

Федеральное агентство научных организаций  
Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт сильноточной электроники Сибирского отделения  
Российской академии наук  
(ИСЭ СО РАН)

УДК 537.525; 62-768.3

ГРНТИ 29.27.43; 47.14.17; 47.14.21; 47.14.23

№ государственной регистрации 114112440211

Инв. № 2014.31.12

УТВЕРЖДАЮ:

Директор ИСЭ СО РАН,  
ч.-корп. РАН

Н. Ратахин /Ратахин Н.А./  
«29» 12 2014 г.



ОТЧЁТ

О ПРИКЛАДНЫХ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Разработка методов комплексной диагностики бортовой аппаратуры  
космических аппаратов на устойчивость к дугообразованию

по теме:

ВЫБОР НАПРАВЛЕНИЙ ИССЛЕДОВАНИЙ  
(промежуточный)

Шифр 2014-14-579-0003-024

Руководитель темы:

А.В. Батраков  
подпись, дата

29.12.2014

А.В. Батраков

Томск 2014

## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

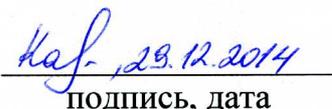
Руководитель темы,  
Заведующий  
лабораторией,  
канд. физ.-мат. наук

  
подпись, дата

23.12.2014

А.В. Батраков (введение,  
заключение,  
разделы 1.1, 1.2, 2.1,  
2.6, 3.1, 3.2, 4,  
Приложение А)

Ответственный  
исполнитель темы,  
Заведующий  
лабораторией,  
канд. физ.-мат. наук

  
подпись, дата

29.12.2014

В.М. Карабан (раздел 2.7)

Ответственный  
исполнитель темы,  
Заведующий  
лабораторией,  
д-р. физ.-мат. наук

  
подпись, дата

29.12.2014

А.В. Козырев (раздел 2.7)

Исполнители темы:

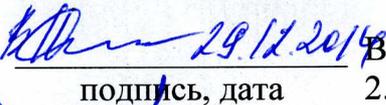
Профессор,  
д-р техн. наук

  
подпись, дата

подпись, дата

В.А. Лавринович (разделы 2.4, 2.5,  
Приложение А)

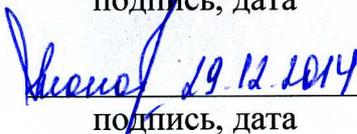
Доцент,  
канд. физ.-мат. наук

  
подпись, дата

подпись, дата

В.С. Ким (разделы 1.3, 2.2, 2.3, 2.4,  
2.6, Приложение А)

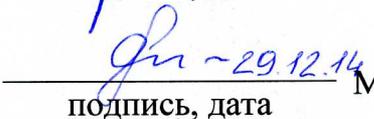
Доцент,  
канд. техн. наук

  
подпись, дата

подпись, дата

А.П. Леонов (разделы 1.3, 2.2, 2.3,  
2.4, 2.6)

Доцент,  
канд. техн. наук

  
подпись, дата

подпись, дата

М.Т. Пичугина (разделы 2.4, 2.5)

Ведущий научный  
сотрудник,  
д-р техн. наук

  
подпись, дата

подпись, дата

Г.Е. Озур (раздел 3.3.2)

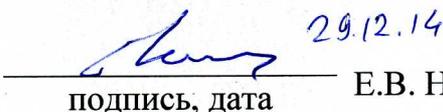
Старший научный  
сотрудник,  
канд. физ.-мат. наук

  
подпись, дата

подпись, дата

С.А. Попов (раздел 3.3.4)

Старший научный  
сотрудник,  
канд. физ.-мат. наук

  
подпись, дата

подпись, дата

Е.В. Нефёдцев (раздел 3.3.3)

Старший научный  
сотрудник,  
канд. физ.-мат. наук

  
подпись, дата

подпись, дата

А.Б. Марков (раздел 2.7)

Младший научный сотрудник, канд. физ.-мат. наук	<u>В.Ю. Кожевников - 29.12.2014</u> подпись, дата	В.Ю. Кожевников (раздел 2.7)
Аспирант, научный сотрудник	<u>М.П. Сухоруков - 29.12.2014</u> подпись, дата	М.П. Сухоруков (раздел 2.7)
Магистрант	<u>Д.С. Косов - 29.12.2014</u> подпись, дата	Д.С. Косов (раздел 2.7)
Младший научный сотрудник, канд. физ.-мат. наук	<u>Е.Л. Дубровская - 29.12.2014</u> подпись, дата	Е.Л. Дубровская (Прядко) (Приложение А)
Младший научный сотрудник	<u>С.А. Онищенко - 29.12.14г.</u> подпись, дата	С.А. Онищенко (раздел 3.3.3)
Младший научный сотрудник	<u>А.В. Шнайдер - 29.12.2014</u> подпись, дата	А.В. Шнайдер (раздел 3.3.4)
Младший научный сотрудник	<u>В.И. Петров - 29.12.2014г.</u> подпись, дата	В.И. Петров (раздел 3.3.1)
Младший научный сотрудник	<u>Е.В. Яковлев - 29.12.2014</u> подпись, дата	Е.В. Яковлев (раздел 3.3.2)
Аспирант, инженер	<u>П.П. Кизириди - 29.12.2014г.</u> подпись, дата	П.П. Кизириди (раздел 3.3.2)
Вед. конструктор	<u>А.Г. Падей - 29.12.2014г.</u> подпись, дата	А.Г. Падей (раздел 3.3.1)
Вед. инженер	<u>К.В. Карлик - 29.12.2014г.</u> подпись, дата	К.В. Карлик (разделы 3.3.1, 3.3.2)
Вед. инженер	<u>А.В. Миков - 29.12.2014</u> подпись, дата	А.В. Миков (разделы 3.3.2, 4)
Аспирант, младший научный сотрудник	<u>Л.А. Зюлькова - 29.12.2014</u> подпись, дата	Л.А. Зюлькова (раздел Приложение А)
Вед. электроник	<u>П.Г. Алимов - 29.12.14</u> подпись, дата	П.Г. Алимов (раздел 3.3.2)

Нормоконтролёр

 29.12.2014 С.В. Лыков  
подпись, дата

## РЕФЕРАТ

Отчет 197 с., 1 ч., 20 рис., 16 табл., 113 источников, 1 прил.

### РАДИОЭЛЕКТРОННАЯ АППАРАТУРА КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ, ДИАГНОСТИКА, ВАКУУМНАЯ ДУГА

Объектами исследования является экспериментально-аппаратный комплекс, реализующий методику комплексного тестирования модулей бортовой аппаратуры и кабельной сети космических аппаратов на устойчивость к дугообразованию, и экспериментальный образец программного комплекса, реализующего алгоритм оценки вероятности дугообразования в трёхмерной макромодели модуля бортовой аппаратуры и кабельной сети космического аппарата.

Целью первого этапа исследований является выбор направлений исследований, включая анализ современной научно-технической, нормативной, методической литературы по теме исследований; проведение патентных исследований; сравнительную оценку эффективности возможных направлений исследований; разработку общей концепции конструкции и функционирования комплекса оборудования для диагностики модулей бортовой аппаратуры и кабельной сети космических аппаратов с целью выявления рисков дугообразования; формулировку и согласование требований, предъявляемых к экспериментальному типовому модулю радиоэлектронной аппаратуры.

Методом исследования является сравнительный анализ источников информации по теме исследований и разработка концепций построения экспериментального диагностического оборудования, методик и программных средств.

В результате исследования были сформулированы направления реализации прикладных научных исследований, основанные на классификации известных дефектов и природных факторов, приводящих к дугообразованию в условиях орбитального космического пространства. Выполнены патентные исследования и определены направления дальнейшего поиска для разработки и патентной защиты результатов интеллектуальной деятельности.

# СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	10
1 Аналитический обзор современной научно-технической, нормативной, методической литературы, затрагивающей научно-техническую проблему, исследуемую в рамках ПНИ.....	15
1.1 Состояние проблемы отказов СЭС КА .....	15
1.2 Специфические характеристики электрической дуги в условиях эксплуатации СЭС КА.....	22
1.3 Характеристики электроизоляционных материалов, используемых в БАКС КА .....	29
2 Сравнительная оценка эффективности возможных направлений исследований.....	37
2.1 Методы ранней регистрации дуги в СЭС КА средствами ТМ .....	37
2.2 Методы моделирования локальной атмосферы бортовой РЭА.....	39
2.3 Методы неразрушающего контроля дефектности электронных плат ...	44
2.4 Методы неразрушающего контроля дефектности изоляции кабелей и проводов БКС.....	49
2.5 Методы неразрушающего контроля электрических соединителей .....	56
2.6 Анализ применимости методов диагностики диэлектриков к комплексной диагностике БАКС КА на устойчивость к дугообразованию	78
2.7 Сравнительный анализ методов моделирования процессов в модулях РЭА.....	84
3 Общая концепция конструкции и функционирования комплекса оборудования для диагностики модулей бортовой аппаратуры и кабельной сети космических аппаратов с целью выявления рисков дугообразования.....	103
3.1 Состав и основные требования ТЗ на ЭАК.....	103
3.2 Анализ требований ТЗ на ЭАК.....	105
3.3 Технические решения и конструкция ЭАК .....	108
3.3.1 Общая конструкция ЭАК.....	108
3.3.2 Источник плазмы первичной дуги.....	110
3.3.3 Имитация ионосферной плазмы.....	112
3.3.4 Зондовые измерения параметров плазмы .....	115
4 Требования, предъявляемые к экспериментальному типовому модулю радиоэлектронной аппаратуры.....	116
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	120
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	126
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Отчёт о патентных исследованиях .....	138

## ОБОЗНАЧЕНИЕ И СОКРАЩЕНИЯ

БА	— бортовая аппаратура
БАКС	— бортовая аппаратура и кабельная сеть
БКС	— бортовая кабельная сеть
БС	— батарея солнечная
ГВ	— газовыделение
ГСО	— геостационарная орбита Земли
ДУ	— двигательная установка
ДСК	— дифференциальная сканирующая калориметрия
ЕРПЗ	— естественные радиационные пояса Земли
ИИКП	— ионизирующее излучение космического пространства
ИС	— интегральная схема
ИСЗ	— искусственный спутник Земли
КА	— космический аппарат
КАС	— комплекс автоматики и стабилизации
КД	— конструкторская документация
КП	— космическое пространство
КЭП	— комплекс электрических преобразователей
МКС	— международная космическая станция
МКТ	— методика комплексного тестирования
МКЭ	— метод конечных элементов
НО	— низкая орбита Земли
ОКС	— орбитальной космической станции
ПН	— полезная нагрузка
ПО	— программное обеспечение
ППН	— повышающий преобразователь напряжения
РЭА	— радиоэлектронная аппаратура
САПР	— системы автоматизированного проектирования
САС	— срок активного существования
СВА	— собственная внешняя атмосфера
СКЛ	— солнечные космические лучи
СО	— система ориентации

СТР	— система терморегуляции
СЭП	— система электропитания
СЭС	— система энергоснабжения
ТЗ	— техническое задание
ТМ	— телеметрия
ТУ	— технические условия
УФИ	— ультрафиолетовое излучение
ФКП	— факторы космического пространства
ЦП	— центральный процессор
ЧР	— частичный разряд
ЭАК	— экспериментальный аппаратный комплекс
ЭДС	— электродвижущая сила
ЭМС	— электромагнитная совместимость
ЭРИ	— электрорадиоизделия
ЭСЗ	— электростатический заряд
ЭСР	— электростатический разряд
ЭСЭ	— электрические соединительные элементы
ЭТМ	— экспериментальный типовой модуль КЭП
ESA	— Европейское космическое агентство
FAA	— Федеральное агентство воздушного транспорта США
FDTD	— finite-difference time-domain (конечных разностей во временной области)
FVTD	— finite-volume time-domain (конечного объема во временной области)
GTD	— geometrical theory of diffraction (геометрическая теория дифракции)
MEI	— measured equation of invariance (измеряемое уравнение инвариантности)
MOM	— method of moments (метод моментов)
MSS	— multilevel subgridding scheme (схема многоуровневых сеток)
NASA	— Национальное аэрокосмическое агентство США

PASD	— pulse arrested spark discharge (задержанный импульсный искровой разряд)
PBA	— perfect boundary approximation (приближение идеальной границы)
PIC	— particle-in-cell (макрочастица, «частица в ячейке»)
TDR	— time domain reflectometry (рефлектометрический метод)
UTD	— uniform theory of diffraction (однородная теория дифракции)

## ВВЕДЕНИЕ

Проблема дугообразования в модулях бортовой аппаратуры и кабельной сети космических аппаратов является относительно новой, и её появление связано с необходимостью перехода систем электропитания космических аппаратов на уровни напряжения, значительно превышающие порог дугообразования в вакууме. Доля ответственности систем электропитания в сбоях в космических аппаратах составляет 3% в общей статистике и 9% в статистике фатальных отказов, приведших к потере аппаратов. Одной из основных причин выхода из строя систем электропитания является вторичная дуга, но, несмотря на это, стандартных методов диагностики радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов на устойчивость к дугообразованию нет в силу относительной новизны проблемы. К настоящему времени накоплен значительный объём информации по фундаментальным вопросам физики вакуумной дуги, и задача данного проекта состоит в разработке методов и экспериментального оборудования для реализации методики комплексного тестирования бортовой аппаратуры и кабельной сети космических аппаратов на устойчивость к дугообразованию.

Наиболее уязвимыми с точки зрения появления дефектов, способных приводить к дугообразованию, являются изоляционные покрытия, которые, как правило, выполнены из полимерных материалов или содержат полимеры материалы (клеи, герметики, пластмассы, резины, стеклопластики и т.д.), и электрические соединители различного типа. В этой связи значительная часть решения проблемы сосредоточена в разработке специфических методов дефектоскопии диэлектрических покрытий, диэлектрических оболочек и контактных соединений.

Методы дефектоскопии используются во всех отраслях промышленности. Кроме выявления опасных, с точки зрения эксплуатации, элементов конструкции, методы дефектоскопии предоставляют данные для оценки остаточного ресурса изделия и оптимизации технологии производства. В космической технике значение дефектоскопии многократно

возрастает из-за невозможности проведения ремонтных работ во время эксплуатации космического аппарата.

Стоящая перед проектом задача является нетривиальной, поскольку бортовое оборудование космических аппаратов представляет собой комплекс, сочетающий сложнейшую функциональную нагрузку с значительным энергопотреблением в условиях воздействия факторов космического пространства. Принимая во внимание сложность, а иногда и уникальность бортового оборудования космических аппаратов, методы диагностики бортового оборудования не должны использовать режимы, способные привести к ухудшению характеристик или снижению срока активного существования оборудования. Ограничение выбора методов диагностики только неразрушающими методами контроля бортового оборудования в значительной мере суживает круг возможных для применения методов дефектоскопии. Дополнительным условием, определяющим возможность использования метода диагностики, является его способность определения местонахождения различных типов дефектов изоляции (сквозных нарушений изоляционных покрытий в результате растрескивания, механического нарушения сплошности, истирания и т.п.) или нарушения электрических контактов в ходе испытания. Кроме того, пригодные для целей данной работы методы диагностики должны иметь низкий уровень ложного обнаружения дефектов.

Поскольку энергопотребление аппарата велико, и обнаружение дугового разряда по уровню тока не может предотвратить разрушительных последствий слаботочной стадии дуги, ранее обнаружение разряда в бортовой аппаратуре средствами телеметрии является актуальной задачей, и разработка технических решений и методов в решении данной проблемы является одной из задач данного проекта.

Вследствие многофакторности космического пространства и процессов, предшествующих инициированию дуги и сопровождающих дуговой разряд, принципиально важным является разработка методов тестирования конструкций модулей системы электропитания космического аппарата с использованием специализированного программного обеспечения.

Создание экспериментального образца такого программного обеспечения является одной из задач данного проекта.

Целями первого этапа проекта является выбор и обоснование направлений исследований на основе аналитического обзора современной научно-технической, нормативной, методической литературы, затрагивающей научно-техническую проблему, исследуемую в рамках прикладных научных исследований, патентных исследований, сравнительной оценки эффективности возможных направлений исследований, разработки общей концепции конструкции и функционирования комплекса оборудования для диагностики модулей бортовой аппаратуры и кабельной сети космических аппаратов с целью выявления рисков дугообразования, формулировки и согласования требований, предъявляемых к экспериментальному типовому модулю радиоэлектронной аппаратуры, с организацией - индустриальным партнёром.

На этапе работы выполнены патентные исследования, посвященные определению уровня техники в области разработки устройств и способов обнаружения и предотвращения дефектов печатных плат и кабельных соединений в наземных условиях с целью предотвращения дугообразования при эксплуатации этой аппаратуры в условиях космического пространства. На основании патентных исследований были сделаны выводы:

– Известные методы диагностики РЭА и их элементов можно условно разделить на несколько направлений:

– поиск дефектов диэлектрических покрытий печатных плат, в рамках которого разрабатываются химические методы, плазменные методы, флуоресцентные методы, методы теплового контроля, методы с применением волоконной оптики;

– поиск дефектов проводящих дорожек, в рамках которого разрабатываются методы рефлектометрии, индукционные методы, методы, основанные на измерении сопротивления;

– поиск дефектов в паяных, обжимных и механических контактных соединениях, в рамках которого разрабатываются методы рефлектометрии, индукционные методы, методы, основанные на измерении сопротивления.

– Разработка методов комплексного тестирования и диагностического оборудования для обнаружения и предотвращения дефектов печатных плат и кабельных соединений в наземных условиях с целью предотвращения дугообразования при эксплуатации этой аппаратуры в условиях орбитального космического пространства является технически обоснованной и потенциально востребованной разработчиками радиоэлектронного оборудования космических аппаратов.

– При разработке метода комплексного тестирования и диагностического оборудования, реализующего данный метод, создание объектов интеллектуальной собственности возможно в направлениях:

– поиск новых флуоресцентных покрытий для флуоресцентного метода диагностики дефектов диэлектрических покрытий печатных плат;

– поиск новых технических решений для создания дефектоскопического оборудования и способов его применения для реализации метода плазменного зондирования покрытых диэлектриком печатных плат и кабельных соединений закрытого исполнения;

– поиск новых технических решений для создания дефектоскопического оборудования для рефлексометрии кабельных соединений;

– поиск новых технических решений для создания дефектоскопического оборудования и способов тепловизионного контроля дефектов разъёмных соединений, находящихся под нагрузкой;

– поиск новых технических решений для разработки способов бездефектного нанесения диэлектрических покрытий на печатные платы с установленными электрорадиоизделиями;

– поиск новых технических решений для разработки способа обнаружения ранних стадий дугообразования в бортовой аппаратуре и кабельной сети при эксплуатации в вакууме;

– поиск новых технических решений для создания специализированного диагностического комплекса тестирования бортовой аппаратуры и кабельной сети космических аппаратов.

# **1 Аналитический обзор современной научно-технической, нормативной, методической литературы, затрагивающей научно-техническую проблему, исследуемую в рамках ПНИ**

## **1.1 Состояние проблемы отказов СЭС КА**

Условия эксплуатации КА являются экстремальными для техники из-за наличия ФКП: проникающей радиации высокоэнергетических частиц коронарной плазмы, вакуума и экстремальной разницы температуры на солнечной и теневой сторонах. В этой связи высокая вероятность выхода КА из строя до окончания САС является естественной, что является удобным обстоятельством для объяснения проблем с оборудованием КА. Однако ФКП не всегда являются единственной причиной отказов. Статистика отказов КА и её анализ изложена в работе [1]. На рисунке 1.1 приведена динамика числа запусков американских ИСЗ военного назначения по годам и соответствующего числа преждевременно вышедших из строя ИСЗ. Данные свидетельствует о значительном проценте неудач, но, с другой стороны, каждое новое поколение КА демонстрировало проблемы в начальной стадии эксплуатации, после чего доля отказов снижалась. Как отмечается в [1], контроль и прозрачность анализа технических проблем в военной промышленности имело положительный эффект, чего не было достигнуто в производстве гражданских ИСЗ, где процент выхода из строя всегда был и остаётся высоким (рисунок 1.2). С точки зрения автора [1], при производстве коммерческих КА, анализ технических проблем крайне затруднён как со стороны изготовителя, скрывающего проблемы под прикрытием коммерческой тайны, так и со стороны заказчика, скрывающего проблемы из соображений возможного отрицательного влияния фактов неудач на имидж компании.

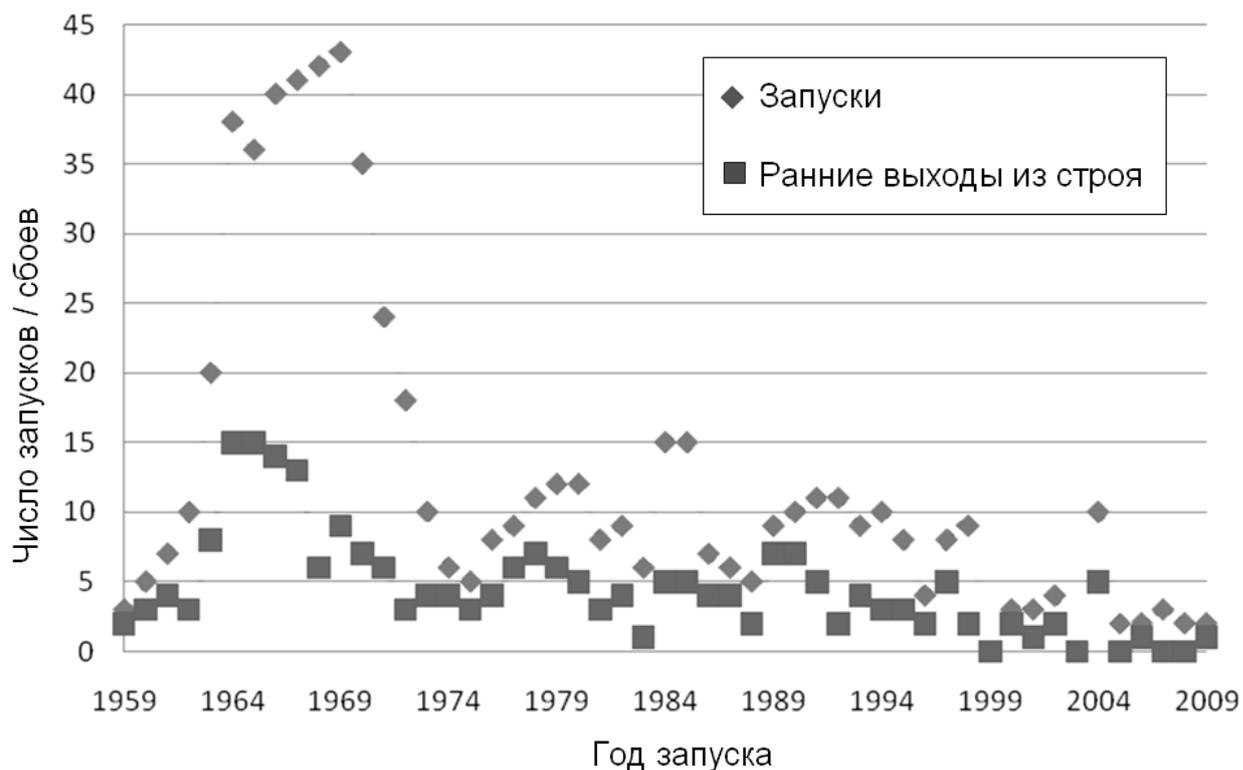


Рисунок 1.1 – Статистика преждевременного выхода из строя американских ИСЗ военного назначения по данным, опубликованным в [1].

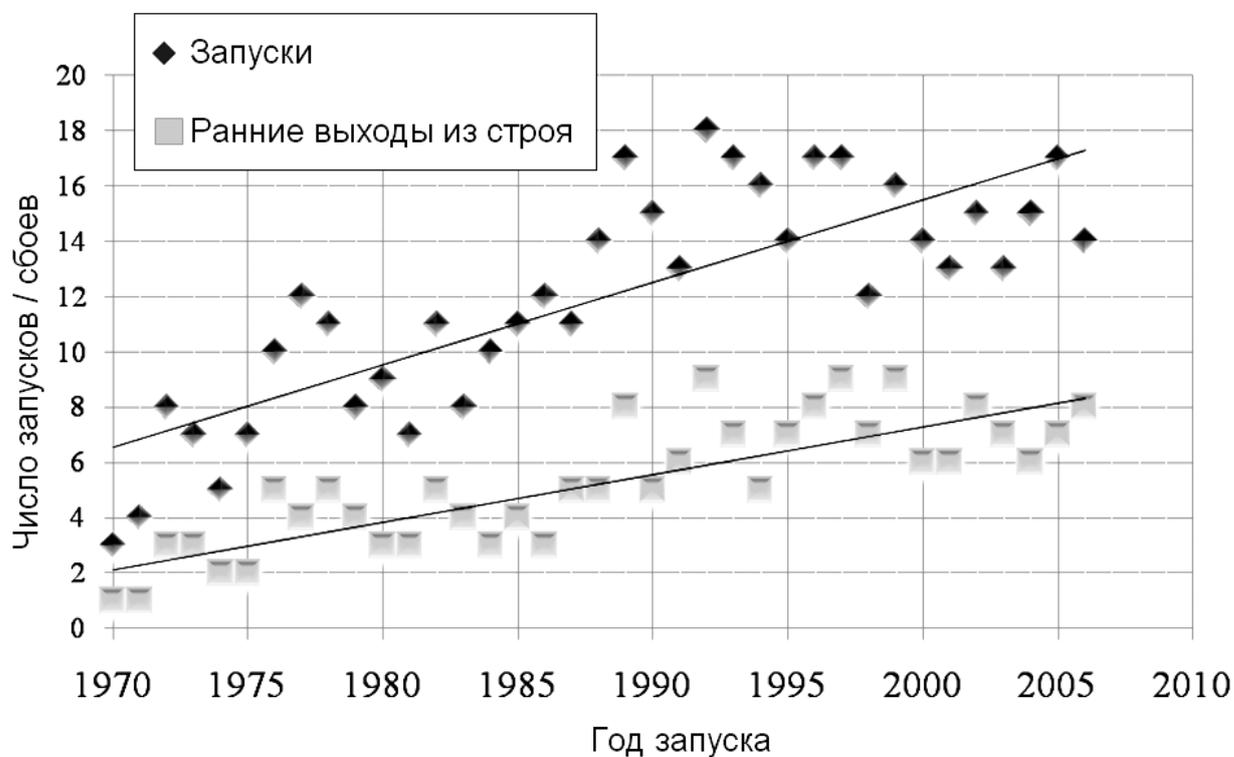


Рисунок 1.2 – Статистика преждевременного выхода из строя американских ИСЗ гражданского назначения по данным, опубликованным в [1].

СЭС является ключевой системой КА, обеспечивающей КА энергией. Доля ответственности каждой из подсистем, составляющей СЭС, различна в зависимости от условий эксплуатации. В работе [3] приводится статистический анализ проблем СЭС в течение САС по данным открытых источников информации (рисунок 1.3). Следует отметить, что сбои в СЭС на НО случаются относительно редко, но если происходят, то носят фатальный характер. Причина такой закономерности в [3] не раскрывается.

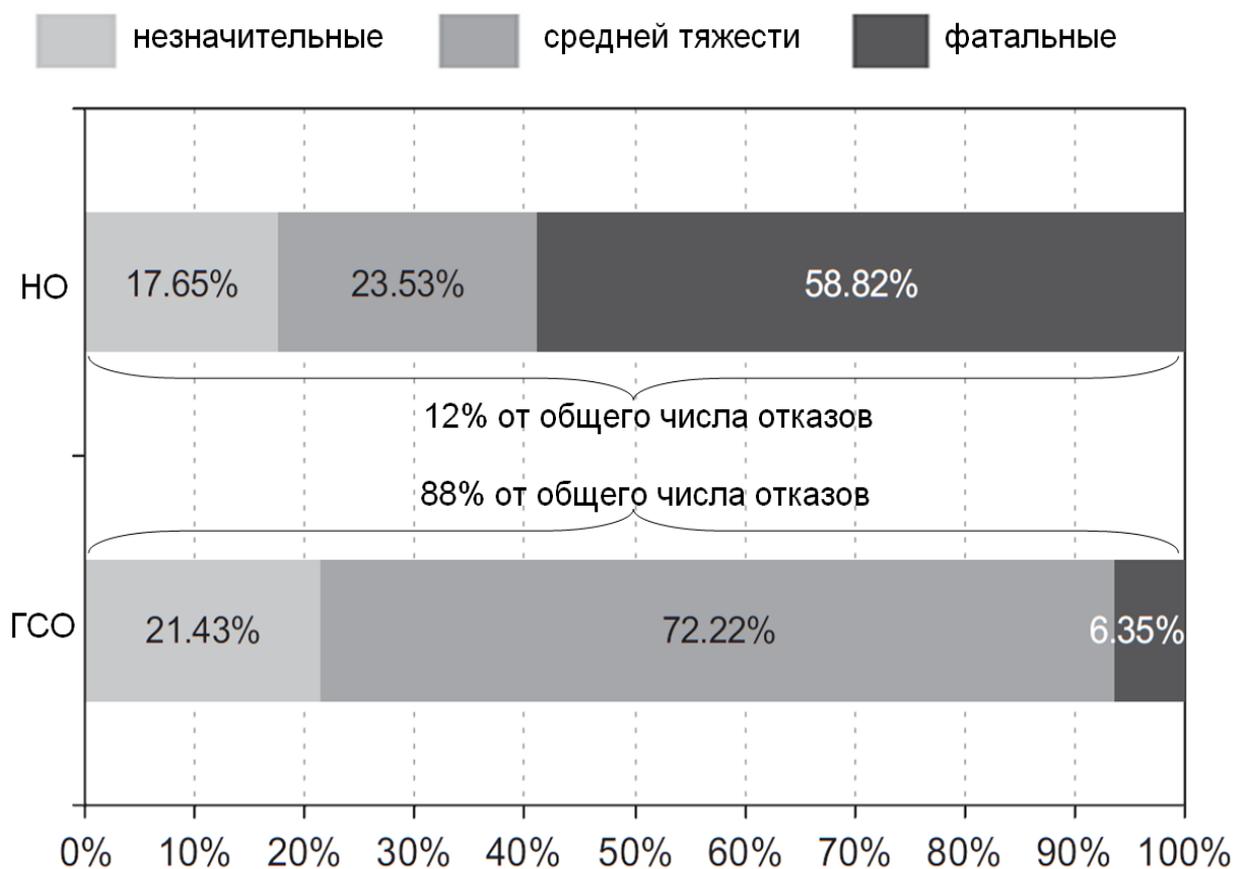


Рисунок 1.3 – Статистика нештатных ситуаций в СЭС КА в зависимости от орбиты и тяжести последствия по данным, опубликованным в [3].

Доля ответственности различных подсистем и причины отказов в различных подсистемах детально анализируются в [4]. В частности, в [4] приводятся сводные данные по анализу 773 случаев сбоев в работе ИСЗ, отображённые в Таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Число сбоев в различных подсистемах ИСЗ по данным [4].

Подсистема	Незначительные сбои	Сбои средней тяжести	Фатальные сбои	Все сбои
СО	86	35	16	137
ДУ	29	55	14	98
Антенны	4	17	0	21
ЦП	24	1	5	30
Механизмы	8	9	7	24
ПН	99	93	3	195
АБ	6	16	8	30
СЭП	7	10	9	26
БС при раскрытии	2	6	2	10
БС при эксплуатации	22	77	9	108
Телеметрия	32	23	19	74
Неопознанная	0	14	6	20
<b>Все подсистемы</b>	<b>319</b>	<b>356</b>	<b>98</b>	<b>773</b>

Важным для анализа проблемы является соотношение долей подсистем в фатальных сбоях, и в этом сегменте статистики доля СЭП велика. В процентном отношении в данной подсистеме наибольший процент фатальных сбоев в общей статистике сбоев по подсистеме (рисунок 1.4). В [4] на основании данных статистике построена модель роста вероятности сбоев различной тяжести для различных подсистем КА, в том числе для СЭП (рисунок 1.5). При построении зависимостей использовалась модель, учитывающая лишь ФКП.

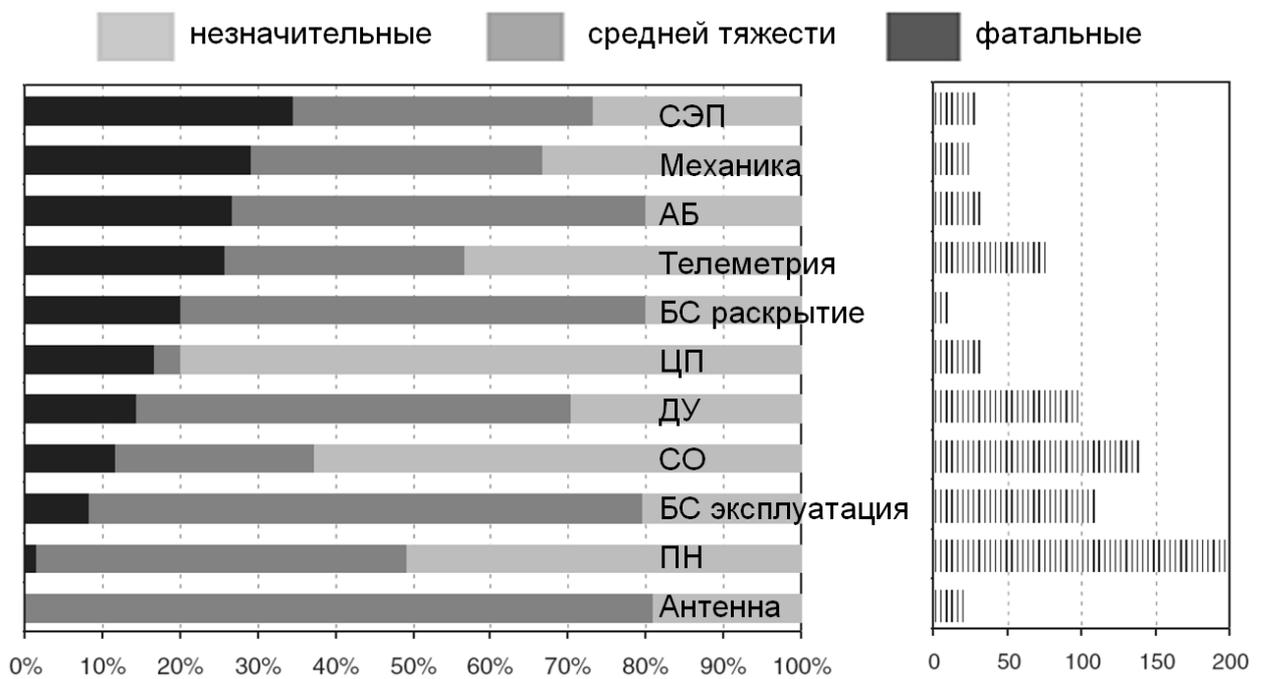


Рисунок 1.4 – Доля подсистем КА в сбоях различной тяжести по данным, опубликованным в [4]. Гистограмма слева отображает общее число событий.

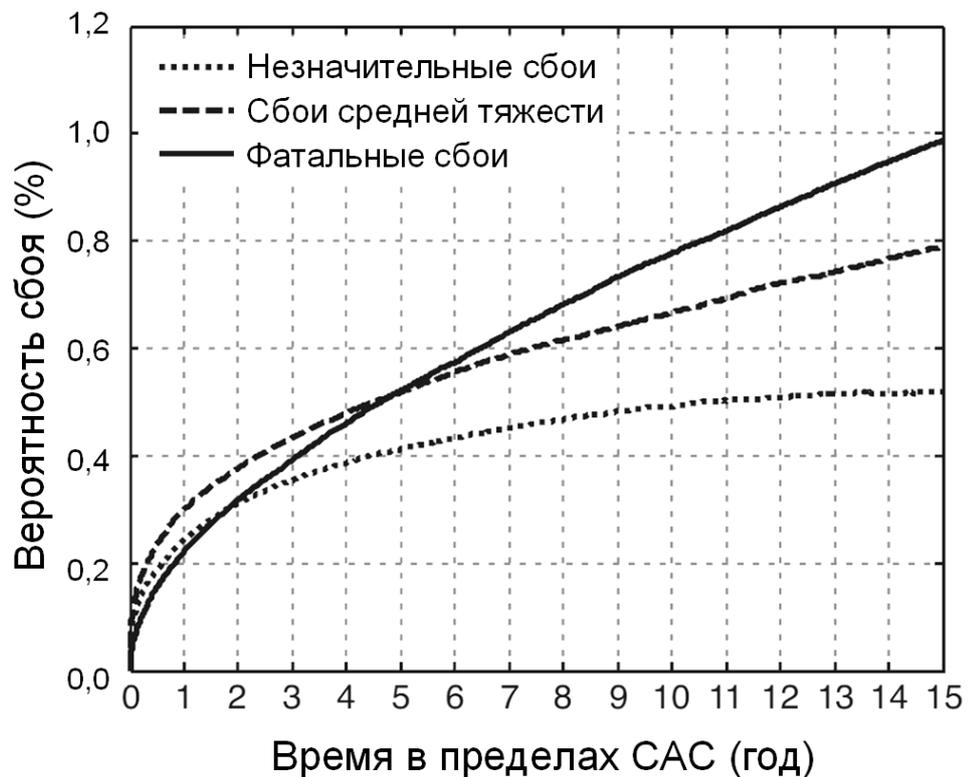


Рисунок 1.5 – Динамика роста вероятности сбоев различной тяжести СЭП КА по данным, опубликованным в [4].

Исключая человеческий фактор, причиной сбоев РЭА СЭП является деградация ЭРИ вследствие ФКП. Для оценки вероятности выхода из строя различных типов ЭРИ при эксплуатации КА в [5] рекомендованы данные, представленные в таблице 1.2, где сравниваются ЭРИ коммерческого исполнения (КИ) и военного исполнения (ВИ). К сожалению, более поздние источники информации по данному вопросу в открытой печати отсутствуют, и современная элементная база, возможно, является более радиационно-стойкой, однако данные [5] отображают общую тенденцию, необходимую для анализа проблемы.

Таблица 1.2 – Рекомендованные в [5] данные по наработке на отказ ЭРИ для оценки САС РЭА на стадии проектирования.

Тип ЭРИ	Число отказов за $10^6$ часов		Тип ЭРИ	Число отказов за $10^6$ часов	
	КИ	ВИ		КИ	ВИ
<b>Конденсаторы:</b>			<b>Полупроводниковые ключи:</b>		
керамические	66	22	сигнальные, n-p-n	71	14
плёночные	78	26	сигнальные, p-n-p	100	20
танталовые	200	63	силовые, n-p-n	650	130
электролиты	1600	480	силовые тиристоры	1800	360
<b>Резисторы:</b>			ИС цифровые	1050	18
постоянные композиционные	45	45	ИС аналоговые	900	33
постоянные проволочные	100	100	<b>Трансформаторы и прочее:</b>		
постоянные плёночные	3	3	трансформаторы сигнальные	10	3
переменные металлокерамические	2760	1380	трансформаторы силовые	82	32
переменные проволочные	300	100	тепловые реле	225	3
<b>Диоды:</b>			соединители, контактные пары	32	4
сигнальные	28	5,6	плавкие предохранители	300	100
силовые	2160	432			

Как отмечается в [6], при анализе причин отказов человеческий фактор занимает ведущую позицию. В работе [5] даётся следующая классификация (приведено в переводе):

- случайные отказы (ФКП);
- отказы вследствие износа, которые учтены при проектировании;
- отказы из-за ошибок проектирования, как следствие недооценки условий эксплуатации;
- отказы из-за дефектов производства, например, применительно к системам питания (список может быть продолжен):
  - отрезок проводника, который мог возникнуть во время снятия изоляции – потенциальный источник короткого замыкания;
  - выступающие винты, прокалывающие окружающую изоляцию проводов или являющиеся концентраторами электрического поля, провоцирующими ЭСР.

Одной из ошибок проектирования, согласно [6], является использование открытых плавких вставок, инициирующих дугу с неприемлемо высокой вероятностью при напряжении цепи, подлежащей разрыву, выше 50 В. Другой пример дугообразования в СЭП приведён в работе [7]. Выход КА ADEOS II в [7] объясняется перегревом в БКС вследствие использования материалов, не обеспечивших отвод тепла, что привело к локальному нагреву до 230°C, интенсивному газовыделению и зажиганию дуги в соединителе. Этот сценарий отличается от официального объяснения выхода КА ADEOS II из строя, согласно которому причиной послужил удар микрометеорита.

Инцидент инициирования дугового разряда в условиях орбиты отмечен в [8], февраль 1996 года, американский проект TSS-1R. Из-за загрязнений, оставленных в кабеле, произошло газовыделение, и загорелась дуга. В [8] содержится большой объём информации об инцидентах, приведших в отказам в КА. Среди причин дугообразования фигурируют два физических процесса: дугообразование вследствие накопления заряда космическим аппаратом (arcing from spacecraft charging) и дугообразование вследствие обезгаживания (arcing due to outgassing). Если первый из упомянутых выше

механизмов является следствием ФКП, то за второй механизм отвечают исключительно разработчики и производители КА.

В работе [9] даётся подробный анализ влияния отказов подсистем КА на его жизненный цикл, в том числе анализируются характерные причины отказов, что касается дугообразования в СЭП, в [9], как и в [7], отмечается, что данная проблема является относительно новой.

## 1.2 Специфические характеристики электрической дуги в условиях эксплуатации СЭС КА

По тяжести последствий при горении дуги в СЭС КА принята классификация, закреплённая в стандарте ISO-11221:2011 и представленная на рисунке 1.6.

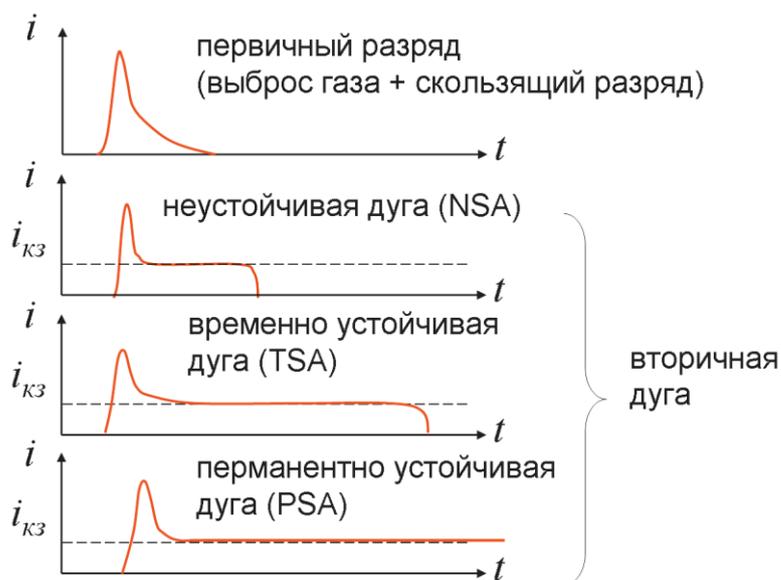


Рисунок 1.6 – Классификация дуговых разрядов в СЭС КА, принятая в ISO-11221:2011, определяемая по виду осциллограмм тока дугового разряда, где  $i_{кз}$  – ток короткого замыкания СЭС.

Основным источником дугообразования в БС и внешней аппаратуре КА являются ФКП, в частности плазменное окружение и наличие высокоэнергетических частиц, приводящих к накоплению ЭСЗ с последующим ЭСР. Не последнюю роль играет газовыделение из КА. Как результат, пороги дугообразования в условиях орбитального КП низки. В [6] приведены данные по зависимости пробивного напряжения между

оголёнными проводниками БС (диапазон расстояний между проводниками от единиц миллиметров до десятка сантиметров), согласно которым электрическая прочность промежутка оказывается аномально низкой (рисунок 1.7) и много меньше, чем это следует из физики электрического пробоя в газе [10] и в вакууме [11].

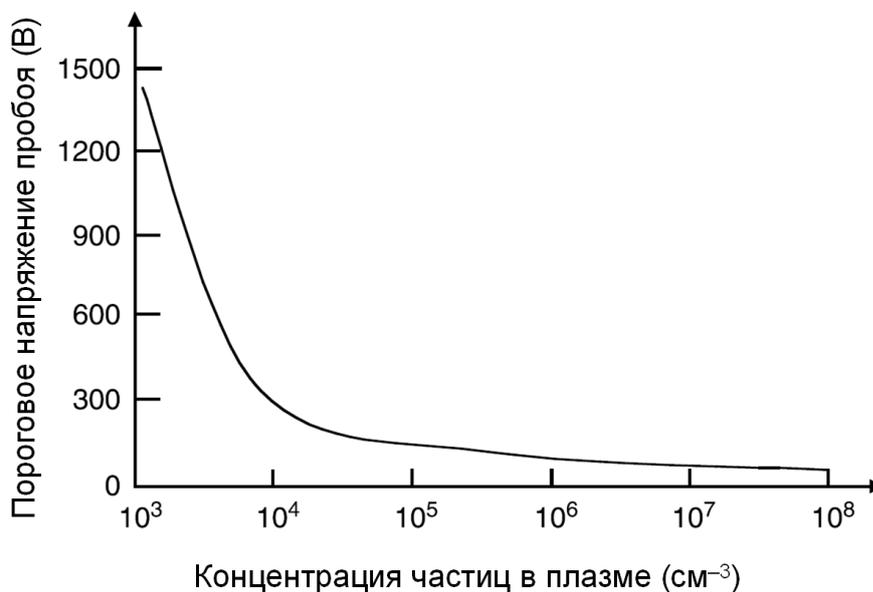


Рисунок 1.7 – Зависимость порогового напряжения пробоя между оголёнными проводниками БС от концентрации частиц в окружающей плазме [4].

Объяснение, сделанное на основе анализа литературных данных, даётся в обзоре [12]. В качестве основных механизмов, приводящих к дуге при длительном пребывании в орбитальном КП, авторы [12] приводят следующее:

- эффект Мальтера, заключающийся в эмиссии электронов из проводника, покрытого тонкой диэлектрической плёнкой, ускоренных за счёт положительного потенциала поверхности плёнки, образованного в результате вторичной электронной эмиссии при условии коэффициента вторичной электронно-электронной эмиссии больше единицы;
- газовый разряд в нейтральных газах, выделяемых из диэлектрических материалов в КА;
- эмиссионная активность в тройных точках диэлектрик–проводник–вакуум и с острых граней под плазмой;

– ионная бомбардировка поверхностей.

В [12] также отмечается, что критичным процессом с точки зрения инициирования дуги, в том числе и в модулях СЭП, расположенных внутри КА, является отслоение диэлектрика, покрывающего элементы, от основы, что создаёт узкую полость, способную эмитировать плазму при наличии электрического поля, достаточного для ионизации газа в полости. Такое поведение узких полостей является следствием повышенного давления в них из-за затруднённой откачки газа.

Другим потенциально возможным процессом, приводящим к образованию плазмы в работающих модулях СЭП, является барьерный разряд, для зажигания которого, согласно [13], достаточно частот в единицы килогерц и напряжений, соответствующих напряжению зажигания тлеющего разряда. Как и любой газовый разряд, барьерный разряд должен эффективно гореть в области давлений и расстояний, соответствующих минимуму кривой Пашена, однако в настоящее время между барьерным разрядом и инициированием дуги в работающей РЭА связи не установлено.

Резкий рост вероятности зажигания дуги с увеличением концентрации частиц в плазме, подобной зависимости, представленной на рисунке 1.6, отмечено в [14], однако диапазон давлений, при которых такой рост наблюдается, более чем на порядок величины выше давлений, соответствующих излому кривой на рисунке 1.7. Но, в любом случае, как концентрации порядка  $10^4 \text{ см}^{-3}$ , так и  $10^5 \div 10^6 \text{ см}^{-3}$ , легко реализуемы при зажигании разряда в изолирующих промежутках, поскольку даже при давлении 0,1 мПа, соответствующих высокому вакууму, концентрация нейтральной компоненты среды составляет величину порядка  $10^{10} \text{ см}^{-3}$ , достаточно высокую для формирования редкой плазмы.

С точки зрения деструктивных последствий горения дугового разряда, включая вероятность зажигания повторных дуг, принципиальное значение имеет длительность горения дуги. В обзоре [15] данная проблема анализируется с точки зрения дугообразования в СЭП КА. В статье

рассматриваются пороговые значения токов и напряжений существования разряда. Пороговые значения тока дуги в зависимости от материала не имеют чёткого определения и в значительной степени зависят от длительности горения дуги (рисунок 1.8). Чем больше ток, тем больше среднестатистическое время горения дуги. Дуга на легкоплавких металлах при одном уровне тока горит дольше, чем на тугоплавких

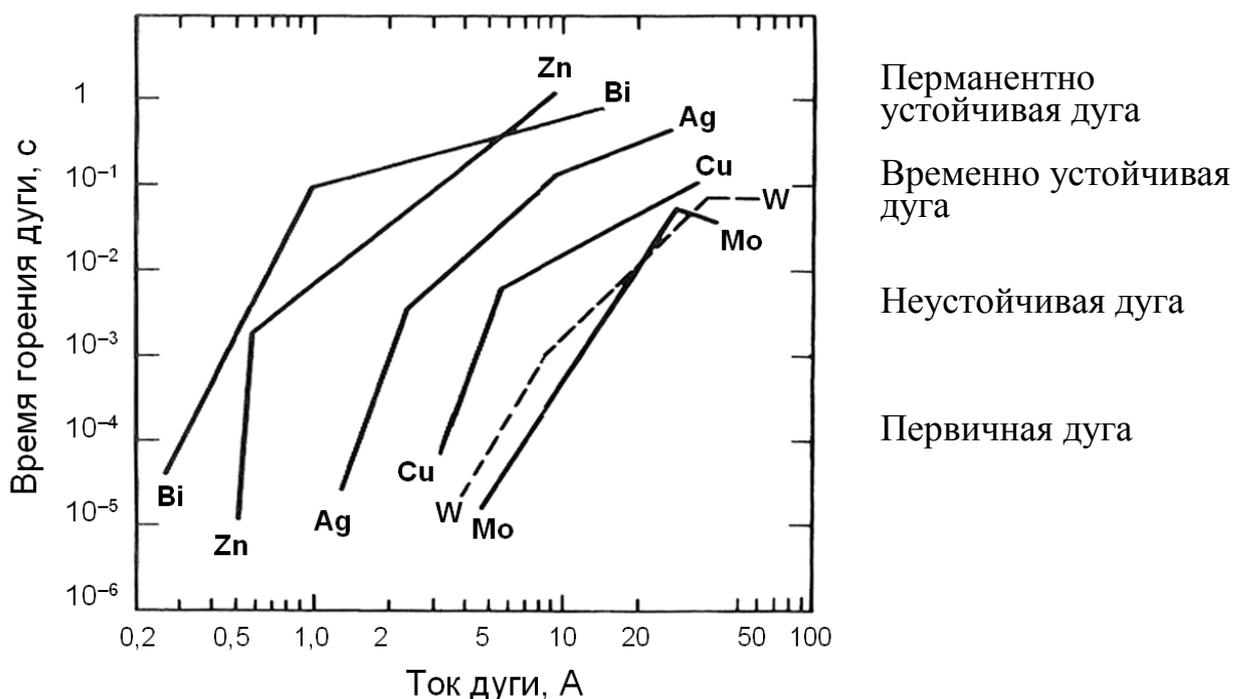


Рисунок 1.8 – Зависимость времени горения дуги от тока дуги для некоторых металлов [15].

Напряжения горения обобщено в обзоре [15] для большого числа металлов и представлено в таблице 1.3. Представленные данные указывают на существование тенденции роста напряжения горения дуги с ростом температуры плавления материала электродов, однако данная зависимость не является строгой. Например, алюминий и титан имеют одинаковые значения падения напряжения на дуге, несмотря на значительное различие в значениях температуры плавления. Данные по пороговым значениям тока дуги и минимальным значениям напряжения горения дуги имеют большое практическое значение с точки зрения оценки риска дугообразования в вакууме.

Таблица 1.3 – Значения минимального напряжения горения дуги,  $U_{\min}$  [В], для различных материалов электродов.

Элемент	$U_{\min}$	Элемент	$U_{\min}$	Элемент	$U_{\min}$	Элемент	$U_{\min}$
Li	9.0	Cd	8.1	Ti	15.5	Cr	15.5
Na	7.0	Hg	7.5	Zr	18.5	Mo	23.0
Cu	15.5	Al	15.5	Hf	15.0	W	23.2
Ag	12.5	Ga	10.0	C	12.0	Te	11.0
Au	12.9	In	9.5	Sn	10.5	Mn	12.0
Mg	11.0	La	10.5	Pb	8.0	Fe	15.5
Ca	8.0	Nd	11.5	Nb	19.0	Co	18.9
Sr	7.0	Gd	11.0	Ta	20.0	Ni	16.5
Ba	6.3	Dy	11.5	Sb	8.8	Pd	16.0
Zn	9.1	Yb	6.5	Bi	7.5	Pt	13.5

Процесс инициирования первичной дуги и меры по её предотвращению подробно освещаются в литературе, посвящённой проблеме ЭСР в БС. В [16] обобщаются основные современные тенденции при разработке КА, позволяющие снизить риски ЭСР в КА:

1. Меры по снижению процесса накопления заряда за счёт использования изоляционных материалов, препятствующих накоплению заряда, т.е. обладающих ограниченной объёмной и поверхностной проводимостью. С другой стороны, такие материалы в большей степени подвержены объёмному травлению, следовательно, при их длительном пребывании в условиях КП возникает риск оголения токоведущих металлических частей. Также использование материалы с коэффициентом вторичной эмиссии электронов больше единицы. Этот процесс обеспечивает тенденцию к уменьшению отрицательного заряда, но также к увеличению положительного заряда. Второе представляет опасность для возникновения большой разности потенциалов. Избыточный заряд снимается также фотоэмиссией, но лишь на солнечной стороне.

2. Моделирование процесса зарядки КА и снятия избыточного заряда с учётом динамики этих процессов.

3. Новые подходы к снижению последствий зарядки КА и ЭСР, например, использование материалов с высокой эмиссионной активностью даже в слабых электрических полях.

Эмиссионная активность поверхности имеет принципиальное значение для внешнего оборудования КА, включая БС. В [17] с этой целью предлагается использовать источник электронов в виде накаливаемой нити, эмитирующей за счёт термоэлектронной эмиссии, либо облучать неосвещённую поверхность КА источником вакуумного УФ-излучения с целью снятия заряда за счёт фотоэлектронной эмиссии. Более универсальное решение проблемы снятия избыточного отрицательного заряда найдено в [18], где в качестве эмиттера электронов используется металлизированная полиимидная плёнка, обычно применяемая в КА, но перфорированная лазером. Тем самым высокая плотность тройных точек, образованных острой кромкой металлизации и плёнкой, формируется в местах, отдалённых от органов СЭС. Другой способ найден для нейтрализации ЭСЗ на НО. В частности, как сообщается в [6], на МКС используется «плазменный контактор», представляющий собой источник плазмы, создающий проводящий канал между МКС и плазменным окружением, благодаря которому избыточный заряд стекает в окружающую плазму. Плотность тока, необходимого для гарантированного снятия избыточного заряда с поверхности КА, находящегося на ГСО, определена экспериментально в [19] и составляет  $2 \text{ mA/m}^2$ . Очевидно, что подходы, основанные на эмиссии заряженных частиц, не могут быть применены для внутренних модулей СЭС КА, поскольку любой источник заряженных частиц понижает пороги инициирования электрического разряда в газе низкого давления [10].

Результат экспериментов, важный для разработки и практической реализации методов предотвращения вторичного дугообразования, получен в [20], согласно которому вероятность вторичного дугообразования

практически не зависит от наличия или отсутствия окружающей КА плазмы в диапазоне концентраций заряженных частиц, представленном на рисунке 1.7. В этой связи необходимость учёта плазменного окружения как ФКП в исследовании проблемы остаётся, но лишь применительно к обнаружению источников первичного дугообразования.

В [21] анализируется отсутствие гравитации (или микрогравитация) в качестве одного из ФКП, оказывающего сильное влияние на характер горения дуги и ограничивающего возможность использования герметичных контейнеров нормального атмосферного давления. При горении дуги в земных условиях конвекция окружающего газа охлаждает дугу, что является сдерживающим фактором. В условиях отсутствия гравитации конвекция отсутствует, и дуговой разряд в газовом окружении за счёт перегрева газа и электродов приведёт к деструктивным последствиям, гораздо более значительным, чем в случае вакуумного окружения. В этой связи способом защиты от дуги могло бы быть использование герметичных контейнеров высокого давления, в том числе с наполнением газом с высокой электрической прочностью (элегаз, фреоны), но этот подход означает необходимость увеличения массы СЭП, включая БКС. Но, с другой стороны, согласно данным, опубликованным в [6], выигрыш в массе при переходе на более высокие уровни напряжения питания КА колоссален (таблица 1.4) и, возможно, может компенсировать затраты массы на создание герметичной системы электропитания, заполненной SF<sub>6</sub>.

Таблица 1.4 – Масса БКС в зависимости от уровня напряжения, уровня мощности и характерного размера КА.

Уровень напряжения	Мощность 20 кВт и размер КА 10 м	Мощность 100 кВт и размер КА 20 м	Пример использования
28 В	155 кг	7000 кг	Устаревший уровень
70 В	20 кг	900 кг	ИСЗ на ГСО
120 В	7 кг	290 кг	МКС
200 В	3 кг	140 кг	SP-100 (проект)

### **1.3 Характеристики электроизоляционных материалов, используемых в БАКС КА**

В бортовом оборудовании КА применяется большое количество разнообразных полимерных материалов, как в качестве электрической изоляции, так и в качестве конструкционных материалов: пластмассы, резины, клеи, лаки, компаунды, композитные материалы с полимерным связующим. В работах [22-24] даётся обзор характеристик современных материалов. Как правило, такие материалы представляют собой сложные многокомпонентные системы. Для обеспечения заданных свойств в состав полимерных материалов входит до десяти различных низкомолекулярных ингредиентов. На 100 весовых частей полимерной основы полимерные материалы могут содержать:

- наполнители до 70 вес.ч.;
- пластификаторы до 50 вес.ч. и более;
- стабилизаторы (2-4 типа) до 5 вес.ч.;
- красители от 0,01 до 10 вес.ч.;
- антипирены до 70 вес.ч. в зависимости от типа;
- другие ингредиенты (внутренние смазки, антистатика, структурообразователи) до 3 вес.ч.

Кроме того, клеи и лаки содержат остатки растворителей. Низкомолекулярные ингредиенты, входящие в состав полимерных материалов, обеспечивают необходимые эксплуатационные свойства, такие как высокая термостойкость, радиационная стойкость, устойчивость к окислению и др.

Выбор полимерных материалов для космической отрасли определяется условиями эксплуатации. Требования к полимерным материалам в космической отрасли постоянно ужесточаются. На сегодняшний день актуальными являются:

- срок эксплуатации изоляции в течение от 5 до 15 лет, в зависимости от срока эксплуатации КА на орбите, и более;

- снижение массы изоляции электрической сети КА на 30...50%;
- электрическое сопротивление изоляции между электрически не соединенными цепями кабеля, а также между электрическими цепями и нетоковедущими частями кабелей (экраны, защитные плетенки, корпуса соединителей), должно быть не менее:
  - 50 МОм при пониженной температуре и при пониженном атмосферном давлении. В настоящее время для современных КА предъявляются требования устанавливающие величину сопротивления в 100 МОм;
  - 5 МОм при повышенной температуре до +270°С.
- материалы изоляции должны быть стойкими к воздействию солнечного интегрального излучения с плотностью потока 1400 Вт/м<sup>2</sup> в минуту.
- материалы изоляции должны быть стойкими к воздействию ионизирующих излучений в соответствии с требованиями для конкретных КА.
- материалы изоляции должны быть работоспособны в среде азота с примесью кислорода от 2% до 5%, гелия до 0,01% или аргона до 1,5 %.
- неметаллические материалы, применяемые при изготовлении изоляции кабелей не удовлетворяющие требованию по потере массы с учетом рекондиционирования не более 1 % и содержащих летучих конденсируемых веществ не более 0,1 %, должны быть обезгажены по 154.ТБА076.
- изоляция кабельных изделий, а также вспомогательные материалы в течение срока эксплуатации должны быть стойкими к воздействию суммарной дозы ИИКП от  $1 \cdot 10^8$  до  $6 \cdot 10^8$  рад согласно требованиям на конкретные КА.

Жесткие требования ограничивают выбор полимеров для космического применения. В частности, для космического применения используют материалы с низким содержанием летучих соединений и, в первую очередь

не пластифицированные материалы или материалы с низким содержанием пластификаторов. Тем не менее, количество различных полимерных материалов, применяемых в бортовом оборудовании КА в качестве электрической изоляции, герметизирующих составов, конструкционных элементов, клеевых соединений, достигает 200. Все эти полимеры обладают различной термостабильностью и различной степенью газовыделения в условиях КП.

Важной характеристикой материала является его поведения при термоциклировании. В работах [25, 26] рассматривается изменение характеристик полимерных материалов в условиях повышенной и пониженной температуры и низкого давления окружающей среды. Некоторые из ингредиентов, такие как пластификаторы или растворители, в условиях повышенных температур и/или низких давлений испаряются. Другие, например стабилизаторы и некоторые виды антипиренов, способны разлагаться с выделением летучих соединений. Эти процессы неизбежно возникают в процессе эксплуатации и являются составляющей частью процессов старения полимерных материалов, а значит и изделий. Старение полимерных материалов подробно рассмотрено в работах [27-30]. Процесс старения включает также термическую, термоокислительную и радиационную деструкцию полимерных молекул. Все процессы старения ведут к необратимому ухудшению свойств материала и обычно сопровождаются выделением летучих соединений. Кроме ухудшения свойств материалов, в условиях вакуума процессы старения также приводят к возникновению локальных неоднородностей давления и возникновению локальной атмосферы РЭА КА. Скорость выделения летучих соединений и состав локальной атмосферы зависит от условий эксплуатации: температуры, давления, интенсивности УФИ, радиационного фона и др. Эти параметры должны учитываться при моделировании условий эксплуатации, однако определяющим для скорости газовыделения и химического состава

локальной атмосферы является строение и ингредиентный состав применяемых в конструкции полимерных материалов.

Для анализа изменения характеристик полимерных материалов в процессе их старения под действием ФКП используется ряд специфических методов диагностики. В работе [31] рассмотрен метод ДСК, позволяющий определять базовые температурные и структурные характеристики материалов, такие как температуры стеклования и текучести, термостабильность, теплопроводность и др. Данные ДСК анализа позволяют не только ограничить области рабочих температур полимерных материалов, но и количественно определить величину потери массы полимера при термическом старении. В работе [32] рассматривается электронно-зондовый анализ, а в [33] – радиоспектроскопия. Оба метода позволяют получать детальную картину химического строения макромолекул, надмолекулярных структур и структурных переходов в макромолекулах. Для идентификации состава полимерных композиций и структурных изменений в полимерных смолах широко используются такие методы, как инфракрасная спектроскопия [34], газовая и жидкостная хроматография [35] и масс-спектрометрия [36].

В частности, использование перечисленных методов для исследования свойств облученных полимеров позволило обнаружить, что в отношении радиационного старения все полимеры можно разделить на две группы: полимеры, в которых преобладают процессы деструкции, и полимеры, в которых при облучении наблюдается образование поперечных связей (сшивание). Результат воздействия ионизирующих излучений на высокомолекулярные соединения зависит от характера химических связей в молекулах этих веществ. Изменения свойств полимеров при радиационном старении вызваны следующими радиационно-химическими процессами:

- укрупнением макромолекул из-за возникновения поперечных химических связей между линейными макромолекулами – поперечное сшивание;

– деструкцией макромолекул, с образованием летучих продуктов и макромолекул меньшей длины;

– изменением числа и характера двойных связей;

– окислением при наличии доступа кислорода.

В целом, деструктурирующие полимеры отличаются высоким выходом мономеров при пиролизе в вакууме и обладают низкими стандартными значениями теплоты образования. В таблице 1.5 приведены примеры полимеров обоих типов.

Таблица 1.5 – Структурирующиеся и деструктурирующие полимеры при воздействии на них радиации.

Структурирующиеся	Деструктурирующие
Полиэтилен $-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$	Полиизобутилен $\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\   \\ -\text{CH}_2-\text{C}- \\   \\ \text{CH}_3 \end{array}$
Полистирол $\begin{array}{c} -\text{CH}_2-\text{CH}- \\   \\ \text{C}_6\text{H}_5 \end{array}$	Поли- $\alpha$ -метилстирол $\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\   \\ -\text{CH}_2-\text{C}- \\   \\ \text{C}_6\text{H}_5 \end{array}$
Полиметилакрилат $\begin{array}{c} -\text{CH}_2-\text{CH}- \\   \\ \text{H}_3\text{CO}-\text{C}=\text{O} \end{array}$	Полиметилметакрилат $\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\   \\ -\text{CH}_2-\text{C}-\text{CH}_2- \\   \\ \text{H}_3\text{CO}-\text{C}=\text{O} \end{array}$
Поливинилхлорид $\begin{array}{c} -\text{CH}_2-\text{CH}- \\   \\ \text{Cl} \end{array}$	Поливинилиденхлорид $\begin{array}{c} \text{Cl} \\   \\ -\text{CH}_2-\text{C}- \\   \\ \text{Cl} \end{array}$

Для космического применения используются структурирующиеся полимеры, но, например, ПВХ не рекомендован для применения, так как в

изоляционных ПВХ-пластикатах содержание пластификатора может достигать 45 вес.ч. Зная поведение мономеров, с можно предсказать эффекты при облучении полимеров, такие как газовыделение, образование двойных связей, окисление, возникновение центров окраски и т.д. Однако, свойства полимерных смол, то есть полимеров в чистом виде, существенно отличаются от свойств полимерных композиций на их основе, содержащих большое количество низкомолекулярных ингредиентов. По этой причине большая часть известных данных о влиянии излучений на полимерные смолы имеет в большей степени научное значение и в гораздо меньшей степени носит прикладной характер. Для получения более реалистичных данных необходимы исследования поведения конкретных марок полимерных материалов и образцов изделий, используемых в БКС и РЭА КА в условиях, максимально приближенных к условиям эксплуатации.

Свойства полимерных материалов определяются химическим строением макромолекул, ингредиентным составом, дисперсностью и однородностью распределения ингредиентов в полимерной композиции. Эти параметры, до определенной степени, регламентированы ГОСТами на соответствующие классы материалов, (например, ГОСТ 26996-86, ГОСТ 16338-85, ГОСТ 10007-80). Однако, точная рецептура полимерной композиции, как правило, неизвестна, а справочных данных о свойствах всех возможных составов данной полимерной композиции не существует даже для таких хорошо известных полимерных материалов, как полиэтилен или поливинилхлорид. Характеристики промышленно выпускаемых полимерных материалов необходимо определять на готовых образцах. Обзор современных методов испытаний электрических, механических и других характеристик полимерных материалов даётся в работе [37]. Разнообразие видов и режимов испытаний связано с необходимостью моделирования наиболее значимых факторов воздействия в заданных условиях эксплуатации (температура, давление, вид и скорость нагружения и т.д.). Кроме указанных режимов испытаний, на количественные результаты испытаний оказывает

влияние способ приготовления и форма образцов. По этой причине они также регламентированы ГОСТом, но результаты испытаний, например, разрывной прочности, полученные на образцах полимерных материалов, не могут быть прямо перенесены на образцы изделий, изготовленные из данного полимерного материала.

Способ переработки полимерного материала (экструзия, прессование и т.д.), а также скорость и условия отвода тепла при охлаждении изделия, определяют вид и распределение надмолекулярных структур в полимере, что может приводить к значительным отличиям свойств полимерного материала в изделии, от свойств того же материала, измеренных на стандартных образцах. По этой причине, как отмечается в [38], условия испытаний не только должны максимально точно моделировать наиболее значимые условия эксплуатации, но и образцы для испытаний должны быть выполнены тем же технологическим способом и отражать наиболее характерные геометрические параметры реального изделия. Только в этом случае результаты испытаний можно использовать для прогнозирования ресурса или определения причин выхода изделия из строя. Например, в [39] утверждается, что для оценки остаточного ресурса и принятия решения о продлении срока службы кабельных изделий в аэрокосмической отрасли эти методы эффективны в четырех случаях:

- условия эксплуатации в разрабатываемом изделии полностью укладываются в требования ТУ на провод или кабель;
- условия эксплуатации по одному или нескольким параметрам выходят за рамки требований ТУ;
- срок службы разрабатываемого изделия превышает гарантийный срок службы применяемого провода или кабеля, указанный в ТУ;
- срок службы провода или кабеля в эксплуатируемом много лет изделии необходимо продлить в связи с решением продления срока службы изделия.

По данным ФГУП «ОКБ КП» [39], полученным на реальных образцах изоляции кабелей и проводов БКС КА, с точки зрения надежности и долговечности в условиях КП, наилучшими показателями обладает изоляция из фторопластов (Ф-4, Ф-4Д, Ф-40С и др.), полиимидного лака с подслоем из канифоли или суспензии Ф-4Д, кремнийорганической резины, стеклооплетка с пропиткой из кремнийорганического лака. Именно эти материалы, а также герметизирующие, клеевые и защитные компаунды на основе эпоксидных смол, полиэтиленовые композиции, составляют на сегодняшний день большую часть полимерных материалов оборудования КА.

С другой стороны, данные [39] находятся в противоречии с данными [6], согласно которым фторопласты не являются радиационно-стойкими материалами, а полиимид и эпоксидные смолы имеют довольно большую скорость испарения при эксплуатации в открытом КП орбиты Земли (таблица 1.6).

Таблица 1.6 – Параметры стойкости полимерных материалов к ФКП.

Материал	Доза облучения начала деструкции (Мрад)	Реактивность к кислороду, $1 \times 10^{-24}$ см <sup>3</sup> /атом кислорода	Скорость испарения в условиях орбитального КП, мкм/год
Фторопласты	0,1	0,03	0,9
Силиконовая резина	1	0,05÷0,2	1,5÷6
Полиимид	100	3	90
Эпоксидные смолы	1000	2,5	75

Таким образом, выбор изолирующих материалов для использования в БАКС КА является задачей минимизации возможных последствий длительного воздействия ФКП.

## **2 Сравнительная оценка эффективности возможных направлений исследований**

### **2.1 Методы ранней регистрации дуги в СЭС КА средствами ТМ**

Энергопотребление современных КА подразумевает уровень порядка 10 кВт, что при напряжении питания БКС в 100 В подразумевает протекание постоянного тока на уровне 100 А через КЭП или КАС, в зависимости от типа КА. Такие токи при таких напряжениях могут питать достаточно длительное время электрическую дугу, не создающую нагрузку за пределами рабочего диапазона СЭП. Интенсивная эрозия электродов и изолирующих материалов при этом создаёт условия, при которых дуговой разряд перейдёт в стадию перманентной дуги с возможными фатальными последствиями для КА. Таким образом, ранняя регистрация дуги в системах ТМ БАКС по уровню тока является обязательной, но не всегда эффективной.

Эффективность регистрации тока с целью обнаружения дугообразования может быть достаточно высокой с точки зрения достоверности определения факта и локализации события путём использования развитой системы датчиков тока и напряжения, равномерно распределённых по схеме СЭП. Такой метод реализован в работе [40] и подтверждён наземными испытаниями. Для опроса датчиков подразумевается создание цепи, сигналы которой анализируются микропроцессором по отработанному алгоритму, распознающему нештатную картину распределения токов.

Распределённый метод регистрации и локализации тока дуги, основанный на измерении магнитного поля проводника с током, предлагается в работе [41]. По плате, реализующей преобразование или стабилизацию тока, напряжения или мощности, равномерно распределены датчики магнитного поля, ориентированные нормально к поверхности. Токи, текущие по плате, создают азимутальные магнитные поля, направленные нормально к поверхности платы. Тем самым, уровень сигнала с датчиков

магнитного вследствие протекания токов по проводникам платы минимален, в то время как ток дуги имеет компоненту вектора плотности тока, направленную нормально к поверхности платы и создающую азимутальное магнитное поле, силовые линии которого направлены нормально к плоскости датчиков, что обеспечивает высокий уровень сигнала с датчиков магнитного поля. Такой подход позволяет селективно регистрировать ток дуги на ранней стадии процесса на фоне токов функционирующих преобразователей или стабилизаторов. Использование системы датчиков на плате позволяет по соотношению сигналов с разных датчиков локализовать место дуги. В [41] в качестве датчиков тока использовались катушки, что ограничивает метод лишь регистрацией импульсных токов. Метод может быть существенно улучшен использованием датчиков Холла, что повысит чувствительность к слабым магнитным полям, а также позволит регистрировать постоянный и медленно изменяющийся однополярный ток.

Одним из маркеров электрической дуги, особенно в начальной стадии горения при относительной низкой температуре проводников, является характерный шум тока, имеющий в своём спектре выделенный диапазон частот [42] (рисунок 2.1). Этот спектр имеет резкое падение плотности спектральной мощности при частотах выше 1 ГГц, что отличает его от спектра ЭССР, простирающегося на большие частоты вплоть до 4 ГГц [43]. Метод обладает высокой чувствительностью, но для локализации мест дугообразования, как и в случае датчиков магнитного поля, требуется большое количество датчиков. Для дополнительного усиления шумов тока можно использовать заземление через индуктивности в точках измерений, как это предложено в [44].

Для максимально эффективной реализации любого из методов распознавания дуги по маркерам потребуются создание искусственной нейронной сети, каждый из узлов которой осуществляет анализ шумов токов и/или вектора магнитного тока, в зависимости от маркера, и передачу результата анализа по сети.

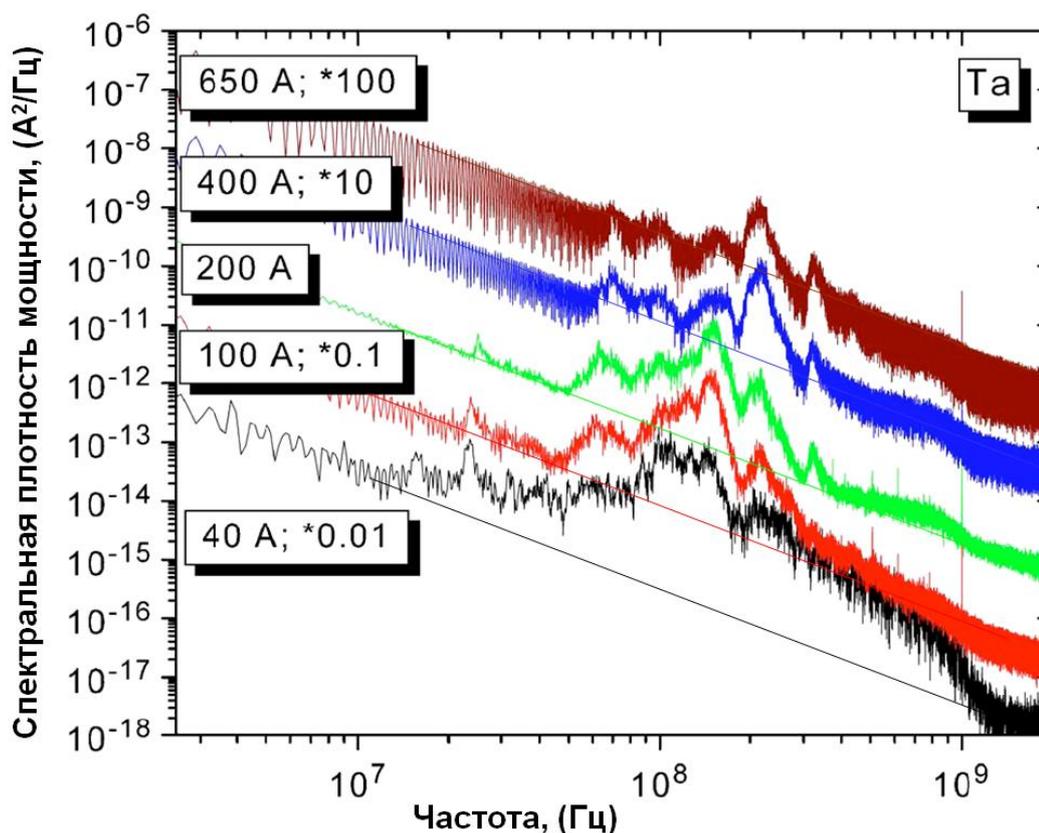


Рисунок 2.1 – Спектральная плотность мощности шумов тока вакуумной дуги при различных токах дуги на тантале [42].

## 2.2 Методы моделирования локальной атмосферы бортовой РЭА

Лабораторное моделирование условий дугообразования в СЭС КА требует точного соответствия состава атмосферы, давления и геометрии системы реальным, на что указывается в стандартных методиках, принятых в аэрокосмических агентствах космических держав [45]. Однако ни одна из известных методик не касается требований на воспроизводство внутренней атмосферы КА, в том числе в модулях БАКС, формируемой не только за счёт внешней остаточной атмосферы, но и за счёт процессов, связанных с испарением и разложением диэлектрических материалов. Старение полимерных материалов неизбежно сопровождается окислительно-деструктивными процессами, в результате которых образуются летучие соединения [46, 47]. Воздействие космического вакуума, ионизирующих излучений стимулирует процессы выделения продуктов радиационной

деструкции, «выпотевания» технологических добавок и примесей из полимерной матрицы [48-50]. Для определения состава выделяющихся продуктов необходима максимально достоверная информация о химическом составе и структуре материалов, которые используются в оборудовании КА. Информация о составе локальной атмосферы, её плотность и условий её ионизации необходима для адекватного моделирования условий возникновения нештатных ситуаций в работе бортовой РЭА.

Моделирование воздействия космического вакуума на материалы КА, прогнозирования нежелательных последствий вследствие ГВ, напрямую связано с разработкой методики обнаружения дефектов бортовой РЭА. Процессы газовыделения и сублимации материалов в вакууме приводят к образованию около КА газового облака, СВА, в состав которого входят также твердые частицы, отрывающиеся от поверхности КА, продукты выхлопа двигателей, газы и твердые частицы, попадающие в космическое пространство из внутренних отсеков КА [51]. Часть газовых частиц СВА возбуждается и ионизируется солнечным ультрафиолетовым излучением и корпускулярными потоками, как это происходит в ионосфере Земли. Из-за наличия СВА давление в непосредственной близости от КА может значительно (иногда на несколько порядков) превышать давление в окружающем космическом пространстве. Под действием внешних сил облако СВА приобретает вытянутую форму, пространственное распределение плотности СВА значительной степени определяется геометрией КА, расположением источников утечки, характеристиками и расположением материалов. Так, для американской ОКС «Скайлэб» в установившемся состоянии, непрерывные потери массы составляли  $10^{-4}$  кг/с. Из этого количества  $2 \cdot 10^{-5}$  кг/с (1,7 кг за сутки) составили утечки из гермоотсеков и  $10^{-5}$  кг/с - утечки ракетного топлива через клапаны двигателей. Остальные массопотери были обусловлены сублимацией порядка 200 различных неметаллических материалов с суммарной площадью около 23000 м<sup>2</sup>.

Плотность атмосферы Земли на высоте полета станции составляет около  $4 \cdot 10^{-12}$  кг/м<sup>3</sup>.

Воздействие СВА на материалы и элементы аппаратуры заключается в:

- а) загрязнение поверхности осаждающимися продуктами СВА;
- б) увеличение светового фона в окрестности КА за счет рассеяния света на частицах СВА и люминесцентного свечения;
- в) возрастание токов утечки в открытых высоковольтных устройствах и снижению их электрической прочности за счет ухудшения вакуума.

Загрязнение отрицательно влияет, на многие элементы КА: иллюминаторы, линзы телескопов и астронавигационных приборов, на солнечные батареи, терморегулирующие покрытия и другие элементы аппаратуры, такие как плазменные зонды, детекторы заряженных частиц малой энергии, коммутирующие устройства и пр. Осадок продуктов СВА состоит главным образом из органических веществ с высоким молекулярным весом. Источниками таких веществ на КА являются продукты сгорания топлива двигателей, краски, электроизоляционные материалы, резина и т.д. На некоторых участках поверхности станции «Скайлэб» после 120 суток полета плотность массы осажденных продуктов СВА превышала 50 мкг/см<sup>2</sup>, что соответствует толщине слоя 0,2...0,3 мкм.

Влияние СВА КА на открытые бортовые высоковольтные устройства, для которых космический вакуум служит естественной электроизоляцией, проявляется повышением давления в промежутках между электродами. При этом в высоковольтных промежутках могут происходить электрические пробой, что является аварийным режимом. Но даже если пробоя нет, в высоковольтных устройствах при ухудшении вакуума увеличиваются токи утечки и возникают кратковременные электрические разряды (микроразряды), что также нарушает нормальную работу устройств и создает электромагнитные помехи для РЭА. Такие явления наблюдались на ОКС «Скайлэб» в первые дни ее полета, когда скорость газовой выделенной была высока. Кроме того, за счет осаждения на изоляторы электропроводящих загрязнений могут возникать нарушения в работе высоковольтных устройств

и РЭА. На рисунке 2.2 представлено газовыделение типичных клеевых материалов в расчете на килограмм после года эксплуатации на орбите GEO при толщине покрытия  $0,01 \text{ г/см}^2$ . Данные получены путем расчета ГВ в лаборатории МИККП (НГТУ), которая специализируется на проведении исследований и выдаче рекомендаций о технической пригодности различных материалов к применению на борту КА. При моделировании ГВ с использованием известной информации о ГВ компонентов материалов предполагалось, что ГВ материала является суммой ГВ отдельных его компонентов. Расчеты были проведены для радиационной обстановки, соответствующей пребыванию КА на орбите GEO. На этой геостационарной орбите величина среднегодовой дозы, поглощенной материалами КА при толщине покрытия  $0,01 \text{ г/см}^2$ , составляет 55 Мрад. Кроме того, в расчете учтено ГВ в результате термического и радиационного старения материалов. Штриховая линия на рисунке 2.2 соответствует максимально допустимой величине ГВ по требованиям стандарта ASTM E 595-77/84/90.

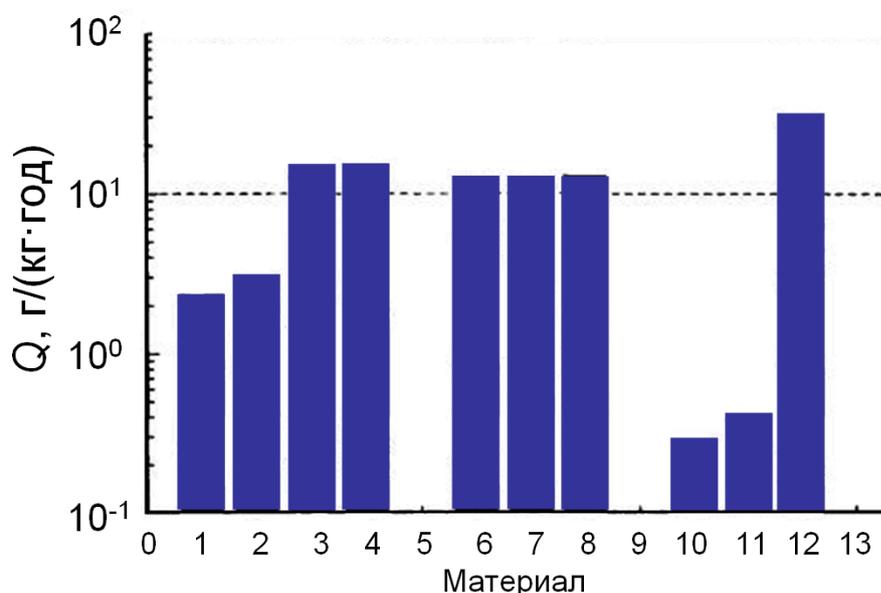


Рисунок 2.2 – Радиационное газовыделение клеевых материалов в расчете на килограмм материала после одного года эксплуатации на орбите GEO при толщине защиты  $0,01 \text{ г/см}^2$ : 1 - герметик «Эластосил»; 2 - клей БФ-4; 3 - клей ВК-9; 4 - клей ВТ-25-200; 5 - клей ГИПК-2312; 6 - клей К-153; 7 - клей К-300-61; 8 - клей К-400; 9 - клей КВК-68; 10 - клей ПУ-2А; 11 - клей ТМ-60; 12 - клей ХВК-2А; 13 - клей КТ-30.

Анализ продуктов ГВ полимерных материалов, проведенный в лаборатории МИККП, показал, что основу СВА составляют около 30 веществ, такие как водород, оксид и диоксид углерода, метан и др. (рисунок 2.3). При этом было обнаружено, что газообразные продукты радиационной деструкции полимеров, рекомендуемых для применения на борту КА, практически не конденсируются на поверхности КА. Поэтому был сделан вывод об отсутствии необходимости проведения термовакуумных испытаний таких материалов в условиях воздействия ионизирующих излучений.

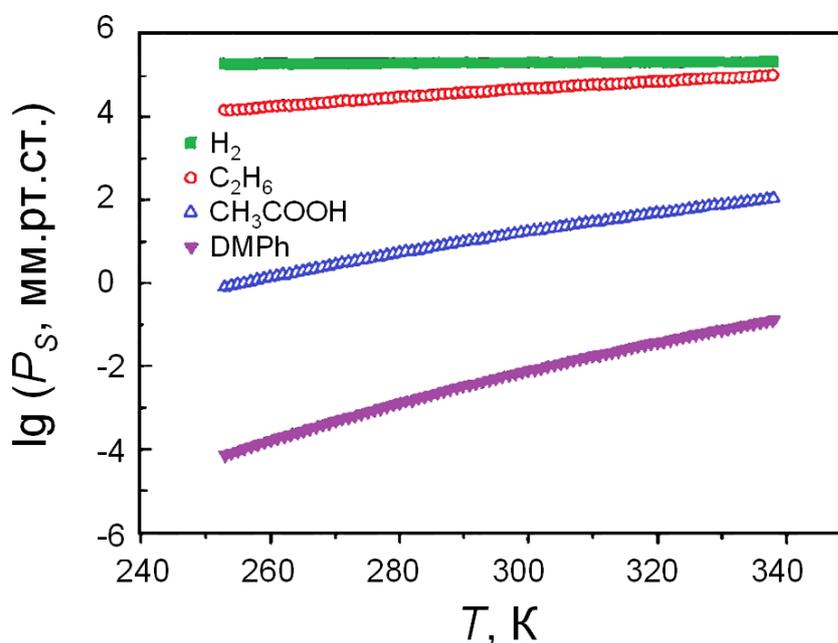


Рисунок 2.3 – Изменение давления паров водорода, этана, уксусной кислоты и диметилфталата в СВА в области температур от минус 20 до +65°C.

Таким образом, для адекватного моделирования поведения дефектов элементов БКС и РЭА КА в условиях эксплуатации требуется определить состав собственной локальной атмосферы. Согласно [51], для многокомпонентных полимерных покрытий, в первом приближении суммарное ГВ можно рассчитать как сумму ГВ каждого из полимерных материалов, взятых со своими весовыми множителями.

### 2.3 Методы неразрушающего контроля дефектности электронных плат

К технологическим дефектам относятся нарушения сплошности изоляционных покрытий и некачественные электрические соединения. При этом, нарушение сплошности изоляции может проявляться как в сквозных дефектах покрытия, так и в виде поровых включений, например, в результате некачественного нанесения лака. Возможные технологические дефекты в изоляционных покрытиях, согласно [52], показаны на рисунке 2.4.

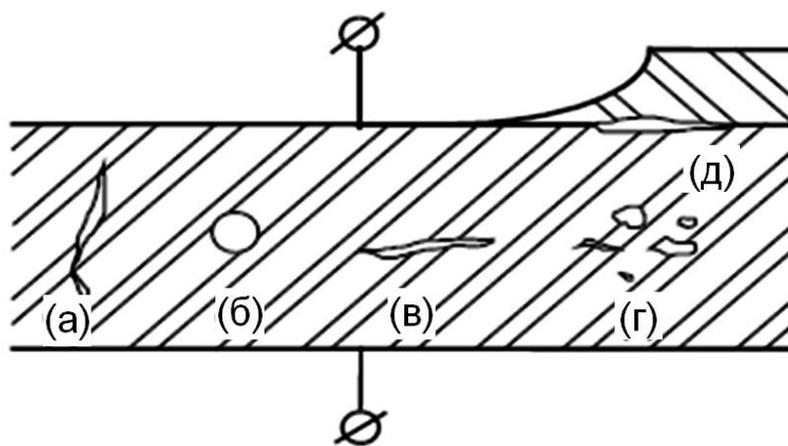


Рисунок 2.4 – Примеры дефектов изоляционных покрытий: а, б, в – поры различной формы и ориентации относительно внешнего поля; г – твердые включения; д – отслоения.

В порах возможно длительное сохранение повышенного давления, что создает опасность возникновения ЧР. Большинство опасных ЧР происходит в порах и трещинах изоляции при сравнительно небольшой напряженности электрического поля. ЧР может быть от 0,01 пКл до  $10^6$  пКл. Начальный ЧР (10...100 пКл) оказывает незначительное влияние на изоляцию, но от уровня ЧР зависит скорость старения изоляции. Безопасный уровень ЧР составляет для твердой изоляции 50 пКл. Критический уровень ЧР превышает 1000 пКл. При таком уровне начинаются интенсивные процессы деструкции полимерной изоляции. ЧР от 1000 до 10000 пКл, воздействующие на изоляцию в течение десятков часов, могут привести к разрушению, вплоть до сжигания полимера. Электрическая дуга загорается в твердой изоляции при

$10^6 \dots 10^7$  пКл. Эти значения ЧР являются недопустимыми ни при коротких перенапряжениях, ни в период тестирования изоляции.

ЧР создают электромагнитные импульсы, что используется в различных методах обнаружения дефектов изоляции в силовых кабельных линиях [53]. Проведенное в работе [52] численное моделирование ЧР показало, что в сферическом дефекте первоначальный ЧР (10 пКл) может происходить, когда размер дефекта достигает 0,5 мм. Допустимый уровень ЧР (50 пКл) начинается, когда размер дефекта достигает 1,08 мм. Критический уровень ЧР (1000 пКл) может возникать при размере пор 4,5 мм. Поскольку ЧР даже первоначального уровня при длительном воздействии могут приводить к ухудшению свойств изоляционного покрытия, то критическим размером дефекта в диэлектрическом покрытии следует считать полость с диаметром более 0,5 мм. Прямое применение методов испытаний силовых кабельных линий для диагностики состояния изоляции БКС и РЭА КА невозможно, но использование высоковольтных импульсов низкой энергии позволяет рассматривать метод ЧР (рефлектометрический метод или *time domain reflectometry* – TDR), как один из возможных. Этот метод уже применяется [54] для обнаружения скрытых дефектов многослойных покрытий, к которым относятся поры. Применение этого метода будет более подробно рассмотрено в разделе 2.4.

Методика тестирования печатных плат включает несколько различных методов, включая и ручное зондирование. При этом по статистике, в [55] отмечается, что при ручном методе тестирования зондами, процент пропускаемых дефектов достигает 25%. Выбор используемых методов тестирования во многом зависит от топологии испытуемого объекта. Однако большинство применяемых методов направлено на обнаружение сквозных дефектов изоляционных покрытий.

Для обнаружения трещин и сквозных нарушений изоляционных покрытий хорошо зарекомендовал себя один из старейших и широко используемых неразрушающих методов контроля: капиллярная

дефектоскопия (контроль с помощью проникающих индикаторных жидкостей) [56]. Капиллярная дефектоскопия используется во многих отраслях, в том числе и для обнаружения дефектов покрытий в аэрокосмической отрасли не только в РФ, но и в США, где этот метод носит название liquid penetrant inspection – LPI. Теоретические основы капиллярного метода неразрушающего контроля и экспериментальные данные о физических свойствах пенетрантов представлены в [57]. Подробный обзор, содержащий принципы, теории и замечания, касающиеся эффективности проникающих систем контроля, проведения испытаний и исчерпывающий список литературы, представлен в [58].

Капиллярный метод является одним из самых простых неразрушающих методов испытаний и используется для проверки широкого спектра деталей: от автомобильных свечей, до критических компонентов авиационных двигателей. Метод основан на усилении видимости дефектов. При капиллярной дефектоскопии на поверхность контролируемого изделия наносят индикаторную жидкость с высокой способностью проникновения в полость дефектов. Излишки жидкости удаляют, затем поверхность посыпают мелкодисперсным порошком, обладающим высокой поглощательной способностью (окись магния, тальк, силикагель). Порошок извлекает индикаторную жидкость из полости дефектов, излишки удаляются обдувкой воздухом. Дефекты устанавливают по видимости смоченного жидкостью порошка, в случае флуоресцентного пенетранта – по свечению при облучении изделия ультрафиолетовыми лучами.

Метод имеет высокую вероятность обнаружения дефектов размером до 0,0127 см. Тем не менее, есть много факторов, которые могут повлиять на чувствительность метода LPI. Метод LPI использует химические вещества, которые могут ухудшать или загрязнять объект испытаний. При испытаниях методом LPI происходит выполнение нескольких операций, которые должны тщательно контролироваться. Существует большое разнообразие пенетрантов - индикаторных веществ, использующихся при капиллярной

дефектоскопии. Согласно военной спецификации Mil-I-25135E, есть пять видов индикаторных веществ: сухие порошки, водные растворы, водные суспензии, неводные суспензии и пенетранты специального применения. Максимальная чувствительность капиллярного метода достигается при использовании люминесцентных пенетрантов. Флуоресценция возникает, когда молекула поглощает фотон лучистой энергии определенной длины волны, а затем излучает энергию с той же или немного большей длиной волны. Пенетранты должны обладать рядом важных характеристик:

- обеспечивать равномерное покрытие испытываемого материала;
- проникать в поверхностные дефекты под действием капиллярных сил;
- легко удаляться с поверхности детали;
- иметь хорошую видимость или свечение;
- быть инертным к испытываемому материалу и не токсичным.

Использование капиллярных методов для обнаружения дефектов изоляции БКС и РЭА может приводить к нарушениям нормального функционирования объектов испытаний. Это ограничивает прямое применение капиллярных методов для диагностики дефектов изоляционных покрытий. В то же время, использование люминесцентных и флуоресцентных материалов является вполне перспективным для контроля качества выполнения технологических операций на стадии производства оборудования КА.

Особенно эффективным представляется использование флуоресцентного метода для обнаружения несквозных дефектов многослойных полимерных покрытий. Так в [59] предложено использование флуоресцентного индикаторного вещества для обнаружения коррозии металлической (алюминий, железо) подложки под полимерным покрытием. Обнаружение дефектов происходит благодаря индуцированной флуоресценции 8-оксихинолин-5-сульфо кислоты с использованием ручной УФ инспекции лампы. В статье показано, что полиуретановые пленки пропускают ионы хлоридов легче, чем ионы алюминия или трехвалентного

железа. В то же время, эпоксидные смолы в большей степени пропускают свет в ближней УФ области, чем полиэфиры или полиуретаны (таблица 2.1) Поскольку многослойные покрытия РЭА КА включают лаки и компаунды на основе эпоксидной смолы, то результаты, приведенные в [59], позволяют предположить, что использование флуоресцентных лаков для диагностики бортовой РЭА является вполне перспективным.

Таблица 2.1 – Светопропускание пленочных покрытий на выбранных длинах волн.

Полимер	Толщина (мкм)	Пропускание при длине волны				
		360 нм	487 нм	495 нм	513 нм	588 нм
Эпоксидная смола	1050	36%	53%	54%	55%	57%
Полиуретан	780	1%	10%	11%	12%	14%
Полиэстер	712	3%	11%	11%	11,5%	16%

На сегодняшний день уже существуют оптические методы контроля многослойных полимерных изоляционных покрытий с использованием флуоресцентных лаков в качестве промежуточного слоя для индикации дефектов [60]. Такой подход является перспективным для неразрушающего контроля дефектности сложных многослойных изоляционных покрытий бортовой РЭА, но пока не является широко распространённым у нас в стране. К сожалению, в настоящее время в основном используются флуоресцентные лаки и компаунды импортного производства. В этом смысле актуален вопрос об импортозамещении флуоресцентных лаков и компаундов, таких, например, как лак UV40, производства компании HumiSeal.

При разработке методики диагностики элементов бортовой РЭА невозможно ограничиться использованием только одного метода. Универсальной методики обнаружения всех типов дефектов изоляционных покрытий не существует. Необходимо использование комплекса различных методов, таких как рефлектометрический метод и метод, использующий флуоресцентные лаки, для обнаружения различных типов дефектов. При

этом для исключения обнаружения ложных дефектов, разрабатываемая методика должна по возможности исключать необходимость «ручного тестирования», что может быть обеспечено только путем максимальной автоматизацией процесса испытания.

#### **2.4 Методы неразрушающего контроля дефектности изоляции кабелей и проводов БКС**

Обнаружение технологических дефектов затрудняет не только многокомпонентность полимерных материалов и использование многослойных покрытий в РЭА КА. Задача усложняется тем, что бортовое оборудование КА соединяется сложными кабельными сетями, которые состоят из жгутов, содержащих одножильные провода, периодически перевязанными шнуровкой, что создает сильно неоднородные профили импеданса на длине линии.

Методика обнаружения дефектов в блоках и кабельной сети РЭА, решает те же задачи, что и методика контроля печатных плат. Она включает диагностику целостности цепей, в том числе и электрических соединителей, и обнаружение нарушений сплошности изоляционных покрытий, то есть условно короткозамкнутых участков. Дефекты изоляции кабельных изделий имеют небольшой размер, в результате чего методы, основанные на измерении импеданса или коэффициента отражения методом наблюдения за формой отражённого сигнала (динамическая рефлектометрия, time-domain-reflectometry - TDR) оказываются неэффективными. Другие известные подходы, такие как методы ЧР или пробоя на постоянном напряжении, широко применяются при диагностировании наземных кабельных линий [53], но малоэффективны в сложных системах бортовых кабельных сетей. Более того, применение таких методов может привести к выходу из строя элементов РЭА.

С точки зрения неразрушающего контроля изоляции БКС КА перспективным представляется метод задержанного импульсного искрового разряда (Pulse Arrested Spark Discharge – PASD) [61]. Метод разработан в Sandia National Laboratories под эгидой Федерального агентства воздушного

транспорта США (FAA) и в 2005 г. на данный метод получен патент США и в настоящее время метод внедрен в систему контроля качества бортовых сетей Центром подтверждения полётопригодности FAA.

Метод испытан на коаксиальных кабелях, экранированных витых парах и сложных однопроволочных пучках, которые обычно встречаются в системах электропроводки самолетов. Диагностика PASD может обнаруживать и определять местонахождение потертостей, трещин, пин-отверстий (проколов), и других дефектов изоляции. Метод PASD смог обнаружить ряд электрических повреждений в изоляции смешанного пучка кабель/провод с неоднородным профилем сопротивления и способен обнаруживать в электроустановочной системе самолета дефекты, связанные с процессами старения, производственными дефектами и повреждениями при установке, а также традиционные дефекты кабельных систем. Практическая реализация метода PASD представлена на рисунке 2.5. Пробой PASD может происходить между двумя соседними проводниками по повреждению изоляции или между проводником и землей, например, оплеткой или металлическим корпусом КА.

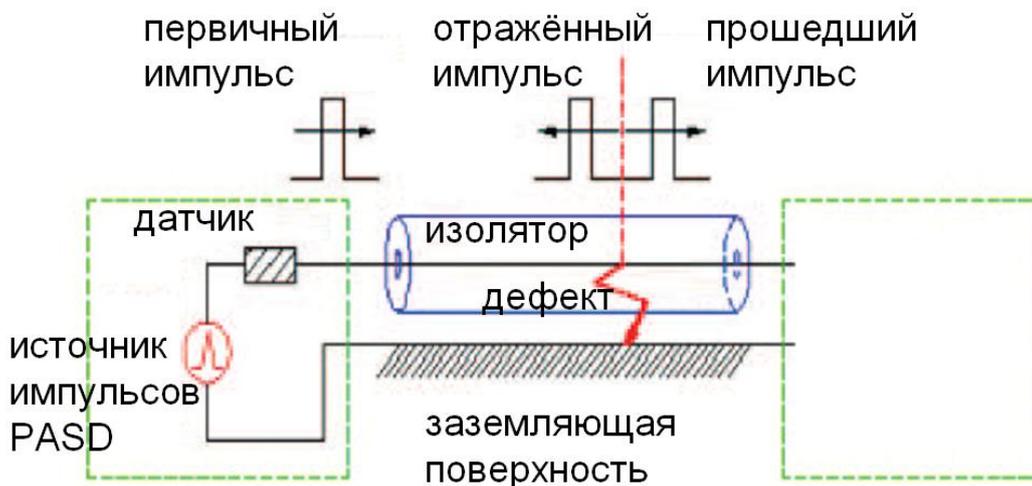


Рисунок 2.5 – Принцип диагностики PASD для дефектов в системе электропроводки. Показан один испытуемый провод. Заземлением может быть смежный изолированный проводник или корпус КА. Электрический пробой возникает из-за поданного высоковольтного импульса низкой энергии.

Чтобы вызвать электрический искровой разряд на месте дефекта изоляции в методе PASD используется высокое напряжение (несколько кВ), низкая энергия (несколько мДж), короткий импульс. Энергии импульса такая же, как энергия статического разряда генерируемого при ходьбе по синтетическому ковру. Уровень энергии достаточно низок, чтобы не повредить типичные изоляционные материалы или проводники в системе электропроводки при всех известных видах повреждений изоляции. Разряд происходит между проводником в тестируемом проводе и другим проводом или заземлением. Сбрасывание импеданса дугой происходит в течение нескольких наносекунд, что приводит к мгновенному короткому замыканию, которое отражает энергию обратно датчикам в точке инъекции. Затем для точного обнаружения положения дефектов используется обычный метод динамической рефлектометрии (измерение коэффициента отражения методом совмещения прямого и отражённого испытательных сигналов: time-domain-reflectometry – TDR).

Как и TDR, испытание методом PASD начинается с характеристики сопротивления провода с помощью импульса низкого напряжения (сотни вольт). Это создает базовую линию, которая имеет решающее значение для возможности PASD работать в условиях неоднородного импеданса кабельных систем. После инъекции импульса низкого напряжения, для обнаружения дефектов, напряжение пошагово поднимают. Если присутствует дефект с размером, превышающим пороговое значение, форма сигнала отклика отклоняется от базовой линии. Поскольку базовая линия определяется в начале каждого испытания, то нет необходимости создавать банк данных исходных характеристик различных типов проводников. Отличие во времени получения сигнала двумя датчиками временного изменения напряжения позволяет определить местоположение дефекта. Для улучшения работы метода в длинных линиях можно использовать инъекцию нескольких импульсов. Эффективность метода PASD доказана для жгутов проводов длиной до 60 м.

Согласно приведенным в [61] данным (таблица 2.2) метод обнаруживает 80% дефектов с воздушным зазором 1 мм (12 из 15 дефектов). При этом эффективность метода PASD при обнаружении потёртостей и отверстий в изоляции с воздушными зазорами ниже 1 мм составила 100%. В то же время, количество необнаруженных дефектов с зазором 3 мм и более резко возрастает. Следует отметить, что в [61] большое внимание уделено доказательству безопасности метода PASD для работоспособности бортовой РЭА.

Таблица 2.2 – Результаты испытаний на испытательном стенде проводки в Центре подтверждения полётопригодности FAA, США (FAA’s Airworthiness Assurance NDC Validation Center - AANC). Размер зазора – воздушный зазор от оголенного провода до ближайшей заземленной поверхности.

<b>Размер зазора</b>	<b>Количество дефектов</b>	<b>Обнаружено</b>	<b>Не обнаружено</b>
Истирание изоляции			
1 mm	7	7	0
3 mm	5	3	2
Отверстие в изоляции			
1 mm	2	2	0
3 mm	6	3	3
Трещина в изоляции			
1 mm	6	3	3
3 mm	1	0	1
<b>ВСЕГО</b>	<b>29</b>	<b>17</b>	<b>12</b>

Другим существующим методом неразрушающего контроля изоляционных покрытий бортовой БКС и РЭА является обнаружение дефектов путем регистрации токов утечки, электромагнитных и ультразвуковых сигналов, возникающих при пробое дефекта изоляции. Существует ряд патентов, например, [62], в которых предложена система для

определения местоположения дефекта изоляции в пучке проводов. Система включает в себя три устройства, которые могут быть использованы в комбинации или отдельно. Первое устройство является регистратором тока утечки, второе устройство содержит контроллер и два или более приемников электромагнитных сигналов излучаемых при возникновении дуги, третье устройство служит для обнаружения электромагнитных и ультразвуковых сигналов. Подобные методы применяют для прогнозирования и обнаружения дефектов в изоляции высоковольтных устройств, как например, в обмотках тяговых электродвигателей [63], но и в этом, относительно простом по сравнению с РЭА КА случае, применение данного метода требует квалифицированной обработки результатов и не исключает ошибок диагностики. Метод [62] вполне применим для диагностики кабелей и проводов БКС КА, но возможность его использования как части комплексного метода обнаружения дефектов в системе РЭА, требует дополнительных исследований его эффективности и безопасности.

Более перспективным представляется метод диагностики представленный в [64]. В данном методе кабель (или провод) не отсоединен от системы и находится под испытательным потенциалом. Для обнаружения дефектов изоляции кабеля, в качестве электропроводящей среды используется источника ионов, расположенный в непосредственной близости от испытуемого объекта (рисунок 2.6). Ток, протекающий в проводнике, изменяется в зависимости от наличия дефектов в изоляции кабеля и потенциала на тестируемом кабеле. Регистрация таких изменений служит для обнаружения дефекта. Эффективность метода зависит от выбора источника плазмы и возможностей регистрирующего оборудования выделить слабый сигнал, вызванный наличием дефекта среди посторонних шумов. Несомненным достоинством метода является небольшие величины энергии нагрузки при проведении испытаний, не оказывающие влияния на состояние полимерной изоляции кабелей и проводов.

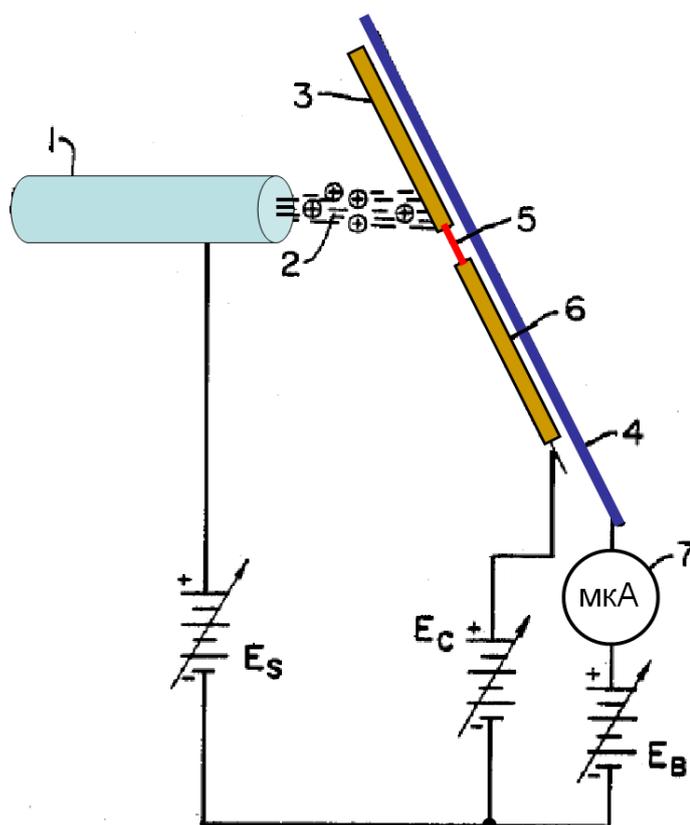


Рисунок 2.6 – Принцип диагностики дефектов с помощью токов утечки через высокоионизованный газ. 1 – подвижный источник ионов; 2 – высокоионизованный поток газа; 3 – провод под нагрузкой (расстояние от источника ионов до 50 мм); 4 – детектирующий электрод; 5 – дефект изоляции; 6 – изоляция провода; 7 – измерительное устройство для регистрации тока (микроамперметр).  $E_s$  – напряжение источника ионов,  $E_c$  – напряжение испытываемого провода заданной формы,  $E_b$  – базовое напряжение на детектирующем электроде для увеличения чувствительности измерения тока.

Рассматриваемый метод позволяет обнаруживать только сквозные дефекты изоляции кабелей и проводов, но он вполне применим в качестве одного из методов в системе тестирования для диагностики изоляции БАКС КА. К сожалению, данные о статистике обнаружения дефектов разных размеров отсутствуют. Кроме того, неизвестен уровень влияния шумов на регистрируемый сигнал тока. В связи с этим, для успешного применения данной методики необходимо проведение исследований для определения

оптимальных параметров источника плазмы и чувствительности регистрирующего оборудования.

Еще один подход к обнаружению дефектов изоляции реализован в [65]. Для обнаружения частичных разрядов или искрения, возникающих в системе кабелей и проводов в ходе испытания, предложено использовать оптоволокно, конструкционно входящее в кабельную систему. В патенте предложены различные конструкции кабеля для регистрации светового сигнала частичных разрядов, но основными всегда являются три элемента: проводник для передачи электрических сигналов, флуоресцентное оптическое волокно для обнаружения излучения, генерируемого частичным разрядом, и прозрачная оболочка. При возникновении частичного разряда в месте нарушения изоляции образуется световой сигнал. Флуоресцентный материал, добавленный в волоконно-оптический кабель, усиливает этот свет, и передает его через оптоволокно на оптический приемник, например, фотоэлектронный умножитель, расположенный на конце флуоресцентных волоконно-оптических кабелей, встроенных в проводку. Используется два светочувствительных сенсора, что позволяет по времени запаздывания сигнала определить месторасположение дефекта изоляции.

Использование волоконно-оптических элементов может быть эффективным не только для разрабатываемого метода диагностики БАКС КА, но также использоваться для обнаружения первичного источника плазмы или поджига дуги в оборудовании. Такими источниками могут являться короткие замыкания дефектных участков или срабатывание плавких предохранителей, то есть в любом случае – источник светового сигнала. Источник света может иметь невысокую интенсивность и быть кратковременным. С этой точки зрения важным элементом данного метода является флуоресцентное оптоволокно, тип и характеристики которого определяют эффективность и точность метода в целом. Типичные значения характеристик оптоволоконных материалов, необходимые для обеспечения работоспособности метода:

- коэффициент преломления сердцевины оптоволоконна  $n_1=1,592$ ;
- коэффициент преломления покрытия оптоволоконна  $n_2=1,416$ ;
- численная апертура  $(n_1^2-n_2^2)^{1/2}$  0.73;
- угол восприятия (в градусах) 93.

Предложенные для использования в [65] типы флуоресцентного оптоволокна представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Типы флуоресцентного оптоволокна, предлагаемые для оптического обнаружения и локализации возникающих частичных разрядов в кабельной системе.

Тип флуоресцентного оптоволокна	F205	F200	F201	F203	F204	F202
Спектральный диапазон поглощения, нм	294-410	315-410	299-477	388-511	441-545	493-580
Спектральный диапазон реэмиссии, нм	406-453	407-455	471-511	484-537	533-581	567-655
Максимальный эмиссионный пик, нм	424	427	493	520	542	625
Цвет	пурпурный	голубой	зеленый	желтый	оранжевый	красный

Необходимо отметить, что ни один из рассмотренных методов не обеспечивает эффективного обнаружения дефектов изоляции проводов и кабелей, сквозных и поровых дефектов многослойных полимерных покрытий и технологических дефектов электрических соединителей одновременно. Для обеспечения надежного обнаружения и локализации дефектов изоляционных покрытий в такой сложной системе, которую представляет собой БКС и РЭА КА необходимо использование различных методов, наиболее эффективных при обнаружении различных типов дефектов.

## **2.5 Методы неразрушающего контроля электрических соединителей**

Возникновение нештатных ситуаций в работе РЭА КА, в том числе и возникновение дуговых явлений, во многом обусловлено наличием дефектов в электрических соединителях. Обнаружение дефектов электрических соединений является важной составляющей разрабатываемого комплексного метода.

В БКС и РЭА КА применяются различные типы электрических соединительных элементов: внутриблочные соединители, соединители ввода/вывода (кабельные соединители) и др. Большая часть таких элементов представлена в докладе представителя компании TE Connectivity (Tyco Electronics), которая является одним из мировых лидеров по производству электрических соединителей [66]. Паяные и обжимные контакты применяются при изготовлении кабельных разветвителей, сростков, хвостовиков, соединителей. Общемировой тенденцией является предпочтение обжимных электрических контактов перед паяными. В докладе [66] приведено обоснование такого предпочтения исходя из сравнения достоинств и недостатков паяных и обжимных электрических соединений, таблица 2.4. В настоящее время обжимные соединители активно внедряются в отечественной космической отрасли [67], тем не менее, в БКС и РЭА КА применяются оба типа соединителей.

Таблица 2.4 – Достоинства и недостатки паянных и обжимных электрических соединений.

Пайка	Обжим
<p>Достоинства:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– не зависит от сечения проводника (один артикул),</li> <li>– не нужен специальный инструмент,</li> <li>– известная технология.</li> </ul>	<p>Достоинства:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– меньше поверхностное сопротивление,</li> <li>– виброустойчивость,</li> <li>– возможна высокая плотность контактов,</li> <li>– не требует обслуживания,</li> <li>– коррозионная стойкость из-за герметичности контакта,</li> <li>– отсутствие нагрева,</li> <li>– отсутствие флюсов и припоев.</li> </ul>
<p>Недостатки:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– большое поверхностное сопротивление,</li> <li>– плохие паяные соединения по всей поверхности проводника,</li> <li>– пары припоя могут осесть на контактах,</li> <li>– короткие замыкания между цепями,</li> <li>– могут оставаться остатки флюса,</li> <li>– деформация или механическая усталость из-за механического воздействия (вес, вибрация).</li> </ul>	<p>Недостатки</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– различные номера для заказа для разного сечения,</li> <li>– необходим инструмент.</li> </ul>

В России на сегодняшний день не существует нормативных документов, определяющих качество обжимных электрических соединений.

В этом смысле основными документами являются стандарты ЕС и США, такие как [68]. Обжимные соединители в РФ сегодня производятся только для некосмического применения, хотя ведутся работы по разработке необходимых технологий в этом направлении, как, например, в [69]. Практическое применение обжимных соединителей является пока достаточно новым и не имеет достаточной статистики отказов.

Основные типы паяных соединений нормируются ГОСТ 19249-73. В этом стандарте нормируются конструктивные элементы паяных швов. Приведены параметры конструктивных элементов паяных швов, толщина паяного шва, величина нахлестки, рациональная форма галтели, регламентированы величины сборочных зазоров для наиболее распространенных сочетаний «паяемый материал – припой». Технические требования к разделке монтажных проводов и креплению жил изложены в ГОСТ 23587-96. Этот стандарт нормирует технические требования к конструкциям разделки монтажных проводов и крепления к контакт-деталям, к наконечникам, к выводам ЭРИ, в изоляторах жил монтажных проводов (далее – жил), предназначенным для выполнения контактных соединений при электрическом монтаже (далее – монтаже), производимом внутри радиоэлектронной аппаратуры, приборов и устройств (далее – аппаратуры). Этот стандарт не распространяется на конструкции разделки и крепления ленточных проводов, на конструкции крепления жил проводов к печатным платам, не устанавливает технических требований к технологическому процессу разделки проводов и крепления жил.

Однако, ни в одном из этих стандартов нет рекомендаций по контролю качества паяных соединений. Этой теме посвящены многочисленные статьи в научных журналах по РЭА. Но в первую очередь целесообразно рассмотреть материалы, приведенные в справочнике по пайке [70], где отмечается, что качество паяных изделий определяется их прочностью, степенью работоспособности, надежностью, коррозионной стойкостью, способностью выполнять специальные функции (теплопроводность,

электропроводность, коммутационные характеристики и т.п.). Обеспечение этих характеристик достигается оптимальными решениями в процессе производства паяного изделия. Дефекты, возникающие при изготовлении паяных изделий, можно разделить на дефекты заготовки и сборки, дефекты паяных соединений и паяных изделий.

К наиболее типичным дефектам паяных соединений относятся поры, раковины, шлаковые и флюсовые включения, непропаи, трещины. Эти дефекты классифицируют на две группы: связанные с заполнением расплавом припоя зазора между соединенными пайкой деталями и возникающие в процессе охлаждения изделия с температуры пайки. Дефекты первой группы связаны главным образом с особенностями заполнения капиллярных зазоров в процессе пайки. Дефекты второй группы обусловлены уменьшением растворимости газов в металлах при переходе их из жидкого состояния в твердое и усадочными явлениями. К ним также относится пористость кристаллизационного и диффузионного происхождения. Кроме пор к дефектам сплошности относятся трещины, которые могут возникать в металле шва, в зоне спаев или в паяемом металле. Большую группу дефектов составляют шлаковые и флюсовые включения.

В справочнике [70] анализируются различные дефекты и причины их появления. Основные дефекты приведены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Основные дефекты паяных соединений.

Вид дефекта	Причина возникновения	Меры предупреждения
Припой не смачивает	Недостаточный нагрев изделия под пайку	Повысить температуру пайки
	Наличие окисной пленки или других загрязнений	Проверить составы травителей и режимы обработки. При пайке в активных газовых средах проверить наличие среды

Вид дефекта	Причина возникновения	Меры предупреждения
	Не обеспечено флюсование	Использовать более активный флюс или газовую среду, увеличить количество применяемых флюсующих средств
	Большая разность температур плавления припоя и флюса	Подобрать припой и флюс в соответствии с требованием технологии пайки
	Не обеспечена оптимальная шероховатость поверхности	Обеспечить подготовку поверхности к облуживанию (механически, химически или другим способом)
	Припой не взаимодействует с паяемым металлом	Заменить состав припоя; повысить температуру пайки; нанести на паяемый материал технологическое покрытие
Припой не затекает в зазор при наличии хорошего смачивания	Увеличен или уменьшен зазор в сравнении с оптимальным	Подобрать оптимальный зазор и обеспечить его поддержание в процессе пайки
Не образуется галтели с обратной стороны шва	Не выдержан оптимальный зазор, большая растворимость паяемого металла в припое	Изменить размер зазора до оптимального; поднять температуру пайки, увеличить количество припоя
	Не выдержан режим нагрева	Обеспечить равномерный прогрев всего изделия до оптимальной температуры
	Плохое качество очистки паяемой поверхности	Обеспечить более тщательную очистку поверхности перед пайкой, применять более активные флюсы или газовые среды
	Отсутствие выхода для газов из замкнутых полостей в зоне шва	Сделать технологические отверстия

Вид дефекта	Причина возникновения	Меры предупреждения
Пористость шва	Недостаточное количество припоя вследствие уноса его при пайке связующим компонентом припоя	Использовать в качестве связующего паяльных паст полимеры, переходящие при нагреве из твердого состояния в газообразное (типа сополимера формальдегида с диаксоланом - СФД)
	Высокая температура нагрева или слишком продолжительный нагрев	Сократить время или снизить температуру пайки
	Испарение компонентов припоя и флюса	Пайку вести в контролируемой среде при минимальных температуре и выдержке; применить способ нагрева, обеспечивающий сокращение времени нагрева
	Влияние флюса или контролируемых сред	Применить пайку в вакууме
	Проникновение газов в зону пайки из диэлектриков при пайке печатных плат	Проверить качество металлизации отверстий печатных плат (толщина покрытия должна быть не менее 25 мкм). Перед пайкой нагревать печатные платы с целью их дегазации. Повысить продолжительность пайки для удаления газообразных компонентов через расплав припоя
Осадки на поверхности печатных плат	Выпадение белого осадка связано с составом флюса, режимом пайки, качеством защитных покрытий	Удалить осадки сухой щеткой или промывкой водой

Вид дефекта	Причина возникновения	Меры предупреждения
	Выпадение темного осадка вследствие неправильного выбора флюса или неполного удаления остатков флюса	Удалить остатки канифольного флюса сразу после пайки с помощью растворителей. Остатки кислотных флюсов удалять с применением нейтрализующих их добавок
Трещины в паяном шве	Быстрое охлаждение после пайки	Уменьшить скорость охлаждения. Использовать нагрев концентрированным источником энергии
	Значительная разность ТКЛР паяемых материалов и припоя	Подобрать материалы с близкими ТКЛР
	Пайка припоями с широким интервалом кристаллизации	Применять композитные материалы
	Образование хрупких фаз	Пересмотреть выбор припоя или режим пайки
Трещины в зоне паяного соединения	Интенсивная диффузия припоя в основной металл	Снизить температуру пайки, сократить время нагрева
	Значительная разность ТКЛР паяемых материалов	Подобрать близкие по ТКЛР материалы. Применить конструктивные или технологические приемы для обеспечения пайки различающихся по ТКЛР материалов. Использовать концентрированные источники нагрева
Смещение и перекос паяных соединений	Плохое крепление изделий перед пайкой	Использовать оснастку и приспособления, обеспечивающие надежную фиксацию изделия в процессе пайки

Вид дефекта	Причина возникновения	Меры предупреждения
Некачественное состояние поверхности изделий после пайки	Окислительная среда в камере пайки	Обеспечить герметичность соединений трубопроводов, подающих защитную среду в камеру пайки
		Создать избыточное давление в системе, подающей защитную среду в камеру пайки
		Проверить состояние внутренней поверхности камеры пайки
	Наличие углерода на поверхности изделий	Проверить полноту удаления смазочного материала на паяемых изделиях
Наплывы или натеки припоя	Изделие недостаточно прогрето при пайке	Повысить температуру пайки в печи, при конвейерной пайке уменьшить скорость движения конвейера
	Наличие перемычек на печатных платах вследствие близкого расположения мест паек	Использовать средства, изменяющие физические характеристики расплава припоя
	В результате низкой температуры пайки, малой выдержки, несоответствия выбранного припоя, плохой смачиваемости поверхности припоем	Повысить температуру расплава, увеличить время контакта печатной платы с припоем. Применить механические средства для удаления избытка припоя
Шероховатая поверхность паяного шва	Высокая температура или слишком продолжительный нагрев	Снизить температуру или сократить время нагрева
Нет электрического контакта впаянного элемента	Ложная пайка, отсутствие спаев	Перепаять место соединения

Вид дефекта	Причина возникновения	Меры предупреждения
Высокое электросопротивление термоэлемента	Пайка произошла не по всей поверхности контакта	Повторно облудить коммутирующие устройства и спаять их
Включения флюса в паяном шве	Температура плавления припоя ниже температуры плавления флюса	Температура плавления флюса должна быть ниже температуры плавления припоя
	Заполнение паяльного зазора происходит с двух сторон	Обеспечить одностороннее заполнение зазора припоем
	Удельный вес флюса больше удельного веса припоя	Подобрать соответствующий флюс
Шлаковые включения в шве	Некачественная подготовка поверхности соединяемых изделий перед пайкой	Обеспечить тщательную подготовку поверхности перед пайкой
	Излишняя продолжительность нагрева в процессе пайки	Выдержать режим пайки
	Использование пламени с избыточным содержанием кислорода	Отрегулировать пламя горелки
Локальная эрозия паяемого материала в зоне соединения	Повышенная растворимость паяемого материала в расплаве припоя	Использовать припой, не вызывающий эрозии, снизить количество вводимого припоя, уменьшить температуру и продолжительность пайки
Деформация и коробление паяного изделия	Неравномерность нагрева и охлаждения изделия	Обеспечить равномерный нагрев и охлаждение изделия
		Применить нагрев концентрированным источником тепла

Вид дефекта	Причина возникновения	Меры предупреждения
		Использовать оснастку, фиксирующую положение изделия при сборке, пайке и охлаждении

Все дефекты, приведенные в таблице 2.5, в результате длительной эксплуатации могут привести к плохому контакту, локальному выделению тепла и, в конечном итоге, могут вызвать нештатное функционирование РЭА или приводить к дугообразованию.

В настоящее время разработаны различные методы и способы для оценки качества паяных изделий. В основном применяют контроль без разрушения и с разрушением. Применение разрушающих методов контроля паяного изделия оговаривается техническими условиями на изделие. При массовом производстве контроль паяных соединений с разрушением не приемлем, поэтому в дальнейшем будем рассматривать только неразрушающие методы контроля паяных соединений.

Визуальный контроль.

Технический осмотр изделия осуществляется невооруженным глазом или с применением лупы в сочетании с измерениями позволяет проверить качество поверхности, заполнение зазоров припоем, полноту галтелей, наличие трещин и других наружных дефектов.

Визуальный контроль применяется для обнаружения самых явных дефектов конструкций и материалов. Внешний осмотр исследуемого объекта на предмет дефектов производится, как с применением оптических средств, так и без них. Главный недостаток визуального контроля заключается в ограниченности такого метода, поскольку он позволяет исследовать только видимые факторы. Тем не менее, визуальный контроль - необходимое звено комплексной дефектоскопии.

Недостатком визуального контроля является невозможность обнаружения скрытых дефектов, а также – влияние человеческого фактора на результат.

### Радиационный контроль.

Область применения методов радиационной дефектоскопии определяется ГОСТ 20426-82. Основным недостатком радиационного контроля является ограниченная разрешающая способность по размерам паяных соединений. Методы радиационного контроля применимы для размеров паяных соединений более 1 мм, что не приемлемо для паяных соединений печатных плат [71].

### Акустический контроль.

К акустическому контролю относится контроль ультразвуком, основанный на способности ультразвуковых колебаний отражаться от поверхности внутренних неоднородностей материала [72]. Этим методом выявляют трещины, поры, раковины, шлаковые включения, незаполнение шва припоем. В [73] приведен подробный систематический указатель работ по дефектоскопии акустическими методами и средствами начиная с 1965 г. Материал разбит на два больших раздела: общий раздел, в котором приведены работы по общим вопросам дефектоскопии акустическими методами, и аппаратура для контроля акустическими методами. Так, в МГТУ им. Н.Э. Баумана разработан прибор для ультразвукового контроля косостыковых паяных соединений по двум схемам: зеркально-теневой – для контроля поверхности разделки и эхо-импульсный – для контроля углов разделки. Контроль ведется наклонным искателем с углом призмы ( $\beta = 50^\circ$ ) дефектоскопами УДМ-1М, УДМ-3, ДУК-66, портативным транзисторным ДУК-66П, специализированными ДУК-11 ИМ, ДУК-1 ЗИМ и др.

Дефекты паяных соединений в двух- и трехслойных конструкциях выявляются акустико-топографическим методом. Он эффективен для контроля дефектов, залегающих на глубине не более 3...5 мм. Преимущество метода – высокая производительность, наглядность результатов, возможность контроля большого ассортимента слоистых материалов. Недостаток метода – разрешающая способность ограничена размерами более 1 мм, что не приемлемо для комплексной диагностики РЭА.

## Вибрационный контроль.

Вибрационная диагностика – метод диагностирования технических систем и оборудования, основанный на анализе параметров вибрации, либо создаваемой работающим оборудованием, либо являющейся вторичной вибрацией, обусловленной структурой исследуемого объекта [55]. Основными преимуществами вибродиагностики являются:

- возможность обнаруживать скрытые дефекты;
- получение информации о состоянии оборудования, находящегося в труднодоступных местах;
- проведение мониторинга и получение информации о дефекте еще на стадии его появления;
- малое время диагностирования.

При вибрационной диагностике как правило исследуются временной сигнал или спектр вибрации того или иного оборудования. Вибрационное диагностирование объектов проводится в три этапа: первичное описание вибрационного состояния объекта, выделение признаков и принятие решения. На этапе поиска информативных признаков ограничивают число измеряемых параметров вибрации, шума и ударов. При этом из множества параметров, характеризующих вибрационный процесс, выделяют только те, которые прямо или косвенно характеризуют состояние объекта. По этим параметрам формулируют информативную систему признаков, используемых при диагностировании. Выбор диагностических параметров вибрации зависит от типов исследуемых механизмов, амплитудного и частотного диапазона измеряемых колебаний.

В низкочастотном диапазоне чаще измеряют параметры виброперемещения, в среднечастотном – виброскорости, а в высокочастотном – виброускорения. Виброперемещение представляет интерес в тех случаях, когда необходимо знать относительное смещение объекта или деформацию. Если исследуют эффективность вибрационных машин, а также воздействие вибраций на организм человека, то изучают

скорость вибрации, поскольку именно она определяет импульс силы и кинетическую энергию. При оценке надежности объектов основным измеряемым параметром является виброускорение.

В бесконтактных измерителях реализуют кинематический метод измерения параметров относительной вибрации на основе использования оптических радиоволновых и др. электромагнитных полей. Наибольшее применение в бесконтактной вибродиагностике нашли оптические методы и средства измерения параметров вибрации, которые по способу выделения информации об измеряемом параметре делят на амплитудные и частотные. К амплитудным методам измерений относят фотоэлектронные, дифракционные и интерференционные методы измерения, а также методы с использованием пространственной модуляции светового потока.

Измерение параметров вибрации, основанное на измерении частоты излучения оптического квантового генератора, отраженного от объекта, проводят измерительными устройствами, действие которых основано на использовании эффекта Доплера. Преобразователи значений вибрации в электрический сигнал делят на два класса: генераторные, преобразующие энергию механических колебаний в электрическую; параметрические, преобразующие механические колебания в изменение параметров электрических цепей, например, индуктивности, емкости, активного сопротивления, частоты или сдвига фаз и т.д.

Для вибродиагностики машин и механизмов используют в основном пьезоэлектрические и электродинамические преобразователи, относящиеся к генераторным, а также индуктивные, вихретоковые и емкостные, относящиеся к параметрическим. Пьезоэлектрические преобразователи применяют для измерения параметров абсолютных колебаний невращающихся частей механизмов. Пьезоэлектрические преобразователи обладают высокими метрологическими свойствами, широким амплитудным и частотным диапазоном, высокой надежностью и сравнительно низкой стоимостью. Основными их недостатками являются высокое выходное

сопротивление и низкая помехозащищенность. В меньшей степени эти недостатки свойственны пьезорезистивным преобразователям, относящимся к классу параметрических преобразователей.

Метод вибрационной диагностики основан на получении данных о вибрации. Любая вибрация содержит в себе гармоники различной частоты. Анализируя амплитуду этих гармоник, можно получить информацию о состоянии оборудования. Данные о вибрации собираются с помощью специального щупа, с помощью датчиков, закрепленных на оборудовании и т. д. (разные приборы используют разные методы получения данных). В работе [74] описаны экспериментальные исследования в области вибродиагностики с использованием встроенных источников колебаний в диапазоне частот от 50 до 1000 Гц с постоянной амплитудой. Приведена методика проведения эксперимента исследований диагностики бортовой РЭА вибрационным методом. Основой предлагаемого метода неразрушающего контроля и диагностирования, производственных дефектов печатных узлов электронных средств, является использование встроенного эмулятора вибрационных тестовых воздействий, установленных непосредственно на печатную плату. Что в свою очередь позволяет производить контроль и диагностику непосредственно в производственном цехе или на месте установки узла электронного средства, неразрушающим способом.

В отличие от классической схемы вибростенда в методике со встроенным источником колебанием генератором звукового сигнала и вольтметром выступает звуковая карта персонального компьютера. Пьезоэлемент заменяет громоздкий вибростенд и вибродатчик. Уменьшение габаритов стенда дает возможность проводить диагностику непосредственно в производственном цехе или на месте установки печатной платы. По результатам экспериментального исследования строится АЧХ исследуемой печатной платы, в исправном состоянии и при внесенных дефектах. Данная

работа не получила развития из-за неоконченной разработки данного подхода, но может представлять интерес для дальнейшей проработки.

Вихретоковый контроль.

Вихретоковый неразрушающий контроль (Eddy current nondestructive testing) – неразрушающий контроль, основанный на анализе взаимодействия внешнего электромагнитного поля с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых в объекте контроля этим полем (ГОСТ 24289-80). В настоящий момент вихретоковый метод неразрушающего контроля является одним из самых точных методов неразрушающего контроля и технической диагностики, толщинометрии, дефектоскопии.

Вихретоковый метод неразрушающего контроля применяется для контроля качества электропроводящих объектов: металлов, сплавов, графита, полупроводников и т. д. Вихретоковые приборы широко используются для обнаружения несплошностей материалов (вихретоковая дефектоскопия), контроля размеров и параметров вибраций (вихретоковая толщинометрия покрытий и виброметрия), определения физико-механических параметров и структурного состояния (структуроскопия), обнаружения электропроводящих объектов (металлоискатели) и для других задач. Объектами вихретокового контроля могут быть электропроводящие прутки, проволока, трубы, листы, пластины, покрытия, в том числе многослойные, железнодорожные рельсы, корпуса атомных реакторов, шарики и ролики подшипников, крепежные детали и многие другие промышленные изделия. Для каждого объекта желательно использовать свою методику вихретокового контроля.

В основе вихретокового метода контроля лежит взаимодействие внешнего электромагнитного поля с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых возбуждающей катушкой в электропроводящем объекте контроля этим полем. В качестве источника электромагнитного поля чаще всего используется индуктивная катушка, которая встроена в вихретоковый преобразователь (вихретоковый датчик). Ток, действующий в катушке

вихретокового преобразователя, создает электромагнитное поле, которое возбуждает вихревые токи в исследуемом металлическом объекте. Электромагнитное поле вихревых токов воздействует на катушку преобразователя и наводит в ней ЭДС или изменяет ее электрическое сопротивление. Сигнал с вихретокового датчика (преобразователя) поступает в электронный блок вихретокового прибора, и полученные данные преобразуются в значения толщины покрытия, электропроводности, размеры трещины и др.

Преимущества вихретокового метода контроля:

- Отсутствие контактной жидкости между вихретоковым датчиком и объектом контроля (в отличие от ультразвукового метода).
- Возможность измерения через зазор от долей миллиметров до нескольких миллиметров (без контакта преобразователя и объекта).
- Высокая чувствительность к микроскопическим дефектам, расположенным непосредственно на поверхности либо близко к поверхности контролируемого металлического объекта (подповерхностные дефекты).
- Высокая точность и повторяемость выявления дефектов.
- Высокая скорость контроля.
- Минимальные требования к состоянию поверхности.
- Возможность контроля покрытий и через покрытия.
- Возможность контроля объектов со сложной геометрией, мест труднодоступа.
- Вихретоковый метод не представляет опасности здоровью оператора.

Руководящие документы по вихретоковому контролю и методические рекомендации включают ГОСТ Р ИСО 15549-2009, ГОСТ 8.283-78, ГОСТ 24289-80, РД-13-03-2006.

Магнитопорошковый и магнитографический методы.

Магнитопорошковый метод связан с образованием в местах дефектов при намагничивании потоков рассеяния (ГОСТ 21105-87). Частицы порошка, наносимые на изделие после намагничивания, оседают в местах дефектов.

Магнитопорошковым методом выявляются дефекты с раскрытием 1...2,5 мкм, глубиной 25 мкм, длиной до 2,5 мм.

Магнитный порошок наносится сухим и мокрым способами. В качестве магнитного порошка используют окалину железа (магнетит), измельченную до состояния пудры. При мокром методе порошок наносится в виде суспензии (вода, масло, керосин). Перед нанесением суспензии контролируемое изделие должно быть обезжирено. Контроль методом намагничивания осуществляется дефектоскопами: переносными (ПМД-70, 77ПМД-3М), передвижным (МД50П), универсальными (УМДЭ-10000, УЭМД-2500) и др. После контроля паяные изделия размагничиваются в переменном магнитном поле. Характеристики серийных магнитных дефектов и приборов размагничивания контролируемого изделия, а также концентрации магнитной суспензии приведены в таблице 2 и 3.

Магнитографический метод (ГОСТ 25225-82) обеспечивает запись на магнитную ленту магнитных полей рассеяния. Лента накладывается на контролируемую поверхность изделия. Информация о результатах контроля считывается с помощью магнитографического дефектоскопа: возникающий на экране электрический сигнал пропорционален величине остаточного магнитного потока полей рассеяния дефектов, записанных на ленте.

Намагничивание контролируемого изделия производится также возбуждением вихревых токов с помощью переменного электромагнитного поля. Контроль осуществляется измерением воздействия поля вихревых токов на возбуждающий преобразователь. Разработано несколько методов электромагнитного контроля: фазовый, амплитудно-фазовый, амплитудно-частотный, многочастотный и их сочетания. Наибольшее применение нашли амплитудно-фазовый и амплитудно-частотный методы.

Недостатком данных методов является необходимость нанесения магнитного порошка на изделие, который может вызвать замыкание между отдельными проводниками на печатной плате. Последующее удаление

магнитного порошка из труднодоступных мест может оказаться невозможным.

Капиллярные методы контроля.

Капиллярные методы контроля (ГОСТ 18442-80) основаны на проникновении в дефекты контролируемого изделия специальных индикаторных пенетрантов, имеющих цветовой тон или люминесцирующих при воздействии УФИ. Этот метод применяется для обнаружения трещин, непропаев, пор и других дефектов. Последовательность операций контроля капиллярным методом: нанесение пенетранта и удаление его (протиркой салфетками, промывкой водой, специальными составами и др.) после выдержки, необходимой для затенения дефектов; покрытие места контроля мелкодисперсным порошком или специальными красками, которые проявляют оставшийся в дефектных местах пенетрант. Образующийся след на месте дефекта можно наблюдать невооруженным глазом.

Люминесцентный метод контроля (ГОСТ 26182-84) отличается повышенной контрастностью пенетранта в результате введения в него люминесцирующих в УФ-свете веществ. В качестве индикаторного пенетранта при люминесцентном методе контроля нашел применение керосин. Добавление в него минеральных масел усиливает люминесценцию. Фосфоресцирующим компонентом в керосине является норпол, дающий яркое желто-зеленое свечение. В качестве индикаторных пенетрантов можно применять люминесцентные жидкости типа ЛЖ (ЛЖ-1, ЛЖ-2, ЛЖ-4, ЛЖ-5, ЛЖ-6А и др.). После нанесения на место контроля эти жидкости удаляются водой, при необходимости с добавкой эмульгаторов ОП-7 или ОП-10. Необходима последующая сушка детали.

Дефекты могут обнаруживаться также вследствие различного отражения дневного света от проявителя и пенетранта. В состав индикаторных пенетрантов в этом случае вводят жирорастворимый темно-красный анилиновый краситель «Судан IV». Режим контроля с использованием керосино-скипидарного раствора этого красителя

следующий: время пропитки 8...15 мин; время проявления 3...30 мин; очистка – протирка содовым раствором. Недостатком люминесцентного метода контроля является привнесение на печатную плату пенантранта с последующим его удалением.

Люминесцентно-цветной метод (ОСТ 108.004.101-80) основан на использовании люминофоров-красителей, светящихся в оранжево-красной области спектра при воздействии ультрафиолетового излучения и избирательно отражающих дневной свет в красной области спектра. Люминесцентно-цветной контроль паяных соединений осуществляют с помощью комплекта АЭРО-12А, состоящего из флуоресцирующего красителя родамина-С, растворителя - гидролизного или технического этилового спирта и эмульгатора ОП-7. Очистка ведется последовательно водой, очистителем на основе эмульгатора ОП-7 и этиловым спиртом, окончательная очистка – промывка водой. Проявителем служит лак на основе белой нитроэмали «Экстра», коллодия и ацетона. Люминесцентно-цветной метод позволяет выявлять дефекты паяных соединений как из ферромагнитных, так и неферромагнитных металлов.

Для выявления дефектов, не обнаруживаемых люминесцентным, цветным и люминесцентно-цветным методами, используют газосорбционный радиоизотопный метод контроля. В качестве вещества, заполняющего поверхностные дефекты, в этом случае применяют не жидкие пенетранты, а газообразный  $\beta$ -радиоактивный газ. Излучение газа, сорбированного поверхностными дефектами, можно зарегистрировать на рентгеновской пленке или люминесцирующими преобразователями излучения. Контроль дефектов этим методом включает обезгаживание изделия в вакуумной камере, наполнение камеры  $\beta$ -излучающим газом, удаление изделия из камеры, получение изображения на рентгеновской пленке или выявление дефектов с помощью люминесцирующих преобразователей.

Недостатком люминесцентно-цветового метода контроля является применение люминофоров-красителей с необходимостью их последующего удаления вплоть до промывки водой.

Люминесцентный гидравлический метод контроля (ГОСТ 18442-80) основан на использовании капиллярных свойств жидкостей, светящихся под действием ультрафиолетового излучения. При контроле используются люминесцентные жидкости: шубекол, ЛЖ-1, ЛЖ-2, ЛЖ-4, ЛЖ-5 и др.

Недостаток люминесцентно-гидравлического метода контроля заключается в необходимости погружения или пропитки элементов печатных плат специальных люминесцентных жидкостей, которые в последствие необходимо удалять.

Рефлектометрический метод.

Определение мест повреждений с помощью рефлектометрии (рефлектометрами) дает возможность предельно быстрого восстановления передачи данных. В настоящее время предъявляются более жесткие требования к эксплуатации телекоммуникационных сетей, в том числе по выявлению и устранению аварийных ситуаций в кратчайшие сроки. С максимальной эффективностью эта задача может быть решена только с помощью современного оборудования, в том числе и передвижных лабораторий.

Приборы и оборудование для диагностики телекоммуникационных и электрических кабелей:

- приборы для локализации мест неисправности (измерительные мосты, рефлектометры, газоанализаторы);
- преобразователи дефектов (для преобразования высокоомных дефектов в кабелях сигнальных, управления и связи);
- приборы для приемочных измерений (для анализа сопротивления изоляции, сопротивления шлейфа, обнаружения паразитных наводок, измерения напряжения и других электрических характеристик);
- приборы для контроля за оболочкой кабеля (мультиплексоры).

Тепловой контроль.

Тепловой метод неразрушающего контроля основан на измерении, мониторинге и анализе температуры контролируемых объектов. Тепловой метод включает следующие виды неразрушающего контроля:

- тепловизионный контроль;
- контроль температуры;
- контроль теплопроводности;
- контроль плотности тепловых потоков.

Условием применения контроля температуры является наличие в контролируемом объекте тепловых потоков. Процесс передачи тепловой энергии, выделение или поглощение тепла в объекте приводит к тому, что его температура изменяется относительно температуры окружающей среды. Распределение температуры по поверхности объекта является основным параметром в тепловом методе, так как несет информацию об особенностях процесса теплопередачи, режиме работы объекта, его внутренней структуре и наличии скрытых внутренних дефектов. Объектами теплового контроля являются такие объекты, как стены зданий, работающий электродвигатель, контактные электрические соединения под нагрузкой и т.д., так и объекты, в которых есть переходные тепловые процессы.

Тепловизионная техническая диагностика получила широкое распространение в энергетике, строительстве и промышленности. Основное преимущество метода — контроль температуры объектов без вывода из эксплуатации и без какого-либо воздействия на них. Очевидно, что успешному внедрению теплового метода контроля способствует развитие средств измерений, в основном тепловизионной техники. Доля задач теплового контроля (контроля температуры), решаемая с помощью тепловизоров настолько велика, что часто употребляется термин тепловизионный контроль.

Тепловизионное обследование является хорошо известным и перспективным методом контроля состояния высоковольтного оборудования

и воздушных линий электропередач. Дефекты сварки, опрессовки соединителей, повреждение проводов распорками, разрывы проводов и шлейфов обнаруживаются на термограммах в виде локальных зон нагрева. Необходимым условием при тепловизионном обследовании является наличие токовой нагрузки ВЛ не менее 50% от номинальной [75]. На сегодняшний день, тепловизионный контроль является одним из самых востребованных и эффективных видом неразрушающего контроля состояния зданий, высоковольтных трансформаторов, тяговых электродвигателей, воздушных линий электропередач и другого оборудования.

В авиакосмической промышленности тепловой контроль является одним из основных методов обнаружения скрытых дефектов (расслоений и ударных повреждений) в композиционных материалах. В то же время, существуют приложения тепловизионного метода для контроля дефектности электронных плат [76], хотя и не имеющие столь широкого распространения, как в области контроля строительных сооружений и высоковольтного оборудования. Учитывая возросшие возможности тепловизионной техники, следует ожидать распространения тепловизионных методов контроля и в области низковольтного электро- и радиооборудования уже в ближайшее время.

Одним из основных средств при тепловом методе неразрушающего контроля является тепловизор или инфракрасная камера. Применение тепловизоров не ограничивается задачами неразрушающего контроля. Тепловизор – профессиональный инфракрасный инструмент для визуализации тепловых полей и дистанционного измерения температуры, нашел применение в военной технике, навигации, медицине, системах безопасности и охраны, противопожарном деле, экологии.

Тепловой контроль тепловизором (тепловизионная диагностика) проводят для выявления скрытых дефектов, приводящих к утечкам тепла, и определения их параметров для оценки качества и соответствий

контролируемых объектов требованиям нормативной технической документации.

При контроле температуры помимо тепловизора или инфракрасной камеры, используют также и другие средства измерений: пирометры (инфракрасные термометры), приборы для определения параметров окружающей среды (контактные термометры, измерители влажности, анемометры, измерители плотности теплового потока, в том числе самопишущие регистраторы перечисленных величин с электронной памятью).

Тепловизионное обследование относится к передовым технологиям неразрушающего контроля качества выполненных работ и решает задачи поиска скрытых дефектов и мест утечек тепла. Профессиональным тепловизором производится сканирование конструкций, зданий и сооружений (кровля и внешние стены) в инфракрасном спектре излучения, при этом регистрируя в виде графических изображений испускаемое объектом тепловое излучение.

Измерение температуры (контроль температуры) является одним из самых важных параметров при энергетических обследованиях, энергоаудите, контроле окружающей среды, а также позволяет определить какая температура у того или иного объекта и др.

## **2.6 Анализ применимости методов диагностики диэлектриков к комплексной диагностике БАКС КА на устойчивость к дугообразованию**

Развитие космической техники ставит жесткие требования: улучшение габаритно-массовых характеристик, увеличение функциональных возможностей и повышение сроков активного существования. При этом, специфика РЭА космического применения состоит в том, что она не ориентирована на массовый выпуск продукции, имеет короткий жизненный цикл и характеризуется быстрой сменой типов [77]. Более 60% базы, используемой в бортовой аппаратуре КА, приобретается у иностранных поставщиков, при этом для РФ действуют экспортные ограничения на

приобретение компонентов качества Military и Space. Этим объясняется существующая проблема обеспечения космической отрасли отечественной элементной базой для аппаратуры РКТ.

Разнообразие применяемых типов сложных изделий при крайне малой серийности и исключительно высоким требованиям надежности и стойкости к дестабилизирующим факторам космического пространства для обеспечения длительных сроков функционирования накладывают на методы испытаний жесткие ограничения. В частности, малая серийность и высокая стоимость испытуемого оборудования не позволяет широко применять обычные, в случае серийного производства РЭА, статистические методы для анализа причин выхода оборудования из строя или оценок остаточного ресурса. По этим же причинам для разрабатываемой комплексной методики обнаружения дефектов могут использоваться только неразрушающие методы контроля. Дополнительное условие накладывает специфика эксплуатации КА, которая не позволяет проводить обычные в земных условиях работы ремонту и обслуживанию аппаратуры во время эксплуатации. Невозможность проведения статистического анализа возникновения нештатных ситуаций и обслуживания оборудования в ходе эксплуатации накладывает на методы контроля дефектности дополнительное требование отсутствия ложных обнаружений. В идеале, разрабатываемая комплексная методика обнаружения дефектов должна обеспечивать сто процентное обнаружение заданного класса дефектов. На практике [52] обычно считают приемлемым уровень обнаружения дефектов не менее 80%.

Обеспечение надежности электронных устройств и систем РЭА КА включает в себя контроль качества многослойных печатных плат, силовых блоков, соединительных и конструктивных элементов. Немаловажную роль в обеспечении надежности играет БКС, объединяющая узлы и блоки в единое целое [78]. От качества изоляции БКС и электрических соединителей во многом зависит надежность работы всего бортового оборудования КА. Своевременное выявление дефектов и неисправностей является

необходимым условием обеспечения надежной работы КА. В то же время, разнообразие испытываемых элементов и материалов БКС и РЭА КА, а также применяемых технологий при производстве бортового оборудования, приводит к возможности возникновения широкого спектра различных дефектов. В результате, для обнаружения дефектов в такой сложной системе, которую представляет собой БКС и РЭА КА, не может использоваться какой-то один метод, комплексная методика должна включать спектр методов неразрушающего контроля, обеспечивающий обнаружение по-возможности максимальное количество дефектов разных типов [55]. Таким образом, разрабатываемая комплексная методика диагностики должна включать максимальное количество методов, ориентированных на определенные типы дефектов и обеспечивать не менее 80% вероятность обнаружения дефектов каждого типа.

Обнаружение дефектов невозможно без создания ситуации, провоцирующей проявление дефектной области в условиях эксплуатации. В частности, это означает необходимость получения данных о составе и характеристиках полимерных материалов изоляционных покрытий и адекватного моделирования локальной атмосферы [51] в области предполагаемых дефектов. Все разнообразные методы неразрушающего контроля дефектов и неисправностей РЭА можно разделить на две большие группы: электрические (внутрисхемное и функциональное тестирование) и неэлектрические (оптический, капиллярный, рентгеноскопический и тепловой контроль) [79]. Далеко не все из известных методов неразрушающего контроля применимы для контроля качества изоляционных покрытий.

Оптический контроль качества РЭА осуществляется визуальным способом с использованием штативных луп и стереоскопических оптических систем [55]. Такой контроль позволяет обнаружить отсутствующие электрические и конструкционные компоненты, наличие деформаций выводов компонентов, неправильную маркировку, обрывы проводников и

паразитные перемычки, не пропаянные соединения и другие дефекты. Недостатками оптического контроля является то, что он не позволяет контролировать проводники, контактные площадки и выводы, расположенные под корпусами компонентов. Осмотр также не позволяет выявлять латентные дефекты многослойной изоляции, такие как наличие не сквозных пор и истираний. Главным недостатком оптических методов контроля является большой процент пропускаемых дефектов (до 25%). Тем не менее, оптические методы контроля являются неотъемлемой частью комплексной методики диагностики, позволяющей проводить отбраковку по наиболее очевидным дефектам изоляционных покрытий.

Капиллярные методы, как и магнитопорошковые методы, в большинстве своем, не могут быть использованы для обнаружения дефектов в изоляционных покрытиях БКС и РЭА КА. Такие методы, как ЛТИ [58], успешно используются для обнаружения дефектов конструктивных элементов летательных аппаратов, в том числе и наиболее ответственных. Однако, методы, основанные на использовании пенетрантов, требуют нанесения на испытываемые поверхности большого количества индикативных веществ [57], что создает опасность нарушения работоспособности испытываемого БКС и РЭА КА. В то же время, методы диагностики, использующие флуоресцентные покрытия в качестве индикативного слоя в многослойном покрытии, находят сегодня применение при диагностике состояния плат и подложек [59]. Эти методы уже получили практическую реализацию для дефектоскопии многослойных изоляционных покрытий [60]. Флуоресцентные методы, использующие в качестве индикативного слоя флуоресцентные слои полимера позволяют обнаруживать не только сквозные дефекты, но и диагностировать некачественное покрытие послойно, либо по минимальной толщине. Эффективность таких подходов во многом зависит от оптимальности выбора флуоресцентных агентов. Для каждого данного типа покрытия выбор агентов должен определяться химической инертностью ко всем металлическим и полимерным материалам испытываемого объекта, а

также величиной коэффициента поглощения прозрачных слоев покрытия на длине излучения флуоресцентного агента. Основной трудностью для реализации данной методики является практически полное отсутствие флуоресцентных лаков и компаундов отечественного производства.

Рентгеноскопический (ГОСТ 20426-82) [71] и ультразвуковой [72] виды контроля, имеют слишком большую погрешность. Кроме того, использование рентгеновского излучения при многократных испытаниях может приводить накоплению радиации и нарушению штатного функционирования элементов РЭА. Использование высокоэнергетических источников излучения может оказывать влияние на нормальное функционирование чувствительных элементов других дефектоскопических методов. По указанным причинам эти виды контроля не могут рассматриваться как возможные составляющие комплексной методики обнаружения дефектов в БКС и РЭА КА.

Прямое применение тепловых методов контроля [75] для обнаружения дефектов в изоляционных покрытиях затруднено вследствие небольших, с точки зрения применимости данных методов, толщин покрытий. В то же время методы тепловой диагностики обладают рядом достоинств, таких например, как отсутствие влияния на работоспособность элементов РЭА, индикаторным элементом данных методов является сам объект испытаний и др. Применение тепловой диагностики для выявления дефектов электрических соединительных элементов представляется вполне перспективным. Температура нагрева соединительного элемента вихревыми токами Фуко напрямую зависит от сопротивления контакта. Таким образом применение вихретоковых методов (ГОСТ 24289-80, ГОСТ Р ИСО 15549-2009, РД-13-03-2006) для тепловой диагностики электрических соединительных элементов позволит локализовать тепловое воздействие в области испытываемого соединения, обеспечив, тем самым, одновременно безопасность чувствительных элементов РЭА, с одной стороны, и определение месторасположения дефекта, с другой.

Функциональное тестирование применяется вслед за оптическим контролем. Однако такое тестирование позволяет проверить работоспособность РЭА в сборе только на ограниченном наборе входных сигналов и не позволяет локализовать дефекты и неисправности. Кроме того при подаче напряжения питания узлы РЭА, содержащие дефекты и неисправности, могут получить серьезные повреждения.

Внутрисхемное тестирование наиболее универсальный метод контроля качества. Оно позволяет обнаружить отсутствующие или неправильно установленные компоненты, дефектные компоненты, паразитные перемычки (короткие замыкания) и обрывы проводников и т.д. Однако, если на плате есть непропаянные выводы компонентов, а тестирование производится путем подключения зонда непосредственно к выводу, дефект печатного монтажа не будет выявлен, поскольку зонд во время проверки прижмет вывод к контактной площадке.

Функциональное и внутрисхемное тестирование элементов БКС и РЭА КА производится на всех этапах сборки. Универсальность этих способов тестирования не позволяет использовать их для обнаружения неявных, то есть не приводящих к сиюминутным нарушениям функционирования, или латентных, то есть внутренних и не проявляющихся в течение длительного времени, дефектов. Как и оптические способы обнаружения дефектов, функциональное и внутрисхемное тестирование являются обязательным этапом контроля качества и не могут быть заменены другими специальными методами дефектоскопии.

С точки зрения разработки комплексной методики обнаружения дефектов электрических соединительных элементов и латентных дефектов изоляции, следует выделить несколько частных подходов. В первую очередь это касается хорошо зарекомендовавших себя рефлексометрических методов аналогичны методу PASD [61]. Использование высоковольтных импульсов низкой энергии позволяет обнаруживать и локализовать большинство типов нарушений изоляционных покрытий, включая латентные дефекты. При этом

дополнительным способом обнаружения дефекта при реализации данной методики является использование в качестве детектора оптоволоконного кабеля, в оптическом волокне которого присутствуют флуоресцентные агенты [65]. Использование данного подхода позволит повысить эффективность и надежность импульсного метода рефлексометрии.

Еще одно перспективное направление представлено в ионно-плазменном методе обнаружения дефектов изоляционных покрытий [64]. Данный метод позволяет создавать высокоионизованное облако плазмы в локальной области предполагаемого дефекта. Источник ионизованной плазмы может быть как стационарного, так и подвижного исполнения, но должен обеспечивать необходимую плотность ионизованного газа в области предполагаемого дефекта. При этом, возникающие в ходе испытания токи могут быть достаточно велики при тестировании проводов и кабелей БКС, но в цепях элементов РЭА, проходящих испытание, необходимо создать испытательные контуры для обеспечения безопасности чувствительных элементов РЭА.

## **2.7 Сравнительный анализ методов моделирования процессов в модулях РЭА**

Моделирование распространения электрических сигналов сводится к аналитическому или численному решению интегральных или дифференциальных уравнений в частотной или временной области. Аналитические решения точны, но получены лишь для ограниченного круга простых структур. Численные решения приближены, но применимы к произвольным структурам и достаточны для большинства практических приложений. Аналитический обзор различных подходов к моделированию представлен в [80].

Строгое решение задачи вычислительного моделирования требует численного решения уравнений Максвелла для граничных условий при начальных значениях, задаваемых электрическими сигналами. Однако необходимые для этого вычислительные затраты оказываются крайне

высокими даже для относительно простых конфигураций. Поэтому такой анализ, называемый электродинамическим или полноволновым (поскольку он учитывает все типы волн, возникающие в межсоединениях), используется при анализе межсоединений, как правило, только на частотах в десятки и сотни гигагерц.

При подходе, соответствующем решению стационарной задачи, делается упрощающее предположение, что в межсоединениях отсутствуют потери, дисперсия и высшие типы волн, и может распространяться только основная поперечная волна. Это позволяет свести уравнения Максвелла к уравнениям, решение которых гораздо проще, но достаточно для большинства практических приложений. Этот случай известен как квазистатический подход, и именно он может быть применен в настоящем проекте.

В [80] выделяется метод моментов MOM. MOM выполняет решение уравнений Максвелла в интегральной форме в частотной области. Данный метод применяют для решения задач, в которых присутствуют токи в металлических или диэлектрических структурах и излучение в свободное пространство. Эти структуры должны быть электрически малыми и обычно являются металлическими, однако специальные расширения метода допускают наличие диэлектриков в виде покрытий или объемных элементов конечных размеров. В этом методе дискретизируется только интересующая структура, а не свободное пространство, как при решении уравнений для нахождения поля в объеме. В частности, он удобен для внешних задач (открытых геометрий) и для нескольких различных линейных и однородных сред. Метод моментов подходит для сочетания с аналитическими и численными процедурами, такими как GTD и UTD. При объединении с аналитическими методами, например, на основе теории линий передачи, можно решить много сложных задач, например точное и надёжное вычисление высоких значений эффективности экранирования или наводок на экранированные кабели. Предложено и совместное использование

разложения матрицы методом MEI и метода моментов, ускоряющее решение в несколько раз. MOM требует дискретизации сеткой не объёма, а только поверхности, поэтому затраты на эту процедуру относительно малы.

Очень интенсивно стало использоваться прямое решение дифференциальных уравнений Максвелла конечно-разностными методами во временной области FDTD и FVTD [81]), достоинствами которых являются простота математических формулировок и учёт произвольных свойств материалов. Метод представляет собой простую схему дискретизации уравнения Максвелла, записанных в дифференциальной форме. Сетки для электрического и магнитного полей смещены по отношению друг к другу на половину шага дискретизации по каждой из пространственных переменных и по времени. Конечно-разностные уравнения позволяют определить электрические и магнитные поля на данном временном шаге на основании известных значений полей на предыдущем, и при заданных начальных условиях вычислительная процедура дает решение во времени от начала отсчета с заданным временным шагом.

Намного сложнее математические формулировки, а также построение сетки, в МКЭ во временной области МКЭ, но они обеспечивают более точное моделирование на стыках частей сложных структур. Стоит отметить, что МКЭ является универсальным, что позволяет решать практически любые системы дифференциальных и интегро-дифференциальных уравнений в частных производных в неоднородной геометрии со сложными граничными условиями. Однако этот факт не гарантирует, что решение может быть получено только при соблюдении внутренней непротиворечивости математической модели. Одни и те же дифференциальные уравнения при вариации параметров могут описывать различные процессы, численное моделирование которых требует специфических методов в рамках общего подхода.

Метод MEI, в котором так же, как в методе конечных разностей, используется аппроксимация производных конечными разностями и за счёт

этого получается разреженная (а не плотная, как в методе моментов) матрица. Разработаны его приложения к решению различных задач, например, вычисления параметров линий. Итеративные методы могут применяться непосредственно к операторному уравнению, без формирования всей матрицы системы линейных алгебраических уравнений, как в методе моментов.

Сравнение разных подходов к моделированию для структур различной сложности показано в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Сравнение разных подходов к моделированию (ИУ – интегральные уравнения, ДУ – дифференциальные уравнения).

Наименование	Частотная область		Временная область	
	ИУ (ММ)	ДУ	ИУ	ДУ
Среда:				
линейная, с потерями	+	+	+	+
дисперсная	+	+	–	0
анизотропная	+	+	0	+
Среда:				
неоднородная	0	+	0	+
нелинейная, изменяющаяся во времени	–	–	–	+
Объект:				
провод	+	0	+	0
замкнутая поверхность	+	+	+	+
открытая поверхность	+	0	+	0
проницаемый объём	+	+	+	+
Граничные условия:				
внутренняя задача	+	+	+	+
внешняя задача (открытые геометрии)	+	0	+	0
полупространство	+	0	0	0
Затраты на:				
дискретизацию сеткой	+	0	+	0
использование симметрии	+	+	0	0
вычисление поля в дальней зоне	+	0	+	0

Наименование	Частотная область		Временная область	
	ИУ (ММ)	ДУ	ИУ	ДУ
Пригодность к гибридизации с: численными процедурами	+	+	+	0
аналитическими процедурами	+	0	0	0
GTD/UTD	+	–	0	–
<b>Примечание.</b>				
+	<i>очень пригоден или наиболее выгоден</i>			
0	<i>средне пригоден или нейтрален</i>			
–	<i>непригоден или наименее выгоден</i>			

Анализ методов решения показал, что для «планарных» структур лучше всего подходит метод моментов, и поэтому именно его рекомендуется использовать для анализа разводки печатных плат, пассивных элементов, соединений интегральных схем, и планарных антенн. Для «объемных» структур, таких как переходные соединения (коаксиальная линия–микроразветвленная линия, коаксиальная линия–волновод и т.п.), разъемы, корпуса, объемные резонаторы, волноводы или объемные антенны, больше подходят методы МКЭ или FDTD.

Методы MOM и МКЭ хорошо работают в частотной области [82], что делает их более пригодными, чем метод FDTD, для анализа цепей с большой добротностью. Примеры цепей, попадающих в эту категорию, могут включать фильтры, объемные резонаторы, генераторы и т.п. С другой стороны, метод FDTD хорошо работает во временной области, а это значит, что его удобно применять для рефлектометрии во временной области TDR на разъемах и переходных соединениях. Метод МКЭ наиболее эффективен для «объемной» геометрии. В качестве примера таких структур можно привести корпуса интегральных схем и модули радиоэлектронной аппаратуры.

Работа [83] посвящена совершенствованию моделирования и обеспечения электромагнитной совместимости бортовой радиоэлектронной аппаратуры. Рассмотрена возможность уменьшения времени моделирования

задач квазистатики за счёт уменьшения времени решения системы линейных алгебраических уравнений блочным и итерационным методами, использования аппаратных средств, корректной сегментации границ проводников и диэлектриков и разработки новых команд для геометрического моделирования.

Моделирование картин электромагнитных полей на основе переходных процессов без наличия ложных скачков при построении линий равного тока рассмотрено в [84]. Приведен алгоритм, который заключается в сведении дифференциальных уравнений в частных производных Лапласа и Пуассона к динамической системе – системе нелинейных дифференциальных уравнений 1-го порядка на основе электротехнических схем замещения. Составлена структурная схема динамической системы, отображающая динамику процесса, где элементами схемы являются операционные усилители, на основе которых может быть сопоставлена электротехническая схема замещения. В работе приводятся примеры построения статических электромагнитных полей в фазовой плоскости.

Метод расчёта электромагнитного поля [85], описываемого волновым уравнением, учитывающий особенности радиоэлектроники, основан на использовании эквивалентной постоянной распространения и позволяет снизить объём вычислений по сравнению с другими методами, основанными на строго динамическом подходе и использующими пространственную дискретизацию моделируемого объекта или интеграл Зоммерфельда. Решение ориентировано на проектные задачи большой размерности с максимальным использованием аналитических методов, реализуемых заранее при разработке соответствующего математического и программного обеспечения, в отличие от ориентации на численные методы, предполагающие проведение основного, причём гораздо большего, объёма вычислений в процессе моделирования. Также в [85] проводится оценка области корректного использования данного метода.

Разработанная структурная электрофизическая модель [86] растекания токов по корпусу космического аппарата при ЭСР основанная на представлении конструкции в виде эквивалентной схемы из  $R$ ,  $L$  и  $C$  элементов позволяет за счет применения методов макро моделирования существенно повысить размерность и точность решаемой задачи определения растекания токов в любой точке поверхности космического аппарата. В [86] также предложен метод расчета электромагнитных полей, возникающих на входах бортовой радиоэлектронной аппаратуры при воздействии электростатических разрядов с учетом большой размерности за счет применения макро моделирования.

При расчёте первичных параметров трасс и паразитных параметров посадочных площадок используются значения диэлектрической проницаемости  $\epsilon_r$  диэлектриков печатных плат, зависящие от частоты  $f$  [87]. При предварительном моделировании испытаний на ЭМС в широком диапазоне частот (например, от 10 кГц до 1, 18, 40 ГГц по стандартам MIL-STD-461F и AIAA S-121-2009) эту зависимость необходимо учитывать, т.к. результаты моделирования и испытаний могут значительно отличаться. Отличия показаны для одиночной линии передачи [87], но не показаны для связанных линий. Также, результаты численных экспериментов показали возможность заметного влияния потерь и дисперсии на физичность формы рассчитанного сигнала (моделирование проведено на основе усреднённых измерений частотной зависимости  $\epsilon_r(f)$  материала FR-4). Учёт такого влияния может быть важным, например, при моделировании устройств, использующих модальные явления.

В [88] приведено описание физических процессов заряжения диэлектрических поверхностей космического аппарата. Также приведены схемы моделирования процессов электризации диэлектрических материалов и элементов конструкции космического аппарата. Результаты исследований электрофизических параметров электростатических разрядов при модельных испытаниях элементов конструкций космического аппарата с

пространственно-распределенным и зарядами на электровакуумном стенде. Изложен подход, позволяющий осуществить идентификацию и математическое описание ЭСР. Даны схемы и описание стендовых испытаний и обоснование базового комплекса технических средств для проведения стендовых испытаний. Изложены рекомендации по антистатической защите космического аппарата и повышения устойчивости бортовой электронной аппаратуры к воздействию ЭСР.

В различных источниках приведена информация о программных продуктах для моделирования. Обзор программных продуктов содержится в [89], детальный обзор и оценка применимости программных продуктов для моделирования – в [90]. В [91] рассмотрен состав и возможности коммерческих программных продуктов для функционального, схемотехнического, пред- и пост- топологического моделирования радиоэлектронной аппаратуры.

Сводные данные о системах моделирования приведены в таблице 2.7.

Таблица 2.7 – Программные продукты для электродинамического и квазистатического моделирования.

№	Название системы	Главный метод	Электронный адрес производителя	Производитель	Страна
1	Concept	MOM	www.tet.tu-harburg.de	University of Technology Hamburg-Harburg	Германия
2	FEKO	MOM	www.emss.co.za	EMSS	ЮАР
3	EMC Studio	MOM	www.emcos.com	EmCoS	Грузия
4	WIPL-D	MOM	www.wipl-d.com/products/products.php	WIPL-D	Сербия
5	Singula	MOM	www.integratedsoft.com	Integrated Engineering Software Sales Inc.	Канада
6	IE3D	MOM	www.zeland.com	Zeland Software	США
7	TALGAT	MOM	www.talgat.org	ТУСУР	Россия

№	Название системы	Главный метод	Электронный адрес производителя	Производитель	Страна
8	QuickWave	FDTD	www.qwed.com.pl	QWED	Польша
9	Concerto	FDTD	www.vectorfields.com	Vector Fields	Великобритания
10	Semcad-X	FDTD	www.semcad.com	SPEAG	Швейцария
11	EMPIRE	FDTD	www.imst.com www.empire.de	IMST GmbH	Германия
12	XFDTD	FDTD	www.remcom.com	REMCOM	США
13	GEMS	FDTD	www.2comu.com	Computer and Communication Unlimited	США
14	Fidelity	FDTD	www.zeland.com	Zeland Software	США
15	HFSS	МКЭ	http://www.ansys.com	Ansys Corp.	США
16	ЭДЭМ	ИУ	www.edem3d.ru		Россия
17	KARAT	PIC	–	–	Россия
18	ANSYS	МКЭ	http://www.ansys.com	Ansys Corp.	США
19	COMSOL	МКЭ	http://www.comsol.com	The COMSOL Group	США

Некоторые из перечисленных программ рассмотрены ниже.

Программа ЭДЭМ (ЭлектроДинамика Элементов из Металла) позволяет исследовать электродинамические свойства структур, допускающих аппроксимацию набором проводящих поверхностей. Это металлические тела, рефлекторы, экраны, замкнутые и незамкнутые оболочки произвольной формы, а также системы из них с характерными размерами от долей до нескольких длин волн. Для аппроксимации таких структур используются плоские треугольники и четырехугольники, спирали, диски, кольца и др. Анализируемые системы могут содержать проводящие или импедансные пленки, а также сосредоточенные емкости и индуктивности, могут также образовывать бесконечные периодические решетки. ЭДЭМ позволяет находить электрические и магнитные поля, возникающие в окрестности таких структур, вычислять пространственные

распределения компонент полей и плотности потока мощности, рассчитывать диаграммы направленности, находить полную излучаемую мощность, определять фазовые центры, поляризационные характеристики и др. В основе программы лежат алгоритмы решения интегральных уравнений. Возможности данной системы не изучались из-за ограничений, имеющихся в демо-версии, и специфики программы, ориентированной только на металлические объекты. Стоит отметить сложность использования программы и неудобный графический интерфейс.

KARAT – это программа, основанная на методе PIC, которая предназначена, главным образом, для решения нестационарных электродинамических задач, имеющих сложную геометрию и включающих динамические и релятивистские электроны и ионы. В частности, KARAT хорошо подходит для моделирования сильноточных электронных приборов, таких как, виркаторы, лазеры свободных электронов, гиротроны и др., а также физических явлений в лабораторной и пространственной плазме.

Существует ряд специализированных систем, распространяющихся только в странах производителя. (доступны только демо-версии.) Так, система «Lucernhammer» (<http://lucernhammer.tripointindustries.com>), основанная на методе моментов, доступна только в США и только для правительственных, учебных и военных организаций. Аналогичная ситуация с американской системой «RadBase» ([www.surfaceoptics.com](http://www.surfaceoptics.com)) и датской военной системой «CADRC» ([www.cadrcs.com](http://www.cadrcs.com)), ориентированной на решение задач рассеяния. В США и Канаде распространяется система «Gemacs» ([www.gemacs.com](http://www.gemacs.com)), позволяющая использовать, помимо метода моментов, методы FDFD и UTD.

Ограничения в распространении специализированных пакетов вынуждают применять доступные системы, основанные на универсальных численных методах, а также увеличивают актуальность разработки собственных решений. Далее рассмотрено несколько таких систем.

CST Microwave Studio (CST MWS) представляет собой программу, предназначенную для численного моделирования высокочастотных устройств (антенн, фильтров, ответвителей мощности, планарных, многослойных структур), а также анализа проблем целостности сигналов и ЭМС во временной и частотных областях с использованием прямоугольной или тетраэдральной сеток разбиения, соответственно. Преимуществом вычислительных технологий компании CST является использование аппроксимации для идеальных граничных условий РВА. При моделировании 3D-структур, содержащих поверхности сложной кривизны, использование классической прямоугольной сетки разбиения приводит к необходимости использовать слишком мелкую сетку и большое число ячеек. Использование тетраэдральной сетки частично решает проблему и позволяет снизить требования к вычислительным ресурсам. В системе реализованы еще две технологии: метод тонких стенок TST, позволяющий оптимально представить две диэлектрические части кубической ячейки, разделенные тонкой металлической стенкой, а также технология разбиения методом подсеток MSS, позволяющая начинать и заканчивать линии разбиения в любой точке анализируемого объема и, тем самым, вблизи элементов произвольной формы получать особые конформные слои с измельченной сеткой разбиения.

Система TALGAT – комплекс программ, в состав которого входят: ядро системы, вычислительные модули, программа управления системой с помощью графического интерфейса пользователя с поддержкой графического вывода OpenGL, программа управления системой из командной строки, программа для конвертирования файлов других программ в формат файлов системы и программа для упаковки входных файлов системы в исполняемые файлы. Для ввода данных создан интерпретируемый скриптовый язык TALGAT\_Script. Отличительной особенностью системы является ее модульная архитектура, позволяющая разработчику нового модуля повторно использовать все ранее реализованные возможности

системы. В системе реализованы параметрическая, структурная и структурно-параметрическая оптимизация параметров структур генетическими алгоритмами и эволюционными стратегиями, возможность использования в качестве значения функции качества любых вычисляемых системой характеристик структур, а также одновременная оптимизация нескольких структур и возможность проведения двух- и трехмерного электростатического и трехмерного электродинамического анализа в одной среде и обработки результатов в совокупности.

Инструменты ANSYS используются в различных отраслях науки и техники, в том числе при разработке радиоэлектронной аппаратуры. Набор программных продуктов для электромагнитного анализа нацелен на улучшение конструкций устройств благодаря совмещению возможностей передовых методов вычисления электромагнитных полей и средств моделирования нагруженных цепей и систем. Эти методы позволяют эффективно вести автоматическую разработку, оптимизацию электронных и электромеханических изделий, не создавая дорогостоящих физических прототипов [92].

Программное обеспечение ANSYS Maxwell предназначено для моделирования 2D и 3D электромагнитных полей, используемое для проектирования и исследования двумерных и трехмерных моделей, электрических и электромеханических устройств различного применения. ANSYS Maxwell базируется на методе конечных элементов и точно рассчитывает статические, гармонические электромагнитные и электрические поля, а также переходные процессы в полевых задачах. ANSYS Maxwell поддерживает электростатические трехмерные поля в диэлектриках, вызванные распространением напряжений и зарядов, электрические трехмерные поля в проводниках, описываемые пространственным распространением напряжения электрического поля и плотности постоянного тока, и комбинации, предыдущих двух вариантов с

решениями по полю в проводниках, используемыми как граничные условия для электростатической задачи.

Программная среда COMSOL Multiphysics [93] позволяет решать системы нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных методом конечных элементов. С позиций вычислительной физики и теории численных методов, ядро COMSOL представляет собой набор алгоритмов, реализующих нестационарный метод конечных элементов. Расчётные подпрограммы, дополняющие метод конечных элементов для конкретного физического приложения объединены разработчиками среды COMSOL Multiphysics в модули, облегчающие моделирование с точки зрения конечного пользователя продукта.

Модуль COMSOL AC/DC предназначен для моделирования задач электромагнитных явлений как переменного, так и постоянного тока. COMSOL AC/DC содержит приложения для общего статического и квазистатического электромагнетизма двухмерных и трехмерных моделей. При расчетах моделей можно осуществлять статический, гармонический и переходный анализ или анализ явлений во времени, а также проводить расчеты для заданной частоты. При моделировании допустимо включать в анализируемую модель другие физические приложения, например, теплопередачу, Джоулеву теплоту или индукционный нагрев. Физическое моделирование связывается с решением электрических цепей заданных в формате SPICE, представляемых как возбуждающий или демпфирующий элемент.

Среди достоинств COMSOL Multiphysics следует отметить, что COMSOL Multiphysics на сегодняшний день является единственной программной средой, содержащей модуль, реализующий физическую модель слабоионизованной плазмы в электромагнитном поле. Поэтому в качестве среды для численного решения системы дифференциальных уравнений в частных производных для данной работы предлагается использовать программную среду COMSOL Multiphysics.

При этом данная среда обладает рядом недостатков, которые связаны с автоматизацией проведения моделирования, а именно необходимо на вход программы представить трехмерную модель печатной платы со всеми проводниками, сквозными отверстиями и контактными площадками с возможностью выбора моделируемой цепи. Модуль распространяемый вместе с программой COMSOL Multiphysics ECAD (англ. electronic computer-aided design) Import Module [94], не поддерживает возможность выбора моделируемой цепи, а также при импорте печатной платы представляет проводники в качестве пустотелых объектов, поэтому необходимо трехмерную модель печатной платы представить в виде файлов, используемых системами автоматизированного проектирования механических устройств, к таким типам файлов, поддерживаемых COMSOL Multiphysics относятся:

- AutoCAD(.dwg, .dxf) ;
- ACIS (.sat, .sab, .asat, .asab) ;
- IGES (.igs, .iges) ;
- CATIA V5 (.CATPart, .CATProduct) ;
- Inventor assemblies (.iam) ;
- PTC Creo Parametric(.prt, .asm) ;
- STL (.stl) ;
- STEP (.step) ;
- VRML (.vrm, .wrl) ;
- Parasolid(.x\_t, .xmt\_txt, .x\_b, .xmt\_bin) ;
- SOLIDWORKS (.sldprt, .sldasm).

К присутствующим на рынке решениям данной проблемы можно отнести следующие программы:

- Altium Modeler for SolidWorks [95] - является двунаправленным инструментом между Altium Design и SolidWorks, позволяя экспортировать трехмерную модель из Altium Designer в формат SolidWorks, однако не

разделяет и не предоставляет возможности выбора электрических цепей, не поддается автоматизации, требует предустановленный Altium Designer;

– PCB Investigator [96] - представляет собой инструмент для просмотра и редактирования файлов печатных плат может экспортировать, импортировать и редактировать файлы форматов: ODB++, GenCAD, Gerber 274x, DXF, не поддерживает выбор цепей для моделирования;

– CircuitWorks [97] - входит в состав программного обеспечения SOLIDWORKD 3D CAD, так же является двунаправленным инструментом, позволяющий проводить преобразования из ECAD модели в MCAD и наоборот, не подвергается автоматизации (все действия производятся вручную), не разделяет электрические цепи при моделировании;

– Mentor Graphics Expedition [98] – средство разработки печатных плат, поддерживающее автоматическую и интерактивную трассировку; набор инструментов, входящий в этот программный продукт, основан на использовании самых передовых технологий в области проектирования печатных плат и высокочастотного анализа, тесно интегрирован между собой и предоставляет наиболее полный спектр возможностей, включая сквозную систему редактирования и управления ограничениями, систему редактирования и управления библиотеками компонентов и проектными данными; XPedition позволяет импортировать и совмещать трехмерную модель корпуса и печатной платы, однако совмещение доступно только для просмотра в самой программе и не подлежит экспорту в другие программы;

– Mentor Graphics Pads [99] - доступный, интуитивный и производительный маршрут проектирования для рабочих групп и небольших компаний, предназначенный для проектирования многослойных печатных плат радиоэлектронных средств и компьютерных систем, адаптирован к операционной среде Windows и содержит следующие программные модули: Library Manager – менеджер библиотек обеспечивает возможность разработки и управления библиотекой компании, PADS Logic и DxDesigner – утилиты для создания принципиальных схем устройств, Symbol Editor –

редактор символов элементов, предназначенный для создания условных графических обозначений, Decal Editor – редактор посадочных мест, PADS Layout среда проектирования топологии печатной платы PADS Router – утилита для ручной и автоматической трассировки (хоть Mentor Graphics Pads и обладает обширными функциональными возможностями, в нём отсутствует возможность экспорта трехмерной модели печатной платы, как и возможность выбора электрической цепи для дальнейшего моделирования в сторонних САПР);

– Cadence Allegro [100] - является проверенной, масштабируемой системой для сквозного проектирования печатных плат основанной на технологических и методологических задачах, содержит полный набор инструментов позволяющий сопровождать разработку на всех этапах – от начала до конца. Включает в себя топологический редактор печатных плат, модуль автоматической и интерактивной трассировки, интерфейсы для взаимодействия со сторонними САПР приложениями, имеет продвинутый трехмерный визуализатор для работы с трехмерной моделью печатной платы, однако отсутствует возможность экспорта трехмерной модели печатной платы с выбранными для моделирования электрическими цепями, чего требует поставленная задача.

В связи с отсутствием необходимого функционала у представленного программного обеспечения, можно сделать вывод о необходимости разработки собственного программного продукта, позволяющего производить чтение топологии печатной платы, автоматическое создание трехмерной модели, отображение и редактирование, выборку моделируемых электрических цепей и экспорт трехмерной модели печатной платы в COMSOL Multiphysics.

Необходимость визуального контроля процесса, объединения трёхмерной модели печатной платы и корпуса, а также возможности редактирования геометрической модели корпуса влечет за собой использование либо специализированной САПР, либо геометрического ядра,

имеющего данный функционал. Среди имеющихся на данный момент графических ядер стоит отметить следующие геометрические ядра:

- геометрическое ядро от C3D Labs [101], представляет собой программную реализацию методов построения моделей геометрии реальных и воображаемых объектов, а также математических методов управления этими моделями, разработано на языке программирования C++;

- 3D ACIS Modeler [102], геометрическое ядро, разрабатываемое Spatial Corporation, написан на языке программирования C++, позволяет создавать каркасные модели, поверхности и твердые тела, обладает богатым набором геометрических функций.

Однако, чтобы использовать данные геометрические ядра, пре- и постпроцессор должны быть написаны на языке программирования C++, что не представляется возможным, поскольку автоматизация моделирования в COMSOL Multiphysics будет выполняться на языке программирования C#, что обеспечивает легкий доступ к моделирующей среде COMSOL, параметрам моделирования, результатам работы и базе данных, содержащей модели, материалы и отчеты о ранее проведенных моделированиях.

Среди САПР, реализующих возможность просмотра, редактирования, импорта/экспорта файлов геометрии можно выделить следующие программы:

- Autodesk AutoCAD [103] - двух- и трёхмерная система автоматизированного проектирования и черчения, разработанная компанией Autodesk. AutoCAD обладает следующими возможностями: 3D-моделирование тел/поверхностей/сетей, материалы, визуализация, концептуальные инструменты построения эскизов и проектирования, импорт моделей в форматах FBX, Inventor, IGES и др., главный вид, проекционные виды, сечения и выносные элементы, однако отсутствие трёхмерной параметризации не позволяет AutoCAD напрямую конкурировать с машиностроительными САПР среднего класса, такими как Inventor, SolidWorks;

– SolidWorks [104] - программный комплекс САПР для автоматизации работ промышленного предприятия на этапах конструкторской и технологической подготовки производства, обеспечивающий разработку изделий любой степени сложности и назначения, разработанный компанией SolidWorks Corporation, обладающий следующим функционалом: твердотельное моделирование, каркасное моделирование, проектирование изделий с учётом специфики изготовления, оформление чертежей по ЕСКД, трансляция данных, поддержка программирования на языках Visual Basic, Visual C++;

– Parasolid [105] – геометрическое ядро, разрабатываемое и поддерживаемое компанией Siemens PLM Software; ядро Parasolid предназначено для математического представления трехмерной формы изделия и управления этой моделью; полученные с его помощью геометрические данные используются системами автоматизированного проектирования, технологической подготовки производства и инженерного анализа при разработке конструктивных элементов, деталей и сборок; дает возможность работы с тонкостенными деталями, включает широкий спектр возможностей по созданию уклонов, скруглений, фасок, масштабированию, является базовой платформой геометрического моделирования для многих ведущих мировых САПР, систем технологического проектирования и инженерного анализа, включает инструменты для прямого редактирования деталей: сжатия-расширения, создания смещений, замены геометрии и перемещения элементов детали с автоматическим обновлением соответствующих данных; для эффективного использования требующий знаний в области систем автоматизированного проектирования (САПР), вычислительной геометрии и топологии; поддерживающий импорт данных из других САПР программ;

– CATIA [106] – САПР французской фирмы Dassault Systèmes; позволяет реализовывать трехмерные модели, эскизы, модели из листового металла, кованые модели, композитные модели, поддерживает формат

STEP файлов для обмена с другими САПР программами; обеспечивает решение, охватывающее широкий спектр операций, в т.ч. проектирование и позиционирование деталей, проектирование автоматических механизмов, имитационное моделирование кинематики в реальном времени, создание функциональных допусков и аннотаций, разработка сборочных чертежей и фотореалистичных изображений;

– КОМПАС [107] – семейство систем автоматизированного проектирования, разрабатываемое российской компанией Аскон, Компас-3D, включая собственно систему трёхмерного твердотельного моделирования, предназначенную для создания трёхмерных ассоциативных моделей отдельных деталей и сборочных единиц, содержащих как оригинальные, так и стандартизованные конструктивные элементы, использующее параметрическую технологию, позволяющую быстро получать модели типовых изделий на основе однажды спроектированного прототипа, имеющее многочисленные сервисные функции, облегчающие решение вспомогательных задач проектирования и обслуживания производства, обладающее ключевой особенностью в виде использования собственного математического ядра и параметрических технологий, разработанных специалистами компании Аскон, а именно геометрического ядра от лаборатории C3D Labs.

Несмотря на весь богатый функционал, данные САПР не подходят в решении поставленной задачи, так как на первом месте стоит автоматизация процесса, чего нельзя добиться используя AutoCAD или SolidWorks, потому что все действия по совмещению трехмерной модели печатной платы и корпуса, а также экспорт созданной геометрии в COMSOL Multiphysics будут проводиться в ручную. Из этого можно сделать вывод о необходимости разработки собственного геометрического ядра, реализующего возможность импорта/экспорта геометрии, работу с геометрией, автоматизацию процессов, связь с COMSOL Multiphysics.

### **3 Общая концепция конструкции и функционирования комплекса оборудования для диагностики модулей бортовой аппаратуры и кабельной сети космических аппаратов с целью выявления рисков дугообразования**

#### **3.1 Состав и основные требования ТЗ на ЭАК**

ЭАК должен быть предназначен для отработки комплекса научно-технических решений, необходимых для разработки оборудования для комплексной диагностики БАКС КА с целью выявления рисков дугообразования.

ЭАК должен включать:

а) универсальную вакуумную камеру объемом, достаточным для испытания типовых модулей бортовой аппаратуры и кабельной сети космических аппаратов;

б) масс-анализатор остаточной атмосферы с возможностью дифференциальной откачки;

в) систему термостатирования исследуемого объекта;

г) источник плазмы первичного разряда, имитирующие испарение проводников;

д) источник плазмы, имитирующий ионосферную плазму;

е) диагностическое оборудование для измерения параметров окружающей среды (газовой и плазменной), электрофизических процессов и фотонной эмиссии в исследуемых объектах;

ж) осциллографическую технику;

и) управляющий компьютер, осуществляющий управление комплексом и считывание данных с диагностического оборудования и осциллографов.

ЭАК должен обеспечивать функциональные возможности:

а) создание и поддержание газовой среды контролируемого состава и давления для имитации условий космического пространства в соответствии с ГОСТ 25645.154-90 и ГОСТ 25645.101-83 и испытания аппаратных модулей

бортовой аппаратуры и кабельной сети космических аппаратов на устойчивость к дугообразованию;

б) термоциклирование в диапазоне температур от минус 60°C до +120°C;

в) скорость откачки, достаточную для стабилизации давления в процессе газовой выделения при термоциклировании в рабочей камере;

г) обеспечение плазменного окружения контролируемого состава;

д) контроль остаточной атмосферы и параметров окружающей плазмы, включая концентрации заряженных частиц;

е) измерение давления газа во внутреннем пространстве бортовой аппаратуры космических аппаратов с погрешностью не более  $\pm 50\%$  измеряемой величины;

ж) измерение концентрации носителей заряда с погрешностью не более минус 50% плюс 100%;

и) задание напряжений до 1000 В с погрешностью и величиной пульсацией не более  $\pm 3\%$  задаваемого значения;

к) измерение пространственных потенциалов плазмы с погрешностью не более  $\pm 5\%$  измеряемой величины;

л) регистрацию напряжений, предпробойных токов, токов электрических разрядов с полосой пропускания регистрирующих трактов, достаточной для регистрации токов вакуумной дуги, включая диапазон естественных шумов тока дуги от 100 МГц до 1 ГГц, и с погрешностью не более  $\pm 5\%$  измеряемой величины;

м) регистрацию интенсивности свечения плазмы в реальном масштабе времени синхронно с регистрацией электрических сигналов с высокой чувствительностью, включая режим счёта фотонов;

н) автоматизированное управление экспериментом, включая сбор данных, с числом каналов управления и регистрации сигналов, обеспечивающим одновременное функционирование всех регистрирующих датчиков и функциональных модулей комплекса;

п) протоколирование результатов измерений в электронном виде.

ЭАК должен быть разработан с учетом технической и экономической обоснованной унификации, стандартизации и взаимозаменяемости используемых деталей и узлов.

Вакуумные компоненты ЭАК должны быть унифицированы в соответствии с ГОСТ Р 52856-2007.

Конструкции шкафов, рам, функциональных модулей экспериментальной установки должны быть унифицированы и соответствовать типоразмеру 19" 600 мм × 600 мм или 600 мм × 800 мм.

Управление ЭАК и обмен данными между диагностическим оборудованием, осциллографической техникой и управляющим компьютером должны осуществляться с использованием одного или нескольких стандартизированных компьютерных интерфейсов RS-232, RS-485, USB, GPIB, Ethernet. Использование удалённого управления экспериментальным аппаратным комплексом и сетевых протоколов передачи данных не предусматривается.

### **3.2 Анализ требований ТЗ на ЭАК**

Объём вакуумной камеры для экспериментальных исследований процесса дугообразования и тестирования ЭТМ, имитирующего реальный модуль КЭП с точки зрения процессов, ответственных за дугу, определяется объёмом ЭТМ и дополнительным пространством, необходимым для размещения диагностического оборудования.

Поскольку процесс инициирования первичного разряда происходит в соответствии с закономерностями пробоя газовых промежутков низкого давления [10], состав газа имеет ключевое значение и должен соответствовать реальному составу атмосферы, задаваемому ГОСТ 25645.154-90 для профиля давления по высоте, задаваемого ГОСТ 25645.101-83. Измерение состава остаточной атмосферы необходимо для контроля окружающей атмосферы при проведении исследований. Измерения такого рода осуществляются масс-спектрометрами квадрупольного типа.

Современные масс-спектрометры имеют при относительно невысокой цене разрешение 1 а.м. по массе и чувствительность не ниже 1 мкПа по парциальному давлению. Необходимость дифференциальной откачки связана с тем, что для нормального функционирования масс-спектрометра требуется давление остаточной атмосферы не выше 10 мПа. Поэтому для измерения состава газовой атмосферы при более высоких давлениях требуется дифференциальная откачка прибора до давления ниже 1 мПа с возможностью напуска газа из анализируемого объёма.

Термоциклирование в диапазоне температур от минус 60°C до +120°C является одним из ФКП. Термоциклирование оказывает существенное влияние на электрические соединения, паяные и обжимные, и на ГВ из изоляционных материалов. Поскольку экспериментальные исследования и тестирования осуществляется по отношению к функционирующему модулю, обладающему собственным тепловыделением, система термоциклирования должна обладать функциями термостатирования для поддержания заданной температуры рабочего стола, на который крепится исследуемый модуль.

Источник плазмы первичного разряда, имитирующий испарение проводников, необходим для исследования и тестирования модулей на устойчивость к вторичной дуге. В настоящее время существует стандарт ISO-11221:2011, в котором определены требования и методики на определение устойчивости к вторичному дугообразованию только по отношению к БС и с использованием высоковольтного ЭСР в качестве первичного разряда. Данный подход неприменим к задачам выполняемых ПНИ ввиду отсутствия данного механизма во внутренних модулях СЭП КА. В этой связи ранее был разработан подход, и в рамках выполняемых ПНИ усовершенствован и проверен на стабильность работы источник дугового первичного разряда, имитирующий испарение проводника. Результаты проверки представлены в работе [108].

Источник плазмы, имитирующий ионосферную плазму, в первую очередь актуален для исследования дугообразования во внешнем оборудовании СЭС КА, включая БС. Но поскольку внутреннее оборудование имеет открытое исполнение, включая технологические отверстия для

обеспечения вакуума внутри модулей, существует возможность проникновения редкой плазмы внутрь модулей. С другой стороны, наличие такой плазмы делает некорректным рассмотрение электрической изоляции с точки зрения кривых Пашена, основанных на измерениях в однородном поле без существования первичного источника плазмы [10].

Любые процессы, связанные с электрическим разрядом в средах, сопровождаются излучением света. Процессы, предшествующие пробую, сопровождаются свечением низкой интенсивности. В этой связи требуется регистратор слабых световых потоков, обладающий высокой чувствительностью, вплоть до возможности регистрации слабых потоков в режиме счёта фотонов.

Осциллографическая техника необходима для регистрации импульсных токов и напряжений при инициировании и горении дугового разряда. Для анализа дуги от осциллографа требуется частотный диапазон, соответствующий спектру шумов тока вакуумной дуги [42] (рисунок 2.1), верхний предел которого составляет 1 ГГц. Большой диапазон не требуется. Ключевое значение имеет также длина массива записи осциллограммы, поскольку при горении первичной дуги в СЭП КА длительность тока может достигать единиц миллисекунд. Идеальным случаем является использование осциллографа с длиной записи не менее 1М точек на канал и числом таких каналов не менее 2.

Наличие управляющий компьютера, осуществляющего управление комплексом и считывание данных с диагностического оборудования и осциллографов, является необходимым вследствие большого объёма первичной информации при проведении исследований и испытаний. Управляющий компьютер должен иметь промышленное исполнение для защиты от электромагнитного воздействия при горении электрического разряда.

Для контроля плазменной среды требуются средства измерения параметров плазмы в широком диапазоне концентраций заряженных частиц. В качестве метода измерений наиболее универсальным и эффективным является зондовый метод [109]. Средства измерения параметров плазмы

необходимы также для реализации методик, связанных с обнаружением дефектов диэлектрических покрытий в модулях СЭП. С использованием зондового метода может быть реализовано измерение потенциалов в исследуемом плазмонаполненном пространстве.

Для реализации зондового метода измерения параметров плазмы и потенциалов плазмонаполненного пространства требуются стандартное лабораторное оборудование, включающее источники постоянного напряжения и тока и измерители напряжений и токов.

### **3.3 Технические решения и конструкция ЭАК**

#### **3.3.1 Общая конструкция ЭАК**

ЭАК представляет собой экспериментальную испытательную установку на основе высоковакуумной системы и рабочей камеры, укомплектованную дополнительными составными частями и оборудованием, обеспечивающими функциональные возможности и делающую её уникальной. Концепция конструкции ЭАК схематически представлена на рисунке 3.1. ЭТМ 1 располагается на рабочем столе 2 внутри рабочей камеры 3. Напротив открытой стороны ЭТМ 1 располагается двух-координатный манипулятор с приборной площадкой 4, на которую устанавливается источник плазмы первичной дуги 5 и регистратор фотонов 6. Стол 2 устанавливается на несущем фланце 7 с нижним драйвером 8. На противоположной стороне камеры 3 устанавливается фланец 9 с верхним драйвером 10. На фланце 9 устанавливается источник плазмы внешнего пространства 11 и широкодиапазонный датчик давления 12. Второй широкодиапазонный датчик давления 13 устанавливается на промежуточную камеру 14, соединённую с рабочей камерой 3 высоковакуумным шибберным затвором 15. Промежуточная камера 14 соединяется с высоковакуумным насосом 16 без использования затвора и во время экспериментов или испытаний всегда находится под высоким вакуумом, что обеспечивает дифференциальную откачку для масс-спектрометра 17. Для измерения состава атмосферы в рабочей камере 3 используется дозирующий вентиль 18. Рабочая камера 3 содержит окна 19 и порты электрических вводов 20. Для формирования атмосферы заданного состава в рабочей камере 3 используется система регуляторов расхода газа 21 и газовые баллоны 22.

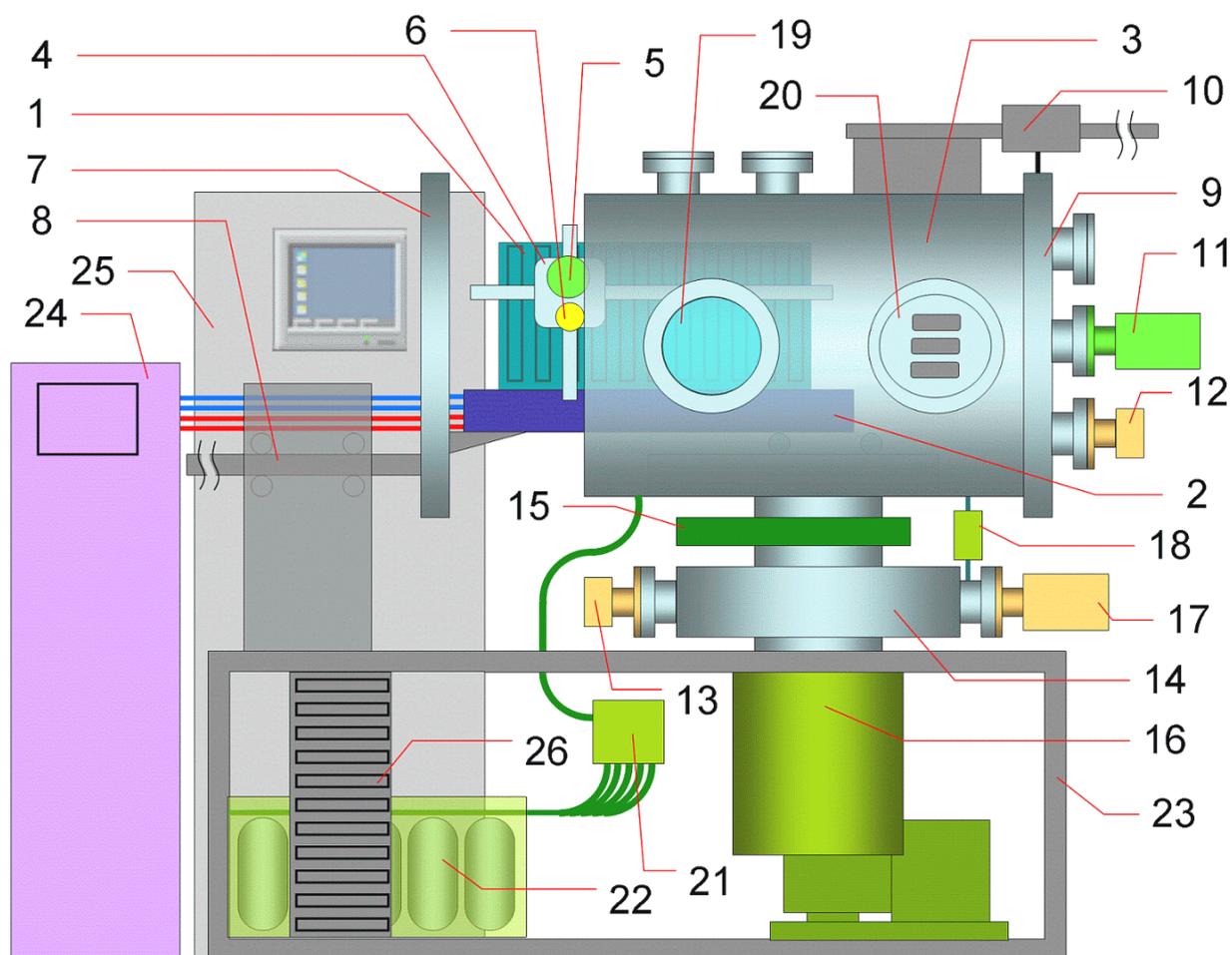


Рисунок 3.1 – Концепция конструкции ЭАК: 1 – ЭТМ; 2 – рабочий стол; 3 – рабочая камера; 4 – двух-координатный манипулятор с приборной площадкой; 5 – источник плазмы первичной дуги; 6 – регистратор фотонов; 7 – несущий фланец; 8 – нижний драйвер фланца; 9 – фланец; 10 – верхний драйвер фланца; 11 – источник плазмы внешнего пространства; 12, 13 – широкодиапазонные датчики давления; 14 – промежуточная камера; 15 – шиберный затвор; 16 – высоковакуумный насос; 17 – масс-спектрометр; 18 – дозирующий вентиль; 19 – смотровое окно; 20 – порт электрических вводов; 21 – регуляторы расхода газа; 22 – газовые баллоны; 23 – основание; 24 – двухконтурный термостат; 25 – приборная стойка; 26 – блок силовой электроники.

Рабочая камера 3 устанавливается на основание 23. Для термостабилизации в рабочем столе 2 предусматриваются два контура жидкости, горячий для диапазона температур от  $+20^{\circ}\text{C}$  до  $+120^{\circ}\text{C}$  и холодный для диапазона температур от минус  $60^{\circ}\text{C}$  до  $+20^{\circ}\text{C}$ . Контуров работают по очереди, в любой момент времени активен только один из контуров. Достижение комнатной температуры для переключения активности контуров не требуется.

Стабилизация температура жидкостей в контурах рабочего стола 2 обеспечивается двухконтурным термостатом 24. ЭАК предполагается полностью автоматизированным. Средства управления и сбора данных располагаются в приборной стойке 25. Силовые элементы управления вакуумным и газовым оборудованием выносятся в блок силовой электроники 26, который крепится к основанию 23.

Все компоненты и системы ЭАК, кроме источника плазмы первичной дуги 5, источника плазмы внешнего пространства (ионосферной плазмы) 11, системы измерения параметров плазмы (на рисунке 3.1 не показана) и механически изготавливаемых частей, представляют собой серийно выпускаемые приборы и компоненты.

Подлежат изготовлению средствами опытного металло-обработывающего производства организации-исполнителя проекта, следующие составляющие ЭАК: рабочая камера, включая торцевые фланцы, промежуточная камера, рабочий стол, драйверы фланцев, основание.

### **3.3.2 Источник плазмы первичной дуги**

За основу источника плазмы первичной дуги взят принцип инициирования дуги испарением тонкой плёнки импульсом тока, изложенный в [110]. Испарение плёнки достигается в начале импульса тока, и после испарения плёнки между электродами, находившимися в контакте благодаря плёнке, зажигается дуга, определяемая разрядным контуром источника питания дуги. После погасания дуги часть плазмы дуги конденсируется на керамический изолятор, разделяющий электроды промежутка, что обеспечивает формирование металлической плёнки для следующего акта горения дуги. Данный метод содержит неопубликованное в [110] ноу-хау, заключающееся в подборе режимов горения дуги, однако этот подбор не требует специальных исследований. В выполненных для отработки режима экспериментах удалось достичь стабильного воспроизводства дугового разряда при параметрах импульса тока,

представленного на рисунке 3.2. Схема эксперимента представлена на рисунке 3.3.



Рисунок 3.2 – Осциллограммы тока в цепи анода первичной дуги (Ch4) и напряжения на катоде первичной дуги (Ch5).

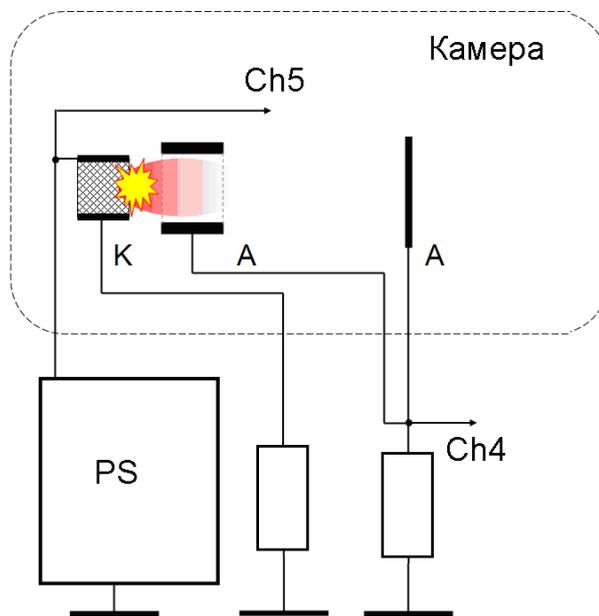


Рисунок 3.3 – Схема эксперимента по физическому моделированию первичной дуги: Ch4 – анодный ток первичной дуги; Ch5 – напряжение на первичной дуге; PS – источник питания первичной дуги; К – катодный узел; А – анодный узел.

Дуговой промежуток представлял собой торец двух цилиндрических электродов, разделённых керамической трубкой внешним диаметром 4 мм и толщиной стенки 1 мм. Пустоты между электродами и керамической трубкой были убраны путём заполнения эпоксидным компаундом. Для инициирования первого акта горения дуги на торец керамической трубки наносился графитовый мостик шириной порядка 0,5 мм.

Наиболее ценным в режиме горения дугового разряда, представленном на рисунке 3.2, является факт инициирования дуги при импульсном напряжении амплитудой 50 В. Дуга зажигается с запаздыванием порядка 1 мс, после чего напряжение падает до уровня 25 В. Имитационный процесс первичного дугообразования воспроизводит первичную дугу в РЭА, инициированную испарением ЭРИ или плавкой вставки, но при этом воспроизводится устойчиво с частотой до 10 Гц.

### 3.3.3 Имитация ионосферной плазмы

Параметры ионосферной плазмы зависят от высоты орбиты и солнечной активности. На рисунке 3.4 представлена зависимость максимальных и минимальных значений концентрации плазмы от высоты [6].

Для измерения концентрации плазмы используется метод электрического зонда Ленгмюра [109]. В случае низких концентраций плазмы измерения ведутся по электронному току насыщения, плотность которого вычисляется по формуле:

$$j_e = en_e \left( \frac{kT_e}{2\pi m} \right)^{1/2}, \quad (3.1)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана,  $e$  – элементарный заряд,  $n_e$  – концентрация электронов в плазме,  $T_e$  – температура электронов в плазме,  $m$  – масса покоя электрона. При концентрации плазмы  $10^4 \text{ см}^{-3}$  и температуре 1 эВ плотность электронного тока насыщения равна  $27 \text{ нА/см}^2$ . Измерение концентрации менее плотной плазмы затруднено в лабораторных условиях из-за малости

тока. В этой связи представляет практический интерес создание и использование источника редкой плазмы в диапазоне  $10^4 \div 10^7 \text{ см}^{-3}$  для имитации ионосферной плазмы.

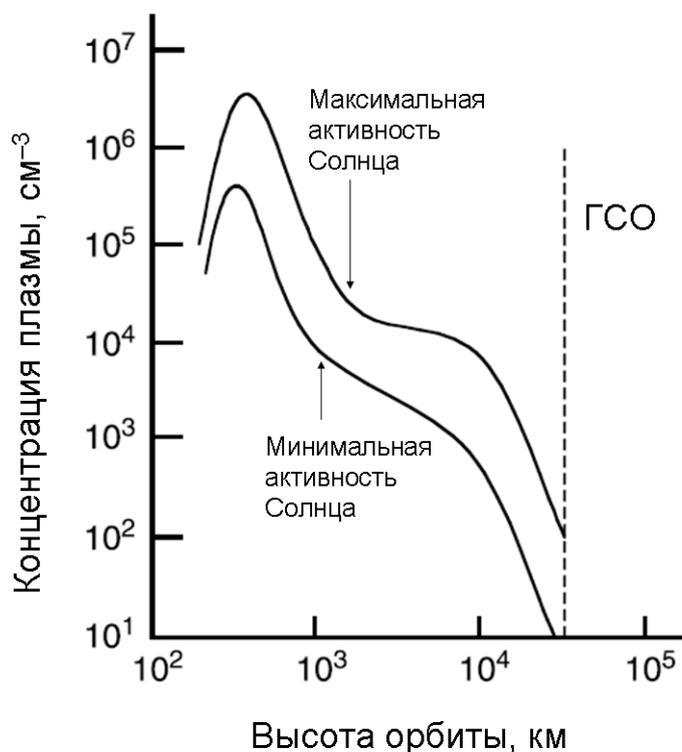


Рисунок 3.4 – Зависимость концентрации плазмы от высоты орбиты Земли.

Для удовлетворения всему диапазону концентраций требуются различные способы формирования разряда, однако при этом имеется возможность и опыт использования некоторой универсальной конструктивной основы разрядной ячейки [111–113], позволяющей реализовать магнетронный, отражательный, полостной и дуговой разряды, как отдельно друг от друга, так и в смешанном виде.

На рисунке 3.5 показана концептуальная схема конструкции разрядной ячейки, в которой возможно сосуществование всех перечисленных выше типов разрядов. В частности, самокалящийся элемент, снижающий напряжение горения и стабилизирующий генерацию плазмы [113] одновременно служит для формирования магнетронного разряда, а также формирования диаграммы направленности. В то же время, конструкция должна позволять, при необходимости, исключать тот или иной вид разряда

или перераспределять степень значимости отдельного вида разряда в их общей совокупности. В связи с этим, в конструкции ячейки, должны быть предусмотрены следующие возможности:

- перемещение самокалящегося элемента относительно эмиссионного отверстия, а также его извлечение;
- заполнение объема катодной полости металлической вставкой;
- резьбовая регулировка положения эмиссионного отверстия и изменения его диаметра посредством вставок;
- возможность ввода ВЧ мощности через анодный ввод (при необходимости генерации ВЧ-разряда).

При необходимости, вне объема ячейки, возможна также установка отклоняющих систем, плазменных ловушек и дополнительного электрода для получения плазмы, распределенной по всему объему камеры. В последнем случае газоразрядная ячейка играет роль стимулятора несамостоятельного низковольтного разряда в условиях интенсивной откачки объема (более 100 л/с).

Для стабильной работы ячейки в различных режимах требуется давление внутри нее  $0.5 \div 5$  Па. Для этого требуется регулятор расхода газа на диапазон  $2 \div 50$  атм см<sup>3</sup>/мин, высоковакуумный насос с производительностью более 200 л/с, а также источник питания, обеспечивающий поджиг разряда на уровне 1000 В, регулировку и стабилизацию тока в номинальном режиме в пределах  $0.1 \div 3$  А при напряжениях  $50 \div 400$  В (напряжение зависит от типа разряда и режима его горения).

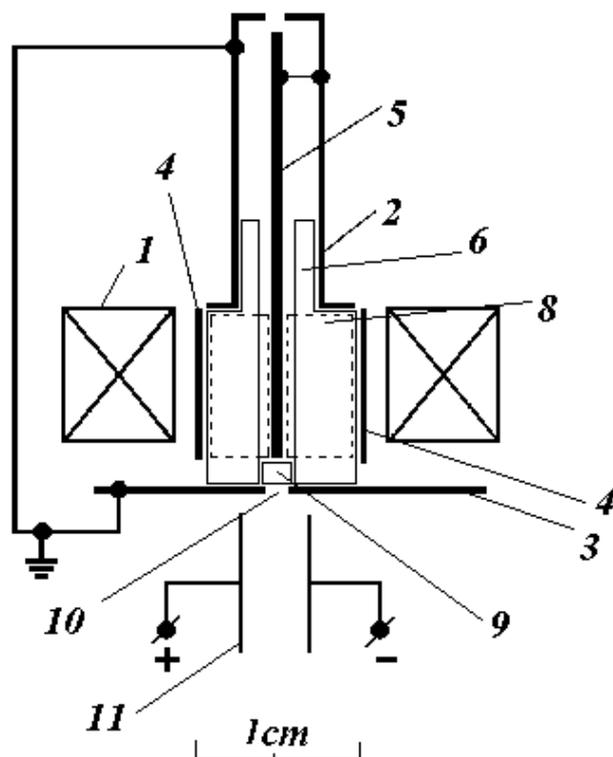


Рисунок 3.5 – Схема электродов разрядной ячейки с полым катодом: 1 – постоянный магнит, 2 – полый катод, 3 – катод-отражатель, 4 – анод, 5 – самокалящийся электрод, 6 – область горения отражательного разряда с полым катодом (сплошная линия), 8 – область горения магнетронного разряда с накалившимся катодом (пунктирная линия), 9 – область горения основного дугового пеннинговского разряда, 10 – эмиссионное отверстие, 11 – электростатическая ловушка.

### 3.3.4 Зондовые измерения параметров плазмы

С использованием формулы (3.1) можно измерять концентрацию электронной компоненты плазмы при условии бесстолкновительного режима токопереноса из плазмы на зонд [109], что, как правило, выполняется при давлениях остаточной атмосферы ниже 1 Па. При более высоких давлениях вводятся поправки на диффузионный режим токопереноса [109]. Собирающий зонд может быть установлен на приборной площадке двухкоординатного манипулятора, что обеспечит возможность сканирования пространства в области расположения ЭТМ. Использование этого же зонда, но заземлённого через сопротивление, много большее сопротивлению плазменного слоя вокруг зонда, позволяет переводить зонд в режим плавания

и измерять плавающий потенциал пространства [109]. С использованием измеренных значений плавающего потенциала можно найти температуру плазмы в соответствии с формулой:

$$U_{ni} = \frac{kT_e}{e} \ln \sqrt{\frac{m_i}{2\pi m_e}}, \quad (3.2)$$

где  $m_i$  – масс иона.

#### **4 Требования, предъявляемые к экспериментальному типовому модулю радиоэлектронной аппаратуры**

Основное назначение ЭТМ – проверка работоспособности и оценка эффективности ЭАК и МКТ модулей БАКС КА на устойчивость к дугообразованию. В этой связи к ЭТМ не должны предъявляться требования полной имитации функционирования модулей СЭП КА, включающего в том числе и низковольтные слаботочные цепи, предназначенные для управления и телеметрии, но лишь силовые цепи, способные обеспечить питание длительно горящей вакуумной дуги.

Другим принципиально важным моментом является отсутствие со стороны МКТ и ЭАК требований радиационной стойкости на материалы и ЭРИ, входящие в состав ЭТМ. В связи с этим радиационно-стойкие ЭРИ и материалы, используемые в промышленно выпускаемых модулях СЭП КА, могут быть заменены на эквивалентные по остальным параметрам ЭРИ и материалы.

Все процессы, связанные с первичным и вторичным дугообразованием в модулях СЭП КА, локализованы в пределах ячейки, образованной сторонами расположенных напротив друг друга блоков. В этой связи для целей использования ЭТМ необходимым и достаточным является модуль, состоящий из двух блоков, помещённых в стандартный корпус. При этом одна из боковых стенок корпуса должна быть демонтирована с целью обеспечения беспрепятственного наблюдения, регистрации оптических

сигналов, создания потоков плазмы, текущих внутрь модуля и измерения параметров плазмы в пространстве вокруг модуля и непосредственно в ячейке, образованной блоками.

Схема блока должна состоять из двух ППН. Принцип работы ППН представлен схематически на рисунке 3.6.

Входной разъем питания платы можно использовать типа ОсОНП-8-42P29-1В (или аналог).

Выходной разъем может быть аналогичен входному.

Требуемые параметры ППН:

- постоянное входное напряжение в пределах от 54 до 93 В;
- постоянное выходное напряжение 100 В.

Компоновка силовых элементов должна обеспечивать минимальную длину контура ППН (транзистор- диод -конденсатор)

Диодная сборка (2Д273ЕС) может быть заменена на диод. Параметры диодной сборки диода:

- номинальное напряжение не менее 200 В;
- номинальный ток не менее 15 А;
- время восстановления обратного сопротивления не более 50 нс.

Амплитуда импульсов должна обеспечивать срабатывание драйвера управления. Управление выходным напряжением осуществляется изменением коэффициента заполнения согласно передаточной характеристике ППН. Форма импульсов прямоугольная.

Нагрузка должна обеспечивать сброс мощности до 500 Вт.

Сопротивление нагрузки может регулироваться в пределах от 200 до 20 Ом.

Частота следования импульсов управления – 62.5кГц.

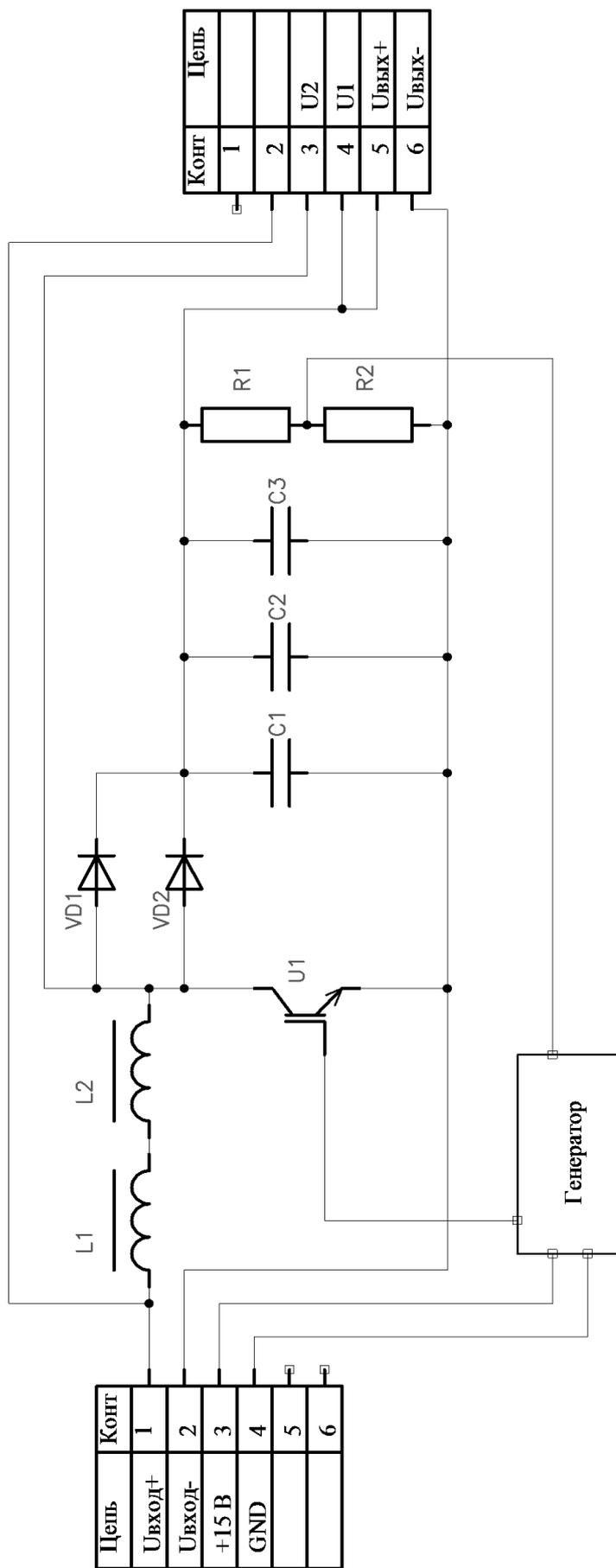


Рисунок 3.6 – Схема ППН для формирования блоков ЭТМ.

Необходимо обеспечить ППН защитой по превышению напряжения на 5% от номинального выходного напряжения.

В качестве драйвера управления можно использовать микросхему IR2110.

В качестве силового транзистора можно использовать транзистор типа IRF250 (корпус TO247).

В качестве выходных конденсаторов можно использовать конденсаторы типа K71-16-160В, 6,8 мкФ.

Дроссели L1 и L2 следует соединить последовательно. Число витков равно 28. Провод ПЭТВ-2-ОС-0.75х4.

Необходимо вывести все силовые цепи ППН на выходной разъем.

Рекомендуемое напряжение питания генератора равно 15 В.

Генератор следует расположить на плате блока.

Необходимо предусмотреть размещение радиатора на блоке для отвода тепла.

Печатные платы блока следует изготовить без покрытия паяльной маской.

Минимальное расстояние между проводниками должно быть не менее 1.27мм.

Толщина фольги плат должно быть 35 микрон.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании результатов выполнения первого этапа работ можно сделать следующие выводы:

1. Разработку метода комплексного тестирования модулей бортовой аппаратуры и кабельной сети космических аппаратов на устойчивость к дугообразованию следует вести по следующим направлениям:

– моделирование локальной атмосферы по основным электрофизическим характеристикам, таким как плотность и степень ионизации газов, максимально соответствующим свойствам реальной локальной атмосферы вблизи области вероятного дефекта, с учётом возможного состава продуктов газовой выделения из органических изолирующих материалов, а также первичных разрядов, специфических для модулей системы электропитания космических аппаратов;

– обнаружение предпробойных состояний изолирующих промежутков в бортовой аппаратуре и кабельной сети космических аппаратов на основе классификации дефектов изоляции кабелей и проводов бортовой кабельной сети, электрических соединительных элементов и изоляционных покрытий элементов радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов по типам и размерам;

– выбор оптимальных с точки зрения обнаружения каждого из классов дефектов методов и создание экспериментального аппаратного комплекса для отработки режимов и определения критических параметров для выбранных методов дефектоскопии;

– разработка принципов регистрации и локализации ранних стадий пробоя в бортовой аппаратуре и кабельной сети космических аппаратов, способных быть эффективно адаптированными к средствам телеметрии бортовой аппаратуры системы электропитания космического аппарата;

– разработка специализированного программного обеспечения, моделирующего разрядные процессы в трёхмерной макромодели,

приближенной к реальным объектам исследования и позволяющей выявлять и обосновывать ситуации риска дугообразования на стадии проектирования радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов.

2. Анализ существующих методов дефектоскопии показал, что:

– к актуальным с точки зрения возможности дугообразования дефектам относятся сквозные дефекты изоляционных покрытий с размерами более 0,5 мм и с расстоянием между неизолированными токоведущими частями до 5 мм;

– в многослойном изоляционном покрытии могут существовать несквозные дефекты в виде газосодержащих пор и внутренних трещин, а также в виде низкодисперсных включений частиц электропроводящих материалов, наличие такого типа дефектов может приводить к ускорению старения полимерных покрытий в ходе эксплуатации и, в конечном счете, к образованию электрического пробоя или дуги;

– актуальным, с точки зрения опасности для работы оборудования, следует считать размер латентных включений более 0,5 мм;

– дефекты электрических соединительных элементов приводят к увеличению переходного сопротивления, локальному повышению температуры, и, в случае частичного нарушения контакта, могут приводить к искрению, что в условиях вакуума неминуемо приводит к дуге.

3. Комплексный анализ характеристик существующих методов дефектоскопии позволил отобрать следующие методы для последующей разработки методики комплексного тестирования:

– для обнаружения и локализации дефектов изоляции проводов и кабелей бортовой кабельной сети космических аппаратов наиболее перспективными являются методы рефлексометрии, подобные, но не эквивалентные, рассмотренному в отчёте методу задержанного импульсного искрового разряда в комбинации с рефлексометрией, метод плазменного зондирования, а также использование оптоволоконных датчиков искрения;

– для обнаружения и локализации сквозных и латентных дефектов многослойных покрытий элементов бортовой РЭА перспективными являются метод использования флуоресцентных слоев, рефлексометрический метод, метод плазменного зондирования, тепловая диагностика с использованием локального вихретокового нагрева, а также использование оптоволоконных датчиков искрения;

– для обнаружения и локализации дефектов электрических соединительных элементов наиболее подходящими являются методы прямого измерения переходного сопротивления контактов, рефлексометрический метод, метод плазменного зондирования, тепловая диагностика с использованием локального вихретокового нагрева, а также использование оптоволоконных датчиков искрения.

4. Для ранней диагностики начальных стадий дугообразования возможно использование телеметрии, включающей:

– датчики и анализаторы спектра шумов токов, позволяющих распознавать инициирование первичной слаботочной дуги по специфическому спектру, являющемуся маркером катодной дуги;

– датчики вектора магнитного поля, позволяющие регистрировать слабые токи, текущие в нестандартных направлениях.

5. Для моделирования разрядных процессов в рамках трёхмерной макромодели радиоэлектронной аппаратуры в газовых средах и в вакууме требуется разработка собственного геометрического ядра, реализующего возможность импорта/экспорта геометрии, работу с геометрией, автоматизацию процессов и связь с программной средой COMSOL Multiphysics, осуществляющей вычислительный процесс на основе системы физических уравнений.

6. При разработке метода комплексного тестирования создание объектов интеллектуальной собственности возможно в направлениях:

– флуоресцентных покрытий для флуоресцентного метода диагностики;

- дефектоскопического оборудования и способов его применения для реализации метода плазменного зондирования;
- дефектоскопического оборудования для рефлексометрического метода;
- дефектоскопического оборудования для тепловизионного метода;
- способа телеметрии ранней стадии дугообразования в бортовой аппаратуре и кабельной сети космических аппаратов;
- специализированного диагностического комплекса тестирования бортовой аппаратуры и кабельной сети космических аппаратов.

Все пункты содержания работ по первому этапу выполнены в полном объёме, в частности:

- выполнен анализ современной научно-технической, нормативной, методической литературы, затрагивающей исследуемую научно-техническую проблему;
- проведены патентные исследования по теме работы;
- выполнена сравнительная оценка эффективности возможных направлений исследований;
- разработана общая концепция конструкции и функционирования комплекса оборудования для диагностики модулей бортовой аппаратуры и кабельной сети космических аппаратов с целью выявления рисков дугообразования;
- сформулированы и согласованы требования, предъявляемые к экспериментальному типовому модулю радиоэлектронной аппаратуры, с организацией - индустриальным партнёром.

На втором этапе выполнения работы следует выполнить теоретический анализ и обоснование набора физических параметров, требующих контроля с точки зрения дугообразования при разработке и эксплуатации космических аппаратов, и разработать критерии возникновения ситуаций риска дугообразования, реализующихся с различной вероятностью и с учетом физических условий внутреннего пространства модулей бортовой

аппаратуры и состояния изоляции и электрических контактов бортовой кабельной сети КА. Требуется также разработать алгоритм оценки вероятности дугообразования в модулях бортовой аппаратуры и кабельной сети космических аппаратов, разработать трёхмерную макромодель модуля аппаратуры и разработать экспериментальный образец программного комплекса. Для последующей проверки экспериментального образца программного комплекса требуется разработать тестовые задачи и «Программу и методики экспериментальных исследований» экспериментального образца программного комплекса.

Также на втором этапе требуется разработка технических решений конструкции экспериментального оборудования для имитации физических условий в модулях бортовой аппаратуры и кабельной сети космических аппаратов, соответствующих ситуациям риска дугообразования; технических решений для конструирования оборудования, реализующего мониторинг физических параметров среды и элементов в модулях бортовой аппаратуры и кабельной сети и интегрированного в аппаратуру; технических решений для конструирования оборудования для испытаний модулей бортовой аппаратуры и кабельной сети на устойчивость к дугообразованию. Требуется разработка технической документации на экспериментальный аппаратный комплекс, реализующий разработанные технические решения. Должна быть разработана «Программа и методика экспериментальных исследований» экспериментального аппаратного комплекса.

Планируемые результаты в целом имеют довольно узкую направленность практического использования, являющегося следствием специфичности условий эксплуатации КА, на решение проблем которых направлен данный проект. Методическая значимость ожидаемых результатов, безусловно, шире, в частности, подходы для формирования элементов и алгоритмов телеметрии ранних стадий дуги в РЭА имеет практическое значение для силовой электроники.

Выполнение проекта находится под постоянным и неформальным вниманием со стороны ОАО «ИСС» – индустриального партнёра. Полученные результаты будут использованы для разработки документации и опытных образцов оборудования в рамках СЧ ОКР, выполнение которой планируется сразу по окончании данного проекта ПНИ в рамках базовой технологии ОКР «Латент», «Промышленная технология выявления латентных дефектов бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов с длительным сроком активного существования на основе комплексного использования полей различной физической природы», предлагаемой ТП «НИСС» в «Проект перечня промышленных критических и базовых технологий на 2016-2025 годы» и упомянутой в отчёте ТП НИСС за 2013 год.

В долгосрочной перспективе результаты выполнения данного проекта позволят уменьшить долю КА, вышедших из строя до окончания расчётного срока активного существования 15 лет, предъявляемого в настоящее время к спутникам связи и навигации. Повышение надёжности САС КА повысит конкурентоспособность КА российского производства.

Полученные результаты являются оригинальными. Работа выполнена на мировом уровне разработок в предметной области исследования.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Len Losik, Using Analog Telemetry to Measure Spacecraft Equipment Usable Life Upgrading Factory ATP // Proc. 2012 IEEE Aerospace Conference.- 2012.- pp. 1-20.

2 Len Losik, Using Telemetry to Confirm Equipment Performance and Mission Life Requirements [Электронный ресурс].- 2009.- Режим доступа [http://www.failureanalysisco.com/yahoo\\_site\\_admin/assets/docs/Using\\_Telemetry\\_for\\_Confirming\\_Equipment\\_Performance\\_and\\_Mission\\_Life\\_Requirements.5173908.pdf](http://www.failureanalysisco.com/yahoo_site_admin/assets/docs/Using_Telemetry_for_Confirming_Equipment_Performance_and_Mission_Life_Requirements.5173908.pdf) свободный.- 10 с.- Яз. английский.

3 So Young Kim, Jean-Francois Castet, Joseph H. Saleh, Spacecraft electrical power subsystem: Failure behavior, reliability, and multi-state failure analyses // Reliability Engineering and System Safety.- 2012.- vol. 98.- pp. 55–65.

4 J. H. Saleh and J.-F. Castet, Spacecraft Reliability and Multi-State Failures: A Statistical Approach, First Edition.– John Wiley & Sons, Ltd. Published.– 2011.– 206 p.

5 Military Handbook. Reliability Prediction of Electronic Equipment.– MIL-HDBK-217F. Notice 2.– 1991.– 150 p.

6 M. R. Patel, Spacecraft power systems.- CRC Press.- 2005.- 691 p.

7 M. Cho, Failure Mechanisms and Protection Methods of Spacecraft Power System // Proc. Int. Symp. Electrical Insulating Materials.- June 5-9. 2005, Kitakyushu. Japan.- pp. 45-48.

8 V. L. Pisacane, The Space Environment and Its Effects on Space Systems.- AIAA.- 2008.- 421 p.

9 System Health Management with Aerospace Applications / edited by S. B. Johnson [et al.].- John Wiley & Sons, Ltd.- 2011.- 630 p.

10 Райзер Ю.П. Физика газового разряда. Научное издание. - 3-е изд., испр. и доп. - Долгопрудный: Издательский дом "Интеллект", 2009. - 736 с.

- 11 Сливков И.Н. Процессы при высоком напряжении в вакууме.– М.: Энергоатомиздат, 1986.– 256 с.
- 12 M. Baghban, O. Shekoofa, A Review on the Mechanisms of Electrical Arcing and Electrostatic Discharge on Space Solar Arrays // Proc. 6th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST-2013).- 12-14 June 2013.- pp. 595-599.
- 13 Автаева С.В., Барьерный разряд. Исследование и применение.- Бишкек: Изд-во КРСУ, 2009.- 152 с.- ISBN 978-9967-05-539-1.
- 14 M. Ranjan, N. Kumar P. Vaghela [et. al.], Arc Mitigation via Solar Panel Grouting and Curing Under Simulated LEO-Like Plasma Environment // IEEE Trans. Plasma Sci.- 2013.- vol. 41.- No. 12.- pp. 3323-3328.
- 15 M. Bodeau, Current and Voltage Thresholds for Sustained Arcs in Power Systems // IEEE Trans. Plasma Sci.- 2012.- VOL. 40.- NO. 2.- pp. 192-200.
- 16 D. C. Ferguson, New Frontiers in Spacecraft Charging // IEEE Trans. Plasma. Sci.- 2012.- VOL. 40.- NO. 2.- pp. 139-143.
- 17 S. T. Lai, Some Novel Ideas of Spacecraft Charging Mitigation // IEEE Trans. Plasma Sci.- Vol. 40.- No. 2.- pp. 402-409.
- 18 A. R. Khan, T. Sumida, M. Iwata [et. al.], Environment Exposure Tests of Electron-Emitting Film for Spacecraft Charging Mitigation // IEEE Trans. Plasma Sci.- 2012.- VOL. 40.- NO. 2.- pp. 380-387.
- 19 Y. Sanmaru, T. Ose, T. Kawasaki, [et. al.], Basic experiment on charging mitigation of solar array in geostationary orbit environment // Proc. XXIIInd Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum.-2006.- pp. 746-749.
- 20 T. Kitamura, Y. Sanmaru, T. Kawasaki, [et/ al], Dependence of sustained arc formation on charging environment of satellite solar array // Proc. XXIIInd Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum.-2006.- pp. 738-741.
- 21 J. Hanson, D. Konig, M. Judd, Fault Arc Tests in Cable Bundles under Microgravity Conditions // IEEE Trans. Dielectrics and Electrical Insulation.- 2000.- Vol. 7.- No. 6.- pp. 804-811.

- 22 Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология. Уч. пос. под ред. А.А. Берлина.– СПб.: Профессия, 2008.– 560 с.
- 23 Павленко В.И., Ястребинский Р.Н. Полимерные радиационно-защитные композиты: монография.– Белгород: Изд-во БГТУ, 2009.– 220 с.
- 24 Полимерные нанокомпозиты: пер. с англ. под ред. Ю-Винг Май и Жонг-Жен Ю.– М.: Техносфера, 2011.– 688 с.
- 25 Крыжановский В.К. Инженерный выбор и идентификация пластмасс.– СПб.: Изд-во НОТ, 2009.– 204 с.
- 26 Швейцер Ф.А. Коррозия пластмасс и резин: пер. с англ.– СПб.: Изд-во НОТ, 2010.– 640 с.
- 27 Милинчук В.К., Тупиков В.И., Брискман Б.А. и др. Радиационная стойкость органических материалов. Справочник.– М.: Энергоатомиздат, 1986.– 272 с.
- 28 Antioxidant Polymers: Synthesis, Properties, and Applications. edited by G. Cirillo, F. Iemma.– Danvers: Wiley, 2012.– 493 p.
- 29 Михайлин Ю.А. Тепло-, термо- и огнестойкость полимерных материалов.– СПб.: Изд-во НОТ, 2011.– 416 с.
- 30 Михайлин Ю.А. Термоустойчивые полимеры и полимерные материалы.– СПб.: Профессия, 2012.– 624 с.
- 31 Берштейн В.А., Егоров В.М. Дифференциальная сканирующая калориметрия в физикохимии полимеров.– Л.: Химия, Ленингр. отделение, 1990.– 254 с.
- 32 Чалых А.Е., Алиев А.Д., Рубцов А.Е. Электронно-зондовый микроанализ в исследовании полимеров. (ИФХ АН СССР); под ред. А.П. Захарова.– Москва: Наука, 1990.– 192 с.
- 33 Рот Г.-К., Келлер Ф., Шнайдер Х. Радиоспектроскопия полимеров: пер. с нем.– М.: Мир, 1987.– 380 с.
- 34 Збинден Р. Инфракрасная спектроскопия высокополимеров: пер. с англ. под ред. Л.А. Блюменфельда.– Москва: Мир, 1966.– 355 с.

- 35 Беленький Б.Г., Виленчик Л.З. Хроматография полимеров.– М.: Химия, 1978.– 343 с.
- 36 Экман Р. и др. Масс-спектрометрия: аппаратура, толкование и приложения: пер. с англ.– М.: Техносфера, 2013.– 352 с.
- 37 Грелльманн В., Зайдлер С. Испытания пластмасс: пер. с англ.– СПб.: Профессия, 2010.– 720 с.
- 38 Шах В. Справочное руководство по испытаниям пластмасс и анализу причин их разрушения: пер. с англ. под ред. А.Я. Малкина.– СПб.: Изд-во НОТ, 2009.–732 с.
- 39 Куница Т.Н., Романов Б.С. О возможности эксплуатации в нестандартных условиях кабелей и проводов для авиакосмической техники // Кабели и провода.– 2010.– № 3 (322).– с. 31-33.
- 40 M. Cho, J. Kim, S. Hosoda, [et. al.], Electrostatic Discharge Ground Test of a Polar Orbit Satellite Solar Panel // IEEE Trans. Plasma Sci.– 2006.- VOL. 34.– NO. 5.– pp. 2011-2029.
- 41 K. J. Ferreira, Fault Location for Power Transmission Systems Using Magnetic Field Sensing Coils.- M.Sci. thesis, Worcester Polytechnic Institute, 2007.- 139 p.
- 42 André Anders, Efim Oks, Material-dependent high-frequency current fluctuations of cathodic vacuum arcs: Evidence for the ecton cutoff of the fractal model // J. Appl. Phys.- 2006.- Vol. 99.- pp. 103301(1-5).
- 43 A. G. Sun, M. W. Crofton, J. A. Young, [et. al], L-, S-, and C-Band EMI Measurement and Characterization of Spacecraft ESD Events // IEEE Trans. Plasma Sci.- 2013.- VOL. 41.- NO. 12.- pp. 3505-3511.
- 44 T. Yoke, S. Iwai, A. R. Khan, [et. al.], Development of Mission Payloads Onboard High Voltage Technology Demonstration Satellite HORYU-II // IEEE Trans. Plasma Sci.- 2013.- VOL. 41.- NO. 12.- pp. 3477-3486.
- 45 D. C. Ferguson, B. V. Vayner, J. T. Galofaro, [et. al.], NASA GRC and MSFC Space Plasma Arc Testing Procedures // IEEE Trans. Plasma Sci.- 2006.- Vol. 34.- No. 5.- pp. 1948-1958.

- 46 Павлов Н.Н. Старение пластмасс в естественных и искусственных условиях.– М.: Химия, 1982.– 224 с.
- 47 Багиров М.А., Малин В.П. Электрическое старение полимерных диэлектриков.– Баку: Азернешр, 1987– 208 с.
- 48 Грасси Н. Химия процессов деструкции полимеров: пер. с англ. под ред. Ю.М. Малинского.– М.: Изд-во иностранной литературы, 1959.– 252 с.
- 49 Денисов Е.Т. Окисление и деструкция карбоцепных полимеров.– Л.: Химия, 1990.– 286 с.
- 50 Горение, деструкция и стабилизация полимеров. Под ред. Г.Е. Заикова.– СПб.: Научные основы и технологии, 2008.– 422 с.
- 51 Смолянский А.С., Липов С.С., Никитин Д.В. Информационные технологии в радиационных испытаниях и прогнозировании свойств материалов космической техники. Часть 2. Практические аспекты применения системы «Космотест» // ВЕСТНИК АлтГТУ им. И.И. Ползунова.– 2006.– №2.– с. 139-142.
- 52 Valatka P., Sučila V. Investigation of the Voltage Influence on Partial Discharge Characteristic Parameters in Solid Insulation // Electronics and electrical engineering.– 2010.– № 10(106).– p. 63-66.
- 53 Русов В.А. Измерение частичных разрядов в изоляции высоковольтного оборудования.– Екатеринбург: УрГУПС, 2011– 367 с.
- 54 Патент ЕС № EP2772769 A1 МПК G01R 31/11 Time domain reflectometer, 2014.
- 55 Городов В. Методы электрического контроля печатных плат // Технологии в электронной промышленности.– 2005.– №1.– с. 68-71.
- 56 Поляк Э.В. Люминесцентный метод дефектоскопии и опыт применения его в машиностроении, в сб.: Дефектоскопия металлов, М.: Гос. Изд. оборон. пром., 1959– с. 139.
- 57 Прохоренко П.П. Капиллярный неразрушающий контроль.– Мн.:ИПФ, 1998. - 160 с.

58 Larson B., Study of the factors affecting the sensitivity of liquid penetrant inspections: review of literature published from 1970 to 1998 [Электронный ресурс].- 2002.- Режим доступа [https://www.cnde.iastate.edu/faa-casr/fpi/Papers/CASR\\_FPI\\_Literature\\_Review.pdf](https://www.cnde.iastate.edu/faa-casr/fpi/Papers/CASR_FPI_Literature_Review.pdf) свободный.- 59 с.- Яз. английский.

59 Bryant D.E., Greenfield D. The use of fluorescent probes for the detection of under-film corrosion // Progress in Organic Coatings.- 2006.- №57.- p. 416 – 420.

60 Патент US6014209 (A) от 01.11.2000, МПК G01N21/95: Method of optically inspecting multi-layered electronic parts and the like with fluorescent scattering top layer discrimination and apparatus therefor.

61 Schneider L., Howard K., Glover S., Lockner T., Dinallo M. A new capability to detect and locate insulation defects in complex wiring systems // IEEE Electrical Insulation Magazine.- 2005.- Vol. 21.- No. 4.- p. 14-20.

62 Патент US2003/0201780 (A1) от 30.10.2003, МПК G01R 31/08: Parallel arc fault diagnostic for aircraft wiring.

63 Патент 2014/0049264 (A1) от 20.02.2014, МПК G01R 31/02: Prognostics system and method for fault detection in electrical insulation.

64 Патент US 4891597 (A) от 02.01.1990, МПК G01R 31/12: Synchronous detection and location of insulation defects.

65 Патент US 2005/0134837 (A1) от 23.06.2005, МПК G01N 21/00: Detection of partial discharge or arcing in wiring via fiber optics.

66 Д. Любимцев, Компоненты TE Connectivity. Индустриальное применение. 30.07.2012 [Электронный ресурс].- 2012.- Режим доступа [http://www.compel.ru/wordpress/wp-content/uploads/2012/07/TE-Connectivity\\_Industrial-solutions.pdf](http://www.compel.ru/wordpress/wp-content/uploads/2012/07/TE-Connectivity_Industrial-solutions.pdf) свободный.- 101 с.- Яз. русский.

67 Васильев И.С., Сунцов С.Б., Ефремов С.В., Ким В.С. Проведение испытаний обжимных электрических соединений в бортовой кабельной сети космического аппарата с целью определения их характеристик // Вестник СибГАУ.- 2014.- № 1(53).- с. 114-118.

68 ESCC Detail Specification № 3401/002 «Connectors, electrical, rectangular removable crimp contacts, based on type D\*MA».- 2006.- ECSS Q ST-70-26C.

69 Сафонов Л., Сафонов А. Электрические прямоугольные соединители. Электролитическое получение серебряных и золотых покрытий повышенной твердости и износостойчивости // Технологии в электронной промышленности.- 2007.- №7.- с. 54-59.

70 Петрунин И.Е., Справочник по пайке, 3-е изд. - М.: Машиностроение-1, 2003. - 480 с.

71 Бакутин В. Н., Заика Ж. А., Карпов В. И. Определение дефектов пайки радиационным методом // Дефектоскопия.- 1972.- № 6.- С. 75-80.

72 Ремизов А. Л. Ультразвуковая дефектоскопия паяных соединений строительных металлоконструкций / В сб.: Пайка 2000.- Тольятти, 2000.- С. 89 - 95.

73 Реука С.В. Акустические методы и средства неразрушающего контроля, Систематический указатель.- Спб.: Изд-во ЛЭТИ, 2009.- 71 с.

74 Лышов С.М., Иванов И.А., Увайсов С.У. Неразрушающий контроль целостности конструкции бортовой аппаратуры // Надёжность и качество – 2013: труды Междун. симпоз.: в 2-х т. /Под ред. Н.К. Юркова. – Пенза: Изд-во ПГУ, 2013. – Т.2. – С. 386-387.

75 Будадин О.Н., Потапов А.И., Колганов В.И., Троицкий-Марков Т.Е., Абрамова Е.В., Тепловой неразрушающий контроль изделий.- М.: Наука, 2002.- 472 с.

76 Патент RU 2033599 С1 от 20.04.1995; МПК G01J5/10: Устройство для контроля состояния электронных плат.

77 Ю.Урличич, В. Субботин, В. Стешенко, Обеспечение аппаратуры ракетно-космической техники электронной компонентной базой [Электронный ресурс].- 2011.- Аэрокосмический курьер, № 5(77).- Режим доступа <http://www.spacecorp.ru/press/publications/item2740.php> свободный.- 11 с.- Яз. русский.

78 Васильев И.С., Сунцов С.Б., Ким В.С. Исследование уровня надежности обжимных электрических соединений в бортовой кабельной сети космических аппаратов в процессе испытаний // Труды 3-й научно-техническая конференция молодых специалистов, ОАО «ИСС им. ак. М.Ф. Решетнева», г. Железногорск.– 2014.– с. 68-70.

79 Глудкин О.П., Енгальчев А.Н., Коробов А.И., Трегубов Ю.В. Испытания радиоэлектронной, электронно-вычислительной аппаратуры и испытательное оборудование / под редакцией Коробова А.И.- М.: Радио и связь, 1987.- 272 с.

80 Integral methods in low-frequency electromagnetics / Pavel Solin, Ivo Dolezel, Pavel Karban - Hoboken, N.J : Wiley, 2009. - 388 p.

81 Z.-L. He, K. Huang, C.-H. Liang. Hybrid finite difference/finite volumemethod for 3-d conducting media problems // Progress In Electromagnetics Research M. – 2012.– Vol. 24. – P. 85–95.

82 Моррис Д. Моделирование электромагнитных полей – как выбрать лучший метод / Д. Моррис // Электроника НТБ. – 2012. – №3. – С.124-129.

83 Салов В.К. Совершенствование моделирования и обеспечения электромагнитной совместимости бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов: диссертация ... кандидата технических наук: 05.12.04 / Салов Василий Константинович; [Место защиты: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники].- Томск, 2014.- 146 с.

84 Васильева О.В. Моделирование картин электромагнитных полей на основе переходных процессов / О.В. Васильева // «Современные проблемы науки и образования» – 2013. – №4. С. 56-64.

85 Конников И. А. Метод расчета электромагнитного поля в задачах микроэлектроники / И. А. Конников // Журнал радиоэлектроники – 2012. – №8. – С. 16-21.

86 Соколов А. Б. Обеспечение стойкости бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов к воздействию электростатических разрядов : диссертация ... доктора технических наук : 05.12.04 / Соколов

Алексей Борисович; [Место защиты: Моск. гос. ин-т электроники и математики].- Москва, 2009.- 236 с.: ил. РГБ ОД, 71 09-5/405

87 Важность корректного учёта частотной зависимости диэлектрической проницаемости материалов при моделировании задач ЭМС / В.К. Салов, Т.Р. Газизов, П.Е. Орлов // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2012. – Т. 55. – №9/3. – С. 106–108.

88 Иванов В.А., Кириллов В.Ю., Морозов Е.П. Моделельные и стендовые исследования электризации космических аппаратов / Под ред. В Ю. Кириллова. - М.: Изд во МАИ, 2012, - 168 с.

89 Суханов М.М. Системы автоматизированного проектирования для ЭМС [Электронный ресурс]. URL: <http://elcut.ru/publications/sukhanov5.pdf>

90 Васильев В.А., Калмыкова М.А. Анализ и выбор программных продуктов для решения инженерных задач приборостроения // Современная техника и технологии. 2013. № 3 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://technology.snauka.ru/2013/03/1702> свободный. Яз. Английский. (Дата обращения: 12.10.2014).

91 Обзор возможностей систем автоматизированного проектирования для схемотехнического и топологического моделирования радиоэлектронной аппаратуры: моногр. / В.М. Карабан [и др.]. – Томск: Изд-во Томск. гос. Ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2013. – 86 с.

92 Геттих А. Линейка программных продуктов для высокочастотного электродинамического анализа от компании ANSYS. Обзор применений и новые возможности / А. Геттих // Региональный форум пользователей ANSYS, Нижний Новгород, 18-19 апреля 2012.

93 Красников Г.Е., Нагорнов О.В., Старостин Н.В. Моделирование физических процессов с использованием пакета Comsol Multiphysics. М.: НИЯУ МИФИ, 2012.– 184 с.

94 Roger, W. Multiphysics Modeling Using COMSOL A First Principles Approach / W.Roger. -Jones and Bartlett Publishers, LLC, 2009.- p.872.

95 Altium Modeler for SolidWorks | Desktop EDA [Электронный ресурс]: Официальный сайт золотого партнера SolidWorks, партнера Solid Edge Voyager, члена Autodesk Developer Network, глобального поставщика средств трехмерного моделирования ECAD и MCAD в сети интернет. 2014. Режим доступа <http://www.desktop-eda.com.au/solidworks-modeler-for-altium-designer> свободный. Яз. Английский. (Дата обращения: 10.09.2014).

96 CAD/CAM Functions | PCB-Investigator [Электронный ресурс]: Официальный сайт PCB-Investigator в сети интернет. 2014. Режим доступа <http://www.pcb-investigator.com/> свободный. Яз. Английский. (Дата обращения: 14.11.2014).

97 Electrical CAD to Mechanical CAD Interchange - CircuitWorks [Электронный ресурс]: Официальный сайт Dassault Systèmes SOLIDWORKS Corporation в сети интернет. 2014. Режим доступа <http://www.solidworks.com/sw/products/3d-cad/electrical-mechanical-cad-interchange-circuitworks.htm> свободный. Яз. Английский. (Дата обращения: 22.09.2014).

98 Xpedition Enterprise - PCB design flow - Mentor Graphics [Электронный ресурс]: Официальный сайт Mentor Graphics в сети интернет. 2014 Режим доступа <http://www.mentor.com/pcb/xpedition/>. Яз. Английский. (Дата обращения: 14.11.2014).

99 PADS Mentor Graphics provides affordable, intuitive printed circuit board (PCB) design software, providing tools for schematic, layout, and rapid prototyping [Электронный ресурс]: Официальный сайт Mentor Graphics PADS в сети интернет. 2014. Режим доступа [www.pads.com](http://www.pads.com) свободный. Яз. Английский. (Дата обращения: 02.10.2014).

100 Mitzner K. Complete PCB Design Using OrCAD Capture and PCB Editor/ K.Mitzner. -Newnes, 2009.- first edition.- p. 488.

101 C3D Labs [Электронный ресурс]: Официальный сайт компании АСКОН в сети интернет. 2014. Режим доступа

<http://c3dlabs.com/ru/news/items/?news=1685&current=3> свободный. Яз. Русский. (Дата обращения: 14.10.2014).

102 ACIS [Электронный ресурс]: Wikipedia ACIS. 2014. Режим доступа <http://en.wikipedia.org/wiki/ACIS> свободный. Яз. Английский. (Дата обращения: 21.10.2014).

103 Munir M. H. AutoCAD 2014 Beginning and Intermediate/ М.Н.Мунир.-Mercury Learning & Information, 2013.- p. 700.

104 Bethune J.D. Engineering Design and Graphics with SolidWorks / Bethune J.D. Newnes.- 2009.- p. 552.

105 Parasolid: Siemens PLM Software [Электронный ресурс]: Официальный сайт Siemens PLM SoftWare в сети интернет. 2014. Режим доступа [http://www.plm.automation.siemens.com/en\\_us/products/open/parasolid/index.shtml](http://www.plm.automation.siemens.com/en_us/products/open/parasolid/index.shtml) свободный. Яз. Английский. (Дата обращения: 05.11.2014).

106 Jaecheol K. CATIA V5 Design Fundamentals: A Step by Step Guide / K.Jaecheol.- CreateSpace Independent Publishing Platform, 2012. - p.512.

107 Ганин Н. Автоматизированное проектирование в системе КОМПАС-3D V12 / Н.Ганин.- ДМК Пресс, 2010. – 368 с.

108 А.В. Батраков, Е.Л. Дубровская, К.В. Карлик и др., Физическое моделирование вторичного дугообразования в диапазоне давлений окружающей среды от атмосферного уровня до уровня вакуума // Известия вузов. Физика.- 2014.- т. 57.- № 11.- с. 7-11.

109 Козлов О.В. Электрический зонд в плазме.– М: Атомиздат.– 1969.– 293 с.

110 A. Anders, I.G. Brown, R.A. MacGill and M.R. Dickinson, ‘Triggerless’ triggering of vacuum arcs // J. Phys. D: Appl. Phys.– 1998.– vol. 31.– pp. 584–587.

111 Крейндель Ю.Е. Плазменные источники электронов. – М.: Атомиздат. 1977.– 144 с.

112 Крейндель Ю.Е., Мартенс В.Я., Съедин В.Я., Гавринцев С.В. Электронная пушка непрерывного действия с плазменным катодом большой площади // ПТЭ.– 1982.– № 4.– с. 178–180.

113 Семёнов А.П., Мохосоев М.В. К вопросу снижения напряжения горения разряда в скрещенных электрическом и магнитном полях // ЖТФ.– 1984.– Т. 54.– № 11.– с. 2276–2277.