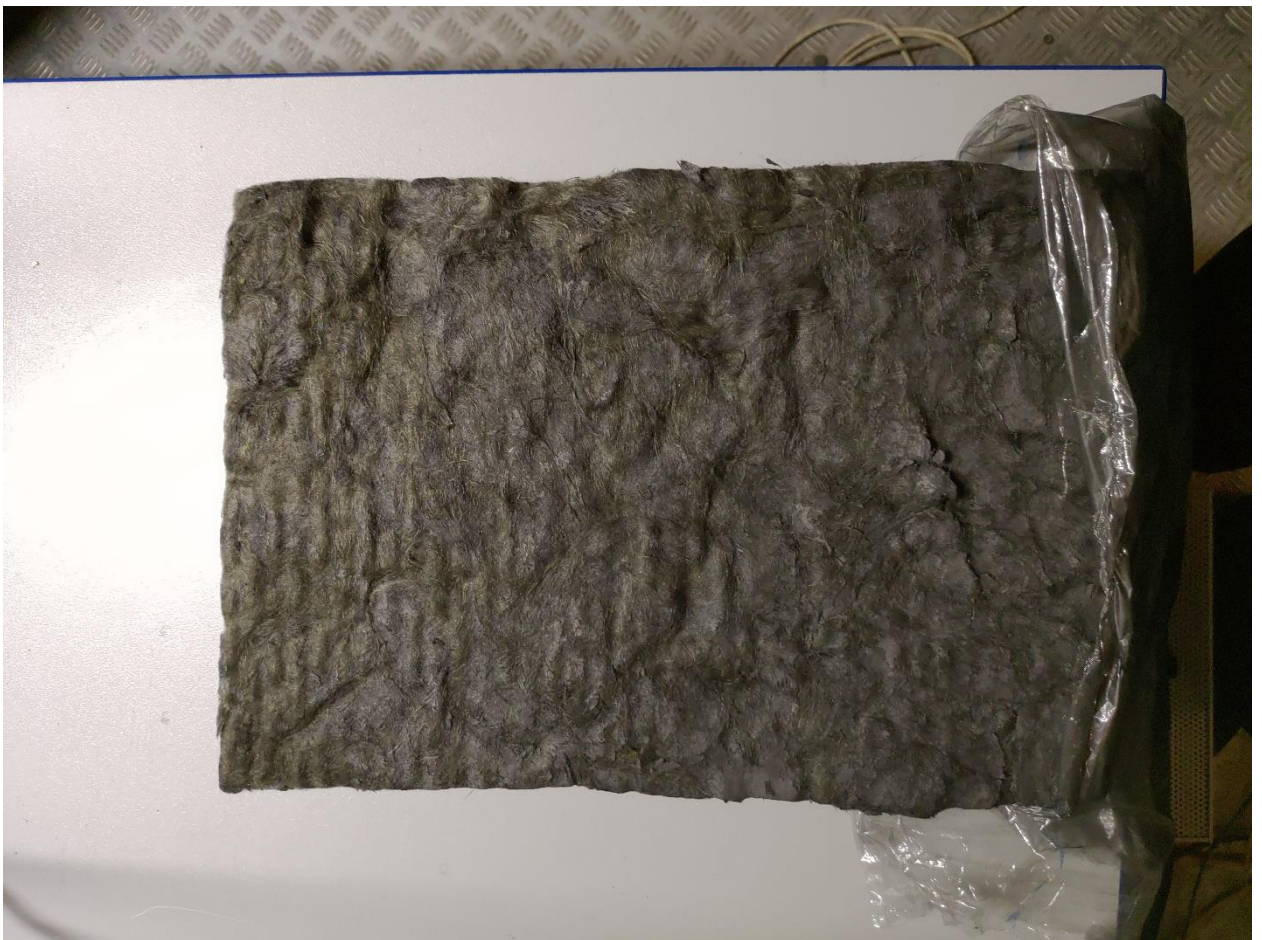


Рис. 3.2 Образец радиопоглощающего материала.

3.2 Исследование коэффициентов отражения и прохождения радиопоглощающего материала

Коэффициенты прохождения и отражения являются электрофизическими свойствами РПМ дающими нам представление о применимости РПМ в области электромагнитного экранирования. Эти коэффициенты показывают соотношение между энергией электромагнитной волны, падающей на РПМ и волны прошедшей через материал или отраженной от него.

Уровень ослабления электрической составляющей отраженного от РПМ волны электромагнитного поля определяется с помощью коэффициента отражения в виде следующей формулы

$$K_{\text{отр}} = 20Lg \frac{E_{\text{отр}}}{E_{\text{пад}}} [\text{дБ}], \quad (1)$$

где $E_{\text{отр}}$ - напряженность электрического поля отраженной волны;
 $E_{\text{пад}}$ - напряженность электрического поля падающей волны.

Радиопоглощающие материалы, выдерживающие большой диапазон температур, помимо поглощающих свойств обладают экранирующими свойствами и могут использоваться не только для уменьшения уровней отраженных электромагнитных волн, но и одновременно, для защиты от проникновения и распространения излучаемых ЭМП в виде электромагнитного поля в конструкции КА. Уровень ослабления электрической составляющей волны электромагнитного поля, проникающего через радиопоглощающие материалы, определяется коэффициентом прохождения

$$K_{\text{пр}} = 20Lg \frac{E_{\text{пр}}}{E_{\text{пад}}} [\text{дБ}], \quad (2)$$

где $E_{\text{пр}}$ - напряженность электрического поля прошедшей волны;
 $E_{\text{пад}}$ - напряженность электрического поля падающей волны.

При исследовании стойких к высоким и низким температурам радиопоглощающих материалов, измерение коэффициентов прохождения и отражения проводились при нормальном падении электромагнитной волны на образец РПМ, расположенный как на металлической поверхности, так и над эталонной нагрузкой.

Особенность исследуемых РПМ заключается в том, что на одной из сторон образцов материалов при их изготовлении образуется отражающий слой из наполнителя, поэтому измерение коэффициента отражения образцов проводилось без снятия отражающего слоя и обратной стороной от отражающего слоя к падающей электромагнитной волне.

Схема установки для определения коэффициента отражения приведена на рис. 3.3. Общий вид установки приведен на рис. 3.4

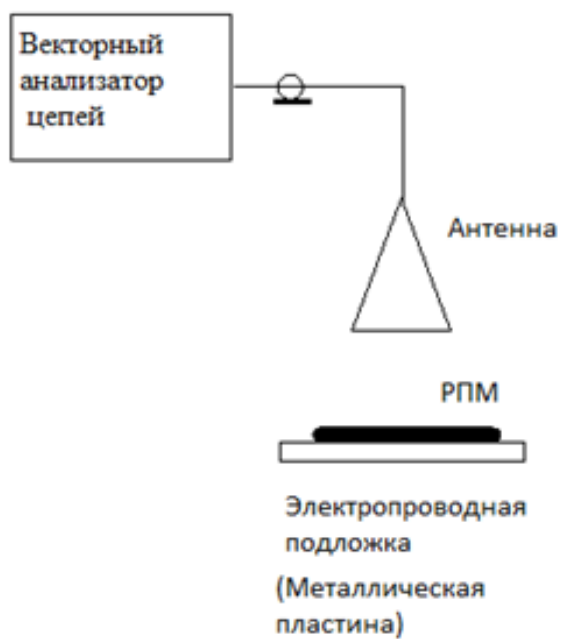


Рис. 3.3 Схема установки для измерения коэффициента отражения радиопоглощающих материалов

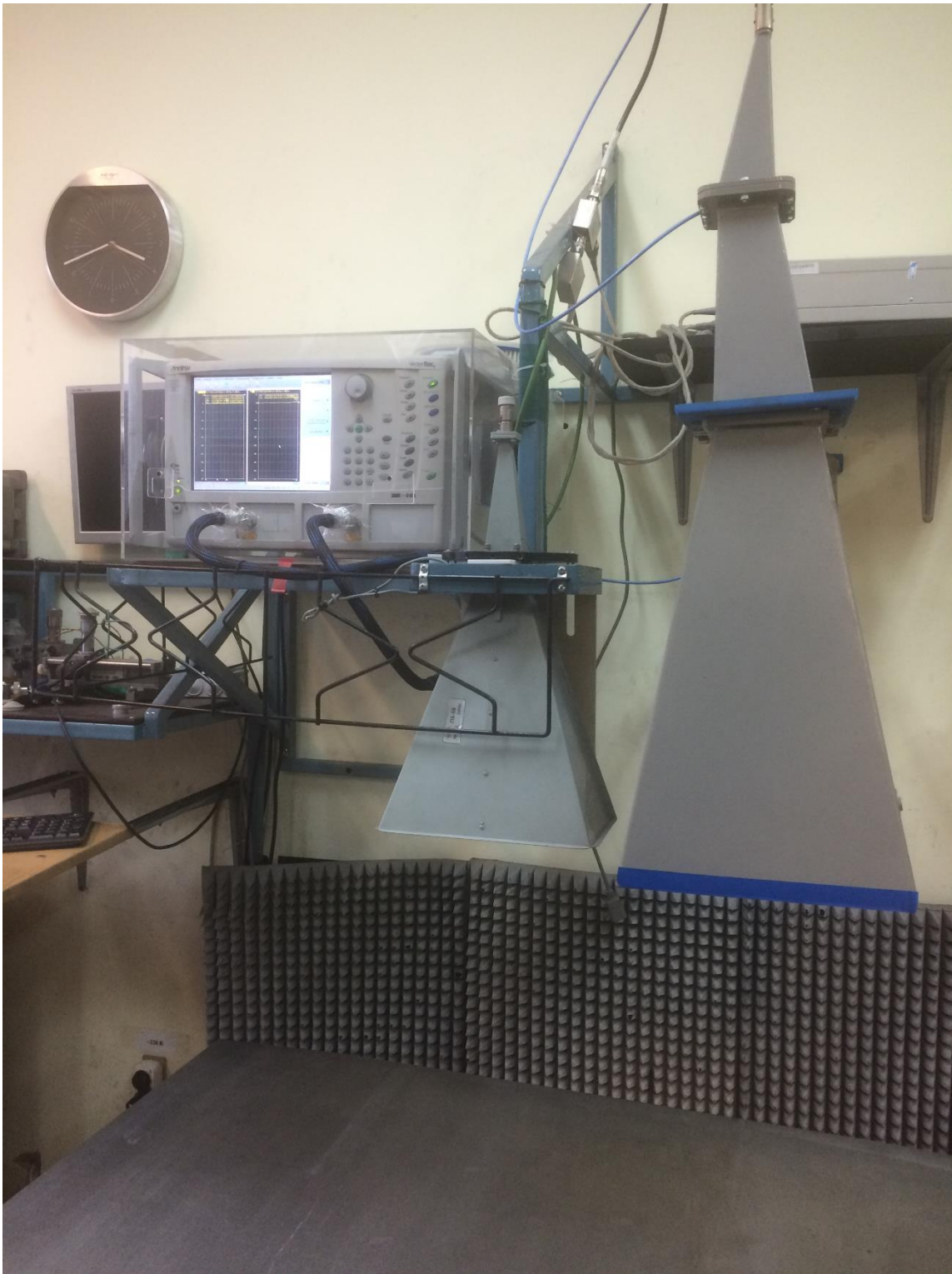


Рис. 3.4 Общий вид установки для определения коэффициента отражения радиопоглощающих материалов.

Измерения коэффициента отражения проводились в диапазоне частот 1...37 ГГц при использовании в качестве подложки металлической пластины и материала эталонной нагрузки. Материал, который использовался в качестве эталонной нагрузки, обладает коэффициентом отражения, изменяющимся в зависимости от частоты от -38 до -70 дБ, что позволяет при исследованиях приближенно имитировать свободное пространство. На рис.3.5 приведена частотная диаграмма коэффициента отражения материала, используемого в качестве эталонной нагрузки.

Перед проведением исследований образец РПМ подвергался температурному воздействию. Образец нагревался до температуры +380 °С и после выдерживания при данной температуре в течение четырех часов погружался в жидкий азот.

Частотная диаграмма коэффициента отражения, построенная по формуле (1), на основе результатов измерений, для образца РПМ, при использовании в качестве подложки металлической пластины, приведена на рис. 3.6.

Коэффициент прохождения образца РПМ, до и после температурных воздействий, определялся на установке, схема которой приведена на рис.3.7.

В результате проведенных экспериментальных исследований установлено, что значения коэффициента прохождения на частоте 6,8ГГц составляют: до температурных воздействий -15,5 дБ; после нагревания до +380 °С -16,2 дБ; после погружения в жидкий азот -13,7 дБ. [88, 29, 30]

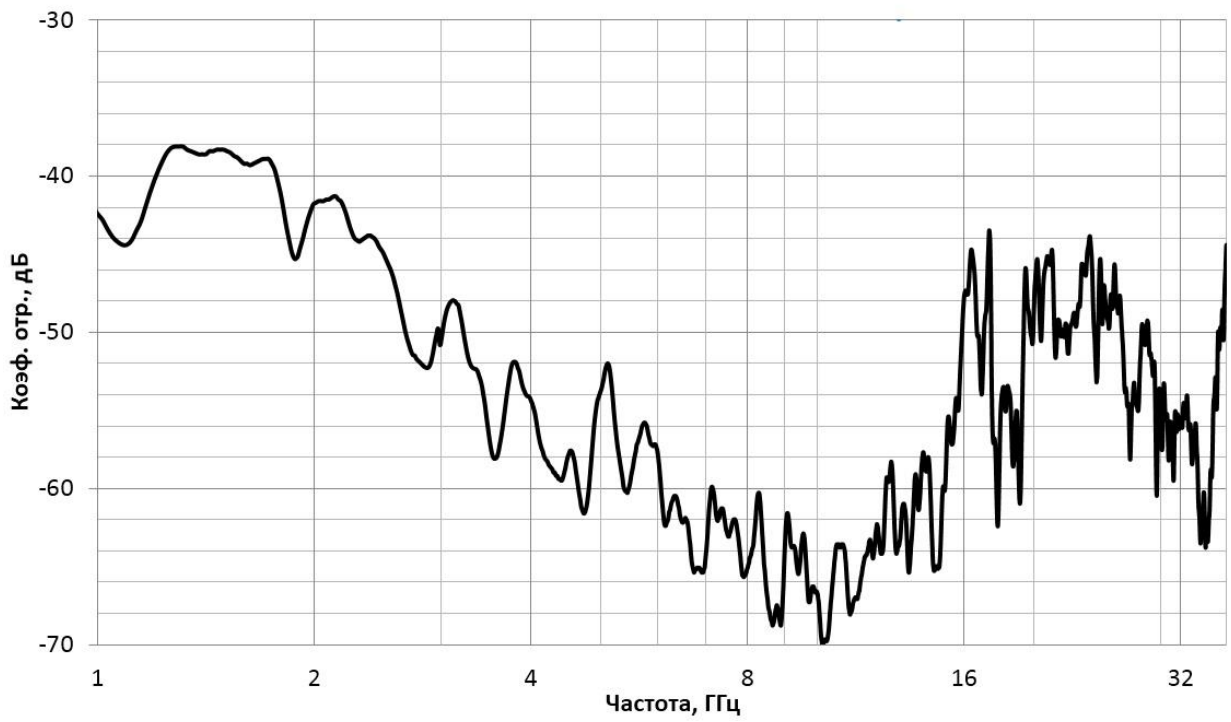


Рис. 3.5 Частотная диаграмма коэффициента отражения материала, используемого в качестве эталонной нагрузки

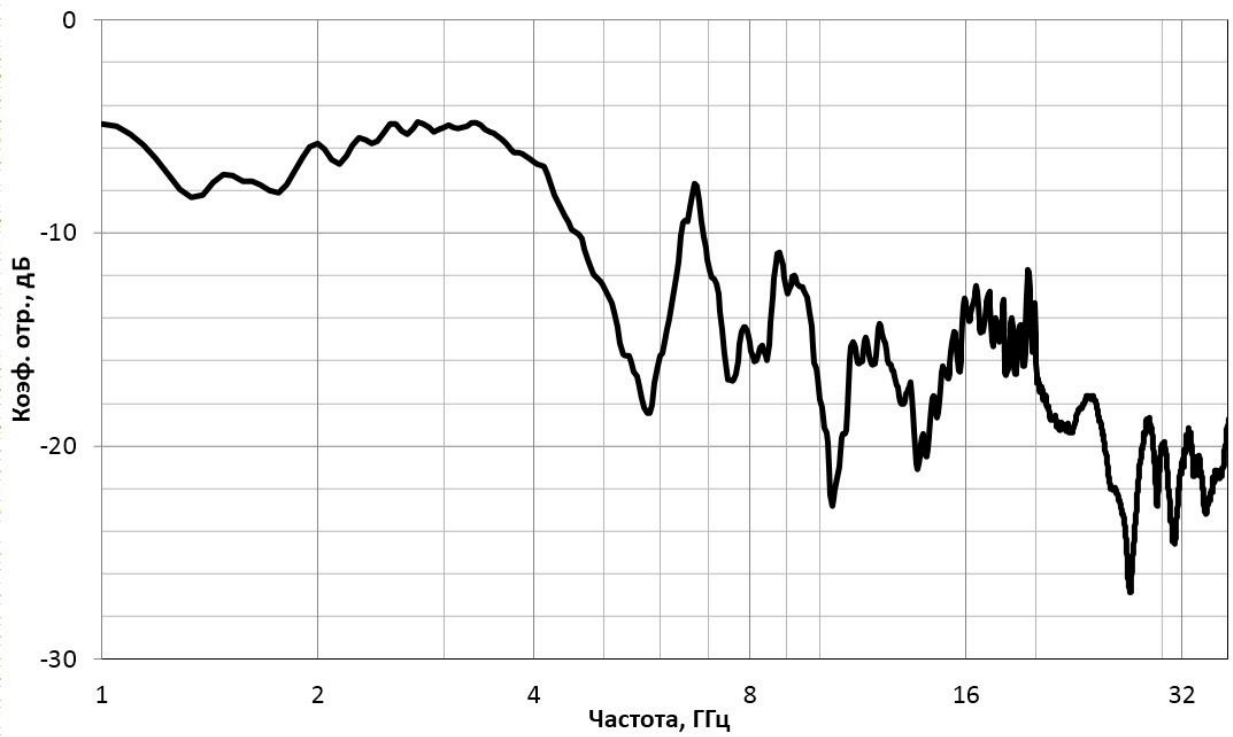


Рис. 3.6 Частотная диаграмма коэффициента отражения образца РПМ при использовании в качестве подложки металлической пластины.

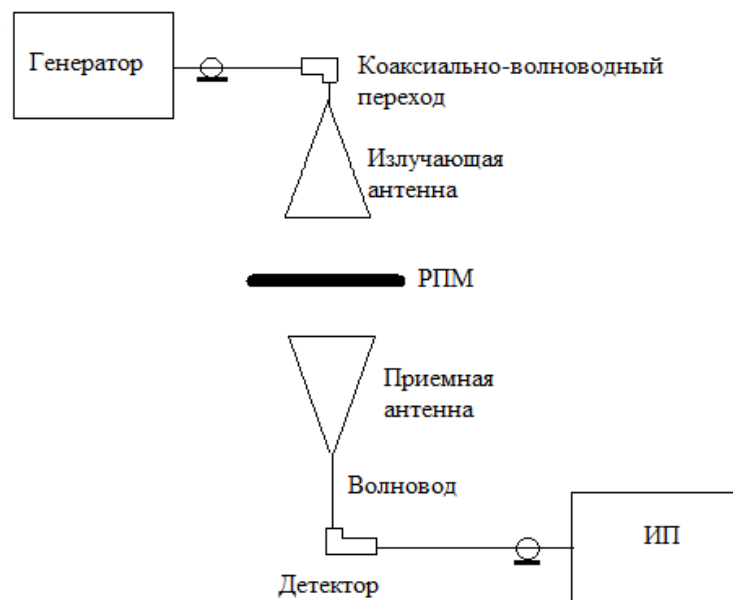


Рис. 3.7 Схема установки для определения коэффициента прохождения:
 РПМ-радиопоглощающий материал; ИП- измерительный приемник

Последующие исследования свойств РПМ заключались в определении значения коэффициента отражения при воздействии электромагнитного поля, создаваемого установкой, на металлический цилиндр длиной 0,2 м и диаметром 0,04 м и такого же цилиндра, но закрытого образцом радиопоглощающего материала.

Схема установки для определения коэффициента отражения для металлического цилиндра в заданном частотном диапазоне приведена на рис.3.8. Фото установки с размещенным в ней металлическим цилиндром и закрытым РПМ приведено на рис. 3.9.

Частотные диаграммы коэффициента отражения открытого металлического цилиндра и цилиндра закрытого образцом РПМ, полученные при использовании в испытательной установке эталонной нагрузки приведены на рис. 3.10. Исследования с использованием эталонной нагрузки, имитирующей свободное пространство, позволяет определить коэффициент отражения электромагнитного поля, создаваемого бортовыми приборами и устройствами КА от элементов конструкции КА. Из приведенных диаграмм следует, что покрытие цилиндрического объекта гибким РПМ позволяет уменьшить коэффициент отражения на 15 дБ и более по сравнению с коэффициентом отражения от цилиндра не закрытым РПМ. Из частотной диаграммы следует, что на частоте 1 ГГц РПМ теряет свои свойства и коэффициенты отражения, открытого и закрытого РПМ металлического цилиндра принимают близкие значения.

Исследования коэффициента прохождения РПМ в диапазоне частот 0,1-1000 МГц проводились в ТЭМ камере. Для этого в рабочей зоне ТЭМ камеры размещался плоский металлический электрод, соединенный экранированным кабелем с измерительным приемником.

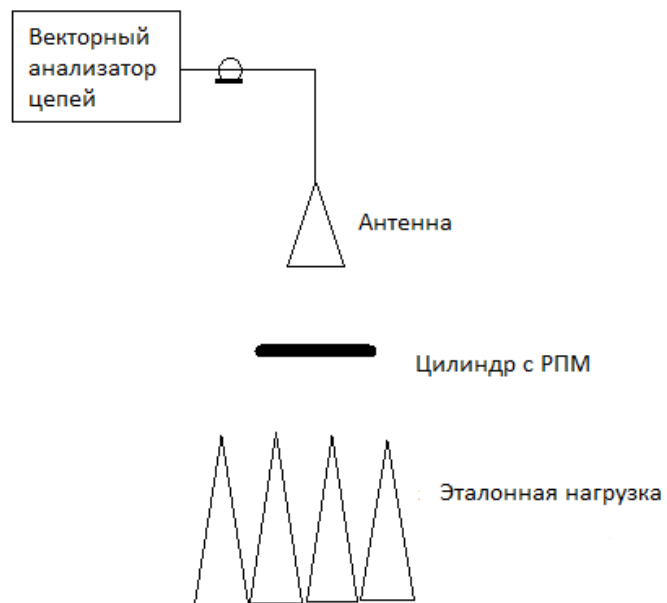


Рис. 3.8 Схема установки для определения коэффициента отражения от металлического цилиндра закрытого РПМ

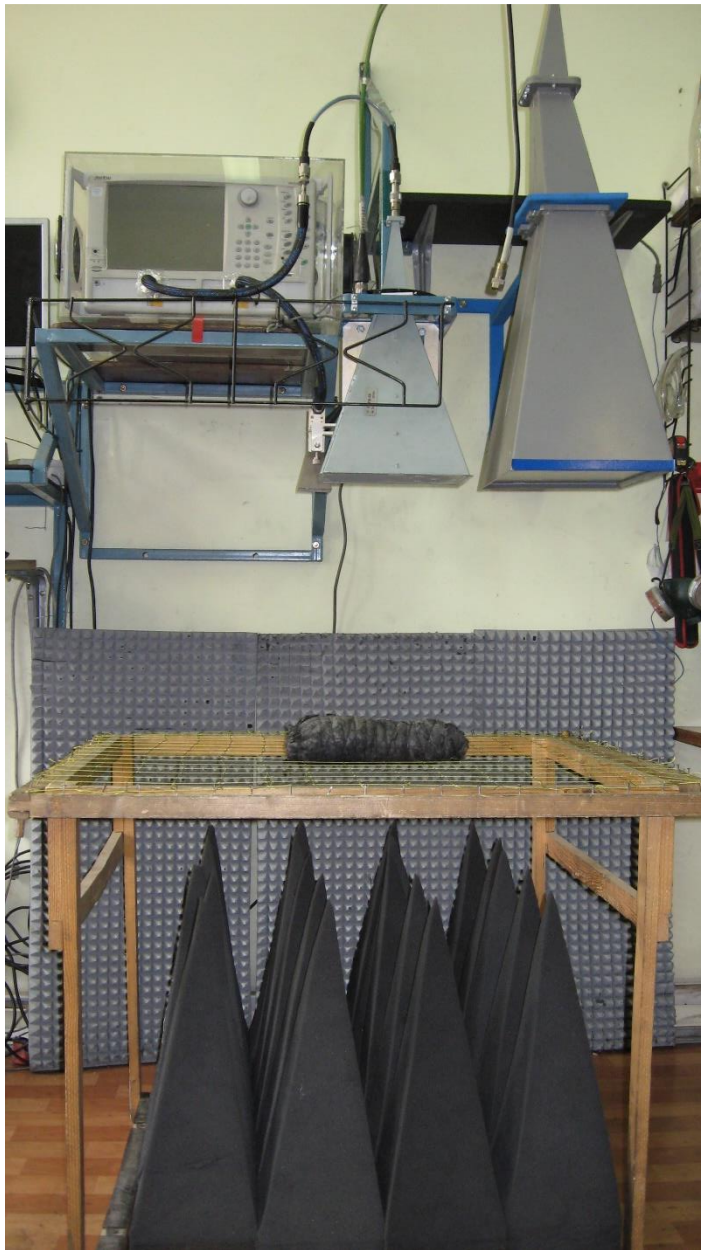


Рис. 3.9 Установка для определения коэффициента отражения от металлического цилиндра закрытого РПМ

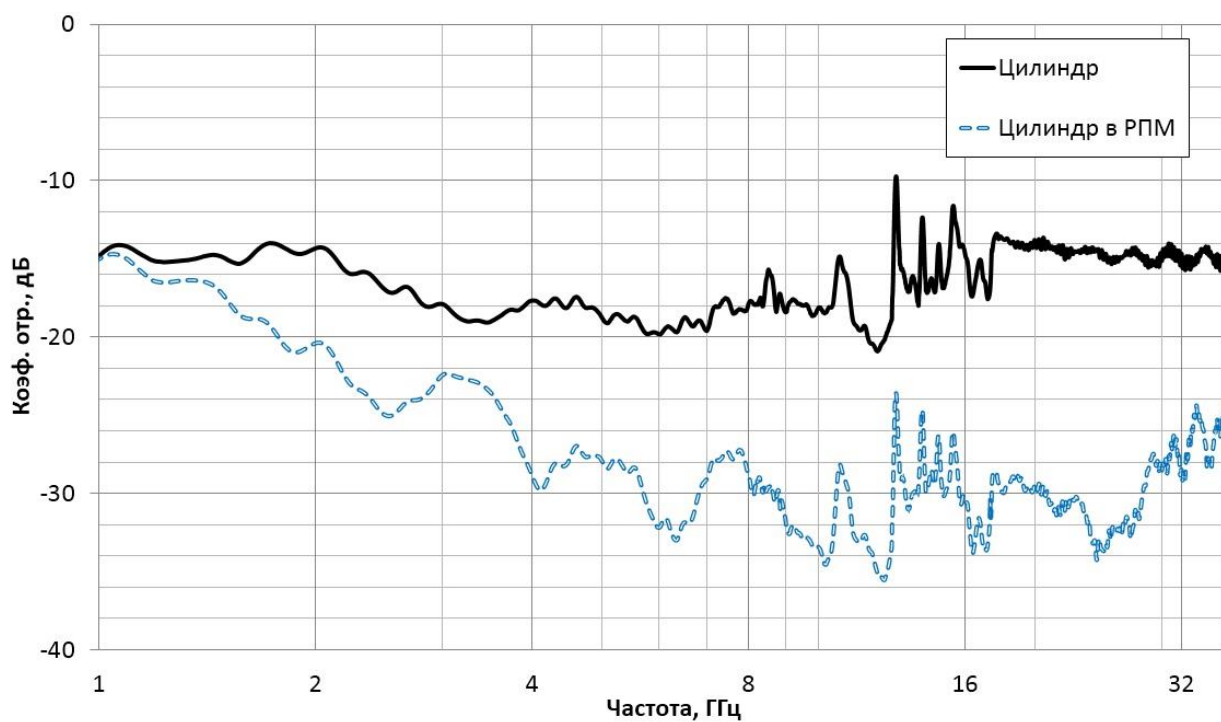


Рис. 3.10 Частотные диаграммы коэффициентов отражения от металлического цилиндра без РПМ и металлического цилиндра, закрытого РПМ

Для исследования коэффициента прохождения в заданном частотном диапазоне электрод накрывался образцом РПМ. Схема исследования приведена на рис.3.11. Частотные диаграммы напряжений, наведенных электромагнитным полем ТЭМ камеры на открытом электроде и электроде, закрытом образцом РПМ относительно заземленного корпуса ТЭМ –камеры приведены на рис.3.12 и рис.3.13, соответственно. Из анализа полученных частотных диаграмм наведенного на измерительном электроде напряжения следует, что коэффициент прохождения, вычисляемый по формуле

$$K_{пр} = U_2 - U_1 \text{ [дБ]}$$

где U_1 - максимальное значение напряжения, наведенного на открытом электроде; U_2 –максимальное значение напряжения, наведенного на закрытом электроде, изменяется, в зависимости от частоты, в пределах от -15 до -20 дБ.

В данном разделе продемонстрированы результаты исследования РПМ после оказанного на него воздействия, но в нормальных условиях при температуре +25°C.

Исследование изменений коэффициента отражения при воздействии экстремальных температур.

Образец РПМ размещен на металлической пластине дополненной нагревательным элементом. Контроль температуры осуществлен термопарой и термовизором. Векторный анализатор со встроенным генератором и приемопередающей антенной используется для создания электромагнитной волны и измерения волны, отраженной от металлической электропроводной пластины. Различие между направленной волной и измеренной отраженной характеризует поглощающие свойства РПМ. Схема приведена на рис. 3.15

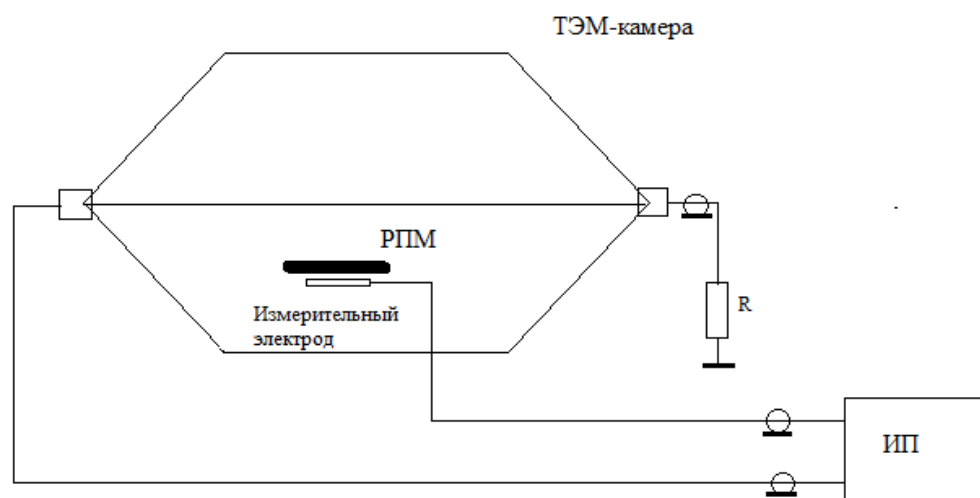


Рис. 3.11 Схема исследования коэффициента прохождения RПM в частотном диапазоне 0,1-1000МГц: RПM - радиопоглощающий материал; ИП-измерительный приемник

RBW: 100 kHz

UNCAL

M1: 837.92 MHz, 93.69 dB μ V

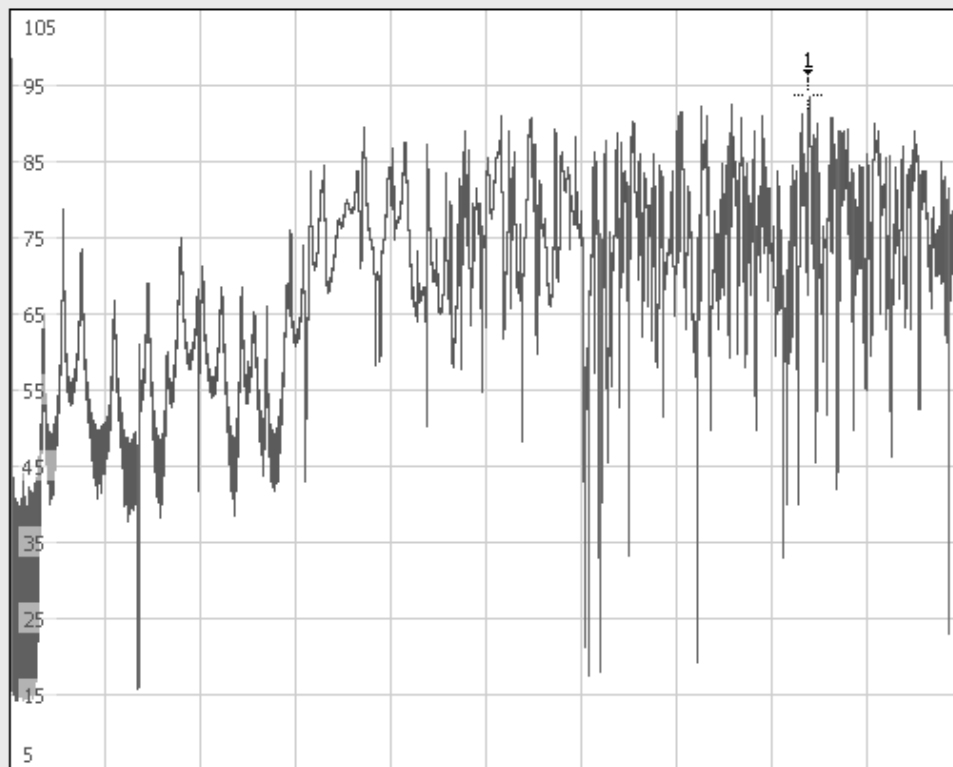
BANDWIDTH

VBW: 300 kHz

SWT: 3 s

Ref: 105 dB μ V

Att: 10 dB



RBW

100 kHz



AUTO RBW

VBW

300 kHz



AUTO VBW

Center: 500.050000 MHz

99.99 MHz/DIV

Span: 999.9 MHz

TG on TM: C/W

Рис. 3.12 Частотная диаграмма напряжения, наведенного на открытом электроде: по оси частот 1 деление 100 МГц; по оси напряжений 10 дБмкВ.

RBW: 1 MHz

UNCAL

M1: 837.92 MHz, 78.76 dB μ V

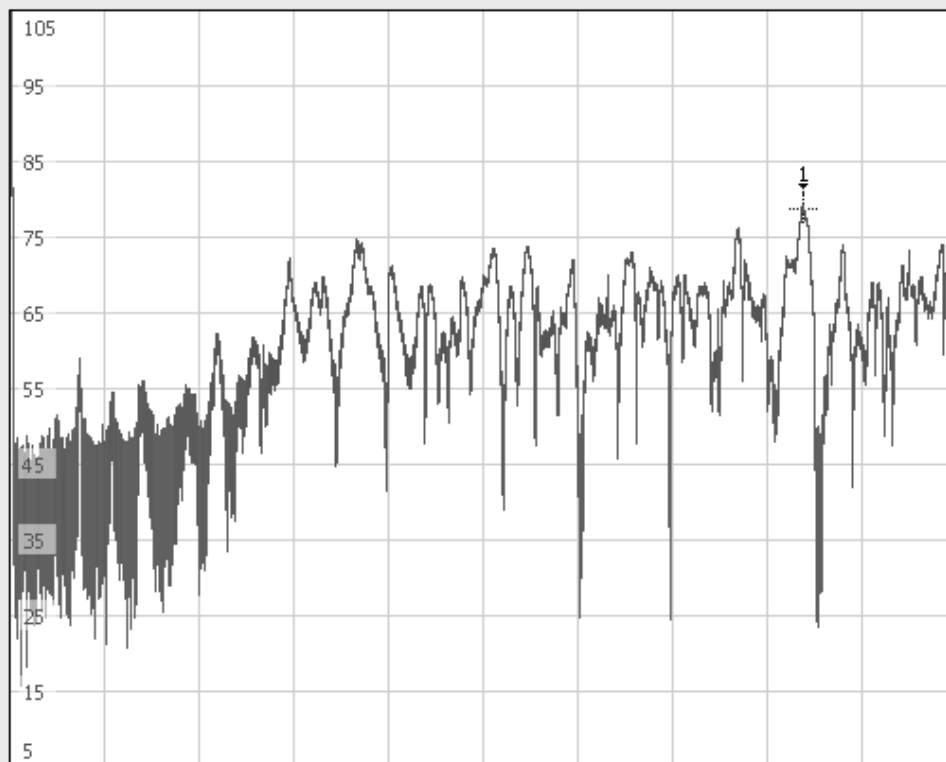
BANDWIDTH

VBW: 1 MHz

SWT: 100 ms

Ref: 105 dB μ V

Att: 10 dB



RBW

1 MHz



AUTO RBW

VBW

1 MHz



AUTO VBW

Center: 500.050000 MHz

99.99 MHz/DIV

Span: 999.9 MHz

TG on TM: C/W

Рис. 3.13 Частотная диаграмма напряжения, наведенного на электроде, закрытом РПМ: по оси частот 1 деление 100 МГц; по оси напряжений 10 дБмкВ.

3.3 Исследование коэффициента отражения радиопоглощающего материала при экстремальных температурах и вибрации

Исследование коэффициента отражения после воздействия вибрации

Для применения любого материала в конструкции следует убедиться, что данный материал сохраняет свои свойства в условиях функционирования аппарата. В случае КА наиболее критичными условиями являются температурные перепады и воздействие вибрации при взлете или посадке КА.

Для исследования влияния вибрации на электрофизические свойства РПМ применено следующее испытание. Первоначально был измерен коэффициент отражения образца РПМ в нормальных условиях. После чего, этот образец был подвергнут воздействию вибрации на специальном стенде с параметрами перегрузки 8g в течение сорока минут. Данное воздействие имитирует взлет ракеты-носителя (Протон-М) и вывод спутника на орбиту. После воздействия вибрации коэффициент отражения образца РПМ был измерен повторно. На рис. 3.14 приведены результаты измерений коэффициентов отражения образца. Схема измерения коэффициента отражения аналогична приведенным ранее на рис 3.8-3.9.

При сравнении частотных диаграмм коэффициента отражения видны некоторые незначительные изменения, но образец сохраняет свои свойства практически в полном объеме.

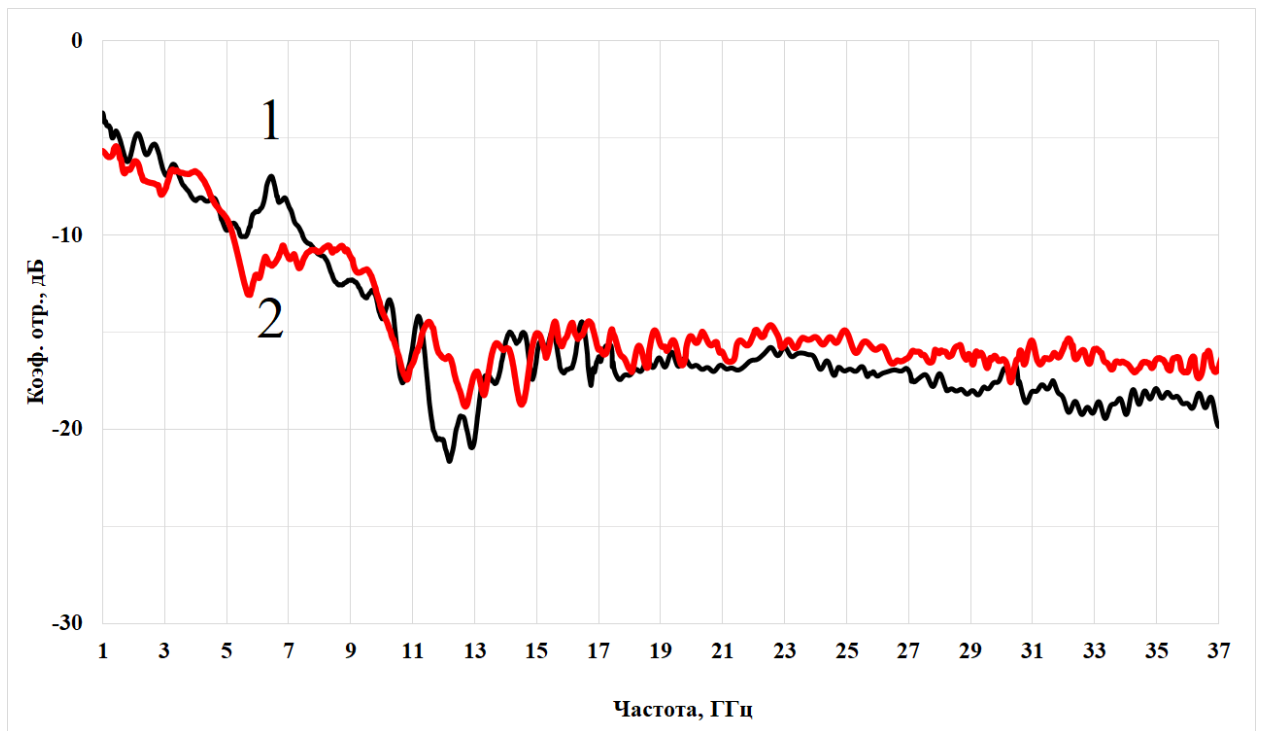


Рис. 3.14 Частотные диаграммы коэффициентов отражения образца РПМ до и после воздействия вибрации:

- 1 – образец до воздействия вибрации;
- 2 – образец после воздействия вибрации.

Частотная диаграмма на рис. 3.16 показывает изменения коэффициента отражения электромагнитной волны от металлической пластины накрытой образцом РПМ в условиях комнатной температуры и при нагреве РПМ до +150 °С. Колебания коэффициента отражения невелики. На некоторых частотах нагретый РПМ поглощает эффективнее чем в нормальных условиях.

Эксперимент для исследования поглощающих свойств РПМ в условиях сверхнизких температур проводился с применением установки схема которой приведена на рис 3.17. Для проведения исследования была использована кювета, наполненная жидким азотом, и с размещенным внутри образцом РПМ.

Частотные диаграммы на рис 3.18 показывают изменения поглощающих свойств образца РПМ погруженного в жидкий азот, а также по мере испарения азота и прогрева образца РПМ обратно до комнатной температуры.

В процессе эксперимента было установлено что кювета с жидким азотом также поглощает и отражает электромагнитное поле антенны. Для определения влияния кюветы с жидким азотом на величину коэффициента отражения образца РПМ была снята частотная диаграмма кюветы заполненной жидким азотом без РПМ, рис. 3.19.

При анализе результатов построена диаграмма коэффициента отражения РПМ, скорректированная с учетом коэффициента отражения кюветы с азотом без РПМ, рис. 3.20.

Диаграмма на рис. 3.21 показывает возвращение частотных свойств коэффициента отражения образца РПМ к значениям, близким к исходным, после завершения эксперимента и постепенного возврата температуры образца к +25°С.

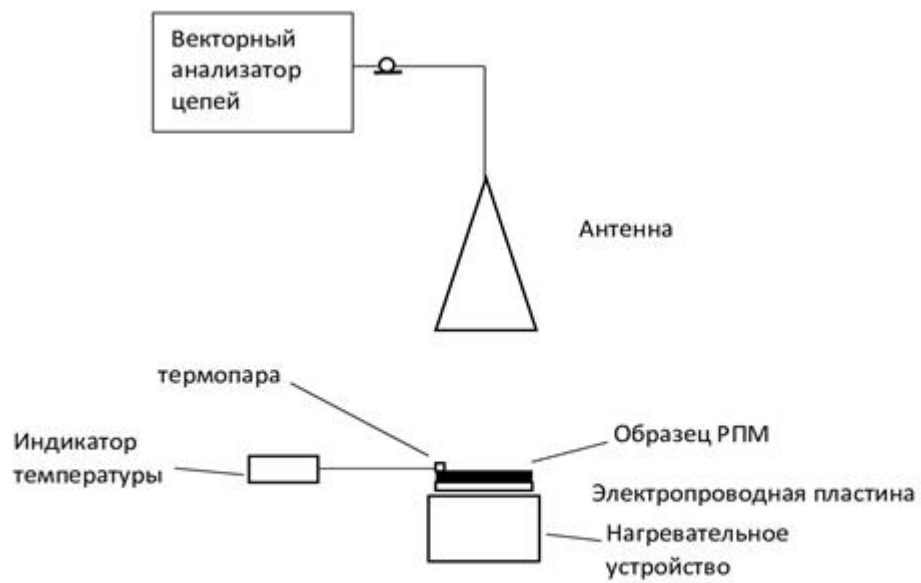


Рис. 3.15 Схема исследования свойств РПМ при температуре +150°C.

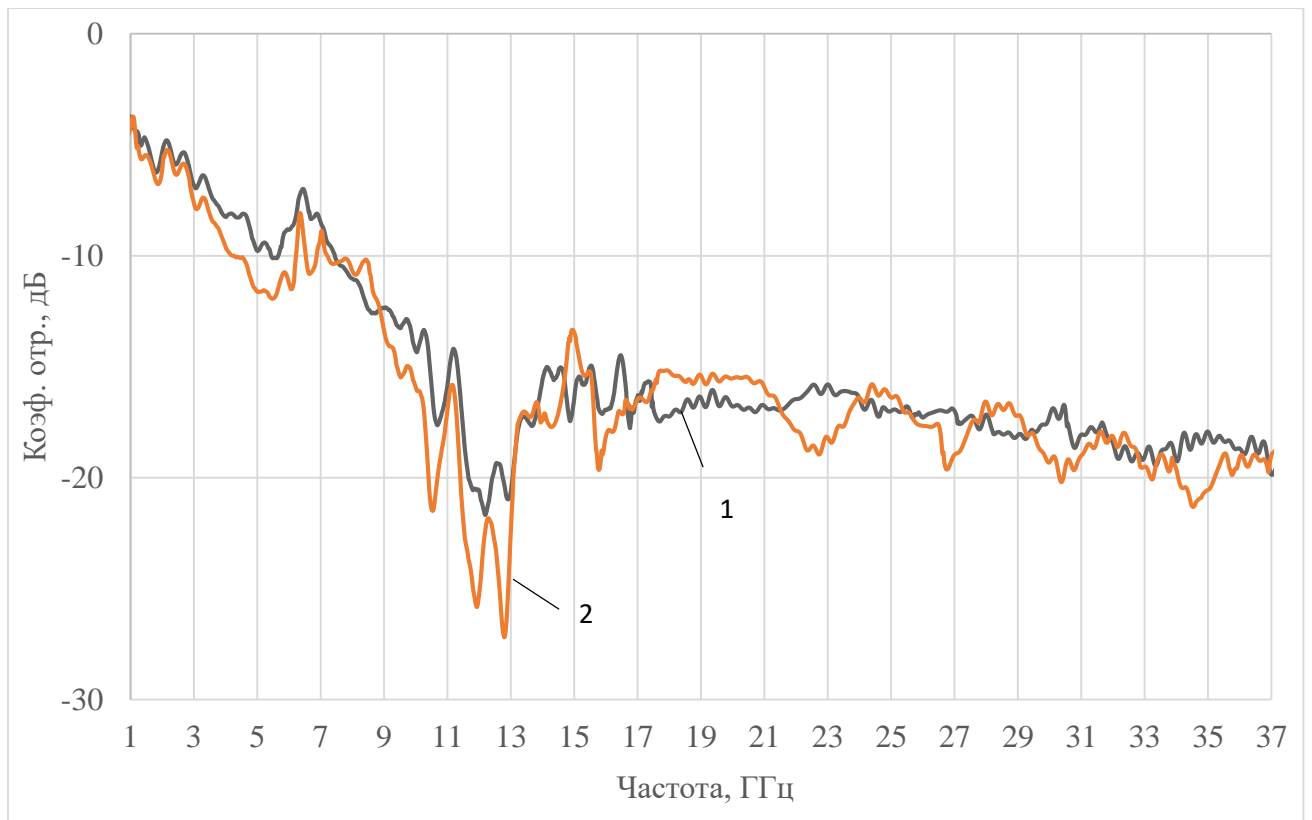


Рис. 3.16 Частотные диаграммы коэффициента отражения образца исследуемого радиопоглощающего материала при разных температурах:

- 1 – частотная диаграмма коэффициента отражения при температуре 25°C;
- 2 – частотная диаграмма коэффициента отражения при температуре 150°C.

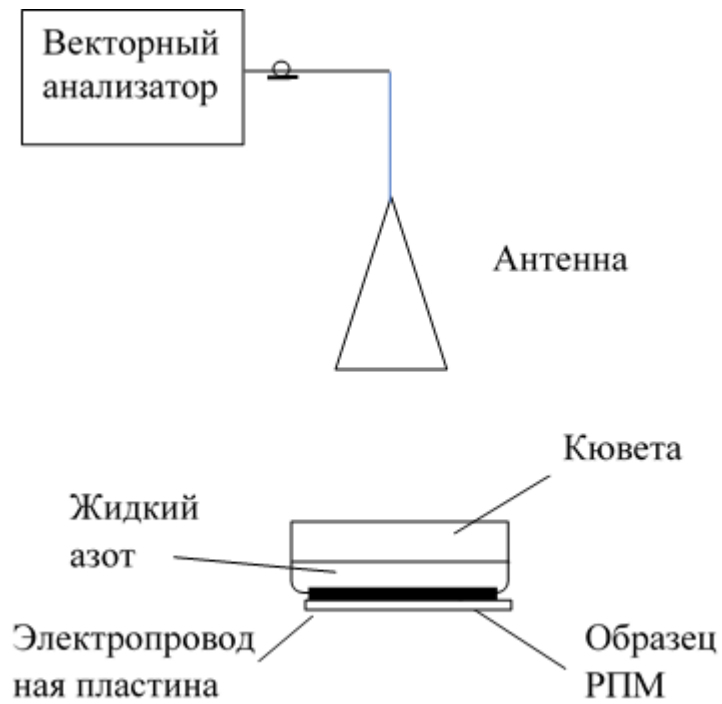


Рис. 3.17 Схема установки для определения коэффициента отражения образца исследуемого радиопоглощающего материала при низких температурах

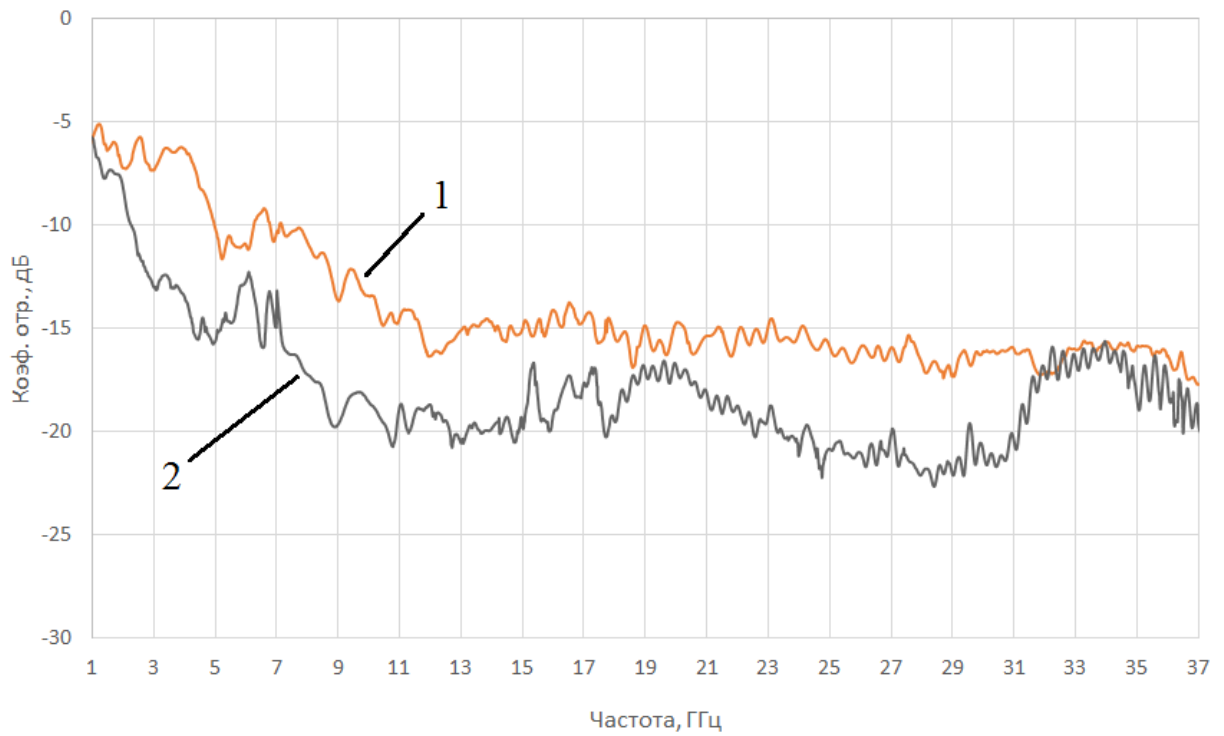


Рис 3.18 Частотные диаграммы коэффициента отражения образца исследуемого радиопоглощающего материала при различных температурах:

1 – частотная диаграмма коэффициента отражения при температуре 25°C;

2 – частотная диаграмма коэффициента отражения при температуре -196 °С

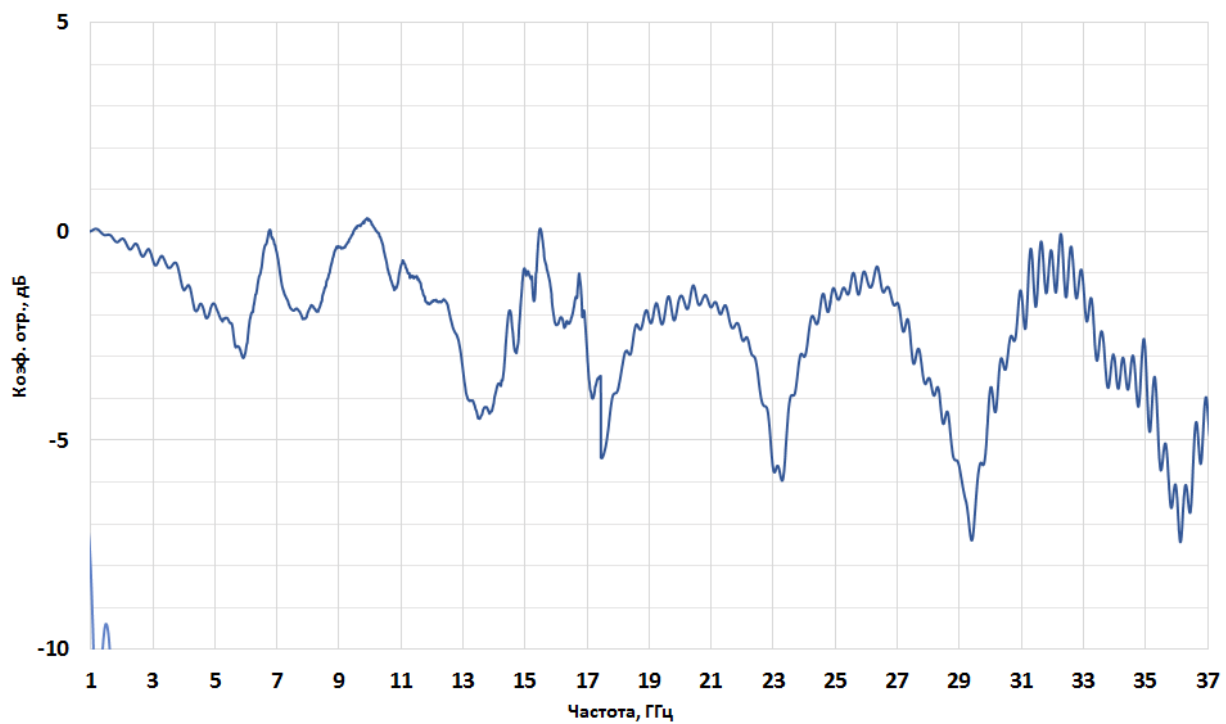


Рис. 3.19 Частотная диаграмма коэффициента отражения жидкого азота в кювете.

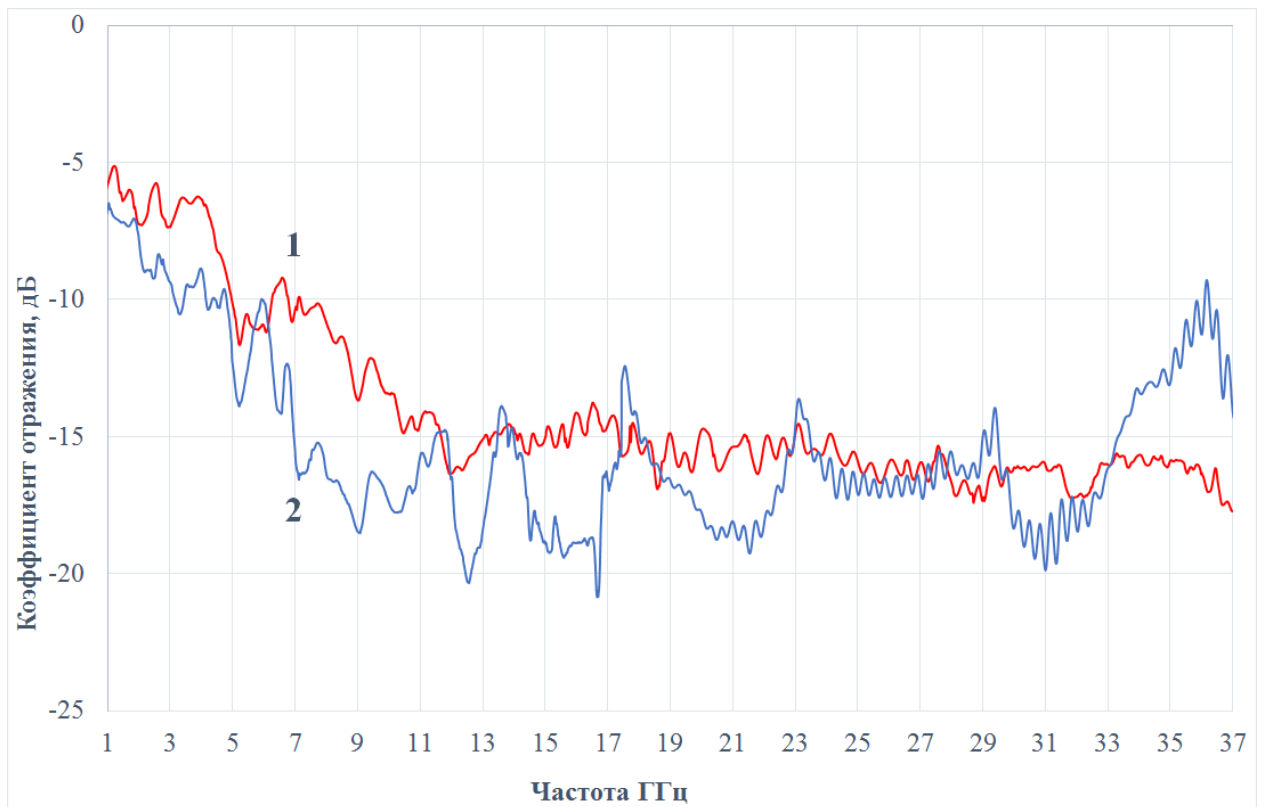


Рис. 3.20 Частотные диаграммы коэффициента отражения образца исследуемого радиопоглощающего материала:

1 – частотная диаграмма коэффициента отражения при температуре 25°C;

2 – скорректированная, с учетом коэффициента отражения азота в кювете, частотная диаграмма коэффициента отражения образца радиопоглощающего материала при температуре -196°C

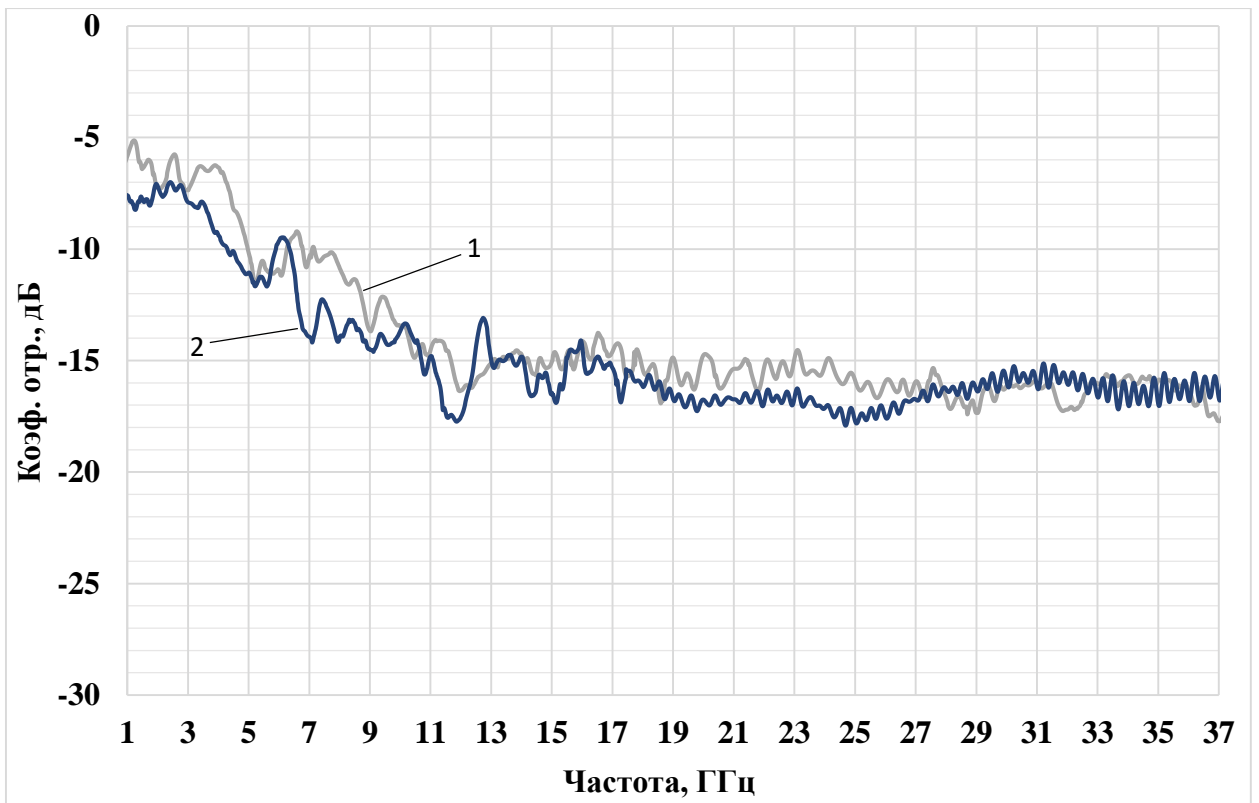


Рис. 3.21 Частотные диаграммы коэффициента отражения образца радиопоглощающего материала при температуре 25°C:

1 - частотная диаграмма коэффициента отражения радиопоглощающего материала до погружения в жидкий азот;

2 - частотная диаграмма коэффициента отражения образца радиопоглощающего материала после изъятия его из кюветы с жидким азотом и постепенного возвращения температуры образца к температуре 25°C

4 Применение радиопоглощающих материалов для повышения эффективности экранирования

4.1 Применение радиопоглощающего материала для ослабления резонансных явлений в модулях ЛА при воздействии внешних ЭМ полей.

Во внутреннем пространстве металлических корпусов ЛА или отдельных функциональных блоков формируется своя электромагнитная обстановка. Вне зависимости от того является ли источник электромагнитного поля внешним или внутренним, во внутреннем пространстве корпусов бортовых приборов и устройств могут возникать резонансные явления. Частоты, на которых возникают резонансные явления электрического поля, определяются особенностями конструкции конкретного блока. Наличие таких явлений может создавать достаточно опасные для функционирования бортовых приборов и устройств электромагнитные помехи. Добавление РПМ в конструкцию ЛА и его устройств или блоков может уменьшить уровни резонансных явлений. Исследуемый радиопоглощающий материал обладает достаточной стойкостью к экстремальным условиям эксплуатации космических аппаратов.

Для проведения исследования влияния РПМ на резонансные явления электрического поля внутри металлических конструкций и модулей ЛА была использована установка, схема которой приведена на рис. 4.1. Металлический куб со стороной 400 мм использован в качестве макета корпуса блока. Макет размещен в рабочем объеме ГТЕМ-камеры. На вход ГТЕМ-камеры подключен генератор высокочастотных синусоидальных сигналов. Измерение создаваемого электрического поля проводилось датчиком Е-поля, размещенного внутри камеры и соединённого с компьютером оптоволоконным кабелем. Во внутреннем пространстве макета модуля размещались три образца РПМ размерами 220x180 мм. Образцы размещались вдоль стенок макета модуля.

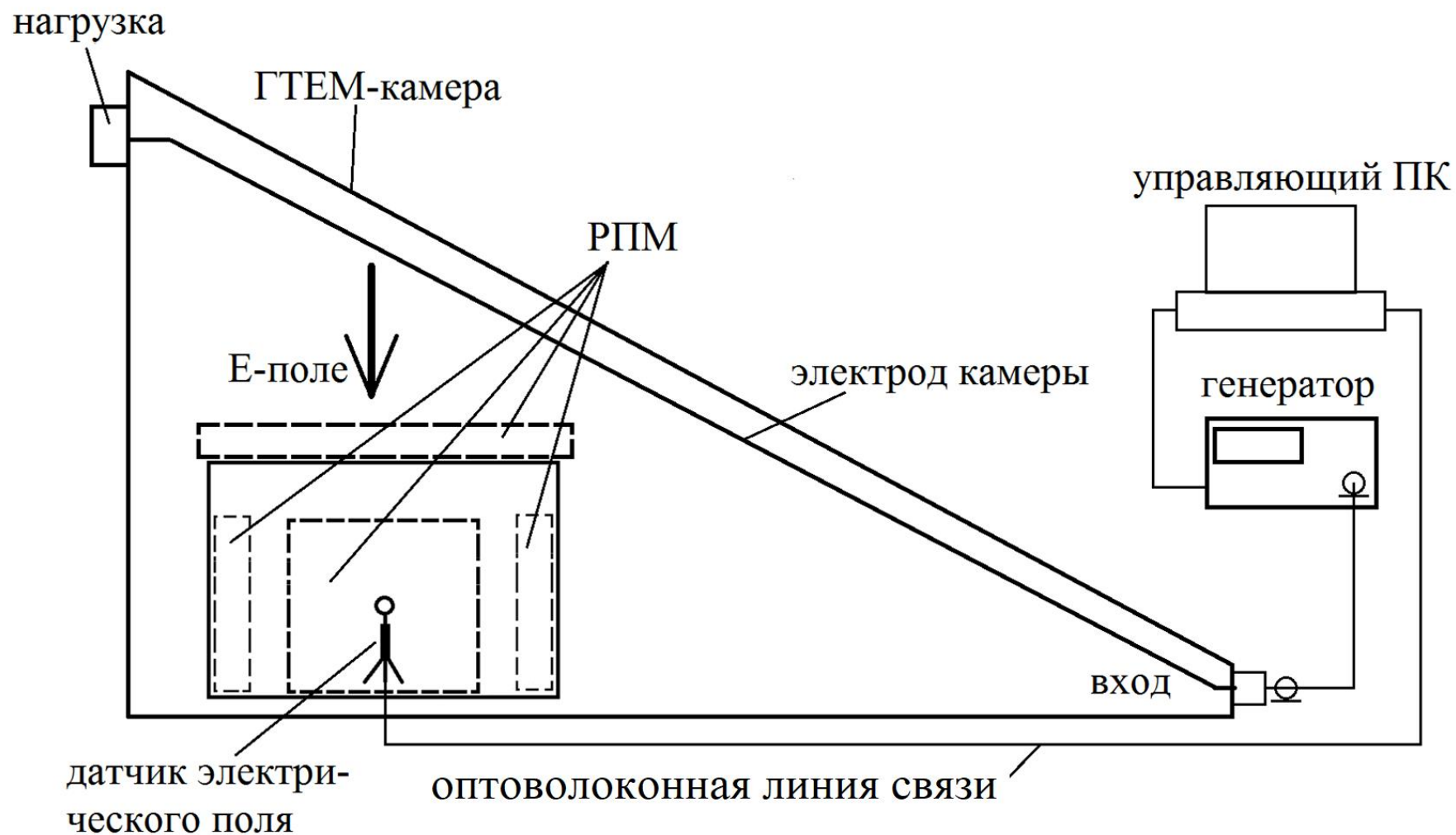


Рис. 4.1 Схема проведения экспериментального исследования влияния РПМ на внутренние резонансы напряженности электрического поля

Первоначально было проведено измерение электрического поля, создаваемого генератором внутри пустой ГТЕМ-камеры. Затем было проведено измерение электрическое поле внутри макета модуля при условии, что датчик Е-поля установлен в той же пространственной точке объема камеры, но уже внутри макета. Сравнение полученных частотных диаграмм показывает изменение электромагнитной обстановки и возникновение резонансных явлений внутри макета модуля, рис. 4.2. Из данных диаграмм видно, что внутри макета модуля имеет место значительное возрастание напряженности электрического поля, вызванное резонансными явлениями.

При размещении во внутреннем объеме макета модуля образцов РПМ также было проведено измерение электрического поля. На рис. 4.3 приведены частотные диаграммы напряженности электрического поля внутри макета модуля при условии что, вдоль стенок макета размещено три образца РПМ. Присутствие образцов РПМ значительно снизило уровни напряженности электрического поля, вызванного резонансными явлениями.

Эффект уменьшения электрического поля с помощью РПМ проявляется даже если всего один образец РПМ размещен возле боковой стенки макета модуля, но в меньшей степени. При данном способе размещения, образцы РПМ не препятствуют проникновению электрического поля от внешнего источника во внутренний объем макета модуля.

Размещение образца РПМ в верхней части макета модуля приводит к проявлению экранирующего эффекта РПМ. Значительное снижение напряженности электрического поля в данном случае наблюдается во всем частотном диапазоне, рис. 4.4.

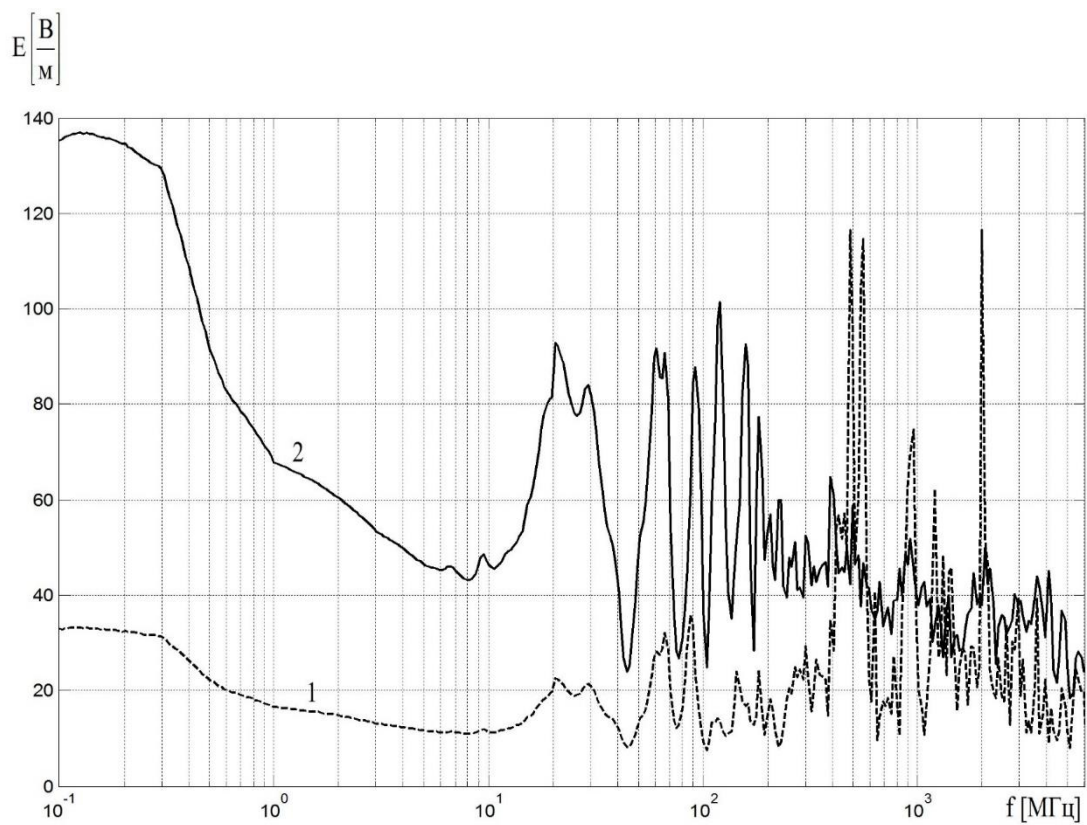


Рис. 4.2 Частотные диаграммы напряженности электрического поля:
 1 – напряженность электрического поля во внутреннем объеме макета модуля;
 2 – напряженность в ГТЕМ-камере до установки макета.

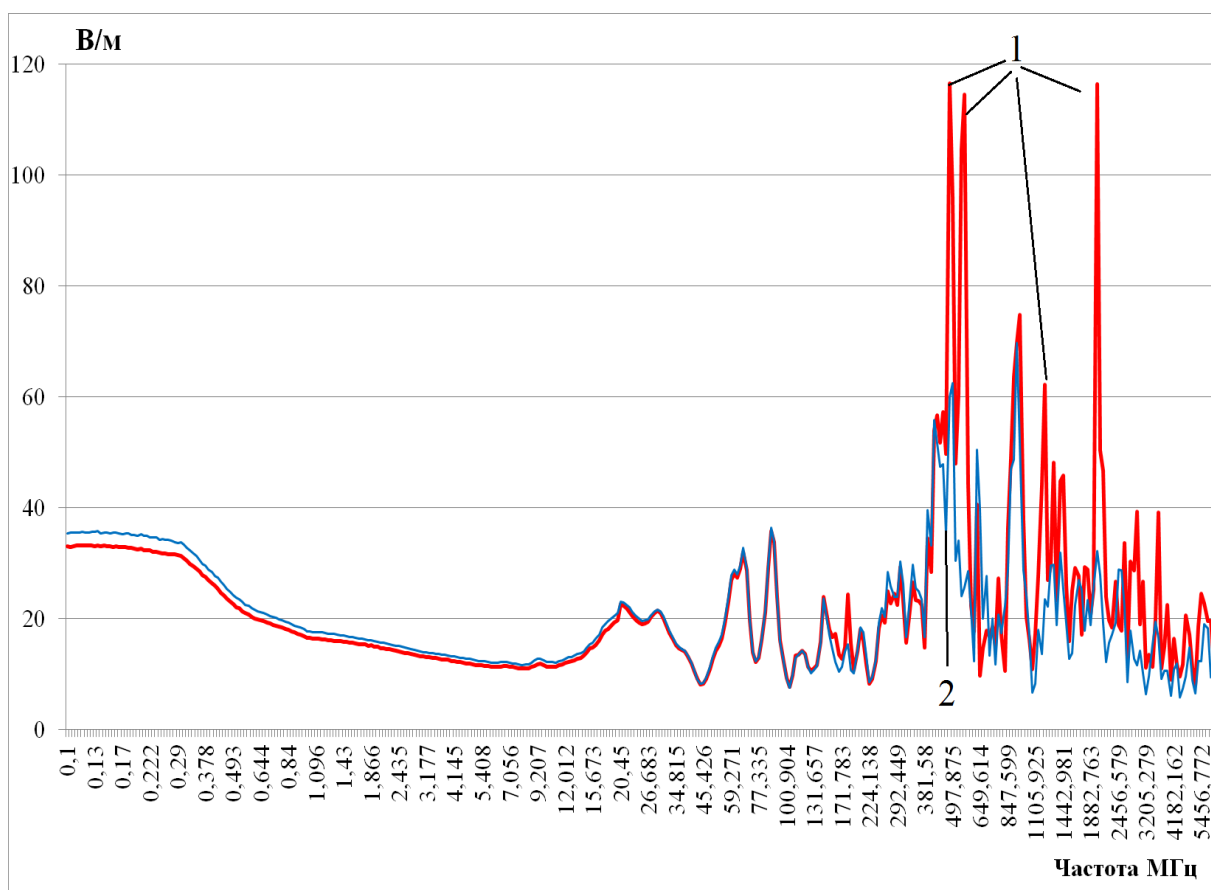


Рис. 4.3 Частотные диаграммы напряженности электрического поля: 1 – напряженность электрического поля во внутреннем объеме макета модуля без РПМ, с указанием резонансных явлений; 2 – напряженность электрического поля во внутреннем объеме макета модуля, в котором размещено три панели РПМ.

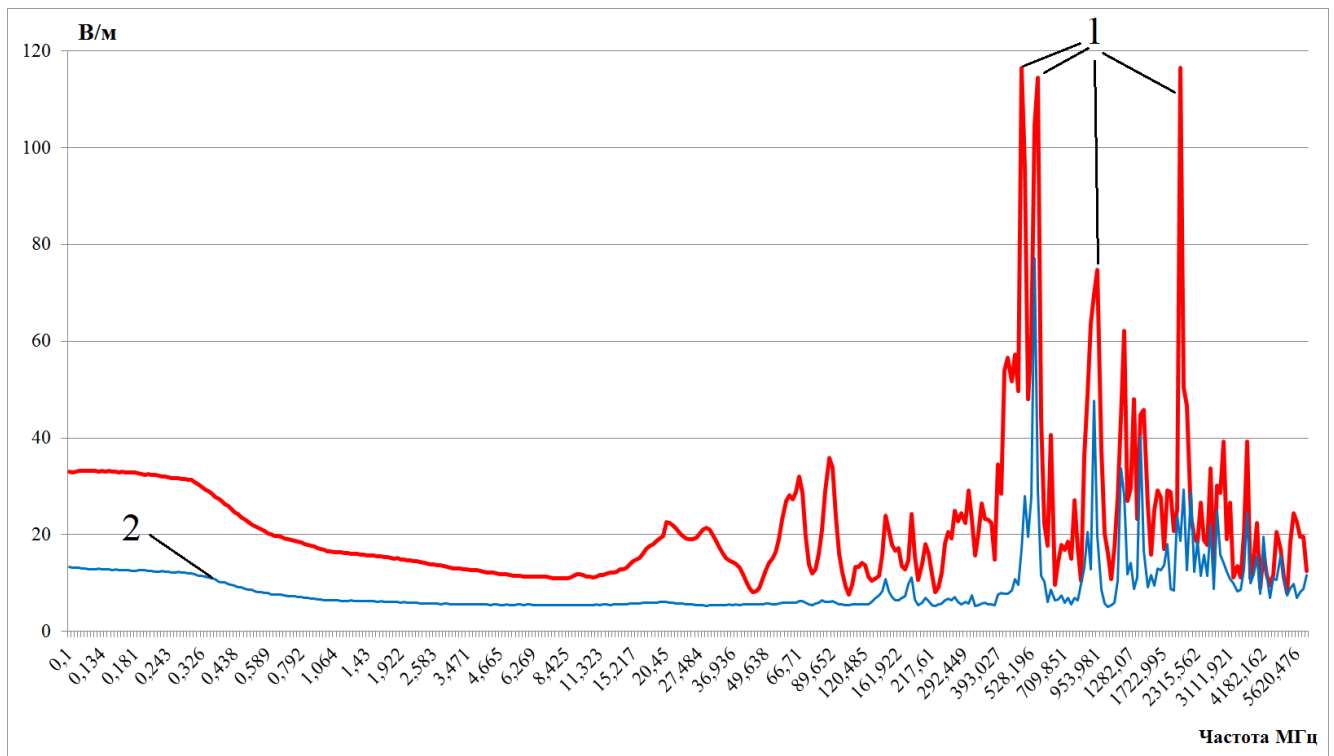


Рис. 4.4 Частотные диаграммы напряженности электрического поля: 1 – напряженность электрического поля во внутреннем объеме макета модуля без РПМ, с указанием резонансных явлений; 2 – напряженность электрического поля во внутреннем объеме макета модуля, когда один образец РПМ закрывает открытую часть макета.

4.2 Применение радиопоглощающего материала для уменьшения излучаемой помехоэмиссии бортовых приборов и устройств.

Значительная часть энергии электромагнитных помех распространяется в форме излучаемых помех, существующих в виде высокочастотного электромагнитного поля. Излучаемые электромагнитные помехи, распространяются в пределах конструкции космического аппарата и создают трудно прогнозируемую результирующую электромагнитную обстановку. Результирующая электромагнитная обстановка формируется из-за отражения и переотражения волн электромагнитного поля от корпусов бортовых приборов и устройств, элементов конструкции космического аппарата и представляет собой неравномерно распределенное в пределах конструкции космического аппарата электромагнитное поле с высокой напряженностью в локальных пространственных областях. Поскольку, РПМ способен уменьшать напряженность электромагнитных полей во внутреннем объеме корпусов блоков ЛА, возможно применение панелей РПМ для уменьшения излучаемой помехоэмиссии.

Проведено экспериментальное исследование влияния радиопоглощающего материала, размещенного во внутреннем объеме макета модуля космического аппарата, на помехоэмиссию, создаваемую макетом блока устройства или бортового прибора, расположенного во внутреннем объеме макета корпуса ЛА. Схема установки для проведения исследований приведена на рис. 4.5. 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 100мм, подключенный к генератору высокочастотных сигналов. Корпус имитатора бортового прибора создавал внутреннее электромагнитное поле,

которое через апертуры макета модуля проникало во внешнее пространство, создавая таким образом внешнюю помехоэмиссию.

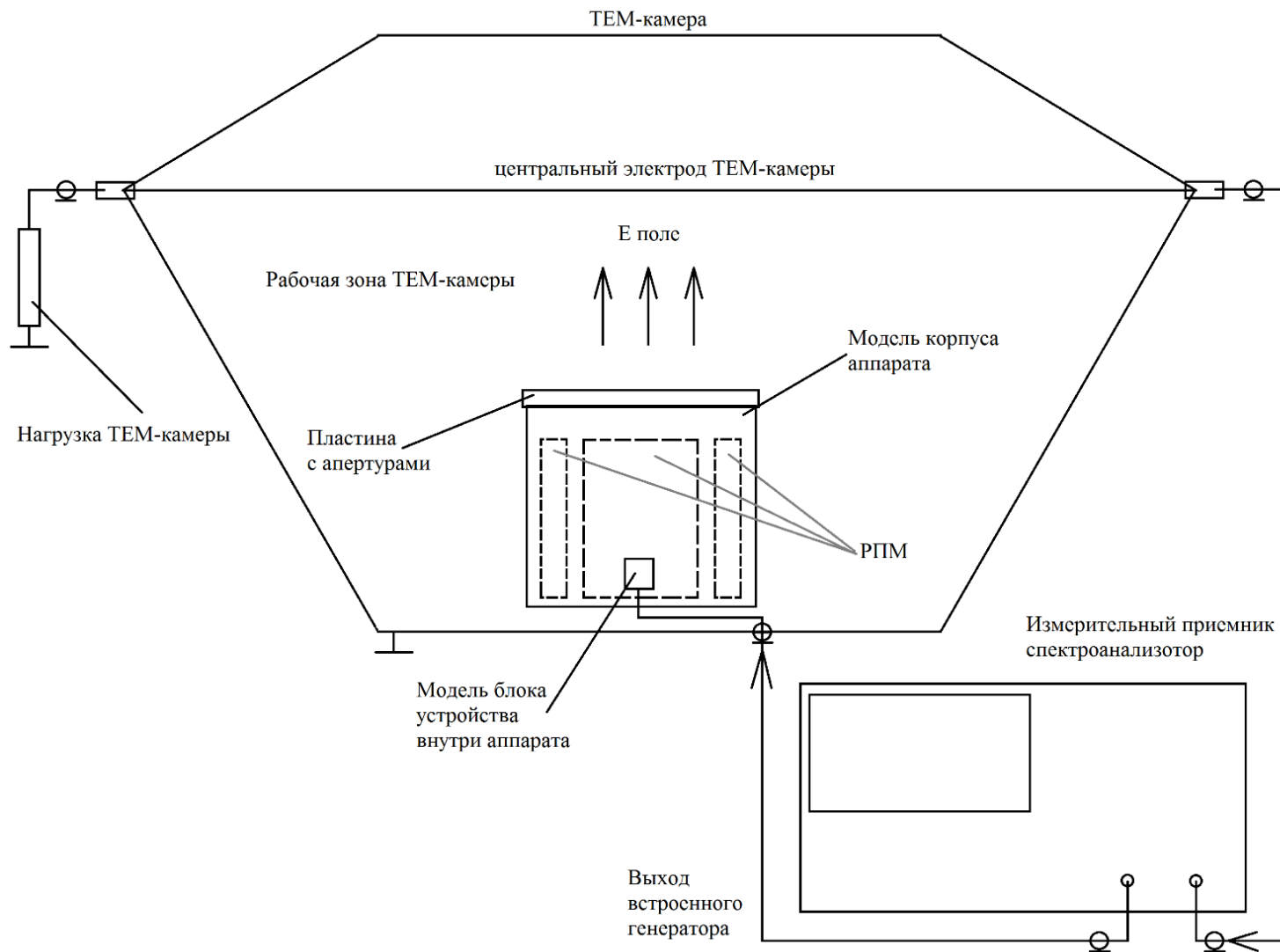


Рисунок 4.5 Схема установки исследования помехоэмиссии макета модуля космического аппарата

Макет модуля космического аппарата имеет выполнен в форме куба с ребром 250 мм из электропроводного материала. Одна из сторон макета модуля открыта или может полностью закрываться электропроводной пластиной с апертурами. Уровни помехоэмиссии определялись с помощью ТЕМ-камеры в которой устанавливался макет модуля.

Для различных случаев излучаемой помехоэмиссии макет модуля полностью закрывался поочередно двумя электропроводными пластинами. Пластины имели различные апертуры. Первая пластина имела одну апертуру в виде круглого отверстия диаметром 20 мм, вторая пластина содержала девять апертур в виде круглых отверстий диаметром 5 мм. Для сравнения были также проведены измерения, когда открытая часть макета модуля не закрывалась электропроводной пластиной. Анализ результатов проводился сравнением полученных частотных диаграмм напряженностей электрической составляющей электромагнитного поля, излучаемого из макета модуля космического аппарата. При проведении эксперимента макет модуля космического аппарата был установлен во внутреннем объеме ТЕМ-камеры.

Для создания излучаемого электромагнитного поля применялся генератор, синхронизированный с измерительным приемником. Имитатор бортового прибора в виде медного кубика, выполнял функцию излучателя электромагнитных помех в виде синусоидального электромагнитного поля, создаваемых электронными приборами и устройствами электротехнического комплекса космического аппарата при их функционировании. В процессе эксперимента проводились измерения уровней напряженности поля при наличии или отсутствии панелей радиопоглощающего материала во внутреннем пространстве имитатора модуля космического аппарата. Измерение напряженностей поля проводилось в диапазоне 100 кГц-3ГГц.

Результаты измерений представлены на рис. 4.6 – для макета модуля, закрытого пластиной, имеющей девять апертур, и рис. 4.7 – для макета модуля, закрытого пластиной с апертурой в виде одного отверстия диаметром 20 мм.

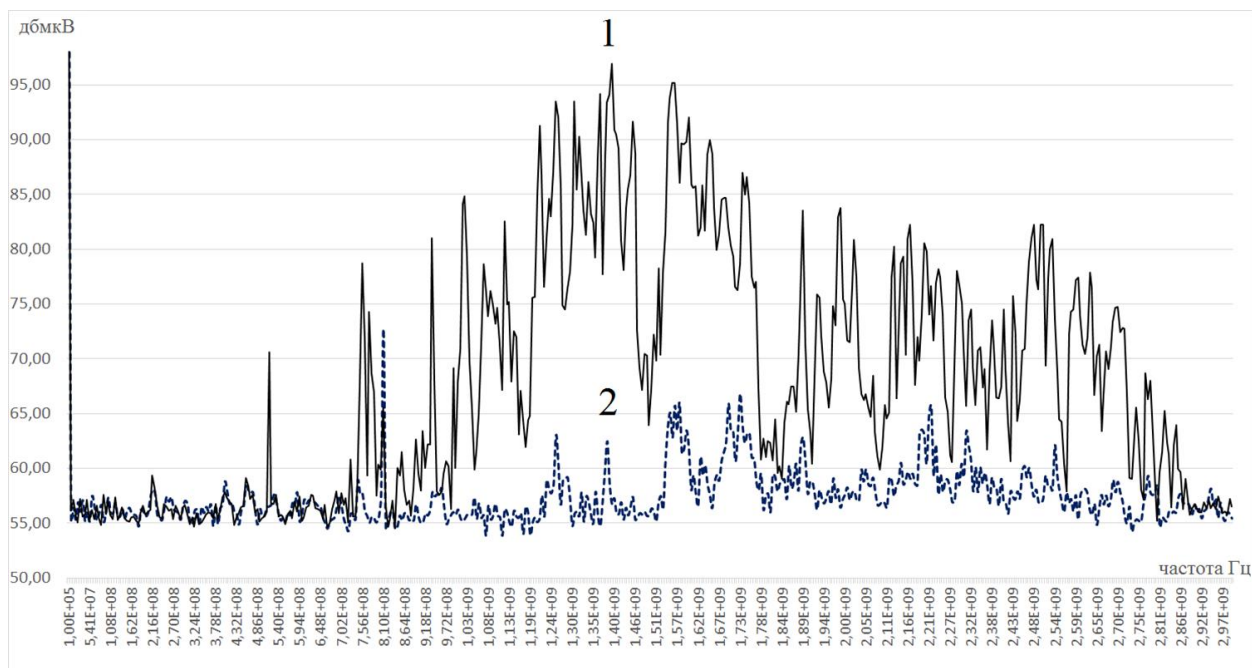


Рисунок 4.6. Частотная диаграмма напряжения, созданного на центральном электроде ТЕМ-камеры электрической составляющей электромагнитного поля, излучаемого макетом модуля закрытым электропроводной пластиной, имеющей девять апертур в виде отверстий диаметром 5мм:

1 – диаграмма без радиопоглощающего материала;

2 – диаграмма при размещении радиопоглощающего материала во внутреннем пространстве макета модуля.

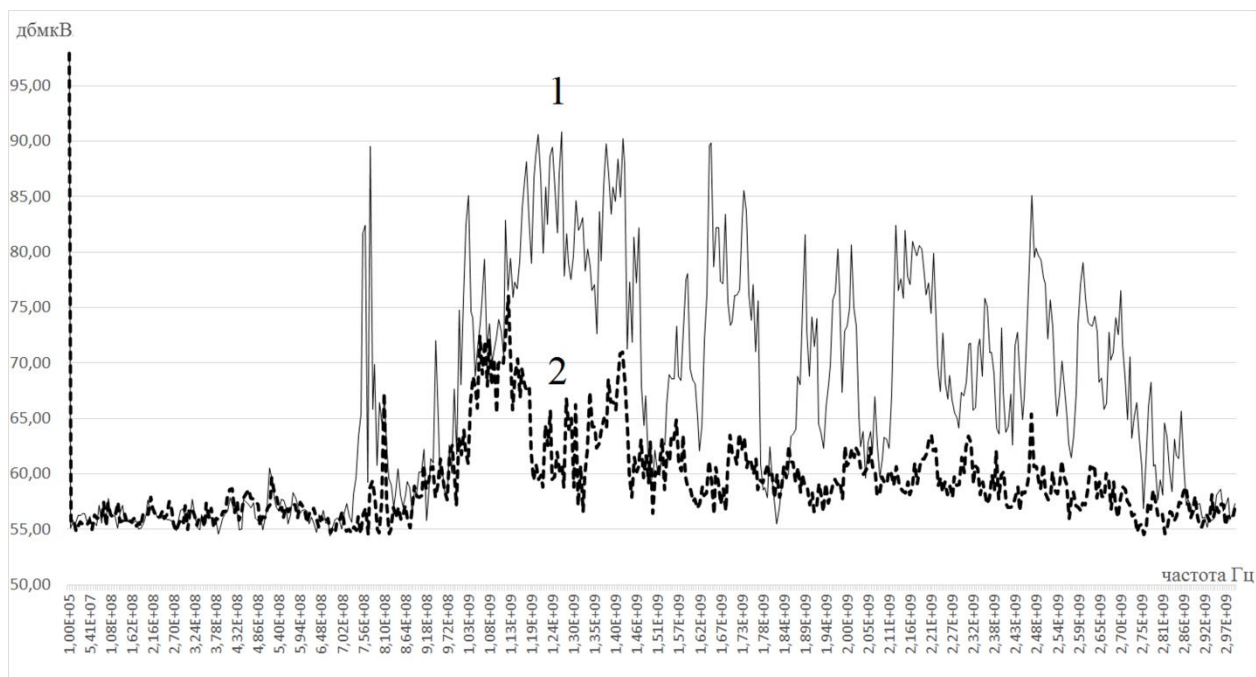


Рисунок 4.7 Частотная диаграмма напряжения, созданного на центральном электроде ТЕМ-камеры электрической составляющей электромагнитного поля, излучаемого макетом модуля космического аппарата закрытого электропроводной пластиной с апертурой в виде отверстия диаметром 20 мм:

- 1 – диаграмма напряженности без радиопоглощающего материала;
- 2 – диаграмма напряженности при размещении радиопоглощающего материала во внутреннем пространстве макета модуля.

4.3 Применение радиопоглощающего материала для фильтрации наведенных высокочастотных кондуктивных помех.

Уязвимые для электромагнитных помех устройства на борту ЛА — это блоки отвечающие за анализ информации от внешних устройств и управление всеми системами ЛА, как правило, это блок вычислительных систем, например, автопилот. Все блоки электронных приборов, фактически, являются совокупностью полупроводниковых микросхем. Именно данные микросхемы становятся главными рецепторами результирующей электромагнитной помехи от любого источника. Поскольку, чувствительными электронными элементами являются вполне конкретные полупроводниковые микросхемы — подавляющая часть энергии помехи на рецепторе формируется в виде кондуктивной помехи.

Высокочастотные сигналы, проходящие по проводам представляют собой электромагнитную волну, движущуюся вдоль поверхности проводящего материала кабеля. Из-за помехоэмиссии, индуктивного взаимодействия близко расположенных кабелей, высокочастотные сигналы обладают высокой степенью проникновения и распространения в конструкции ЛА. 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 характеристики, если был не правильно встроен 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 техническим средствам электромагнитного экранирования, но и выполнять функцию подавления высокочастотных кондуктивных помех в электрических цепях. При условии размещения РПМ в плотном контакте с оболочками проводов кабельного

жгута, помимо экранирующей функции РПМ может отбирать и рассеивать энергию высокочастотной электромагнитной волны, проходящей по проводам жгута.

Для проведения исследования была использована схема на рис. 4.8. Неэкранированная двухпроводная линия была подключена между входом приемника и выходом встроенного генератора высокочастотного спектроанализатора. Данная схема позволяет исследовать эффективность подавления высокочастотной помехи с помощью РПМ. По проводам линии проходит ток от генератора с изменяемой частотой от 100 кГц до 3 ГГц.

Двухпроводная линия располагается между образцами РПМ, с размерами 300x200x18 мм. РПМ прилегает к проводам, однако кондуктивного контакта с проводниками линии нет, так как проводники имеют полиэтиленовую изоляцию. Размещение двухпроводной линии между образцами РПМ приводит к уменьшению уровней высокочастотных сигналов, проходящих по проводникам. Изменения уровней напряжения высокочастотного сигнала фиксируются приемником.

На рис. 4.9 показано различие частотных диаграмм для двухпроводной линии, расположенной между образцами РПМ при передачи высокочастотного сигнала в заданном частотном диапазоне. На рис. 4.10 показано, что применение РПМ снижает кондуктивную помеху даже при условии, что двухпроводная линия частично расположена между образцами РПМ, которые закрывают не более половины длины линии.

Уменьшение высокочастотного сигнала в проводе, охваченном РПМ, подтверждает возможность применения РПМ в качестве дополнительного средства подавления высокочастотных помех в электрических цепях бортовых комплексов ЛА и КА. Из анализа частотных диаграмм на рис. 4.9 и 4.10 следует отметить свойство РПМ сглаживать колебания диаграмм на частотном диапазоне свыше 1 ГГц.

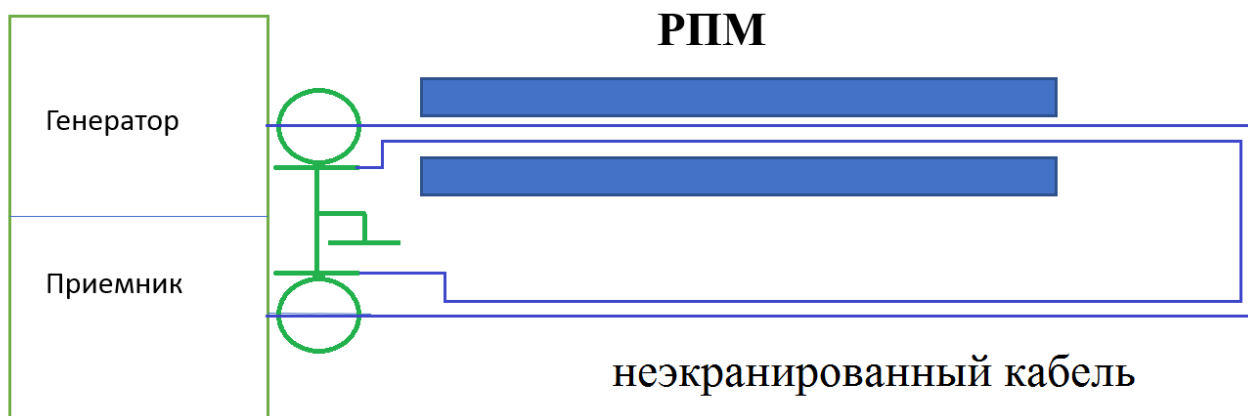


Рис. 4.8. Схема установки для исследования поглощения высокочастотной кондуктивной помехи с помощью образцов РПМ.

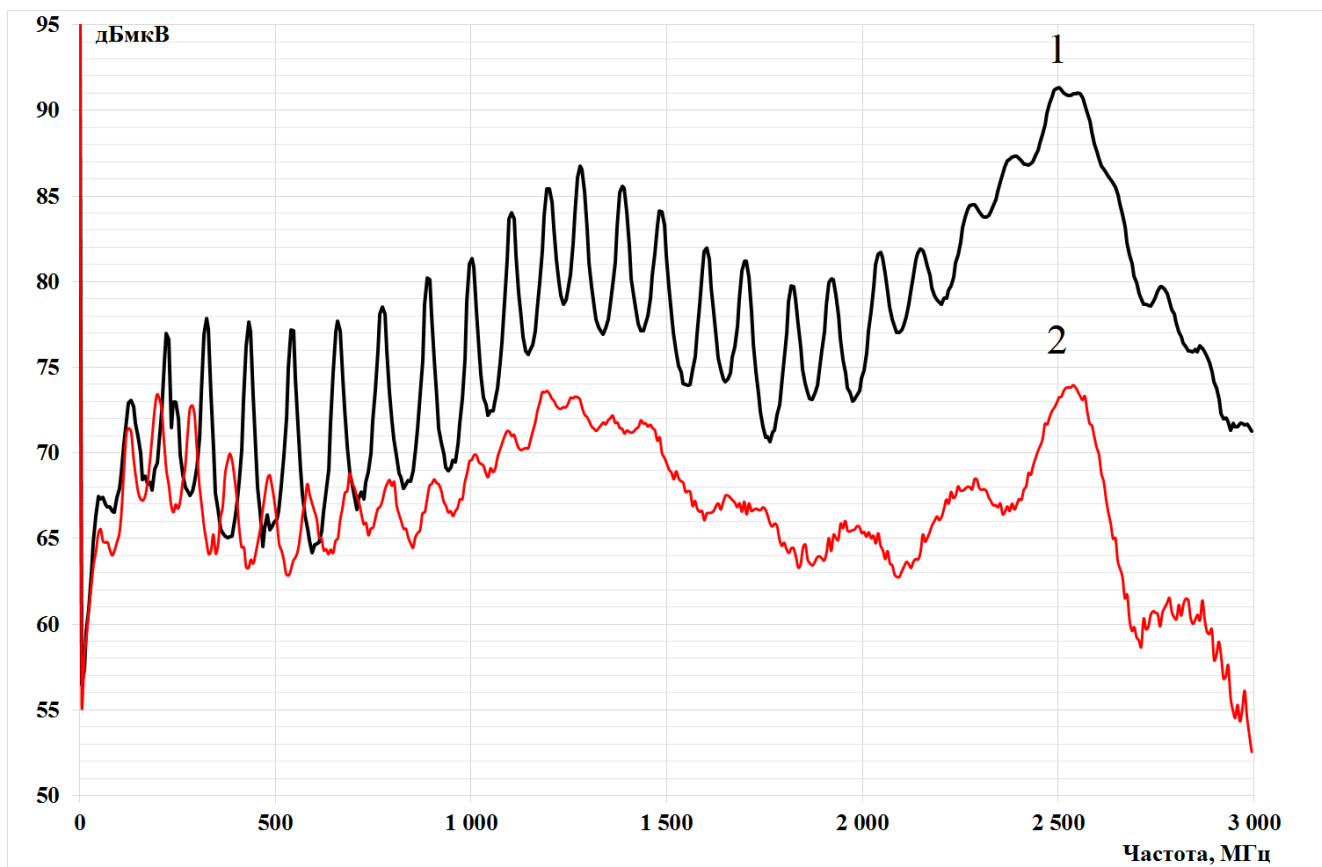


Рис. 4.9. Диаграммы высокочастотной помехи, проходящей по кабелю:
1 – уровень напряжения помехи без применения РПМ;
2 – уровень напряжения помехи, когда двухпроводная линия расположена между образцами РПМ.

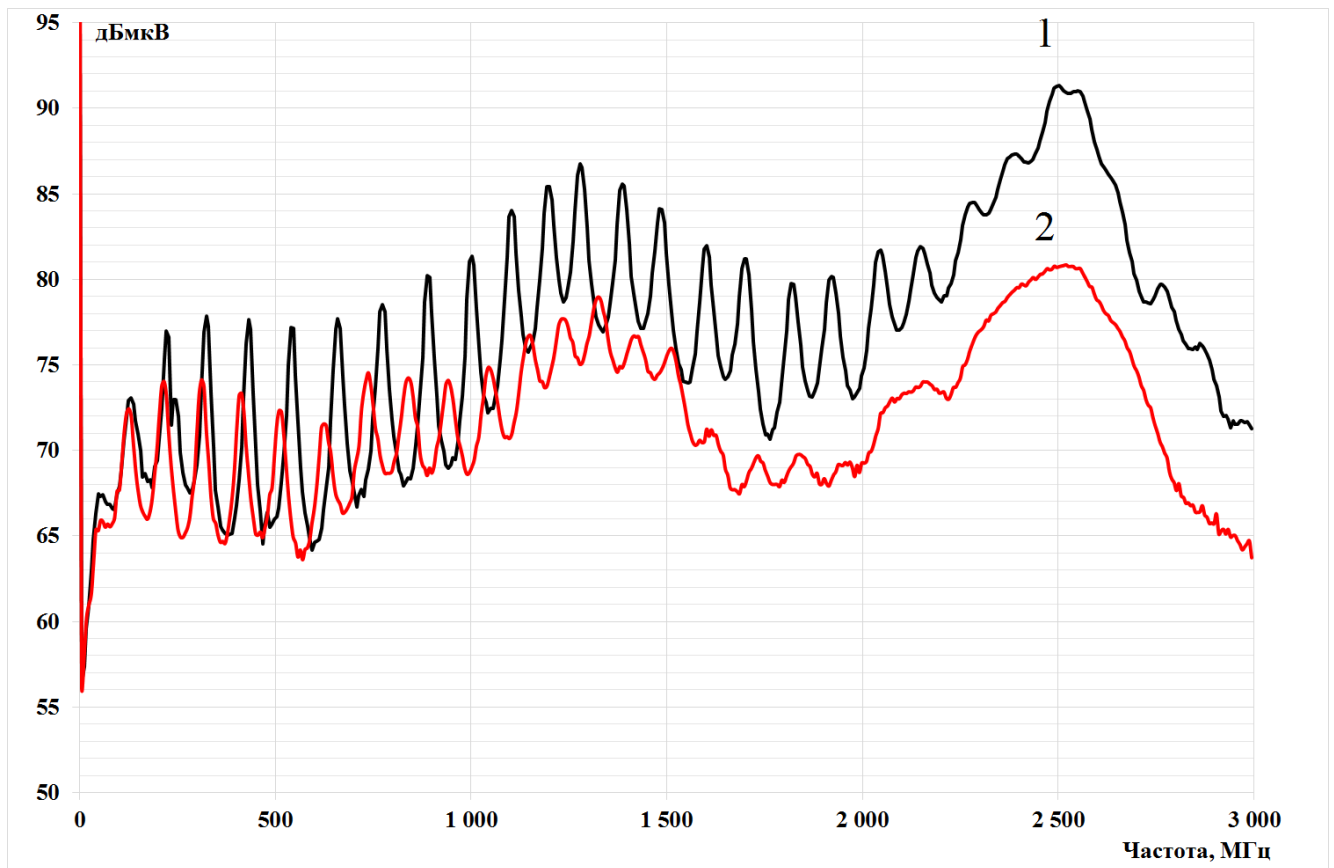


Рис. 4.10. Изменение частотной диаграммы кондуктивной помехи:

1 – без РПМ;

2 – Двухпроводная линия расположена между образцами РПМ частично, РПМ закрывает не более половины длины.

Заключение

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 электротехнических комплексов.

2 Предложена топологическая модель проникновения и распространения электромагнитных помех в электрических цепях и конструкции электротехнического комплекса летательного аппарата. На основе топологической модели предложена 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 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 электропроводного соединения в виде перемычки из плетеной 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 соединение экрана кабеля с кожухом электрического соединителя по всему периметру контакта кожуха и экрана при условии обеспечения минимального переходного сопротивления.

5 Экспериментально исследованы частотные характеристики коэффициентов отражения и прохождения радиопоглощающего материала с целью его применения для уменьшения помехоэмиссии и ослабления резонансных явлений в бортовых приборах, приборных модулях и конструкционных отсеках и устройствах летательных аппаратов. Коэффициент отражения радиопоглощающего материала исследован в частотном диапазоне 1-37 ГГц. Получены частотные характеристики коэффициента прохождения в частотном диапазоне до 1000 МГц. Показано, что радиопоглощающий материал помимо радиопоглощающих свойств позволяет обеспечивать эффективность экранирования до 15 дБ.

6 Проведено исследование частотных характеристик коэффициента отражения радиопоглощающего материала в температурных условиях, аналогичных экстремальным температурным условиям космического

пространства от -150°C до $+150^{\circ}\text{C}$ с целью определения возможности его применения в электротехнических комплексах космических аппаратов.

Исследовано воздействие вибрации на радиопоглощающий материал, возникающей в режиме взлета ракеты-носителя и выведению спутника на околоземную орбиту. Экспериментально установлено, что данный радиопоглощающий материал 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 радиопоглощающего материала 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 радиопоглощающего материала позволяющих уменьшать помехоэмиссию бортовых приборов. Установлено что, применение радиопоглощающего материала 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 может использоваться в качестве эффективного дополнения к существующим методам ослабления резонансных явлений и уменьшения помехоэмиссии электротехнических комплексов космических аппаратов.

9 Предложен способ применения радиопоглощающего материала для подавления наведенных высокочастотных кондуктивных помех. Показано, что размещение двухпроводной линии между образцами радиопоглощающего

материала позволяет снизить уровень высокочастотных кондуктивных помех на 15 дБ в частотном диапазоне от 100МГц - 3 ГГц.

Список использованных источников

1. Кириллов В.Ю. Электромагнитная совместимость летательных аппаратов. М.: Издательство МАИ. 2012. 164 с.
2. Гальперин Ю.И. Гладышев В.А. Козлов А.И. Электромагнитная совместимость научного космического комплекса АРКАД-3. М.: Наука. 1984.- 186с.
3. Дональд Р.Ж. Уайт Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и непреднамеренные помехи. Вып.2 Внутрисистемные помехи и методы их уменьшения. М.: Сов. Радио. 1978. 273с.
4. Комягин С.И. Основы методологии электромагнитной стойкости беспилотных летательных аппаратов. – М.: Изд-во МИЭМ, 2007. – 158 с.
5. Нуриев М.Г., Гизатуллин З.М., Гизатуллин Р.М. Физическое моделирование электромагнитных помех в беспилотном летательном аппарате при воздействии контактной сети электротранспорта // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2018. – № 2. – С. 283-288.
6. Гизатуллин З.М., Нуриев М.Г., Гизатуллин Р.М. Физическое моделирование помехоустойчивости электронных средств при электромагнитном воздействии промышленных макроисточников // Радиотехника и электроника. – 2018. – №1. – С. 97-102.
7. Рябов Ю.Г. Общие положения по сохранению живучести и обеспечению защиты РЭС от воздействия электромагнитного оружия и электромагнитного терроризма // Специальная техника. – 2002. – № 3. – С. 23-34.
8. Ott H. W. Electromagnetic Compatibility Engineering. – New Jersey: John Wiley & Sons, 2009. – 872 с.
9. Piantini A., Janiszewski J.M. Scale models and their application to the study of lightning transients in power systems // Lightning Electromagnetics. Power and Energy Series. London, United Kingdom. – 2012. – pp. 719-764.
10. Johnson H., Graham M. High Speed Signal Propagation. Advanced Black Magic. – New Jersey: Prentice Hall, 2003. – 766 p.

11. Гизатуллин З.М., Гизатуллин Р.М., Нуриев М.Г. Методика физического моделирования воздействия разряда молнии на летательные аппараты // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2016. – № 2. – С. 3-6.
12. Нуриев М.Г., Гизатуллин З.М., Гизатуллин Р.М. Физическое моделирование электромагнитных помех в беспилотном летательном аппарате при воздействии высоковольтной линии электропередачи // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2017. – № 2. – С. 119-124.
13. Гизатуллин З.М., Нуриев М.Г., Гизатуллин Р.М. Физическое моделирование электромагнитных помех в электронных средствах при воздействии электромагнитных полей высоковольтных линий электропередачи // Электротехника. – 2018. – № 5. – С. 45-48.
14. Гизатуллин З.М., Гизатуллин Р.М. Моделирование электромагнитной обстановки на основе теории масштабного эксперимента для задач электромагнитной совместимости и защиты информации // Информационные технологии. – 2013. – № 4. – С. 19-22.
15. Гизатуллин З.М. Анализ магнитных полей внутри здания при воздействии разряда молнии на внешнюю систему молниезащиты здания // Технологии электромагнитной совместимости. – 2010. – № 3. – С. 30-36.
16. Гизатуллин З.М., Гизатуллин Р.М., Нуриев М.Г. Математические модели для физического моделирования задач электромагнитной совместимости // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2015. – № 1/2. – С. 115-122.
17. Гизатуллин З.М., Нуриев М.Г., Гизатуллин Р.М. Физическое моделирование электромагнитных помех при электромагнитном воздействии на макрообъекты // Журнал радиоэлектроники. – 2015. – № 6. – С. 1.

18. Ramdani M., Sicard E., Dhia S. Towards and EMC roadmap for integrated circuits // Proceedings of the 19th International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Zurich, 2008. – pp. 8-11.
19. Кечиев Л.Н. Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры. М.: ООО «Группа ИДТ», 2007. – 616 с.
20. Kohlberg I., Carter R.J. Some theoretical considerations regarding the susceptibility of information systems to unwanted electromagnetic signals // Proceedings of the 14 th International Zurich Symp. on EMC. Zurich, 2001. – pp. 41-46.
21. Здухов Л.Н., Парфёнов Ю.В., Тарасов О.А., Чепелев В.М. Три возможных механизма возникновения отказов электронных устройств в результате электромагнитного воздействия // Технологии электромагнитной совместимости. – 2018. – № 2. – С. 22-34.
22. Нуриев М.Г. Физическое моделирование электромагнитных помех для прогнозирования помехоустойчивости бортовой вычислительной техники БПЛА // Технологии электромагнитной совместимости. – 2019. – № 1. – С. 41-51.
23. Атабеков Г.И., Купальян С.Д., Тимофеев А.Б., Хухриков С.С., Под ред. Атабекова Г.И. Теоретические основы электротехники: учебник для ВУЗов. В 3-х ч. Ч. 2 и 3. Нелинейные электрические цепи. Электромагнитное поле – 4-е изд., переработанное. М.: Энергия, 1979. 432 с.
24. Аверин С.В., Кириллов В.Ю., Машуков Е.В., Резников С.Б., Шевцов Д.А. Обеспечение электромагнитной совместимости бортовых кабелей беспилотных летательных аппаратов // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2017. – № 3. – С. 113-117.
25. Кириллов В.Ю., Клыков А.В., Нгуен В.Х., Томилин М.М. Исследование сопротивления связи и эффективности экранирования бортовых кабельных летательных аппаратов // Технологии электромагнитной совместимости. – 2014. – № 2. – С. 3-8.

26. Отт Г. Методы подавления шумов и помех в электрических системах. М.: Мир, 1979.317с
27. Кириллов В.Ю. Томилин М.М. Гибкие металлизированные материалы для защиты космических аппаратов от электромагнитных полей //Технологии, измерения и испытания в области электромагнитной совместимости: материалы 3-й Всероссийской научно-технической конференции «ТехноЭМС-2016». М. 2016. С.25-26.
28. Гибкий материал для защиты бортовой аппаратуры космических аппаратов // Бибиков С.Б., Кириллов В.Ю., Куликовский Э.И., Томилин М.М. Космические исследования. М.: 2018. Том56. №3. С.267-270.
29. 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.
30. Журавлев С.Ю. Кириллов В.Ю. Жуков П.А. Применение РПМ для космических аппаратов// Технологии ЭМС. №4 (67).2018. С.32-39.
31. Кечиев Л.Н. Акбашев Б.Б. Степанов П.В. Экранирование технических средств и экранирующие системы. М.: ООО «Группа ИДТ» 2010. 470с.
32. Кечиев Л.Н. Экранирование радиоэлектронной аппаратуры. Инженерное пособие. М.:Грифон, 2019. – 720 с., ил.
33. The Radiation Characteristics of 3.43:1 Bandwidth Dipole Antenna with Radar Absorbing Material A.V. Gevorkyan ; Privalova T. Yu 2018 IEEE Radio and Antenna Days of the Indian Ocean (RADIO)
34. Justification of the conditions of reproducible measured characteristics of radio absorbing materials in free space N. V. Anyutin ; A. V. Titarenko ; S. V. Elizarov 2017 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW)
35. Application of radar absorbing material in design of metal space frame radomes Chang-feng Zhang ; Wen Tang ; Xiao-long Mi ; Le-ran Chen Proceedings of

2011 Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference

36. Transmittance and Monostatic Reflectivity of Radar Absorbing Materials for CATR A. Tamminen ; A. Lonnqvist ; J. Mallat ; A.V. Raisanen The Second European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP 2007
37. Influence of gratings made from conducting wire elements on electromagnetic properties of radio absorbing coating A. G. Budai ; V. P. Knysh ; S. V. Maly ; N. N. Aleshkevich ; N. N. Gromyko ; V. A. Svetlov 2010 20th International Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology"
38. Ibrachim A.M., Zischank W.J., Heidler F.H. Measurement of Magnetic Fields Inside Single- and Double-Layer Reinforced Concrete Buildings During Simulated Lightning Currents // IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility. – 2004. – no. 2. – pp. 208-221.
39. Edison S.R., Ernesto P.G., Javier H.M. Design and construction of a reduced scale model to measure lightning induced voltages over inclined terrain // DYNA. – 2015. – no. 82. – pp. 160-167.
40. Гизатуллин З.М. Повышение эффективности экранирования металлических корпусов электронных средств // Технологии электромагнитной совместимости. – 2010. – № 3. – С. 37-43.
41. Гизатуллин З.М. Снижение электромагнитных помех в межсоединениях многослойных печатных плат // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. – 2012. – № 2. – С. 199-205.
42. Гизатуллин З.М., Гизатуллин Р.М., Нуриев М.Г., Назметдинов Ф.Р. Снижение электромагнитных помех и защита информации в вычислительной технике с помощью экранирующих стекол // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2017. – № 3. – С. 46-57.
43. Гизатуллин З.М., Гизатуллин Р.М., Назметдинов Ф.Р., Набиев И.И. Повышение помехоустойчивости электронных средств при

- электромагнитных воздействиях по сети электропитания // Журнал радиоэлектроники. – 2015. – № 6. – С. 2.
44. 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.
45. 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.
46. 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.
47. Кириллов В. Ю., Марченко М. В., Томилин М. М. Электромагнитная совместимость бортовой кабельной сети летательных аппаратов. – М.: Изд-во МАИ, 2014, 178с.
48. Кириллов В. Ю., Томилин М. М. Исследование экранирующих свойств гибких материалов с целью их дальнейшего применения для защиты изделий аэрокосмической техники от электромагнитных воздействий // Вестник Московского авиационного института. 2011, Т.18, №1, С. 121-125.
49. Y. Duan and H. Guan. Microwave Absorbing Materials. – Singapore: Pan Stanford Publishing, 2017.
50. Numerical and Experimental Study of the Shielding Effectiveness of a Metallic Enclosure / F. Olyslager, E. Laermans, Daniel De Zutter et al. // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – Vol. 41, No 3. – 1999. – P. 202-213.
51. Improving the Shielding Effectiveness of a Rectangular Metallic Enclosure with Aperture by Using Extra Shielding Wall / M. Bahadorzadeh, M. N.

- Moghaddasi and A. R. Attari // Progress In Electromagnetics Research Letters. – Vol. 1. 2008. – P. 45–50.
52. Fast MoM Analysis of the Shielding Effectiveness of Rectangular Enclosures with Apertures, Metal Plates, and Conducting Objects / R. Araneo and G. Lovat // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – vol. 51, No 2. – 2009. – P. 274–283.
53. Shielding Effectiveness of Metallic Enclosures at Oblique and Arbitrary Polarizations / Z. A. Khan, C. F. Bunting, M. D. Deshpande // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – Vol. 47, No 1. – 2005. – P. 112–122.
54. L.F. Chen, C.K. Ong, C.P. Neo et al. Microwave Electronics Measurement and Materials Characterization. – John Wiley & Sons, 2004.
55. S. Celozzi, R. Araneo and G. Lovat. Electromagnetic shielding. – Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2008.
56. Comparison of magnetic and microwave absorbing properties between multiwalled carbon nanotubes nanocomposite, nickel zinc ferrite nanocomposite and hybrid nanocomposite / L.J. Yu, S. H. Ahmad, S. Appadu et al // World Journal of Engineering. – No 11(4). – 2014. – P. 317-322.
57. C. Tong, Advanced materials and design for electromagnetic interference shielding. – Boca Raton: CRC Press, 2009.
58. Кужекин И.П., Ларионов В.П., Прохоров Е.Н. Молния и молниезащита. М.: Знак. 2003.г. ,329с.
59. Кравченко В.И. Грозозащита радиоэлектронных средств. М.: Радио и связь, 1991 г.264с.
60. Кравченко В.И., Болотов Е.А., Летунова Н.И. Радиоэлектронные средства и мощные электромагнитные помехи. М.: Радио и связь, 1987 г. 256с.
61. Новые наукоемкие технологии в технике. Т16. Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов. М.:2000. ЗАО НИИ «Энцитех», с.244.
62. Балюк Н.В., Болдырев В.Г., Булеков В.П., Кечиев Л.Н., Кириллов В.Ю.

- Литвак И.И., Постников В.А., Резников С.Б. Электромагнитная совместимость технических средств подвижных объектов. Москва. Издательство МАИ, 2004 г., 647 с.
63. Балюк Н.В., Кечиев Л.Н., Степанов П.В. Мощный электромагнитный импульс: воздействие на электронные средства и методы защиты. ООО «Группа ИДТ» М.: 2008 г., 478с.
64. Князев А.Д. Элементы теории и практики электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств. М.: Радио и связь, 1983., 336с.
65. Уильямс Т. «ЭМС для разработчиков продукции» М.: "Издательский дом Технологии" 2003., 540 с.
66. Уильямс Т. Армстронг К. ЭМС для систем и установок. М.:ИДТ, 2004 г. 507 с.
67. Хабигер Э. Электромагнитная совместимость. Основы ее обеспечения в технике. М.: Энергоатомиздат, 1995. 295с.
68. Шваб А.Й. Электромагнитная совместимость. М.: Энергоатомиздат, 1995. 467с.
69. Бородай П.Н., Тяпин М.С., Мырова Л.О., Сахаров К.Ю. Средства обеспечения стойкости информационных систем к воздействию излучений СШП ЭМИ// Технологии ЭМС2006, №2(17)., с.59-70.
70. Кнопфель. Сверхсильные магнитные поля. М.: Мир. 1968г., 392с.
71. Мырова Л.О., Воскобович В.В. Воздействие сверхширокополосного импульсного электромагнитного излучения на технические средства. Технологии ЭМС// 2004, №3(10), с.25-31.
72. Сахаров А.Д. Взрывомагнитные генераторы. Успехи физических наук. Т 88. вып.4 1966г. с.725-734.
73. Туркин В.А., Сахаров К.Ю., Соколов А.А., Михеев О.В., Кузнецов Е.В. Излучатели сверхкоротких электромагнитных импульсов для испытаний технических средств//. Технологии ЭМС, 2006 №2(17) с.10-16.
74. Baum C.E., Degaugue P., Ianoz M. Electromagnetic Topology and Soil Effects Applied to EMC Problems Symp. On EMC/- Zurich, 1993. P. 87-91.

75. Tashe F.M. Topological Concepts for Internal EMP Interaction // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 1978. V. AP-26. №1. P. 60-64.
76. Messeir M. EMP Hardening Topology Expert System // Electromagnetics. 1986. №6. P. 79-93.
77. Baker G., Castillo P., Vance E.F. Potential for a Unified Topological Approach to Electromagnetic Effects Protection // IEEE Trans. on EMC. 1992. V. 34. N3. P. 267-274.
78. Элементы топологической теории экранирования / Л.Н. Кечиев [и др.] // Проектирование телекоммуникационных и информационных средств и систем : сб. науч. Тр. – М. : Изд-во МИЭМ, 2007. – С. 125-130.
79. Барнс Дж., Электронное конструирование: Методы борьбы с помехами / Пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 238с.
80. Гизатуллин З. М. Помехоустойчивость средств вычислительной техники внутри здания при широкополосных электромагнитных воздействиях: Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук 05.13.05,. / Гизатуллин Зиннур Марселевич. – М: Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, 2016.-382 с.
81. Клыков А. В. Исследование помехозащищенности электрических жгутов электротехнических комплексов летательных аппаратов при воздействии мощных электромагнитных помех: Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук 05.09.03, защищена 29.11.2016г. / Клыков Антон Владимирович. – М: МАИ, 2016.-170 с.
82. Кириллов В.Ю. Электромагнитная совместимость элементов и устройств бортовых систем летательных аппаратов при воздействии электростатических разрядов: Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук 05.13.05,. / Кириллов Владимир Юрьевич. – М: МАИ, 2002.-293 с.
83. ГОСТ 19005-81 Средства обеспечения защиты изделий ракетной и ракетно-космической техники от статического электричества. Общие

- требования к металлизации и заземлению. – Введ. 1982–01–07. – М.: Изд-во стандартов, 1993, Переиздание с изменениями. – 38с.
84. Гроднев И.И., Сергейчук К.Я. Экранирование аппаратуры и кабелей связи. – М.: Связи и радио, 1960. 315с
85. ТУ16.К71 -340-2004 Плетенки металлические экранирующие облегченные марок ПОМС, ПОСМЛ и др. – ВНИИКП, 2004г.//Отт г. Методы подавления шумов и помех в электрических системах.- М.: Мир, 1979.- 317 с.
86. ТУ 4833-008-14621444-2006 Плетенки базальтовые металлизированные экранирующие. – М.: 2006
87. ТУ 16-705.198-81 Кабель КВСФ(м). – 1981
88. Журавлев С. Ю. Термостойкие радиопоглощающие композиционные материалы на основе тонкопленочных наноструктурированных углеродных покрытий: Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук 05.16.09, защищена 20.12.2018г. / Журавлев Сергей Юрьевич. – М: МАИ, 2018.-193 с.
89. 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.
90. ГОСТ Р 51317.4.2-99. Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электростатическим разрядам. Требования и методы испытаний. Введ. 1999–24–14. – М.: Госстандарт России, 2001. 20 с.
91. 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.
92. 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.
93. Журавлев С.Ю., Кириллов В.Ю., Жуков П.А. Исследования радиопоглощающих материалов для космических аппаратов // Технологии электромагнитной совместимости. – 2018. – № 4. – С. 32-39.
94. Жуков П.А., Торлупа А.А., Применение радиопоглощающих материалов для космических аппаратов // Сборник трудов конференции «Техно-ЭМС 2019», ВШЭ НИУ МИЭМ, 2019.
95. 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.
96. 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.
97. 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.
98. 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.
99. 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.
100. 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.

101. 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
102. 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
103. 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.
104. 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.
105. Ковалева Т.Ю., Пустарнакова Ю.И., Ковалева А.Г.и др. “Радиопоглощающие материалы для покрытия электронных средств спец техники”. сб. статей. 27 международной конференции. “Электромагнитное поле и материалы. Фундаментальные физические исследования”. 2015. С. 431–36.
106. Иванов В.А., Кириллов В.Ю., Морозов Е.П. Модельные и стендовые исследования электризации космических аппаратов. М.: Издательство МАИ, 2012.

107. Borgeest K. Tested Once, Forever Right? Influence of Aging and Temperature on Susceptibility and Emissions // Proc. IEEE Intern. Symp. Electromagnetic Compatibility (EMC). 2015. Pp. 271—276.
108. Дьяков А.Ф., Максимов Б.К., Борисов Р.К., Кужекин И.П., Жуков А.В. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике и электротехнике. М.: Энергоатомиздат, 2003.
109. Кириллов В.Ю., Марченко М.В. Зависимость эффективности экранирования кабелей от переходного сопротивления при воздействии электростатического разряда // Технологии ЭМС. 2012. № 1(40). С. 10—14.
110. Al-Hamid M., Leone M., Schulze S. A Novel Characterization Method for Cable Ferrites Using a TEM-Waveguide Test Setup // Proc. IEEE Intern. Symp. Electromagnetic Compatibility (EMC). 2015. Pp. 258—265.
111. Pissoort D. e. a. Towards a Stripline Setup to Characterise the Effects of Corrosion and Ageing on the Shielding Effectiveness of EMI Gaskets // Ibid. Pp. 7—12.
112. Жегов Н. А., Кириллов В. Ю., Клыков А. В., Томилин М. М. Сравнение расчётных и экспериментальных частотных характеристик эффективности экранирования бортовых кабелей летательных аппаратов // Вестник Московского авиационного института. 2015, Т.22, №4, С. 142-148.
113. Deschênes P., Bijman R., Leferink F. Effect of Gland Quality on the Screening Effectiveness of Cableconnector Assemblies // Ibid. Pp. 62—67.
114. Седельников Ю.Е., Веденькин Д.А. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств. Казань: Новое знание, 2016.