

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт космических и информационных технологий
Институт

Межинститутская базовая кафедра
«Прикладная физика и космические технологии»
кафедра

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ В.Е. Косенко
подпись инициалы, фамилия
«_____ » _____ 2020 г

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

«Исследование и разработка технологии производства сверхвысокочастотных
кабельных сборок для нужд космической промышленности»
тема

27.04.03 «Системный анализ и управление»
код и наименование направления

27.04.03.06 «Основы проектирования космических аппаратов»
код и наименование магистерской программы

Научный
руководитель

подпись, дата

Главный учёный секретарь
НТС АО «ИСС», д-р техн.
наук, проф-р

должность, ученая степень

Е.Н. Головёнкин

инициалы, фамилия

Выпускник

подпись, дата

И.О. Трифанов

инициалы, фамилия

Рецензент

подпись, дата

Ведущий инженер АО
«ИСС», канд.техн.наук

должность, ученая степень

Д.А. Большаков

инициалы, фамилия

Нормоконтролер

подпись, дата

Профессор МБК ПФиКТ, д-
р техн. наук, доцент

должность, ученая степень

В.Е. Чеботарев

инициалы, фамилия

Красноярск 2020

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт космических и информационных технологий
институт

Межинститутская базовая кафедра
«Прикладная физика и космические технологии»
кафедра

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ В.Е. Косенко
подпись инициалы, фамилия
«_____ » _____ 2020 г

**ЗАДАНИЕ
НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ
в форме магистерской диссертации**

Студенту Трифанову Ивану Олеговичу
фамилия, имя, отчество

Группа КИ 18-03-6М Направление, (специальность) 27.04.03
номер код

«Системный анализ и управление»

наименование

(27.04.03.06 «Основы проектирования космических аппаратов»).

код

наименование

Тема выпускной квалификационной работы: «Исследование и разработка технологии производства сверхвысокочастотных кабельных сборок для нужд космической промышленности»

Утверждена приказом по университету № _____ от _____

Руководитель ВКР: Е.Н. Головёнкин, Главный ученый секретарь НТС, АО «ИСС» д-р техн. наук, проф., профессор МБК «Прикладная физика и космические технологии»

инициалы, фамилия, должность, ученое звание и место работы

Исходные данные для ВКР: Техническая документация на бортовые кабельные сборки полезной нагрузки космического аппарата

Перечень разделов ВКР:

- 1 Состав и конструкция бортового ретрансляционного комплекса.
- 2 Высокочастотные характеристики бортового ретрансляционного комплекса.
- 3 Общие сведения о коаксиальных линиях передачи.
- 4 Полуавтоматическая установка бесконтактной пайки соединителей.
- 5 Результат тестирования установки бесконтактной пайки соединителей.
- 6 Технология создания кабельных сборок и подтверждение характеристик.

Руководитель ВКР _____
подпись

Е.Н. Головёнкин
инициалы и фамилия

Задание принял к исполнению _____
подпись

И.О.Трифанов
инициалы и фамилия студента

« ____ » _____ 2020 г.

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа по теме «Исследование и разработка технологии производства сверхвысокочастотных кабельных сборок для нужд космической промышленности» содержит 101 страницу текстового документа, 4 приложений, 12 использованных источников.

КОАКСИАЛЬНЫЕ КАБЕЛЬНЫЕ СБОРКИ, КАБЕЛЬ, СОЕДИННИТЕЛЬ, БЕСКОНТАКТНАЯ ПАЙКА, ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ.

Во введении дается краткая характеристика связной полезной нагрузки (далее ПН) космического аппарата, объясняется роль кабельных сборок в ее функционировании, кратко описываются основные тренды отрасли. Формируются цели и задачи работы. Приводятся средства и методы достижения целей и решения задач. Раскрывается актуальность и новизна работы.

В разделе 1 рассматривается типовая конструкция и состав связной ПН, как наиболее распространенной и хорошо описанной в открытых источниках. Приводится анализ количества кабельных сборок в ПН на примере ПН, основанной на бортовом ретрансляционном комплексе. Приводится анализ интерфейсов и габаритных размеров бортового оборудования.

В разделе 2 приводится типовой набор важнейших радиотехнических характеристик (далее РТХ) ретрансляционной полезной нагрузки, из них определяются наиболее требовательные к параметрам кабельных сборок. Приводятся результаты влияния рассогласования на неравномерность характеристик бортового ретранслятора (далее РТР). Подчеркивается важность параметров электротехническости соединителей и кабелей на электромагнитную совместимость (далее ЭМС) бортовых систем и дается ссылка на методику ее оценки.

В разделе 3 содержатся краткие сведения о линиях передачи. Приводится эквивалентная схема кабельной сборки на распределенных элементах. Дается аналитическая оценка компонентам затухания, их погонным, статическим и локализованным значениям. Подчеркивается важность волнового сопротивления как с точки зрения согласования линии передачи, так и с точки зрения оптимизации передачи энергии. На примере сравнения с воздушной линией показано влияние диэлектрика на вносимые коаксиальным кабелем потери в линию передачи.

В приложениях к пояснительной записке представлены отчет по результатам электротермовакуумных испытаний и расчет доз облучения для проведения испытаний на устойчивость к космической радиации.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	6
1 Состав и конструкция Бортового Ретрансляционного Комплекса	8
1.1 Направленные ответвители.....	9
1.2 Входные и выходные фильтры	9
1.3 Матрица переключателей	10
1.4 Малошумящий усилитель	10
1.5 Конвертеры	11
1.6 Линеаризующий усилитель на лампе бегущей волны	13
1.7 Цифровой коммутатор	14
1.8 Передатчик маякового сигнала.....	15
1.9 Пассивные компоненты бортового ретрансляционного комплекса	16
1.10 Общая электрическая схема бортового ретрансляционного комплекса ...	17
2 Высокочастотные характеристики бортового ретрансляционного комплекса, чувствительные к качеству кабельных сборок	19
2.1 Неравномерность амплитудно-частотной характеристики	19
2.2 Неравномерность группового времени запаздывания	20
2.3 Коэффициент стоячей волны	21
2.4 Электромагнитная совместимость и электротермическая прочность	22
3 Общие сведения о коаксиальных линиях передачи	24
3.1 Кабели	24
3.2 Переходы и соединители	31
4 Полуавтоматическая установка бесконтактной пайки соединителей	44
5 Результаты тестирования установки бесконтактной пайки соединителей	55
6 Технология создания кабельных сборок и подтверждение характеристик	57
6.1 Технология создания кабельных сборок	57
6.2 Подтверждение радиочастотных характеристик	64
Заключение	74
Список сокращений	75
Список использованных источников	77
Приложение А Общая электрическая схема БРК С диапазона	78
Приложение Б Проверка ВЧ соединений на электротермическую прочность	79
Приложение В Отчет по результатам электротермовакуумным испытаниям созданных кабельных сборок	86
Приложение Г Расчет доз облучения при испытаниях на устойчивость к космической радиации	100

ВВЕДЕНИЕ

Полезная нагрузка связного космического аппарата, как правило, представляет собой бортовой ретрансляционный комплекс (далее БРК). В негерметичном исполнении (которое является стандартным для современных конструкций космических аппаратов) БРК представляет собой блочную (модульную) конструкцию, состоящую из приборов, расположенных на сотопанелях и соединенных кабельными сборками.

В настоящее время в отрасли спутниковой системы связи (далее ССС) наблюдается дефицит частотно-орбитального ресурса. Это обстоятельство вынуждает конструкторов связных космических аппаратов (далее КА):

- расширять и сдвигать вверх диапазон рабочих частот до 50 ГГц;
- усложнять сигнально-кодовые конструкции;
- увеличивать количество каналов до 80 и более;
- стремиться создавать БРК с максимально линейными характеристиками.

Ужесточение требований и усложнение конструкции БРК накладывает повышенные требования к качеству кабельных сборок и делает более значительной их роль в функционировании БРК и КА в целом. Количество кабельных сборок может достигать 600 единиц на одно изделие. Доля импортных сборок в составе БРК (по данным на 07.2019) более 99,9%. Проблема импортозамещения в этой области стоит очень остро.

В настоящей работе рассматривается влияние параметров кабельных сборок на РТХ БРК, приводятся факторы, определяющие критически значимые параметры кабельных сборок, и предлагается технология полуавтоматического производства кабельных сборок диапазона сверхвысокочастотных (далее СВЧ).

Целью работы является разработать технологию производства кабельных сборок диапазона СВЧ, пригодных для применения в бортовых и наземных системах КА.

Основные задачи работы:

- изучение общей структуры полезной нагрузки КА на примере ретрансляционной полезной нагрузки;
- определение характеристик бортовых ретрансляционных систем, наиболее чувствительных к качеству кабельных сборок;
- определение особенностей кабельных сборок СВЧ;
- разработка полуавтоматической установки бесконтактной пайки соединителей;
- разработка технологии создания кабельных сборок с применением полуавтоматической установки бесконтактной пайки соединителей;
- подтверждение характеристик созданных радиочастотных кабельных сборок.

Методы и средства решения задач:

Задачи работы решались по средствам изучения тематической литературы, специальной литературы (программы и методики испытаний ПН,

отчеты об испытаниях, методики экспресс-анализа, СТП, и др.) В ходе работы проводился анализ влияния характеристик кабельных сборок на РТХ бортовых ретрансляционных систем. В ходе работы проводилось моделирование конструкции кабельных сборок на ЭМС.

Актуальность и новизна работы:

Актуальность работы обусловлена усложнением конструкции и уплотнением бортового оборудования ССС. Эти обстоятельства предъявляют повышенные требования к таким характеристикам межблочных линий передачи (кабельных сборок, волноводов), как:

- качество согласования коэффициента стоячей волны (КСВн, S_{11});
- эффективность экранирования;
- однородность;
- вносимые потери;
- верхний рабочий диапазон частот.

Без обеспечения качества этих показателей на высоком уровне, дальнейшее развитие ССС в рамках сложившегося тренда представляется невозможным.

Новизна работы обуславливается тем, что в настоящий момент 99 % всей бортовой и наземной (технологической) кабельной продукции СВЧ в космической промышленности является импортной. Наряду с отсутствием конкурентоустойчивой отечественной компонентной базы, наблюдается так и отсутствие сертифицированной технологии производства, обеспечивающей качество и повторяемость продукции.

Настоящая работа решает одну из важнейших прикладных задач на пути к взаимопревращению: она предлагает оригинальную технологию производства, имеющую большой потенциал к внедрению в масштабах отрасли.

1 Состав и конструкция Бортового Ретрансляционного Комплекса

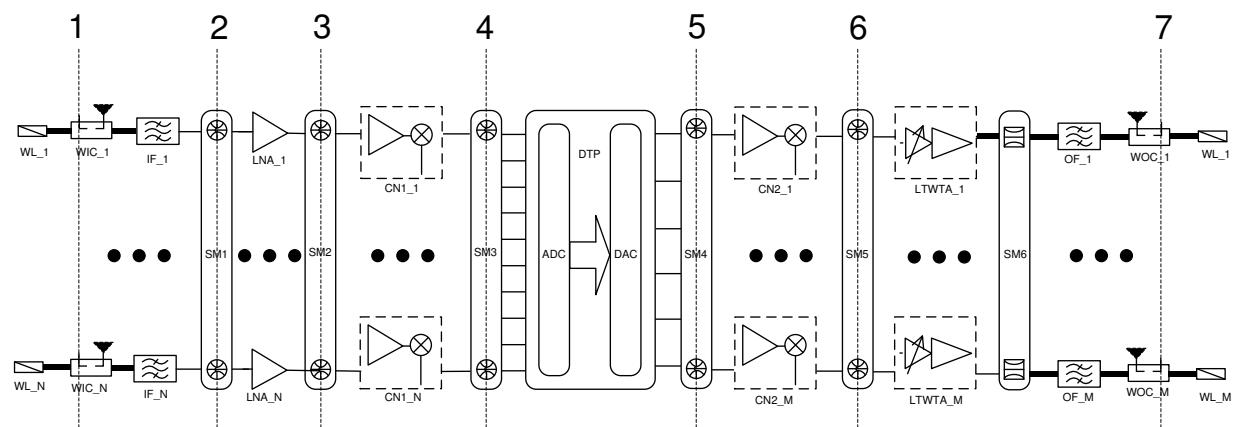
По функциональному назначению и особенностям создания можно выделить два компонента связного КА:

- модуль полезной нагрузки (далее МПН), предназначенный для выполнения целевой задачи (ради которой создается КА);
- модуль служебных систем (МСС), предназначенный для обеспечения работы МПН.

МСС разрабатывается как относительно универсальная конструкция под конкретный тип МПН. Наиболее распространенные типы платформ выпускались множество раз и являются достаточно хорошо отработанными.

Конструкция МПН, как правило, является достаточно уникальной и определяется целевой задачей КА. В связных ПН основным компонентом МПН является БРК. Многоствольные связные БРК являются наиболее сложным и разветвленными (с точки зрения внутренних линий передачи) изделиями.

Существует несколько подходов к проектированию БРК. Современные тенденции развития ССС подразумевают применение БРК с гибкой цифровой коммутацией сигналов. На рисунке 1 упрощенно представлена схема БРК с цифровой коммутацией сигналов.



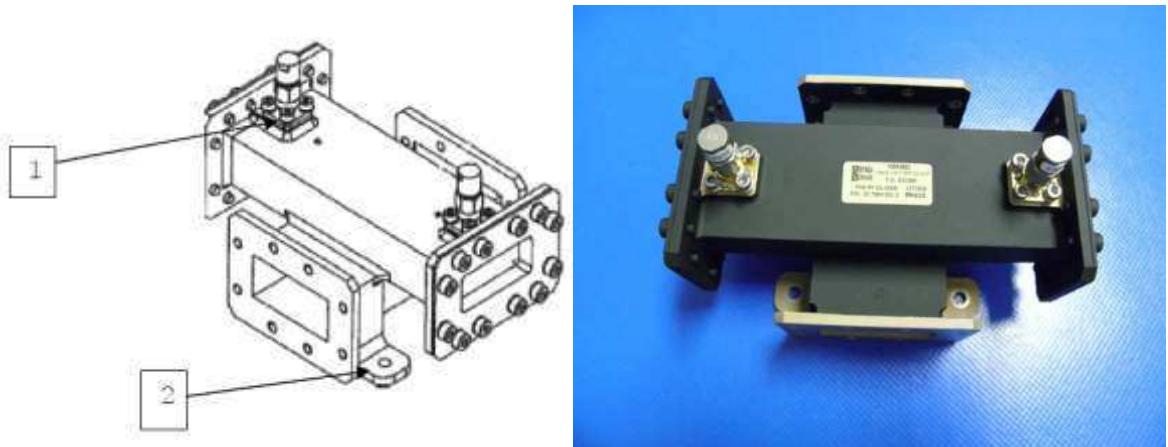
WIC – входной тестовый НО; IF – входной фильтр; LNA – малошумящий усилитель; CN1 – первый конвертер; DTP – цифровой коммутатор/обработчик; CN2 – второй конвертер; LTWTA – линеаризующий усилитель на УЛБВ; OF – выходной фильтр; WOC – выходной тестовый НО; WL – согласующая нагрузка; SM – коммутационная матрица.

Рисунок 1 – Обобщенная схема РТР с обработкой и контрольные точки подключения КПА

Далее рассмотрим отдельные составляющие РТР.

1.1 Направленные ответвители

Направленные ответвители (далее НО) предназначены для подключения контрольно-проверочной аппаратуры во время испытаний БРК на заводе-изготовителе. Как правило, применяются двунаправленные ответвители с прямым каналом, имеющим волноводные интерфейсы и ответвленными с коаксиальными интерфейсами. На рисунке 2 представлены НО.



1 – коаксиальные интерфейсы; 2 – волноводные интерфейсы

Рисунок 2 – НО с установленными согласующими коаксиальными нагрузками

Поскольку, НО являются частью рабочего ВЧ тракта РТР важными параметрами для них являются качество согласования и вносимые потери.

1.2 Входные и выходные фильтры

Фильтры служат для формирования рабочей полосы частот РТР и могут иметь как волноводные, так и коаксиальные интерфейсы.

На рисунке 3 представлен волноводно-коаксиальный фильтр С-диапазона.

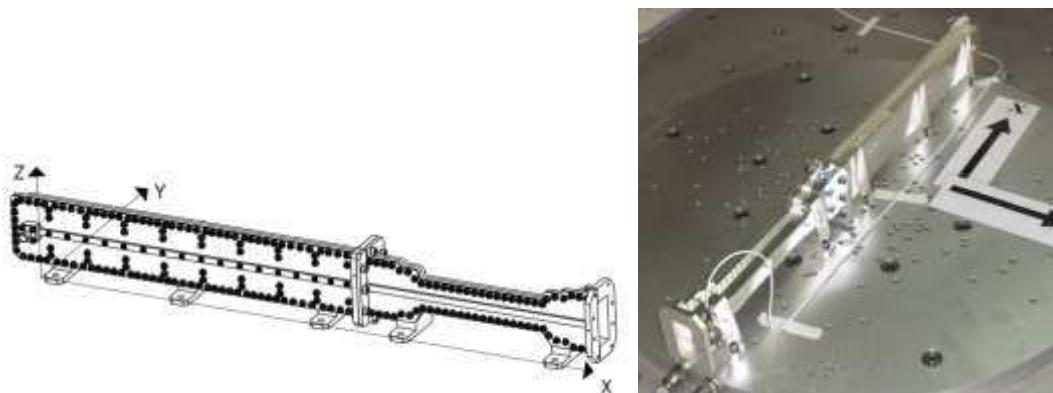


Рисунок 3 – Фильтр С-диапазона с коаксиальным и волноводным интерфейсами

Важными параметрами фильтров являются неравномерности амплитудно-частотной характеристики (далее АЧХ) и групповое время запаздывания (далее ГВЗ). Чтобы обеспечить требуемые значения НАЧХ и НГВЗ необходимо обеспечить качественное согласование, как по входу так и по выходу фильтра.

1.3 Матрица переключателей

Матрицы переключателей предназначены для обеспечения резервирования оборудования БРК в случае выхода из строя, а так же для изменения конфигурации (при необходимости). Переключатели могут иметь как коаксиальные, так и волноводные интерфейсы. Переключатели, расположенные после срезами 3 и 6 на рисунке 1, как правило, являются коаксиальными.

На рисунке 4 представлены матрица коаксиальных переключателей в сборе и один переключатель Т-типа отдельно.

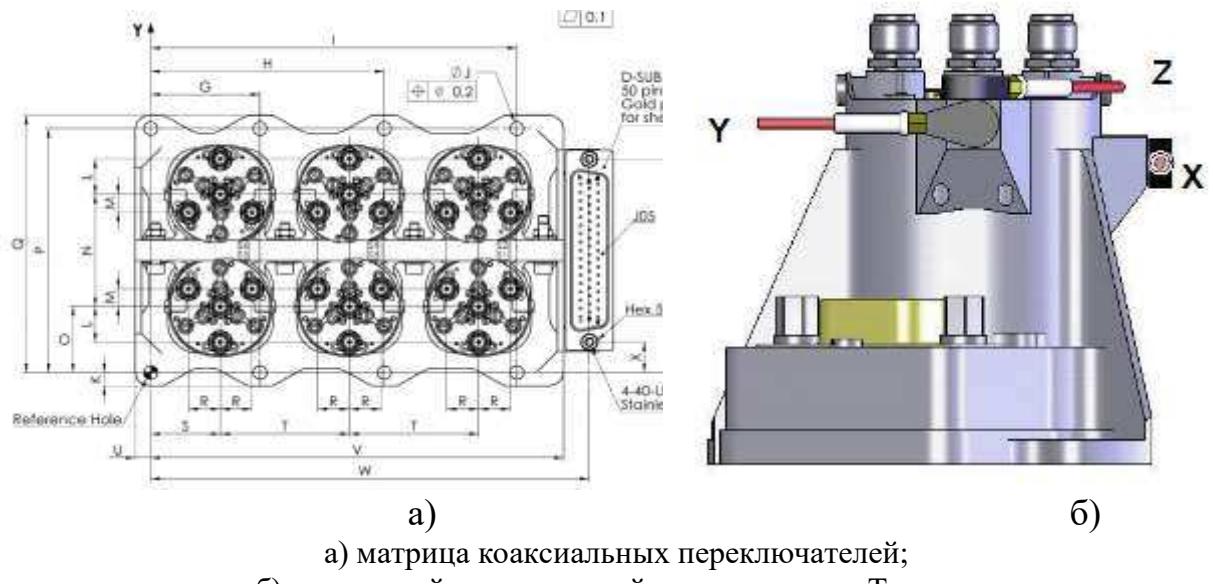


Рисунок 4 – матрица коаксиальных переключателей

1.4 Малошумящий усилитель

Малошумящий усилитель (далее МШУ) выполняют предварительное усиление сигнала, полученного от приемного антенно-фидерного тракта до уровня, достаточного для дальнейших преобразования и усиления.

Потери в тракте от приемного облучателя антенно-фидерной системы до МШУ стараются минимизировать, т.к. они оказывают максимальное влияние на добротность (G/T) РТР. МШУ могут содержать как волноводные, так и коаксиальные интерфейсы.

На рисунке 5 представлена сборка из трех МШУ С-диапазона частот с коаксиальными интерфейсами.



Рисунок 5 – Сборка МШУ С-диапазона (вид сбоку)

1.5 Конвертеры

В ССС диапазоны частот на линиях «вверх» (земля-борт) и «вниз» (борт-земля) всегда делаются с большим разносом. Это необходимо для обеспечения частотной развязки между входными и выходными трактами БРК.

Диапазоны частот по входу и выходу РТР регламентируются международными документами [1]. Они лежат в соответствии с международной классификацией в микроволновых диапазонах С, Ku, Ka (30/20), верхние частоты в ГГц относятся к приемному диапазону, нижние – к передающему диапазону.

Классификация диапазонов частот ССС [2] представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Классификация диапазонов частот ССС

Обозначение диапазона в соответствии с IEEE	Диапазон, ГГц
L-band	1,50 – 1,65
S-band	2,40 – 2,80
C-band	3,40 – 7,00
X-band	7,90 – 9,00
Ku-band	10,70 – 15,00
Ka-band	18,00 – 31,00
Q-band	40,00 – 50,00

Пример частотного плана диапазона Ku представлен на рисунке 6.

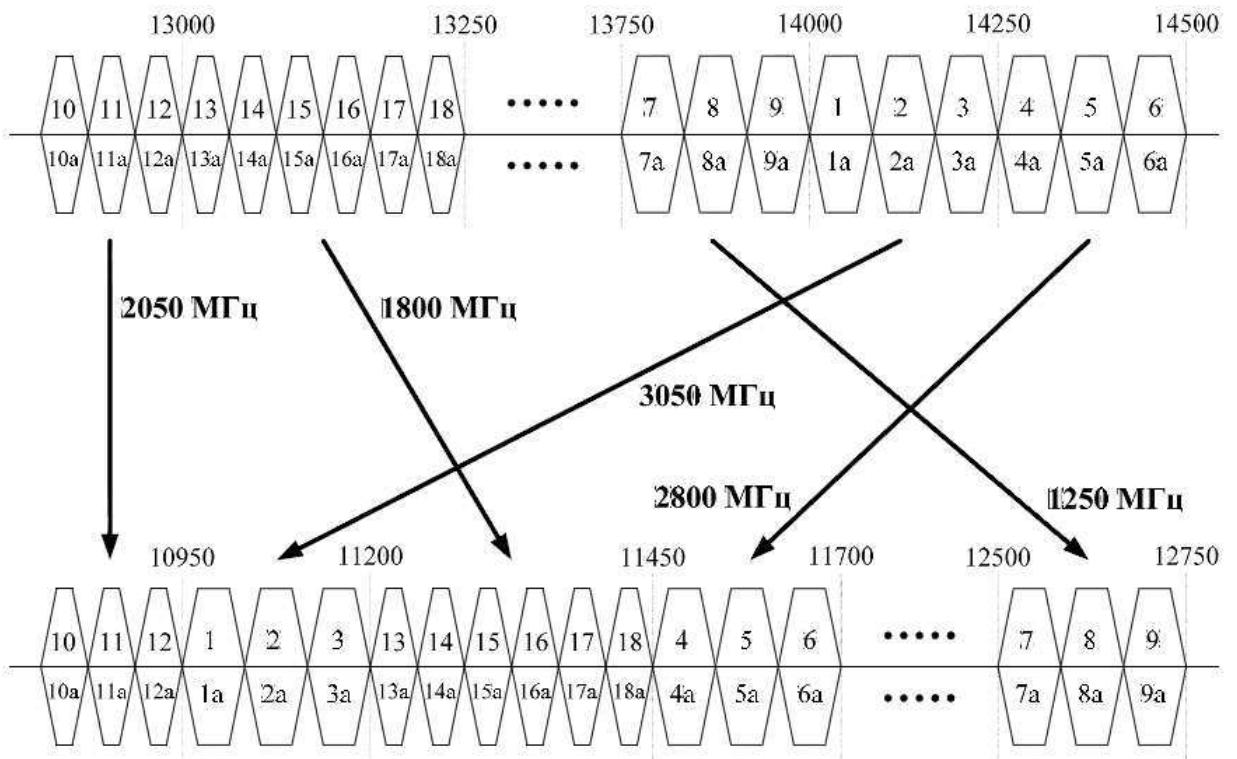


Рисунок 6 – Пример частотного плана Ки-диапазона

Большинство систем связи в настоящее время развернуты в диапазонах С, Ки, и Ка. Интенсивно идет освоение диапазона Q. Общим правилом для указанных выше диапазонов является использование на передачу более низких, по отношению к приемным, частот. Это связано с тем, что, во-первых, на более низких частотах передачи легче реализовать более эффективные (с более высоким, в частности, к.п.д.) усилители мощности типа ЛБВ. Во-вторых, при таком соотношении частот легче обеспечить в БРК высокие требования к развязке между трактами передачи и приема. Нетрудно показать, что для защиты приемного устройства РТР, предельная чувствительность которого может составлять минус 120...130 дБт, от воздействия передатчика транспондера с мощностью $\approx 100...150$ Вт (>20 дБт) развязка между ними должна составлять более 150 дБ [3].

Звеном, отвечающим за реализацию частотного плана в составе РТР является конвертер. К нему предъявляются повышенные требования по неравномерностям характеристик, фазовым шумам, стабильности частоты преобразования, линейности, отсутствию гармонических составляющих. Внешний вид конвертера Ки диапазона представлен на рисунке 7.



Рисунок 7 – Конвертер Ки-диапазона частот

Конвертеры имеют коаксиальные интерфейсы стандарта 2,92 мм, как правило, это:

- вход РЧ;
- вход гетеродина;
- выход ПЧ.

1.6 Линеаризующий усилитель на лампе бегущей волны

Линеаризующий усилитель на УЛБВ по сути являются передающим устройством. Он формирует выходной сигнал РТР, который поступает на облучатель передающей антенны. Линеаризующий усилитель состоит из следующих блоков:

- канальный усилитель (КУС);
- лампа бегущей волны (ЛБВ);
- источник питания (ИП);
- высокомощный вентиль.

КУС обеспечивает работу ЛБВ в требуемом режиме усиления (в режиме насыщения или в линейном режиме). Возможность работы ЛБВ в насыщении гарантируется, если уровень входных сигналов стволов находятся в пределах требуемого диапазона. Усилитель ЛБВ (УЛБВ) обеспечивает усиление сигнала до уровня необходимого для передачи данных. Двойной УЛБВ включает в себя две парные ЛБВ, питающиеся от одного общего ИП. Это делается для экономии массы и места на КА. ИП трансформирует напряжение основной шины питания в высокие напряжения, необходимые для двух ЛБВ, а также выдает низкие напряжения, необходимые для двух КУ, соответствующих этим

ЛБВ. Высокомощный вентиль обеспечивает сохранность ЛБВ при наличии на ее выходе отраженной мощности. На рисунке 8 представлен двойной линеаризующий УЛБВ.



Рисунок 8 – Двойной линеаризующий УЛБВ

ЛУЛБВ, рабочие частоты которых ограничены С-диапазоном имеют коаксиальные интерфейсы. ЛУЛБВ с более высокими рабочими частотами имеют коаксиальный входной интерфейс стандарта SMA и волноводный выходной интерфейс.

1.7 Цифровой коммутатор

Цифровой коммутатор (цифровой транспортный процессор, DTP) представляет собой аппаратное средство, выполняющее передачу элементарных отрезков входного спектра на выбранный или выбранные выходные тракты в соответствии с заданной с земли конфигурацией [4].

По сути это означает, что DTP может взять любой (любые) участок (участки) входного спектра с любого (любых) из входов и перенести его на любой (любые) из выходов [5].

DTP имеет коаксиальные интерфейсы в количестве, определяемом суммой входных и выходных интерфейсов РТР. Говорить о «стволах» в отношении РТР с DTP не вполне уместно, поскольку связи между входными и выходными интерфейсами являются динамическими, и нет привязки конкретного оборудования к конкретной трассе прохождения ВЧ сигнала.

Внешний вид DTP представлен на рисунке 9.

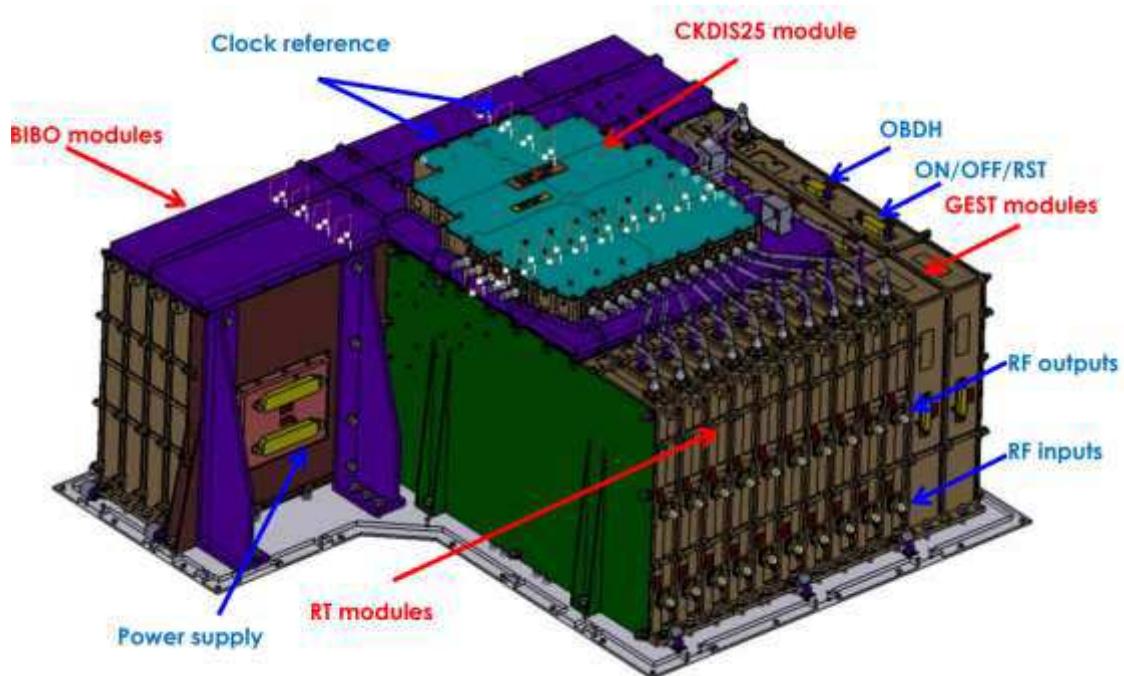


Рисунок 9 – Цифровой коммутатор

1.8 Передатчик маякового сигнала

Передатчик маякового сигнала (маяк) не представлен на рисунке 1, поскольку не участвует в передаче полезного сигнала. При этом в конструкции БРК маяк (или маяки) присутствует всегда. По сигналу маяка выполняется ряд важный действий при ЛИ и эксплуатации БРК:

- определение координат КА;
- наведение антенны земной станции в максимуме диаграммы направленности;
- калибровка линии «вниз»;
- учет влияния изменяющегося вклада атмосферы в затухание на линии «вниз».

Передатчик маяка значительно слабее чем передатчики целевого сигнала БРК, его мощность редко превышает 1 Вт. Как правило, маяк непрерывно передает немодулированную несущую вблизи рабочей полосы частот БРК. Передатчики маякового сигнала имеют коаксиальный выходной интерфейс.

Внешний вид маяка С – диапазона представлен на рисунке 10.



Рисунок 10 – Передатчик маякового сигнала диапазона С

1.9 Пассивные компоненты бортового ретрансляционного комплекса

Согласующая нагрузка – это нагрузка, предназначенная для поглощения переданной ей мощности без отражения. Ее импеданс должен быть равен импедансу того устройства, к которому она подключена. Согласующая нагрузка (рисунок 11, а) должна быть спроектирована таким образом, чтобы поглощать самую высокую мощность, которая может быть ей передана. Оконечные нагрузки могут быть низко- и высокомощными, коаксиальными и волноводными.

Согласующие нагрузки используются с циркуляторами и переключателями для окончания неиспользуемых портов с целью улучшения качества согласования используемых портов.

Гибридное соединение (рисунок 11, б) – устройство, которое объединяет два устройства на входе и разделяет их на выходе так, что каждый выход равен половине суммы обоих входов с некоторым фазовым соотношением.

Делитель мощности (рисунок 11, в) делит один вход на два одинаковых (в идеальном случае – по уровню минус 3 дБ без учета потерь). Его можно подключить в обратном порядке, тогда два входа объединяются в один выход, что делает его сумматором мощности.



а) согласующая нагрузка; б) гибридное соединение; в) делитель мощности

Рисунок 11 – Коаксиальные пассивные компоненты РТР

1.10 Общая электрическая схема бортового ретрансляционного комплекса

Классическая конструкция БРК (без цифровой коммутации и обработки сигнала бортовыми средствами) включает в себя транспондеры с кольцами резервирования. Каждый транспондер можно рассматривать как отдельный РТР. Транспондеры в составе БРК могут иметь общие приемные и/или передающие облучатели и часто используют общие рефлектора антенн. На рисунке А.1 приложения А представлен достаточно типовой фрагмент общей электрической схемы БРК С диапазона.

В таблице 2 представлены обозначения и типы интерфейсов приборов в соответствии со схемой на рисунке А.1 приложения А.

Таблица 2 – Номенклатура интерфейсов приборов

Обозначение по схеме	Тип прибора	Интерфейсы	Количество в схеме, шт
WL	Нагрузка согласующая	1 x SMA	25
WL	Нагрузка поглощающая	1 x TNC	18
WIC	Входной НО	2 x SMA; 2 x WR	3
WF	Входной фильтр	1 x SMA; 1 x WR	3
Обозначение по схеме	Тип прибора	Интерфейсы	Количество в схеме, шт
WST	Переключатель Т-типа	4 x SMA	24
WST	Переключатель Т-типа	4 x TNC	16
WSC	Переключатель С-типа	4 x SMA	6
WSC	Переключатель С-типа	4 x TNC	2
WIS	Вентиль (циркулятор)	3 x TNC	16

Продолжение таблицы 2

Обозначение по схеме	Тип прибора	Интерфейсы	Количество в схеме, шт
WRE	Приемник (МШУ+конвертер)	2 x SMA	5
WIM	Входной мультиплексор	7 x SMA	2
WIM	Входной мультиплексор	3 x SMA	1
WU	Аттенюатор	2 x SMA	48
WTW	Сдвоенный линеаризующий УЛБВ	2 x SMA; 2 x TNC	8
	Кабельная сборка	2 x SMA	83
	Кабельная сборка	2 x TNC	66
WOM	Выходной мультиплексор	6 x TNC 1 x WR	2
WOM	Выходной мультиплексор	3 x TNC 1 x WR	1
WOC	Выходной НО	2 x SMA; 2 x WR	4
WTX	КВП	1x SMA; 1 x WR	1
WM	Передатчик маякового сигнала	1 x SMA	4
WIT	Коаксиальный переход	2 x SMA	10

Как видно из таблицы 2, в приведенном примере схемы БРК содержится 493 коаксиальных соединения (типов SMA и TNC) и только 18 волноводных соединений (типов WR137 и WR229).

На рисунке 12 представлено фото панели с приборами и кабелями.



Рисунок 12 – Фото панели с приборами и кабелями

2 Высокочастотные характеристики бортового ретрансляционного комплекса, чувствительные к качеству кабельных сборок

2.1 Неравномерность амплитудно-частотной характеристики

АЧХ транспондера измеряется между его входом и выходом. Важной характеристикой является НАЧХ в полосе пропускания. НАЧХ – это разность между максимальным и минимальным усилением в дБ в указанной полосе, как показано на рисунке 13. НАЧХ вызвано суперпозицией неравномерностей всех последовательно включенных элементов транспондера.

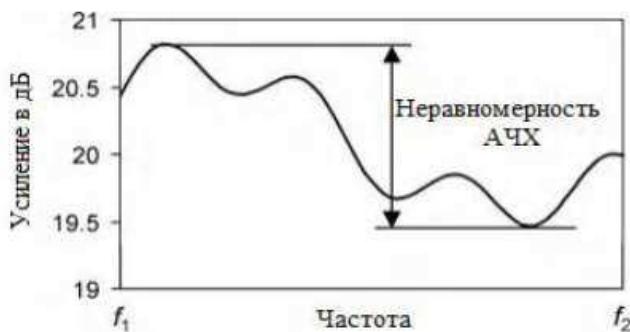


Рисунок 13 – Определение НАЧХ

Кроме нелинейности устройств на АЧХ влияют следующие факторы:

- рассогласования между оборудованием в составе транспондера. Рассогласование (плохое согласование) приводит к увеличению амплитуды отраженных волн, которые взаимодействуют с прямыми волнами, в результате чего происходит интерференция, вызывающая «биения» на АЧХ;
- электромагнитная совместимость (влияние усилителей мощности и антенн, которые могут быть близко расположены к чувствительным устройствам (МШУ));
- эффект многолучевости (сложение переданного через основной тракт сигнала с сигналом, переданным через соседний тракт (как правило, в выходном мультиплексоре)).

Учитывая, что большая часть оборудования БРК соединена между собой кабельными сборками – максимальный вклад в рассогласование внутри транспондера вносят именно ВЧ кабельные сборки.

Пример недопустимой НАЧХ вызванной плохим согласованием кабельных сборок в тракте транспондера Q/Ka диапазона представлен на рисунке 14.

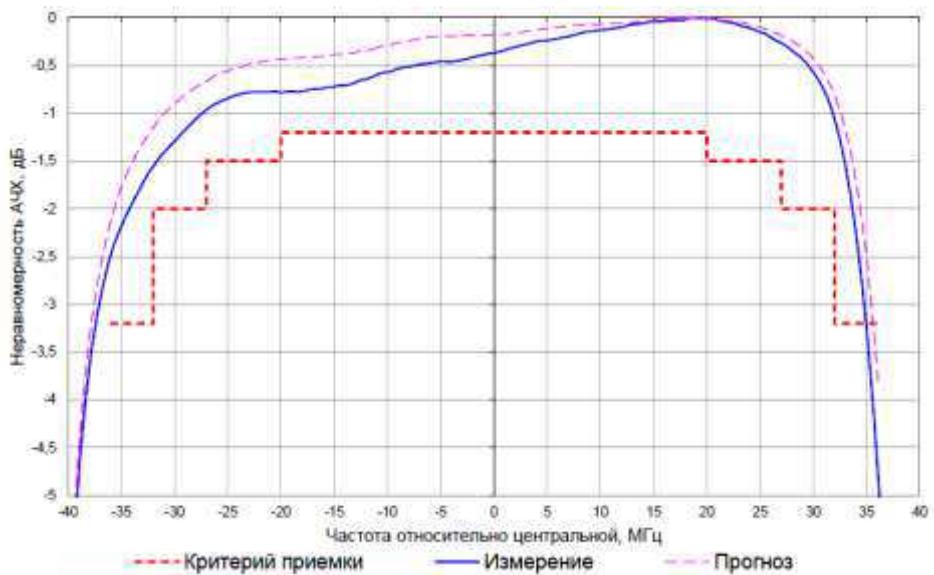


Рисунок 14 – Возрастание НАЧХ вследствие плохого согласования на поврежденной кабельной сборке

2.2 Неравномерность группового времени запаздывания

ГВЗ характеризует время распространения сигнала в линии передачи. Его физический смысл можно пояснить следующим образом. Отклик устройства всегда следует за воздействием на него, при этом устройство задерживает входной сигнал на некоторое время. При подаче на устройство сигналов разной частоты они могут быть задержаны им на разное время. Эта задержка выражается в сдвиге фазы сигнала на выходе относительно его фазы на входе. Групповая задержка при этом характеризует изменение временного сдвига сигнала, который получается в результате фазового сдвига.

Если ФЧХ линейна, то групповая задержка $\tau(\omega)$, вычисляемая по формуле (1), постоянна, а значит, и сигнал передается без искажений.

$$\tau(\omega) = \frac{d(\Phi)}{d\omega}, \quad (1)$$

где $\Phi(\omega)$ – ФЧХ фильтра на частоте сигнала ω .

Наличие неоднородностей в ВЧ тракте транспондера не позволяет обеспечить постоянство ГВЗ в широкой полосе частот, т.к. взаимодействие неоднородностей, распределенных по длине линии передачи, изменяет характер ГВЗ, а именно: добавляется неравномерность в значении ГВЗ. Данное взаимодействие объясняется возникновением отраженных и переотраженных сигналов. Величина и период НГВЗ зависят от величины неоднородностей и расстояний между взаимодействующими неоднородностями.

Влияние НГВЗ на передачу информации может быть значительным (проявляется в межсимвольной интерференции) и зависит от характера

изменения НГВЗ в полосе частот (параболическая, линейная или пульсирующая функция).

Как и в случае с НАЧХ кабельные сборки вносят существенный вклад в НГВЗ. Пример влияния рассогласования кабельной сборки на НГВЗ представлен на рисунке 15.

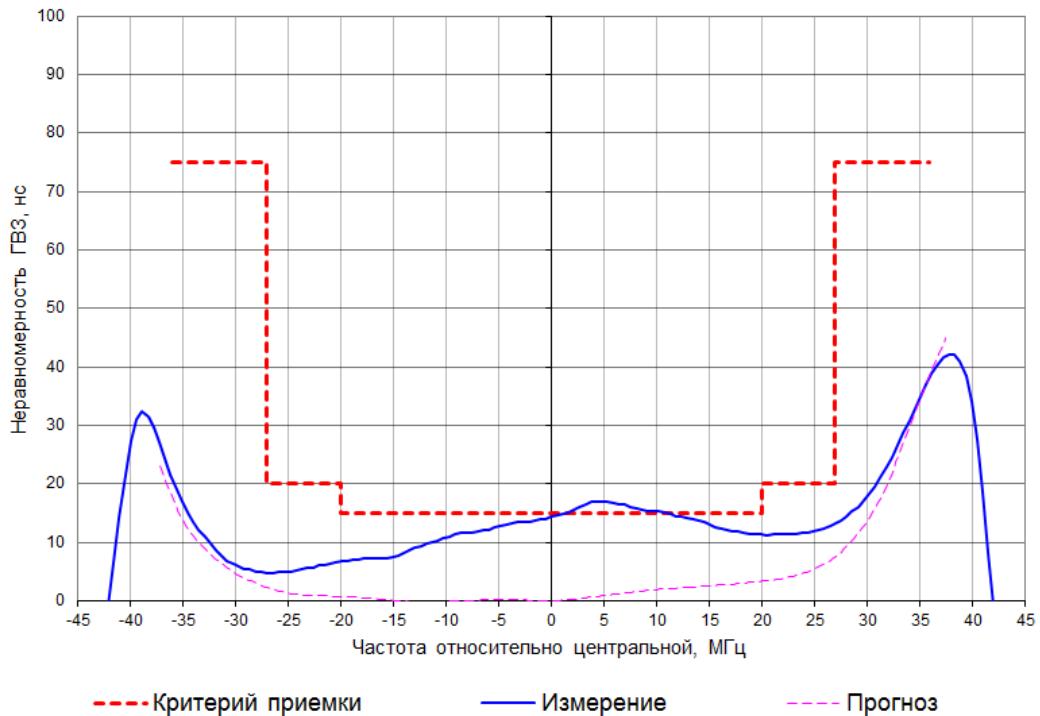


Рисунок 15 – Возрастание НГВЗ вследствие плохого согласования на поврежденной кабельной сборке

2.3 Коэффициент стоячей волны

В разделах 3.1 и 3.2 в качестве примеров представлены результаты измерения сквозных характеристик БРК с настроенными входными и выходными трактами (т.е. согласование по входу и выходу является достаточным для выполнения требований ТЗ). Однако, непосредственно после сборки ВЧ тракты редко имеют достаточное согласование [3].

КСВн входных и выходных ВЧ трактов измеряются как параметры отражения S_{11} и S_{22} по входу и выходу соответственно (для каждого транспондера в БРК).

КСВн связан с параметрами отражения следующей формулой (2) [6]:

$$KCSN = \frac{1+10\left(\frac{S_{11}}{20}\right)}{1-10\left(\frac{S_{11}}{20}\right)}, \quad (2)$$

На рисунке 16 представлены типовые требования к параметрам отражения линейного транспондера.

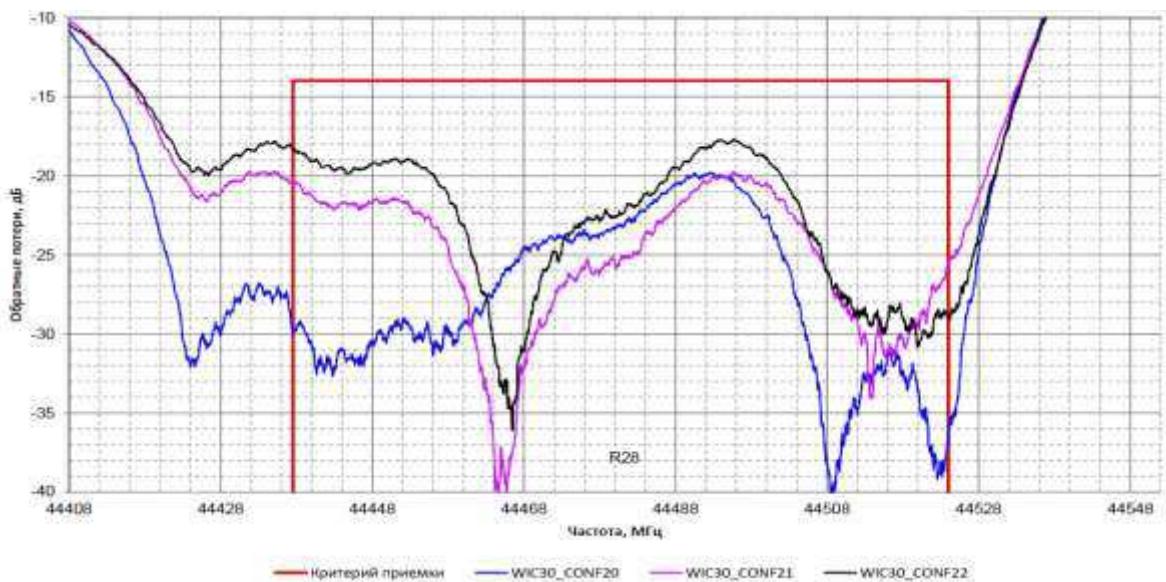


Рисунок 16 – Пример измерения отражения по входу и типовых требования для транспондера Q/Ka диапазонов частот

Как видно из рисунка 16 и формулы (2) наихудшее допустимое значение КСВн составляет 1,5.

Для транспондеров, в которых в качестве входных трактов используются коаксиальные линии передачи – качество согласования кабельных сборок играет ключевую роль.

2.4 Электромагнитная совместимость и электрогоерметичность

В процессе функционирования РТР создается большое количество разнообразных частот различного происхождения. Некоторые из них могут попадать в полосы транспондеров через паразитные излучения радиочастот в устройствах (например, через оплетки кабелей, через соединители в линиях передач, через соединения в конструкциях корпусов и т.д.). Поэтому в конструкциях РТР и антенно-фидерных устройств принимают все меры для подавления паразитных утечек сигнальных трактов до предельно возможного уровня (70...100 дБ). Наиболее опасными (с повышенной восприимчивостью к радиопомехам) являются приемные тракты БРК. Поэтому одной из важнейших характеристик БРК при раскрытии антенаах является автосовместимость, заключающаяся в том, чтобы при максимальном усилении в транспондерах РТР усиленные собственные шумы и паразитные сигналы через конечную развязку между приемной и передающей антеннами не создали сигнал, сопоставимый с входным уровнем шума. При нарушении этого условия на входе РТР могут создаться сигналы положительной обратной связи с крайне нежелательными последствиями, такими как самовозбуждение или паразитные искажения передаточных характеристик.

Следует отметить, что все входящие устройства РТР и БРК в ходе квалификационных наземных испытаний проходят тщательную проверку на

радиоэлектромагнитной совместимости. Как правило, эти испытания проводятся на соответствие требований и по методикам американского стандарта [8].

Электротехническость – это характеристика, определяющая экранирующие свойства ВЧ радиотракта, как с точки зрения влияния помех на работу оборудования (радиовосприимчивость, radiosensitivity, RS), так и с точки зрения создания оборудования паразитного электромагнитного излучения (радиогерметичность, radioemission, RE) [7].

Данная характеристика влияет на качество передаваемого сигнала и является одной из важнейших характеристик ретрансляционной МПН КА.

Таким образом, целесообразно производить проверку коэффициента экранирования ВЧ соединений спутниковых МПН во время этапа автономной отработки на заводе-изготовителе. В ходе испытаний проверяется соответствие эффективности экранирования ВЧ соединений, выполненных во время монтажа ВЧ трактов и оборудования МПН требуемой величине [9].

Учитывая, что большинство соединений в трактах БРК являются коаксиальными – решающим фактором для обеспечения электротехническости БРК является эффективность экранирования кабельных сборок.

Методика проверок и определение критерия эффективности экранирования описывается в приложении В.

3 Общие сведения о коаксиальных линиях передачи

Чтобы избежать путаницы в терминологии необходимо разграничить понятия «кабель» и «кабельная сборка». Кабель представляет собой погонное изделие и может комплектоваться различными видами соединителей и внешней защиты [6].

В приложении к кабельным сборкам диапазона СВЧ это особенно актуально.

3.1 Кабели

Коаксиальные кабели являются основными компонентами проводных линий передач. ВЧ и СВЧ – кабели часто являются первыми представителями семейства СВЧ – устройств и систем передачи, с которыми сталкивается радиоинженер [10].

Основными характеристиками коаксиальных кабелей являются характеристическое (волновое) сопротивление и погонное активное сопротивление (потери). Характеристики коаксиальных кабелей обычно выражаются через их эквивалентные распределенные параметры, используя представление в виде эквивалентных схем, как показано на рисунке 17.

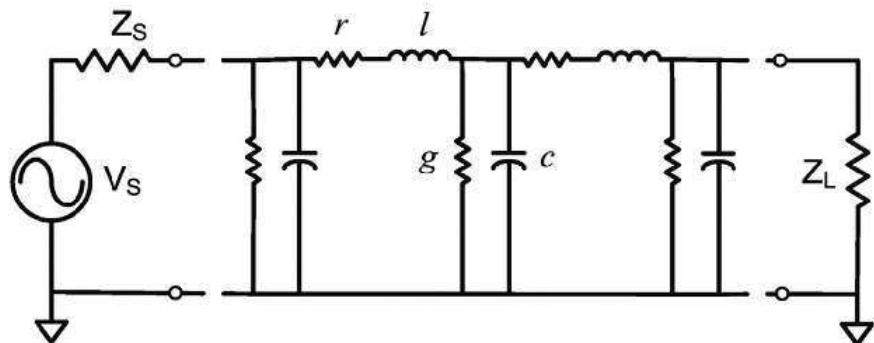


Рисунок 17 – Эквивалентная схема кабельной сборки с распределенными элементами

Поведение коаксиальной линии передачи описывается телеграфными уравнениями:

$$\frac{dv(z)}{dz} = -(r + j\omega l) \cdot i(z) \quad (3)$$

$$\frac{di(z)}{dz} = -(g + i\omega c) \cdot v(z), \quad (4)$$

где $v(z)$ и $i(z)$ — напряжение и ток в линии передачи;

r , l , g и c — погонные (отнесенные к единице длины линии) сопротивление (Ом/м), индуктивность (Гн/м), проводимость (См/м) и емкость (Ф/м) соответственно.

Если пренебречь затуханием в кабеле, волновое сопротивление может быть вычислено как:

$$Z = \sqrt{\frac{l}{c}} \quad (5)$$

В реальной ситуации необходимо учитывать затухание, в связи с чем формула (5) принимает вид:

$$Z_{lossy} = \sqrt{\frac{r+jwl}{g+jwc}} \quad (6)$$

Анализируя вклад каждого компонента (6) в Z_{lossy} необходимо помнить, что в случае с волновым сопротивлением g и r не являются взаимно обратными величинами. Под погонной проводимостью следует понимать не проводимость проводников кабеля, а проводимость между центральным и внешним проводниками. Таким образом, погонная проводимость в большинстве случаев незначительна и (6) можно переписать в виде:

$$Z_{lossy} = \sqrt{\frac{r+jwl}{jwc}} \quad (7)$$

Из (7) видно, что волновое сопротивление будет расти с понижением частоты.

В качестве примера проведем расчет по (7) для кабеля RG6, часто применяемого в системах кабельного телевидения. Зависимость волнового сопротивления от частоты для кабеля RG6 представлена на рисунке 18.

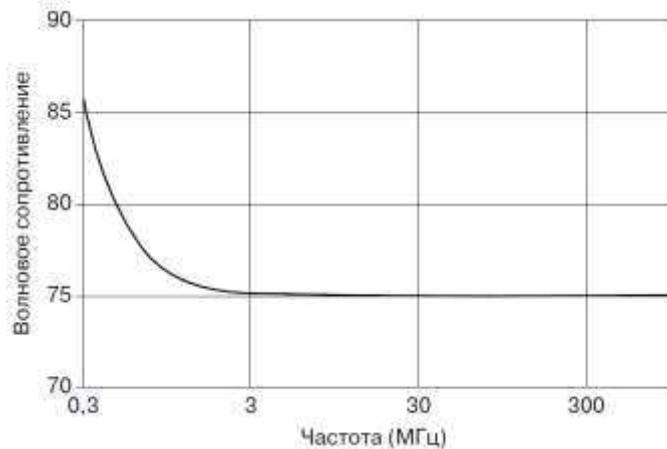


Рисунок 18 – Зависимость волнового сопротивления от частоты для коаксиального кабеля RG6

Поведение кривой на рисунке 18 может показаться удивительным, если не принимать во внимание формулу (7), однако все реальные линии передачи обнаруживают этот эффект, в чем легко убедиться, используя ВАЦ.

Может показаться, что с точки зрения проектировщика СВЧ кабельных сборок явление возрастания волнового сопротивления на низких частотах не важно, но это не так. Дело в том, что в современных БРК с DTP широкополосный полезный сигнал переносится на ПЧ и может занимать полосу частот начиная от звуковых. Эффект, описанный формулой (7) необходимо учитывать при проектировании как БРК, так и самих кабельных сборок. Однако, задача несколько упрощается, если учесть что требования к качеству согласования на таких низких частотах так же смягчаются.

Говоря о коаксиальных линиях передачи стоит упомянуть о существование «воздушных» линий передачи. «Воздушная» коаксиальная линия представляет собой коаксиальный кабель с воздушным диэлектриком, в котором центральный проводник иногда поддерживается посредством диэлектрических шайб, а иногда просто центральными проводниками коаксиальных соединителей, к которым подключается эта линия, как показано на рисунке 19. У этого типа кабелей практически отсутствует погонная проводимость, таким образом, единственным элементом активных потерь остается погонное сопротивление. Маленькое белое кольцо на центральном проводнике воздушной линии — диэлектрическая шайба, иногда используемая для устранения провисания центрального проводника относительно внешнего для упрощенного подключения линии без дополнительной центровки.



Рисунок 19 – Сегмент воздушной коаксиальной линии передачи

На высоких частотах потери в кабеле возрастают из-за скин-эффекта, влияние которого увеличивается пропорционально квадратному корню частоты:

$$r = \sqrt{\frac{\omega\mu}{2\delta}}, \quad (8)$$

где ω – циклическая частота (рад/с);
 $\mu = 1,257$ – магнитная постоянная ($\text{Гн}/\text{м}$);
 δ – толщина скин-слоя (м).

Вносимые потери воздушной коаксиальной линии передачи зависят только от ее погонного сопротивления и могут быть записаны (в дБ) как функция от частоты:

$$L = 8,68 \frac{r}{4\pi Z_0} \left(\frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_b} \right) = A \cdot \sqrt{f}, \quad (9)$$

где R_a и R_b – внутренний и внешний радиусы центрального и внешнего проводников;

r — потери из-за скин-эффекта, имеющие частотную зависимость;
 A – коэффициент потерь.

Рисунок 20 отображает потери реальной воздушной линии, которые хорошо соотносятся с расчетными по формуле (9) значениями для идеального случая.

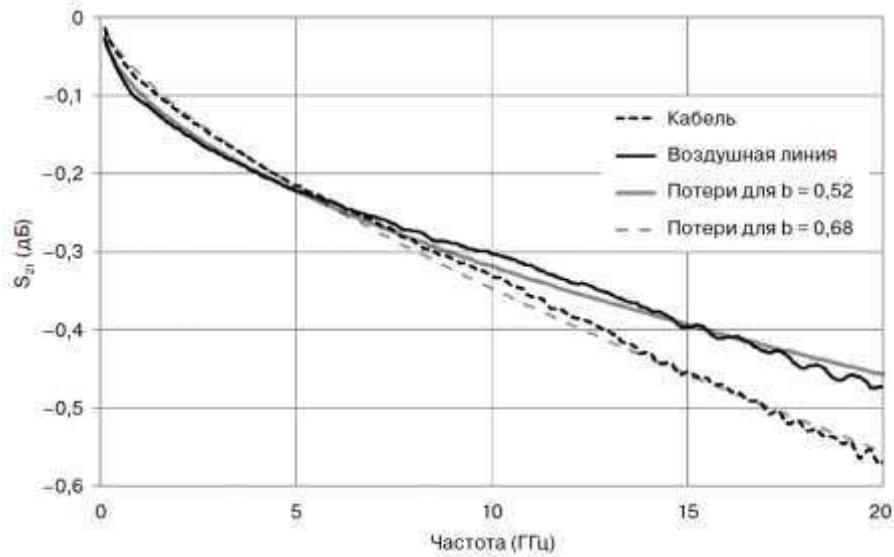


Рисунок 20 – Ослабление, вносимое воздушной линией длиной 15 см и полужестким коаксиальным кабелем с тефлоновым диэлектриком длиной 15 см

В коаксиальной линии передачи с диэлектриком возникают потери, обусловленные тангенсом угла диэлектрических потерь, которые часто бывают более существенными, чем потери от скин-эффекта. Поэтому для абсолютного большинства кабелей расчет потерь по формуле (9) будет неверным.

Учесть разницу в значениях потерь можно, преобразовав формулу (9) путем введения дополнительного показателя степени частоты:

$$L = A \cdot f^b, \quad (10)$$

где L – ослабление в дБ;

A – коэффициент потерь;

b – степень потерь.

Вычислить коэффициент потерь и степень потерь для конкретного кабеля можно, выполнив измерение в двух частотных точках, однако будет точнее провести измерение по нескольким частотным точкам и выполнить аппроксимацию полученных значений по методу наименьших квадратов. В измерении на рисунке 20 присутствуют значения потерь для первой и третей четвертей диапазона частот измерения. Из этих двух значений можно вычислить коэффициент потерь и степень потерь:

$$L_1 = A \cdot (f_1)^b, \quad L_2 = A \cdot (f_2)^b$$

Перейдем в логарифмическую шкалу:

$$\log(L_1) = \log(A) + b \cdot \log(f_1), \quad (11)$$

$$\log(L_2) = \log(A) + b \cdot \log(f_2). \quad (12)$$

Формулы (11) и (12) представляют собой систему линейных уравнений. Решение относительно A и b :

$$A = \exp\left(\frac{\log(f_1) \cdot \log(L_2) - \log(f_2) \cdot \log(L_1)}{\log(f_1) - \log(f_2)}\right) \quad (13)$$

$$b = \frac{\log(L_1) - \log(L_2)}{\log(f_1) - \log(f_2)} \quad (14)$$

Значения потерь, рассчитанные по (11) и (12) с коэффициентом и степенью, рассчитанными по (13) и (14) соответственно, хорошо коррелируют с измеренными значениями (что видно из рисунка 20). Отличие расчётных значений от измеренных составляет менее 0,05 дБ, это значение на уровне погрешности калибровки [11].

Вносимый кабелем сдвиг фазы может быть вычислен аналогично. На практике достаточно аппроксимировать величину сдвига фазы по линейному закону, но реальное значение сдвига фазы с ростом частоты также отклоняется от линейной зависимости, как и потери.

Скорость распространения сигнала в линии без потерь:

$$\nu = \frac{1}{\sqrt{l \cdot c}} \quad (15)$$

Как следует из формулы (7), линия с потерями описывается комплексным сопротивлением, следовательно, и вносимый сдвиг фазы с приближением к области низких частот должен отклониться от линейной зависимости вследствие изменения фазовой скорости.

В особом случае для воздушных линий, не имеющих диэлектрических потерь:

$$v_{prop} = \sqrt{\frac{2\omega}{rc}} \Big|_{\omega \cdot l \ll r} \quad (16)$$

Потери в диэлектрике, как правило, влияют на скорость распространения сигнала (как и вносимые потери). В отличие от идеальных кабелей, на практике присутствуют дефекты, которые вызывают отклонение волнового сопротивления от номинала. Это отклонение, как правило, имеет неравномерность по длине кабеля. Если отклонения случайны и пренебрежимо малы, то они могут пропускаться, за исключением случаев, когда они достаточно велики, чтобы вызывать локальные переотражения сигнала. В состав оборудования для производства кабелей входит масса элементов, представляющих собой тела вращения. Если у этих элементов есть отклонения от формы, или локальные дефекты (например, каверна) – то они вызовут малые, но периодические отклонения волнового сопротивления от номинала. Модель коаксиальной линии передачи с периодическими отклонениями представлена на рисунке 21.

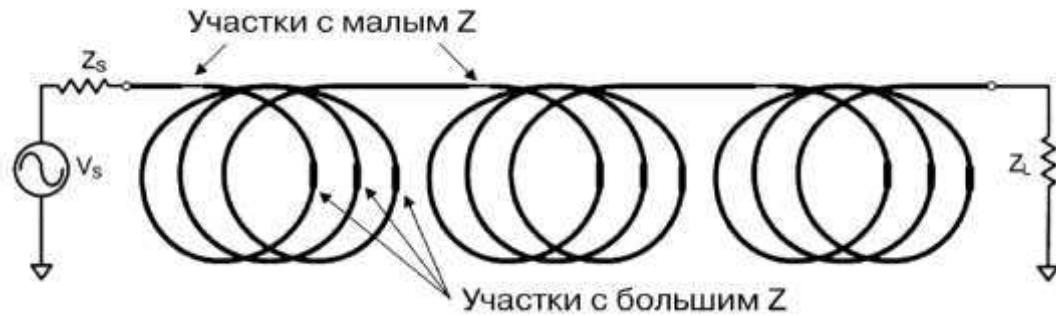


Рисунок 21 – Коаксиальная линия передачи с периодическими отклонениями волнового сопротивления от номинала в результате локальной деформации шкива на производстве

Периодические отклонения волнового сопротивления от номинала могут вызывать явление СВП. Вклады периодических дефектов в возвратные потери могут складываться воедино на определенных частотах и вызывать узкие локальные (в полосах порядка 100 кГц) скачки возвратных потерь с амплитудой

в несколько дБ. Практическая проверка на СВП является очень важной для длинных кабелей с малыми вносимыми потерями. На рисунке 22 иллюстрируется модель СВП в кабеле, вызванных отклонением волнового сопротивления на +0,1 Ом от номинала на участках кабеля протяженностью 15 мм каждые 30 см длины кабеля и на -0,1 Ом каждые 2,7 м длины кабеля при общей длине кабеля 300 м, и вносимых потерь, типичных для магистральных кабелей систем кабельного телевидения. Из рисунка 22 очевидно наличие двух периодических структурных дефектов, вызывающих СВП: меньшие — примерно каждые 50 МГц, из-за областей пониженного волнового сопротивления через каждые 2,7 м длины кабеля, и намного более высокие — примерно каждые 500 МГц из-за областей повышенного волнового сопротивления через каждые 30 см длины кабеля.

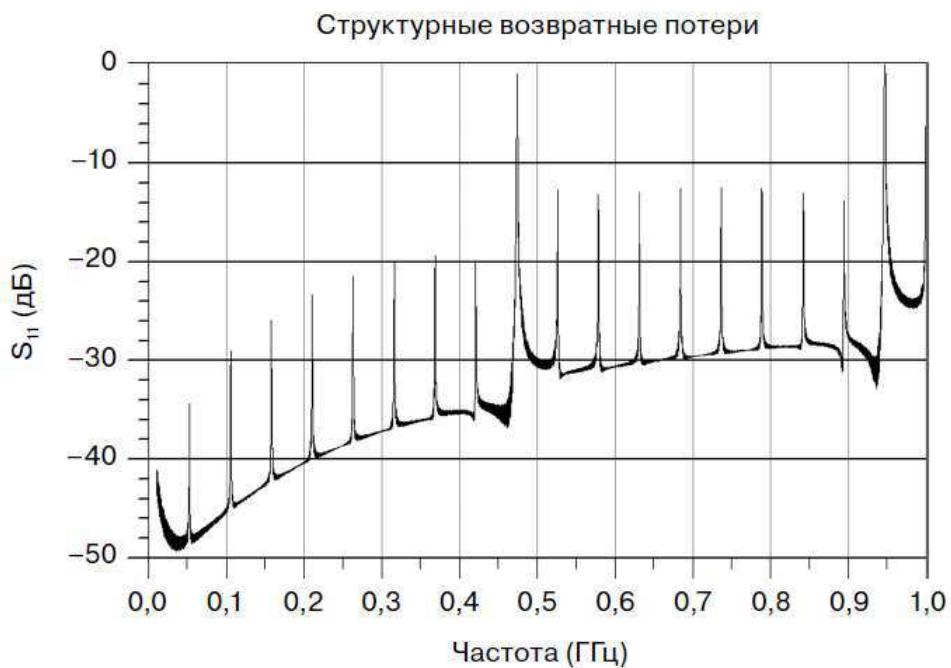


Рисунок 22 – Вид графика возвратных потерь для кабеля с периодическими локальными дефектами

Отклонения величины волнового сопротивления в большую сторону встречаются чаще, поэтому кумулятивный эффект от их совместного влияния будет больше – вплоть по полного отражения, что и наблюдается на графике на рисунке 22.

3.2 Переходы и соединители

3.2.1 Общие сведения

Соединители являются оконечными устройствами линии передачи и служат для обеспечениястыковки линии передачи с другими устройствами ВЧ тракта. Часто соединителям не уделяют должного внимания и не рассматривают как часть устройства или измерительной системы. Такой подход является неверным, т.к. вклад от соединителя в характеристики устройства, или результат измерения может оказаться доминирующим (особенно в диапазоне СВЧ и в случае устройств с малыми потерями). Соединители классифицируются по частотам, областям применения и качеству изготовления. Особенностью соединителей, как СВЧ устройств заключается в трудности измерения их характеристик с достаточной точностью. Эта особенность связана с тем, что, как правило, соединители обеспечивают передачу сигнала между различными средами распространения или линиями передачи с различными конструкциями. В плоскости рабочей поверхности параметры соединителя описаны, как правило, хорошо, в то время, как «оборотная сторона» описана довольно плохо.

Для обеспечения передачи сигнала от вилки к розетке в рамках одного стандартизованного типа тракта используют так называемые переходы с однотипными соединителями. С их помощью коммутируют между собой устройства и элементы цепи. Их параметры описать проще всего, поскольку в этом случае достаточно хорошо поддаются описанию параметры измерительных портов, калибровочные комплекты, как правило, легко доступны, а методы калибровки предельно понятны. Переходы с соединителями разных типов, обеспечивающие коммутацию тракта одного типа с трактом другого стандартизованного типа, также хорошо поддаются описанию, но еще до недавнего времени это было затруднительно, так как не было приемлемых калибровочных мер для измерений параметров таких переходов. Недавние улучшения в методиках калибровки, по сути, устранили любые трудности в определении характеристик переходов с соединителями разных типов. На рисунке 23 показаны некоторые примеры переходов с однотипными и разнотипными соединителями.



Рисунок 23 – Примеры переходов с однотипными и разнотипными соединителями

Начиная с 1930 – х годов и до настоящего времени зарубежные компании, прежде всего США, разработали более 50 серий и огромное количество модификаций радиочастотных соединителей. Так, например, компании Radiall и Rosenberger производят по 49, Molex – 32, Huber+Suhner – 24 серии соединителей. При этом каждая серия насчитывает несколько десятков и даже сотен модификаций соединителей (примеры представлены на рисунке 23). Компания Radiall выпускает около 6000, Huber+Suhner более 3000, Amphenol – свыше 1250 соединителей разных модификаций. Рассмотреть каждую из более чем 50 серий не представляется возможным.

В СВЧ – технике получили широкое распространение несколько основных типов соединителей, которые можно встретить на подавляющем большинстве радиотехнических устройств и приборов. В таблице 3 приведен список распространенных типов соединителей, а также диапазоны их рабочих частот. Они разделены на три обширных категории: прецизионные «бесполые» соединители, прецизионные соединители типа вилка-розетка и соединители общего назначения или сервисные соединители. Это, как правило, соединители для линий с волновым сопротивлением 50 Ом, но и для линий с волновым сопротивлением 75 Ом стандартизовано несколько типов соединителей.

Таблица 3 – Распространённые типы СВЧ соединителей

Наименование	Диаметр внешнего проводника, мм	Номинальное значение рабочей частоты, ГГц	Частота первой моды, ГГц	Максимальная частота применения, ГГц
Тип N (50 Ом) прецизионный	7,00	18,0	18,6	26,5
Тип N (50 Ом) общего назначения	7,00	12,0	12,5	15,0
7 мм	7,00	18,0	18,6	18,0

Продолжение таблицы 3

Наименование	Диаметр внешнего проводника, мм	Номинальное значение рабочей частоты, ГГц	Частота первой моды, ГГц	Максимальная частота применения, ГГц
SMA	3,50	18,0	19,0	22,0
3,5 мм	3,50	26,5	28,0	33,0
2,92 ("K")	2,92	40,0	44,0	44,0
2,4 мм	2,40	50,0	52,0	55,0
1,85 ("V")	1,85	67,0	68,5	70,0
1 мм	1,00	110,0	120,0	120,0

Существует множество конструктивных исполнений. Соединители выпускают в виде вилки (male) и розетки (female). Законченная конструкция соединителя представляет собой сочетание пары: вилка и розетка. Принято считать, что вилка – часть пары, которая имеет штыревой центральный контакт (pin), а розетка – гнездовой контакт (socket). И это не вызывает сомнений в случае резьбового соединения розетки и вилки с присоединительной гайкой. Сложнее при соединении вилки и розетки защелкиванием: push-on, snap-on, slide-on. Некоторые специалисты придерживаются мнения, что и для этих соединителей вилка всегда со штыревым центральным контактом. Другие же считают, что вилка – это подвижная часть сочленяемой пары вилка-розетка, вне зависимости от того, гнездовой или штыревой у нее центральный контакт. Поэтому приборные вилки соединителей SMB, SSMB, MCX и MMCX нередко называют розетками, а кабельные розетки – вилками. По мнению автора, правильнее считать вилкой подвижную часть пары, добавляя в название, с каким она – гнездовым или штыревым центральным контактом. Так, например, поступает американская компания Coaxicom. При дальнейшем рассмотрении имеет смысл придерживаться тех названий соединителей, которыми их представляют компании производители.

Все соединители различают по исполнению (на прямые и угловые) и по назначению (кабельные, приборно-кабельные и приборные). Общая классификация зарубежных соединителей по конструктивному исполнению представлена в таблице 4.

Таблица 4 – Общая классификация зарубежных соединителей

Обозначение в зарубежной документации	Значение термина
Bulkhead connector	Резьбовой соединитель, предназначенный для вставки в панель с ее передней или задней стороны. Соединитель устанавливают в D-образное (от проворачивания) отверстие в панели и закрепляют в ней при помощи гайки и шайбы и уплотняющей прокладки
Feed through connector	Соединитель, проходящий через стенку панели или корпуса изделия и имеющий два входа

Продолжение таблицы 4

Обозначение в зарубежной документации	Значение термина
Back or front mounted connector	Соединитель, монтируемый с задней или передней стороны панели
Flange mounted connector	Фланцевый соединитель с квадратным (четыре крепежных отверстия) или прямоугольным (два отверстия) фланцем, который прикручивают винтами к панели с одной ее стороны
Receptacle	Фиксируемая или стационарно устанавливаемая часть пары (вилка или розетка). Чаще всего это розетка с гнездовым контактом, предназначенная для ввода (вывода) энергии. Центральный проводник в изделии соединяют с полосковой линией передачи. Применяются неподвижный, скользящий (sliding) или сменный (field replaceable) центральный проводники
Field replaceable connector Field replaceable hermetic launcher Field replaceable hermetic launcher with drop-in seals	Соединитель, заменяемый в полевых условиях. Он состоит из герметичного металлокерамического 50-омного ввода (с диаметром центрального проводника 0,3, 0,46 или 0,5 мм) и СВЧ-разъема. Центральный проводник ввода соединяют с микрополосковой линией
Connector for strip transmission line circuits	Коаксиально-микрополосковый переход
Hermetically sealed connector	Герметичный соединитель. Основные типы герметичных соединителей (spark plugs): - с внутренним металло-стеклянным спаем; впаивается в корпус изделия или вкручивается и герметизируется в нем при помощи металлической или эластомерной прокладки; - без внутреннего спаем; вкручивается в корпус изделия и герметизируется в нем при помощи металлической или эластомерной прокладки.
Panel jack	Соединитель «розетка с фланцем» для установки на панель, заканчивающийся входом для радиочастотного кабеля
Panel plug	Соединитель «вилка с фланцем» для установки на панель, имеющий вход для кабеля
Plug launcher	Соединитель, подобный панельной вилке с фланцевым креплением к панели. Отличается тем, что его центральный проводник, контактируемый с печатной платой, имеет определенную форму: с прорезью (slotted), ленточный (tab) или штыревый (pin) и может быть заключен в диэлектрик
Socket launcher	Соединитель, подобный панельной розетке с фланцевым креплением к панели

Окончание таблицы 4

Обозначение в зарубежной документации	Значение термина
PCB plug	Соединитель типа вилка, монтируемый в металлизированные отверстия на печатной плате (printed circuit board) запрессовыванием (press-in) или пайкой (soldering)
PCB socket	Соединитель типа розетка, монтируемый в отверстия на печатной плате
Surface mount connector	Соединитель, монтируемый на контактные площадки определенной конфигурации (foot print, print layout, pad) на поверхности печатной платы
Press-fit connector	Соединитель, запрессовываемый в панель или стенку корпуса изделия. Не имеет фланца и присоединительной резьбы. Для прессового соединения на наружной поверхности соединителя сделана накатка
Straight cable plug (male) / jack (female)	Прямая кабельная вилка / розетка
Right angle (elbow) cable plug (male) / jack (female)	Угловая кабельная вилка / розетка
Straight cable plug (male) / jack (female) flange mount	Прямая вилка / розетка фланцевая приборно-кабельная
Right angle panel cable plug (male) / jack (female) flange mount	Угловая вилка / розетка фланцевая приборно-кабельная
Straight / Right angle bulkhead cable plug (male)	Прямая / угловая кабельная вилка с резьбой на корпусе, закрепляемая в панели с ее передней или задней стороны
Straight / Right angle bulkhead cable jack (female)	Прямая / угловая кабельная розетка с резьбой на корпусе
Straight / Right angle bulkhead receptacle plug (male)	Прямая / угловая вилка, для установки в панель, для ввода энергии
Straight / Right angle bulkhead receptacle jack (female)	Прямая / угловая розетка для установки в панель, для ввода / вывода энергии
Straight / Right receptacle plug (male) flange mount	Прямая / угловая вилка для ввода / вывода энергии, фланцевая (квадратный или прямоугольный фланец с четырьмя или двумя крепежными отверстиями)
Straight / Right receptacle jack (female) flange mount	Прямая / угловая розетка для ввода / вывода энергии, фланцевая (квадратный или прямоугольный фланец с четырьмя или двумя крепежными отверстиями)

Различные производители могут выпускать большое количество модификаций различных соединителей, применяя при этом собственную систему обозначений (кодификацию). Номенклатура и кодификация некоторых соединителей Huber + Suhner представлена в таблице 5.

Кабельные соединители предназначены для соединения между собой двух кабелей и не имеют элементов крепления к панели. Приборно-кабельные соединители также выполняют функцию соединения кабелей, но при этом одна из частей соединителя (блочная) крепится к панели. Приборные соединители

устанавливают непосредственно в изделие. Выводы энергии предназначены для передачи сигналов с плат на радиочастотные кабели. Особой группой являются коаксиально – микрополосковые (полосковые) переходы, с помощью которых осуществляют соединение коаксиальных кабелей с микрополосковыми (полосковыми) линиями. Адаптеры служат для соединения двух или более частей соединителей с одинаковыми или разными присоединительными размерами.

3.2.2 Способы соединения вилки и розетки

Резьбовое соединение.

На корпусе розетки имеется резьба, а вилка снабжена присоединительной гайкой (см. рисунок 24). Резьбовое соединение предпочтительно в случаях, когда высоки требования по устойчивости к воздействию внешней среды, ударным и вибрационным нагрузкам (военная, авиационная и космическая техника), а также для прецизионной измерительной аппаратуры. Резьбовое соединение используют в соединителях серий SMC, 7/16, DIN 4.1/9.5, SK, N, PC3,5, SMA, TNC и многих других. К недостаткам резьбовых соединителей относятся невозможность быстрого соединения и рассоединения вилки и розетки, а также непригодность для использования в миниатюрных изделиях с плотной компоновкой.

В зарубежных резьбовых соединителях используется американская дюймовая резьба (стандарт ANSI B1.1-1982). Это обстоятельство осложняет применение зарубежных резьбовых соединителей в отечественных устройствах, в которых используют только метрическую резьбу, так как необходимы адаптеры для перехода с дюймовой на метрическую резьбу.

Резьбовое соединение гарантирует не менее 500 циклов соединения и рассоединения вилки и розетки без ухудшения электрических параметров соединителей, если соблюдено требование о максимально допустимом моменте при закручивании (затягивании) присоединительной гайки на вилке.

Величина момента зависит от типа соединителя и его материала (латунь, нержавеющая сталь). Для выполнения этого требования необходимо применять специальные тарированные ключи (torque wrench). Виды резьбы зарубежных соединителей и рекомендации по величине момента по данным компании Keysight приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Виды резьбы зарубежных соединителей и рекомендации по величине момента по данным компании Keysight

Соединители	Вид резьбы	Близкая метрическая резьба	Рекомендуемое значение момента затягивая гайки, Н·См
SMC	0,190-32-NF	M5 × 0,8	35
SSMA			70

Продолжение таблицы 5

Соединители	Вид резьбы	Близкая метрическая резьба	Рекомендуемое значение момента затягивая гайки, Н·См
SMA	0,250-36-UNS	M6 × 0,75	100 (негерметичные соединители), 195 (герметичные)
3,5-мм (APC-3,5, PC3,5)	0,250-36-UNS	M6 × 0,75	90
2,9-мм (K, SK, OS-2,9 и др.)	0,250-36-UNS	M6 × 0,75	90
2,4-мм (APC-2,4, OS-50)	M7 × 0,75	—	90
1,85-мм (APC-1,85, V, OS-65)	M7 × 0,75	—	90
1-мм (APC-1, RPC-1,0, W)	M7 × 0,75	—	45
TNC	7 / 16-28 UNEF	M11 × 1	56
N, UNF, APC-7	0,625-24 UNEF	M16 × 1	135
7 / 16	M29 × 1,5	—	3500

Резьбовое соединение в разрезе представлено на рисунке 24

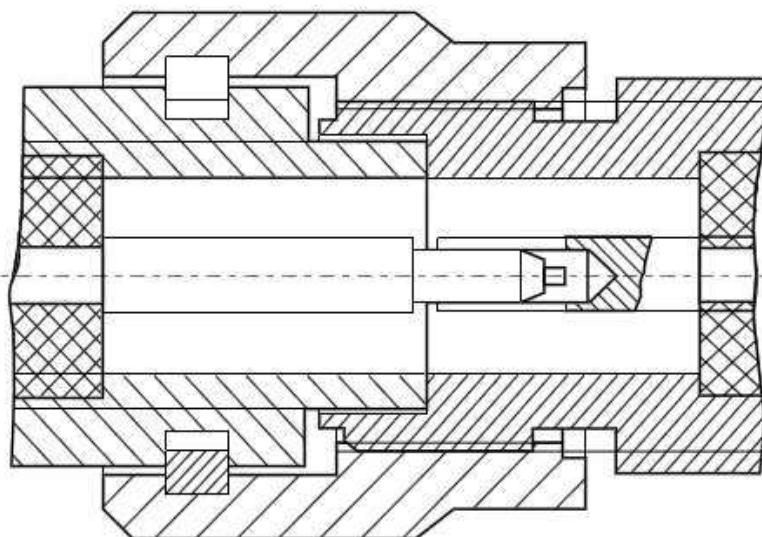


Рисунок 24 – Резьбовое соединение вилка-розетка в разрезе

Байонетное соединение (BNC).

На корпусе вилки имеются два штыря, которые входят в Г-образные прорези на корпусе розетки. Данные соединители позволяют быстро и с минимальным усилием соединять вилку с розеткой, однако не надежно в условиях вибрационных и ударных нагрузок. Соединители типа BNC редко

используются на частотах выше УКВ диапазона в силу существенного вносимого рассогласования на более высоких частотах. Внешний вид соединения BNC представлен на рисунке 25.



Рисунок 25 – Байонетный соединитель

Соединение защелкиванием (snap-on, push-on).

Этот механизм соединения применяют в микроминиатюрных и субминиатюрных соединителях для устройств с высокой плотностью монтажа, особенно для многократного соединения и рассоединения печатных плат. Соединение snap-on наружных проводников вилки и розетки соединителя SMP показано на рисунке 26.

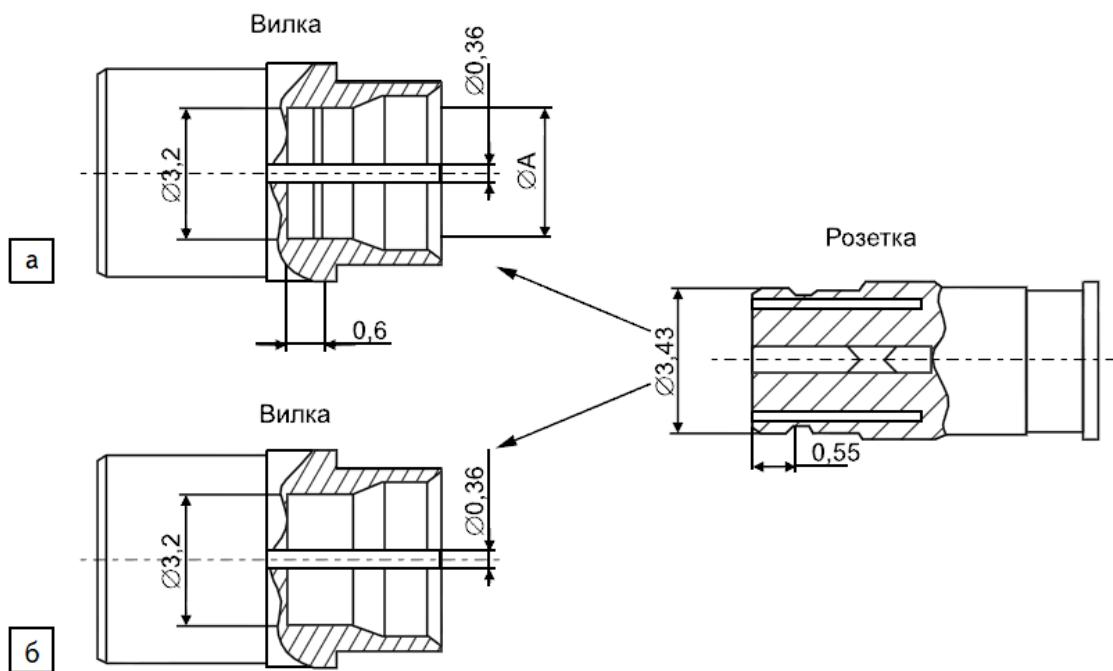


Рисунок 26 – Соединение snap-on

Стыкуемая часть розетки представляет собой пружинный элемент с четырьмя или шестью ламелями, изготовленный из термически упрочненной бериллиевой бронзы. На внутренней поверхности вилки сделана канавка. При введении в вилку пружинящая часть розетки сжимается на гладкой поверхности ΦA и затем, распрямившись в канавке, защелкивается в ней. Надежное соединение возможно даже при радиальной и аксиальной несоосности вилки и розетки до 0,25 мм.

Разработаны соединители с одним из трех уровней защелкивания: полное (full detent, lock-on), ограниченное (limited detent) и скользящее соединение (slide-on, smooth bore). Полное защелкивание, или блокировка, используется в соединителях, работающих при повышенных вибрационных и ударных нагрузках. Для рассоединения вилки и розетки требуется специальный инструмент – экстрактор (decoupling tool). В варианте ограниченного защелкивания ΦA на 0,1 мм больше, чем в случае полного защелкивания. Поэтому стыкуемая часть розетки сжимается меньше, и происходит неполное защелкивание (см. рисунок 26а). Рассоединить пару соединителей можно и без применения экстрактора. Скользящее соединение осуществляется за счет «распружинивания» вилки в розетке с гладкой (без канавки) внутренней поверхностью (см. рисунок 26б). Типичное применение этого варианта – каскадное соединение печатных плат.

Существенных успехов в разработке подобных соединителей добилась фирма Huber + Suhner, они создали широкую номенклатуру, включающую даже версии SMP соединителей. Допускающих несоосность вилки и розетки.

Соединение quick-lock.

Соединители quick-lock стали доступными пользователям в 2003 году. Серия таких соединителей была создана альянсом Quick Lock Formula (QLF Alliance), в который вошли известные компании: Huber+Suhner, Radiall и Amphenol. Позже в этот альянс вступили и другие компании.

Механизм соединения quick-lock состоит из подпружиненного наружного проводника вилки, в котором блокируется наружный проводник (со специальным буртиком) розетки. На рисунке 27 представлен процесс рассоединения при отводе стопорной муфты на корпусе вилки.

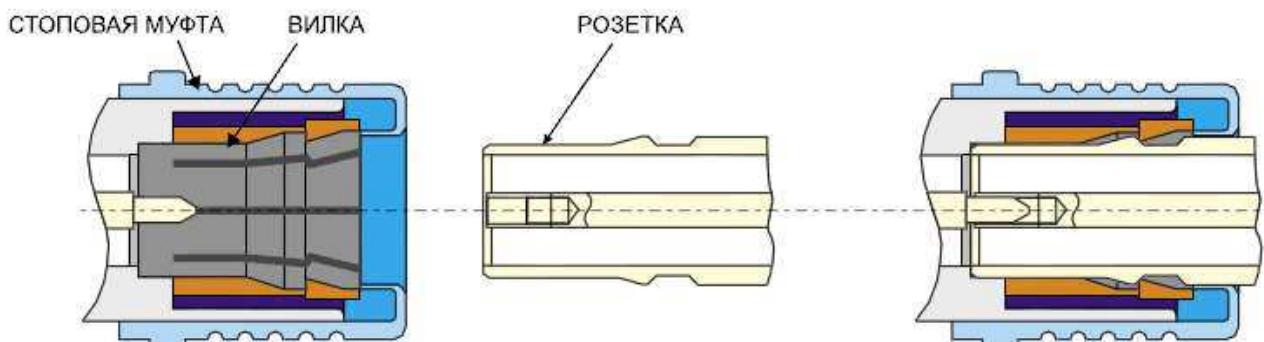


Рисунок 27 – Соединение quick-lock

Применение в соединителях QMA и QN нового механизма соединения розетки и вилки позволило не только уменьшить размеры соединителей, но и по сравнению с резьбовыми аналогами в 10 раз сократить время соединения (менее 2 с) и устраниТЬ необходимость в тарированных ключах. При этом после соединения с розеткой вилка с заделанным в нее кабелем может поворачиваться на 360°.

Соединение quick-lock сочетает, высокий уровень параметров, свойственный резьбовым соединениям с простым и быстрым соединением/разъединением snap-on.

Соединение slide-on (скользящее соединение)

Соединители с механизмом blind mate (соединение «вслепую») созданы для работы в устройствах, требующих многократного быстрого соединения розетки и вилки при их значительной аксиальной и радиальной несоосности в моментстыковки. Этот механизм реализован в соединителях ВМА, OSSP и OSP, применяемых в многовыводных линиях передачи с высокой плотностью компоновки. Для его реализации на внутренней поверхностистыкуемой части розетки смонтирован пружинный элемент, который удерживает вилку послестыковки пары соединителей. Несоосность розетки и вилки компенсируется соединением скольжением (slide-on) наружного проводника вилки спружинным наружным контактом розетки (см. рисунок 27). Допускается аксиальная и радиальная несоосности 0,38 и 0,2 мм соответственно.

Следует подчеркнуть, что сочетание соединителей, в которых использованы механизмы snap-on, quick-lock и blind mate, со стандартными резьбовыми соединителями невозможно без применения соответствующих адаптеров.

3.2.3 Соединители российского производства

В России действует ряд отраслевых стандартов, определяющих требования к радиочастотным соединителям [12, 13]. Существует также документ, регламентирующий соответствие российских и зарубежных соединителей [14], номенклатура кратко представлена в таблице 6.

Таблица 6 – Номенклатура регламентирующая соответствие российских и зарубежных соединителей

Размеры коаксиальной линии, мм	Типы радиочастотных соединителей	
	Отечественные	Зарубежные
	ГОСТ 20265-83, ГОСТ 13317-89	MIL-C-39012
7 / 3,04	III (B, P)	N, APC-7, RPC-7
4,1 / 1,27; 3,5 / 1,52	IX (B, P)	SMA
3 / 0,94	Отсутствуют	SMC, SMB
2,92 / 1,27	Отсутствуют	2,9-мм соединители (K, SMA 2,9, SMP, GPO и др.)
2,4 / 1,042	I (B, P)	2,4-мм соединители (APC-2,4, OS-50, RPC-24 и др.)
1,85 / 0,83	Отсутствуют	1,85-мм соединители (APC-1,85, OS-65, VP, GPPO)
1 / 0,534	Отсутствуют	1-мм соединители (APC-1,0, RPC-1,0)

Как видно из таблицы 6 в Российской номенклатуре отсутствует преемственность по четырем из семи наиболее распространенным типам соединителей. В космической промышленности это обстоятельство является серьезной проблемой, т.к. существенная доля оборудования ретрансляционных полезных нагрузок производится за рубежом. Кроме этого стоит отметить, что серийно выпускаемые зарубежные соединители по РТХ превосходят отечественные. В изделиях военного назначения применение зарубежных соединителей часто недопустимо, однако обеспечивать совместимость с зарубежными все же приходится, поскольку при испытаниях и настройке отечественного оборудования приходится использовать зарубежную измерительную технику (Keysight, Rohde&Schwarz, Tektronix и др.).

Описанная выше ситуация является одной из причин появления на рынке переходов между отечественными и импортными соединителями. Стоит заметить, что несмотря на соответствие по параметрам и пригодным кабелям некоторых типов из таблицы 6, механически они не совместимы, т.к. в отечественных соединителях применяется метрическая резьба, а в зарубежных – дюймовая. В таблице 7 представлена номенклатура таких переходов американской компании Spectrum, на данный момент Spectrum принадлежит швейцарской/немецкой Huber+Suhner.

Таблица 7 – Номенклатура переходов американской компании Spectrum

Интерфейсы	Верхняя рабочая частота, ГГц	KCB _H , макс.	Тип
Тип N* - Тип III** (тракт 7 / 3,04 мм)			
N (розетка) – Тип III (розетка)	18,0	1,15	8001-6F61-02
N (розетка) – Тип III (вилка)	18,0	1,15	8001-5M61-02
N (вилка) – Тип III (розетка)	18,0	1,15	8001-516F-02
N (вилка) – Тип III (вилка)	18,0	1,15	8001-5M51-02
3,50*** - Тип IX, вар.3**** (тракт 3,5 мм)			
PC3.5 (розетка) – Тип XI, вар.3 (розетка)	26,5	1,15	8001-9F92-02
PC3.5 (розетка) – Тип XI, вар.3 (вилка)	26,5	1,15	8001-9M92-02
PC3.5 (вилка) – Тип XI, вар.3 (розетка)	26,5	1,15	8001-9F91-02
PC3.5 (вилка) – Тип XI, вар.3 (вилка)	26,5	1,15	8001-9M91-02

* - N-тип в соответствии с MIL-STD-348A/304, резьба 5/8-24 UNEF-2A/2B (дюймовая);
 ** - «Экспертиза», в соответствии с ГОСТ 13317-89, 51914-2002, резьба M16x-6g/6H (метрическая);
 *** - 3,5 мм в соответствии с IEC 60169-23, резьба 1/4-36 UNS-2A/2B (дюймовая), совместим с SMA, SK;
 **** - «Град», в соответствии с ГОСТ 13317-89, 51914-2002, резьба M6x0,75-6g/6H (метрическая).

Внешний вид такого перехода представлен на рисунке 28.



Рисунок 28 – Внешний вид перехода американской компании Spectrum

В России эти переходы поставляются официальным дилером Huber + Suchner компанией «НКТ».

При этом работы по освоению импорто-совместимых соединителей ведутся достаточно активно. Из-за высокой стоимости спрос на них большой. Кроме коммерческих структур в этих работах заинтересован МО РФ.

Лидером по производству РЧ соединителей в России является ФГУП ПО «Октябрь», в номенклатуре которого более 250 негерметичных типов соединителей и 40 герметичных, выполненных по [15 – 18], все они имеют метрическую резьбу и ограничение по частоте 18 ГГц. Однако, в последние годы компания активно обновляет парк технологического оборудования и нанимает персонал по направлению "радиочастотные соединители". Недавно в номенклатуре ФГУП ПО «Октябрь» появились соединители с резьбой стандарта 0,25-36UNS, которые должны быть

совместимы с SMA, 3.5 и 2.92 (с ограничениями) и с рабочей частотой до 26,5 ГГц. Внешний вид таких соединителей представлен на рисунке 29.

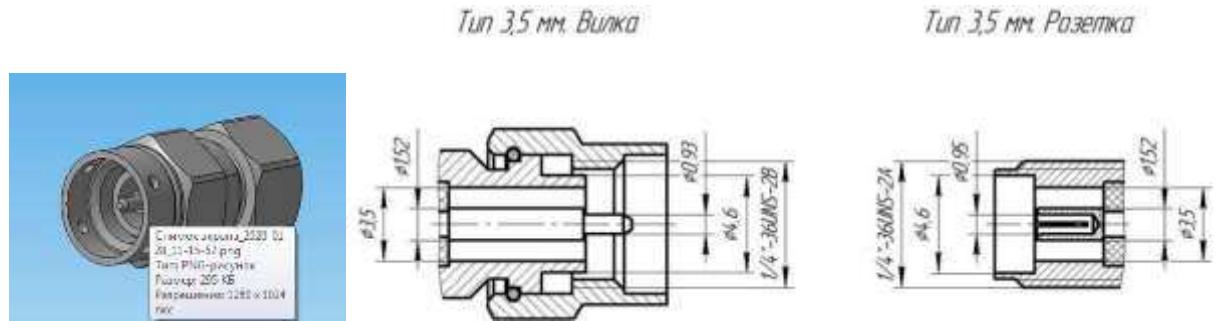


Рисунок 29 – Совместимые с импортными соединители ФГУ ПО «Октябрь»

На рисунке 29 (слева) видны отверстия в на корпусе соединителя – это может означать, что предприятие готовится выпустить версию этого соединителя для работы в условиях термовакуумной камеры (в перспективе в условиях космического пространства).

Кроме ФГУП «Октябрь» создать более-менее отложенное производство смогли: ОАО ЦНИИИА, НПФ «Микран», ООО «Амитрон», АО НИПИ «Кварц», НПП «Спецкабель», ФГУП НПП «Исток», ОАО «ИРЗ». Более подробная информация о их продукции представлена на официальных сайтах и в [18] (часть информации в [18] устарела на момент написания работы).

4 Полуавтоматическая установка бесконтактной пайки соединителей

Установка для полуавтоматической пайки обоймы коаксиальных соединителей СВЧ состоит из позиционера 2, обеспечивающего фиксацию соединителя, генератора ТВЧ с индукционной охлаждаемой катушкой 7, создающего индукционные токи (токи Фуко) в заготовке, пиromетрического термометра (пиromетра) 3, фиксирующего температуру обоймы, контроллера 4, обеспечивающего анализ текущей температуры, программируемого таймера 5, управляющего ШИМ контроллером 6, задающим необходимый режим работы генератора ТВЧ, источника постоянного тока 8, обеспечивающего питание генератора ТВЧ, резервуара-охладителя с насосным агрегатом 9, осуществляющего охлаждение генератора ТВЧ и индукционной катушки.

На рисунке 30 представлена блок-схема установки для полуавтоматической пайки обоймы коаксиальных соединителей СВЧ.

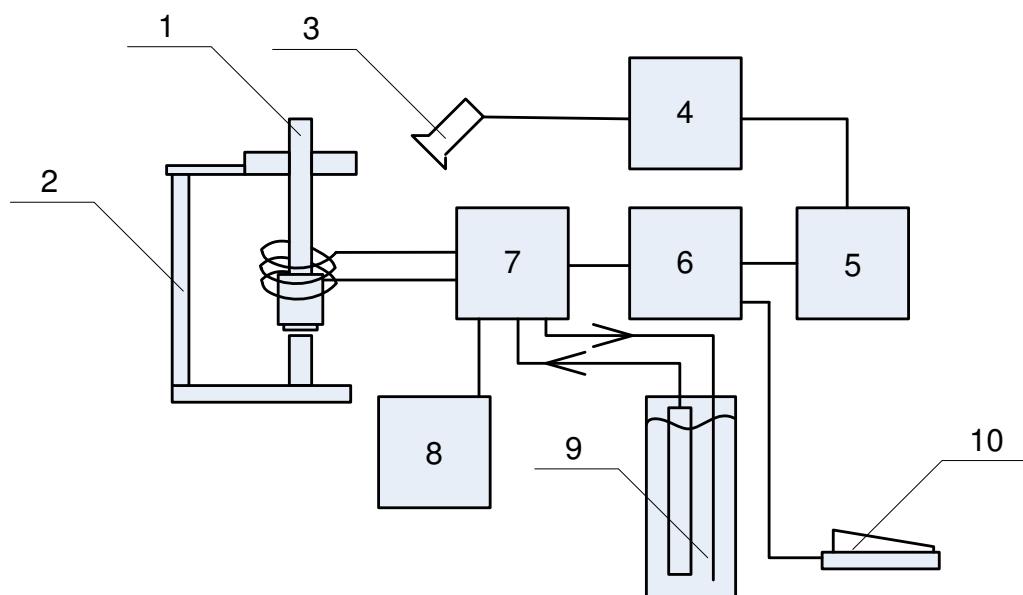


Рисунок 30 – Блок-схема установки для полуавтоматической пайки соединителей

Преимущество предлагаемой установки заключается в следующем:

1 Пайка осуществляется индукционным способом (без прикосновения жала паяльника к заготовке), что обеспечивает идеальное распределение расплавленного припоя по спаиваемым поверхностям.

2 Благодаря применению ШИМ возможно оптимизировать температурный режим, не опасаясь перегрева диэлектрика в кабеле, или (наоборот) недостаточной глубины пайки.

3 Применение пиromетрического термометра (пиromетра) позволяет организовать обратную связь (через контроллер 4) и оптимальный режим будет поддерживаться автоматически.

4 Полностью исключается человеческий фактор – результат не зависит от квалификации оператора.

Разработанная установка представляет собой полуавтомат для запайки обоймы коаксиального соединителя (в особенности типа SMA) к оплётке кабеля. Процесс полуавтоматический, потому что установка оператор вручную устанавливает в позиционер обойму и кабель.

Алгоритм работы установки следующий:

1 Оператор устанавливает в позиционер обойму (корпус) соединителя SMA. Позиционер устроен таким образом, что его рабочая часть повторяет ответную часть монтируемого соединителя (на практике это и есть ответная часть, закрепленная на конце центрирующего штока).

2 Оператор устанавливает кабель с припаянным соединителем центральной жилы и нанесенным флюсом на оплётку в обойму и фиксирует его в позиционере при помощи фторопластовых поджимных губок.

3 Оператор нажатием на педаль запускает головку генератора ТВЧ.

4 Переменное электромагнитное поле созданное катушкой, под действием генератора ТВЧ вызывает в обойме соединителя вихревые токи (индукционные токи, токи Фуко), которые нагревают одновременно обойму, припой и оплётку кабеля.

5 Инфракрасное излучение от нагреваемой обоймы фиксируется пиromетром и в реальном времени оценивается контроллером температуры.

6 Контроллер температуры формирует управляющий сигнал для программируемого таймера на отключение генератора ТВЧ, а так же управляющий сигнал для ШИМ, который определяет скважность, влияющую на скорость нагрева обоймы.

7 Генератор продолжает формировать импульсы тока необходимой скважности в катушке на частоте 40 кГц (питаясь от источника постоянного тока) до тех пор, пока не получит сигнал на отключение по одному из двух событий: окончание разрешенного времени нагрева, либо достижение заданной температуры. В первом случае сигнал на отключение подается программированным таймером, во втором – контроллером температуры.

В качестве источника ТВЧ выбран автогенератор на базе IGBT модуля с рабочим диапазоном частот 22 – 32 кГц и номинальной полезной мощностью 8 кВт. Модуль IGBT питается выпрямленным напряжением сети порядка 290В. Согласование с охлаждаемой индукционной катушкой осуществляется с помощью согласующего трансформатора (сердечник выполнен из феррита). Конденсатор С1 образует с катушкой L1 колебательный контур, максимальная добротность которого обеспечивается на рабочей частоте 30 КГц. При этом добротность колебательного контура низкая (что не угрожает IGBT модулю благодаря низкому внутреннему сопротивлению в открытом состоянии, IGBT работает в ключевом режиме). Это обстоятельство позволяет:

- менять конфигурацию катушки индукционного нагрева без существенного снижения эффективности;
- помещать внутрь катушки обоймы из различных материалов без существенного снижения эффективности.

Охлаждающая жидкость (дистиллированная смягченная вода) циркулирует одновременно по двум контурам: контур охлаждения IGBT

модуля и катушка индукционного нагрева. Давление создается винтовым насосом, погруженным в резервуар – охладитель объемом 125 литров.

Схема устройства индукционного нагрева обоймы соединителя представлена на рисунке 31.

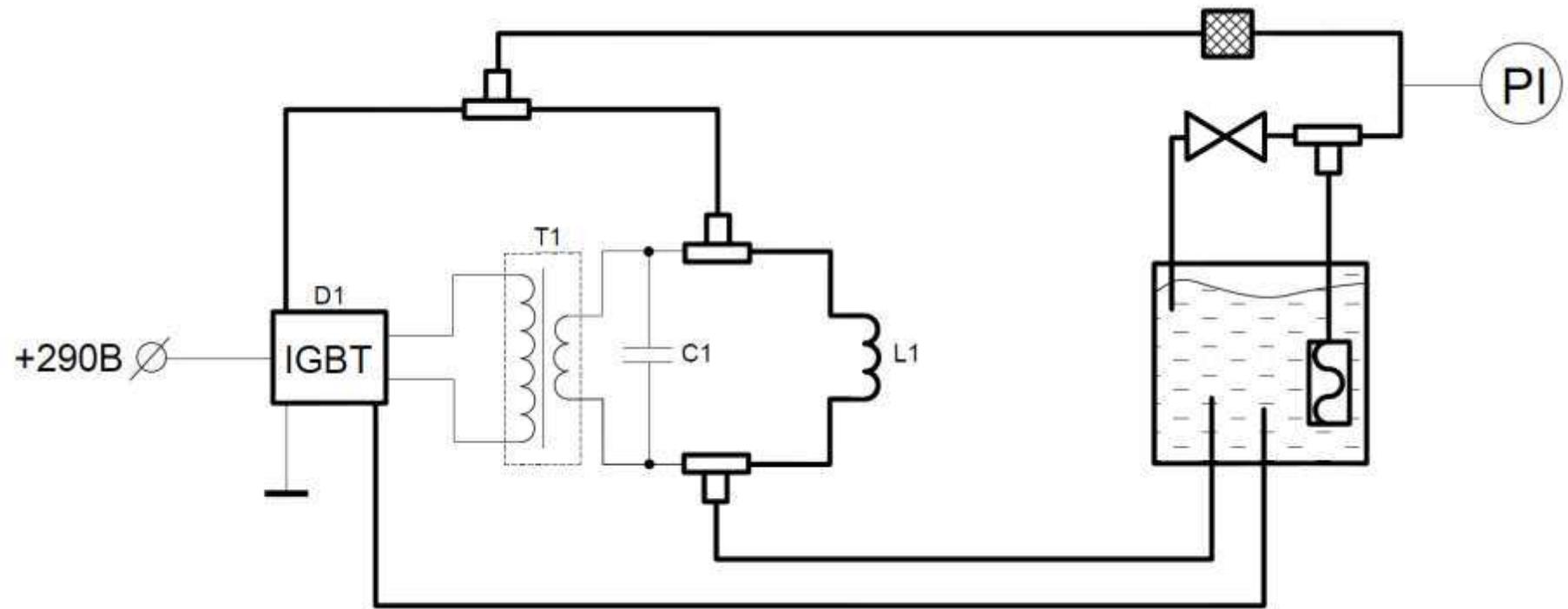


Рисунок 31 – Схема устройства индукционного нагрева обоймы соединителя

На рисунке 32 представлено изображение рабочей области установки для полуавтоматической заделки соединителей с установленной заготовкой кабельной сборки.



Рисунок 32 – Рабочая область установки для полуавтоматической заделки соединителей

Кроме устройства индукционного нагрева в состав установки входит также устройство пайки соединителей центральной жилы, выполненное на базе «термопинцета». Существует возможность использовать как одноконтурный термопинцет, изображенное представлено на рисунке 33, так и двухконтурный, представленный на рисунке 34, в зависимости от типа монтируемого соединителя.

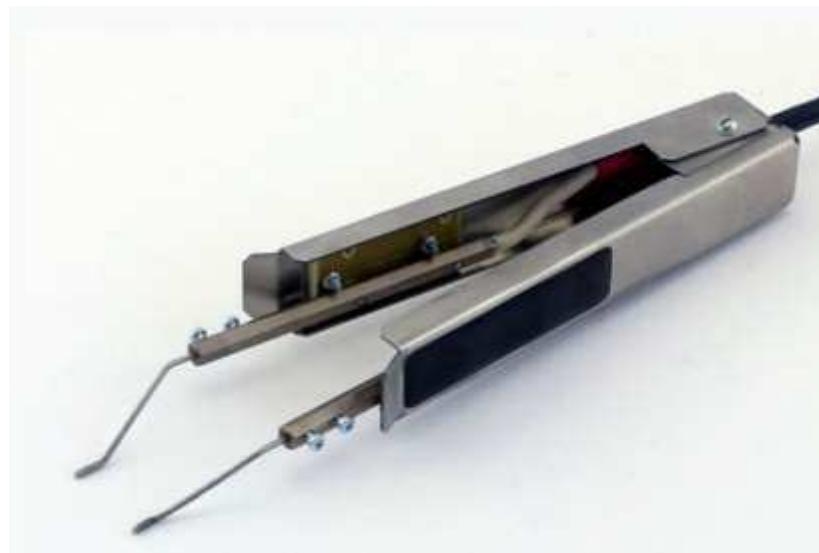


Рисунок 33 – Одноконтурный термопинцет



Рисунок 34 – Двухконтурный термопинцет

Устройство пайки центральной жилы соединителей может использоваться как в автоматическом режиме (с контролем температуры посредством пиromетра), так и в ручном (с управлением мощностью оператором в процессе отработки режимов пайки). Для этих целей предусмотрено два контроллера термопинцета. На рисунке 35 представлена схема силового блока автоматического контроллера (ШИМ) термопинцета.

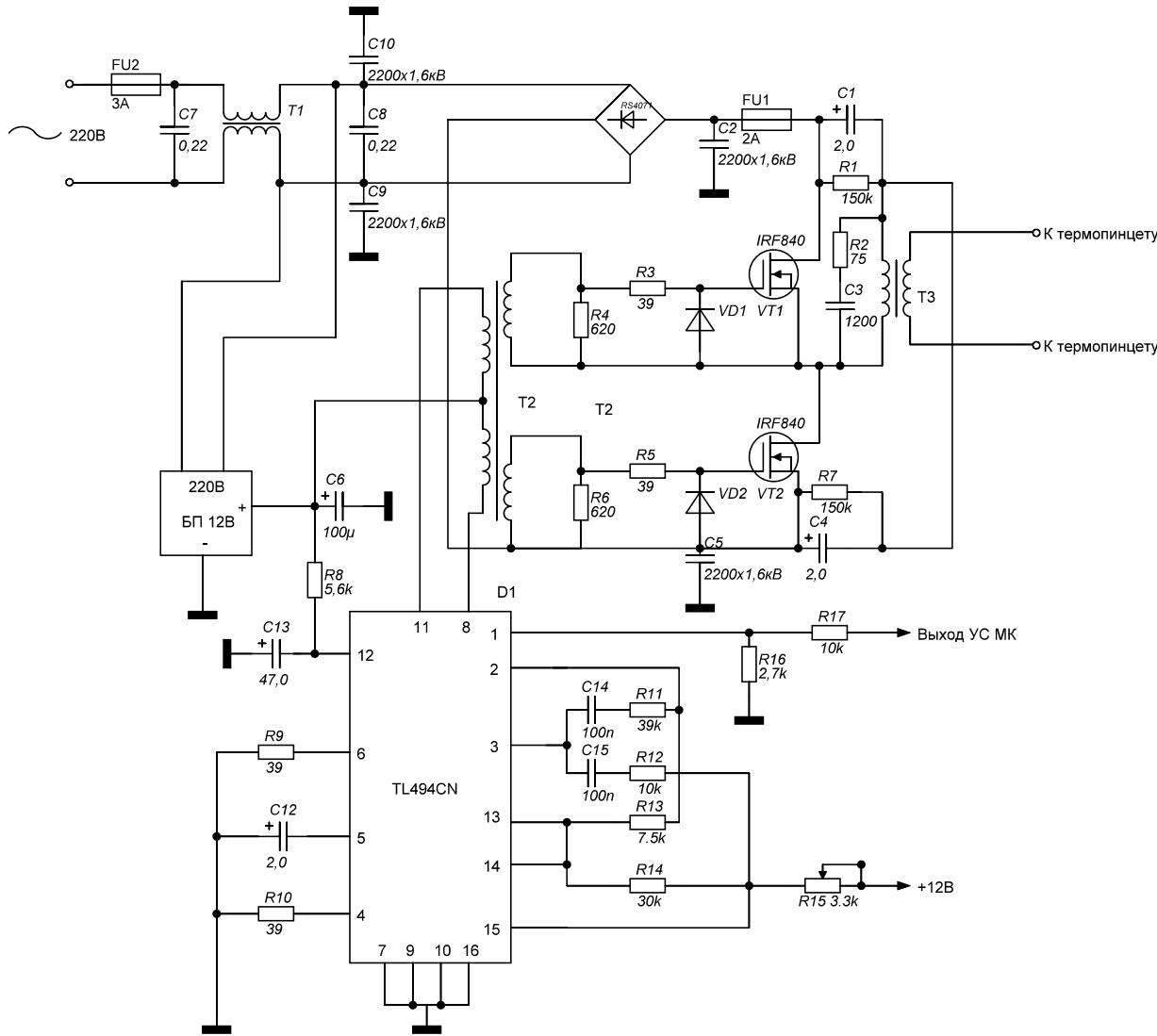


Рисунок 35 – Принципиальная электрическая схема силового блока автоматического контроллера термопинцета

Силовой блок автоматического контроллера построен на базе ШИМ-контроллера TL494CN. Интенсивность нагрева регулируется посредством изменения скважности выходного сигнала (IGBT транзисторы IRF840 работают в ключевом режиме). Это позволяет добиться максимально возможного коэффициента полезного действия приблизительно 94% (при использовании ферритовых сердечников фирмы EPCOS) и силового выходного кабеля сечением 6 мм².

Управление в автоматическом режиме осуществляется от блока управления, построенного по классической архитектуре схем с 8-,битными микроконтроллерами семейства Atmel Mega (AtMega 328PU). Микроконтроллер считывает информацию с пирометра и формирует управляющее напряжение, которое подается на вывод 1 МС TL494CN через резистор R17. Внутренняя схема ШИМ – контроллера (поясняющая логику его работы) представлена на рисунке 36.

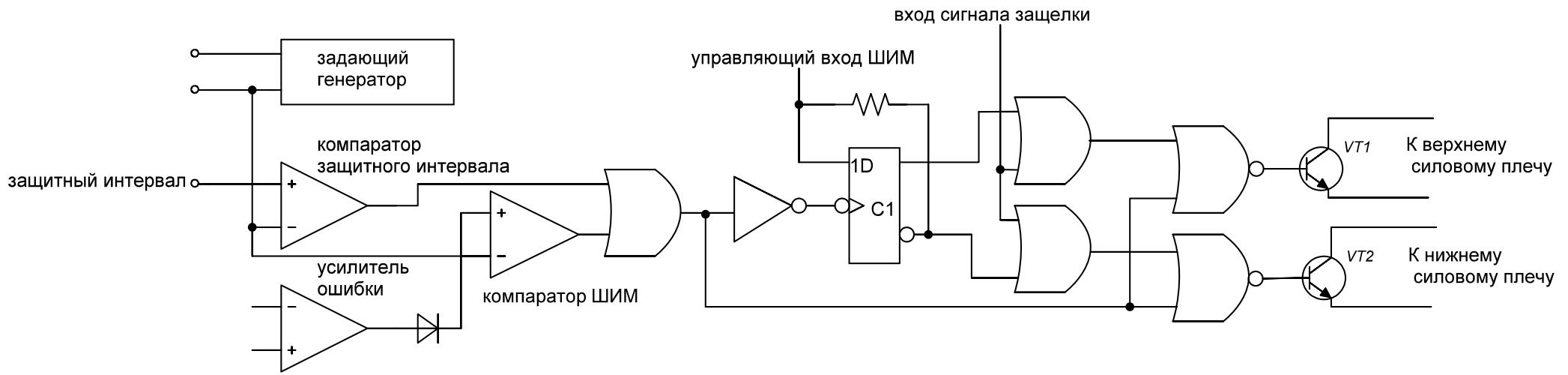


Рисунок 36 – Внутренняя схема ШИМ-контроллера

Автоматический режим пайки отлично зарекомендовал себя при производстве изделий с отработанными (известными заранее) тепловыми параметрами процесса пайки. При этом, если тепловые параметры (режим пайки) – неизвестны подобрать правильную передаточную характеристику для формирования управляющего сигнала проблематично. Поэтому установка для полуавтоматической заделки соединителей снабжена дополнительным силовым блоком термопинцета с ручной регулировкой интенсивности и длительности нагрева. Это позволяет оператору подобрать режимы пайки для новых соединителей «интуитивно» и опираясь на отработанные данные настроить длительность и интенсивность нагрева в автоматическом режиме. Схема силового блока термопинцета с ручным управлением представлена на рисунке 37.

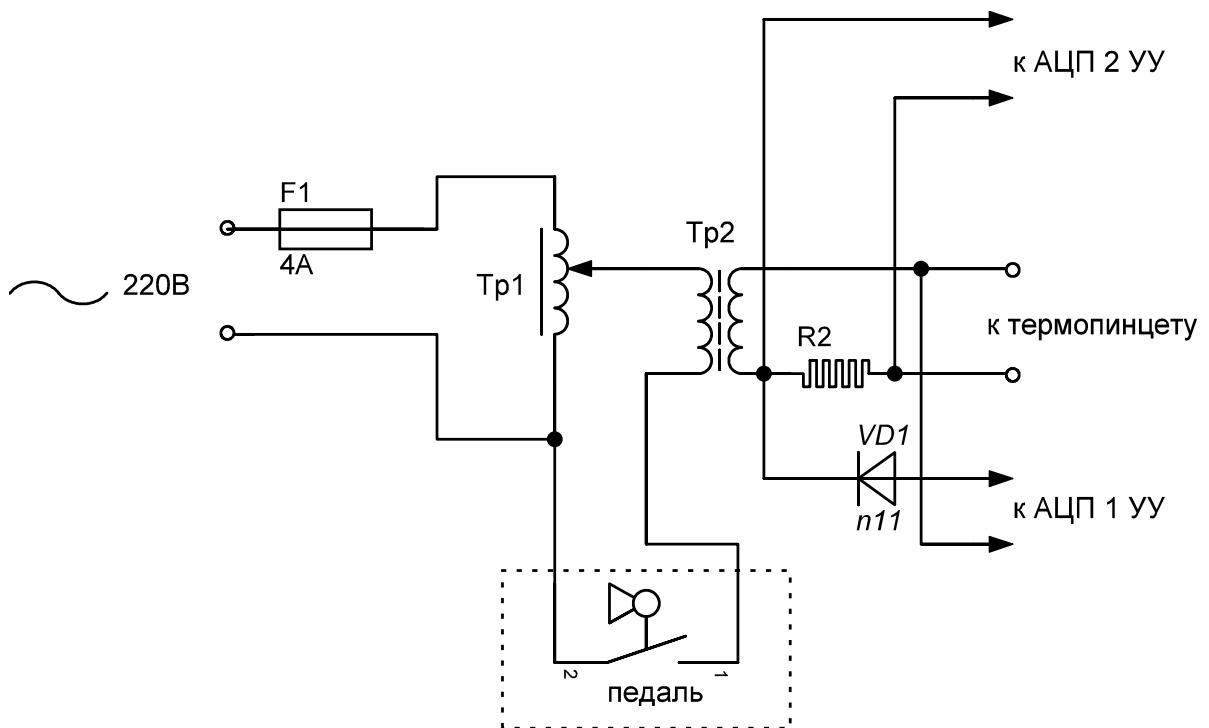


Рисунок 37 – Схема силового блока термопинцета с ручным управлением

Резистор R2 выполняет роль токового шунта и предназначен для формирования «зеркального напряжения» на входе АЦП 2 микроконтроллера УУ. Прямое напряжение на входе АЦП 1 УУ формируется непосредственно с выхода понижающего трансформатора ТР2. Регулируемый трансформатор ТР1 предназначен для подстройки оператором в ручном режиме. Педаль предназначена для задания длительности нагрева оператором в ручном режиме. Микроконтроллер самостоятельно определяет длительность и мощность работы нагревательного элемента термопинцета и позволяет оператору сохранить до 64 режимов нагрева (с последующим использованием в автоматическом режиме работы).

В таблице 8 представлены эксплуатационные характеристики контроллера силового блока автоматического контроллера термопинцета.

Таблица 8 – Эксплуатационные характеристики контроллера силового блока автоматического контроллера термопинцета

Наименование параметра, характеристики	Единица измерения	Значение
Напряжение питания переменного тока частотой 50 Гц	В	200 – 250
Потребляемая мощность	Вт	170
Предохранитель	А	4
Максимальная мощность инструмента	Вт	159,8
Напряжение на выходе блока (максимальное на холостом ходу)	В	2,5
Количество видов инструментов	шт	2
Количество циклов нагрева каждого инструмента	шт	2000
Минимальная мощность нагрева	%	0
Максимальная мощность нагрева	%	100
Шаг установки нагрева	%	1
Минимальное время нагрева	с	-
Максимальное время нагрева	с	-

5 Результаты тестирования установки бесконтактной пайки соединителей

Разработанная установка была протестирована при выполнении работ по созданию пробных кабельных сборок, радиочастотные характеристики которых были измерены при помощи ВАЦ N5244A. Результаты измерений представлены на рисунках 38 и 39 (КСВн и передаточная характеристика S_{21} соответственно).

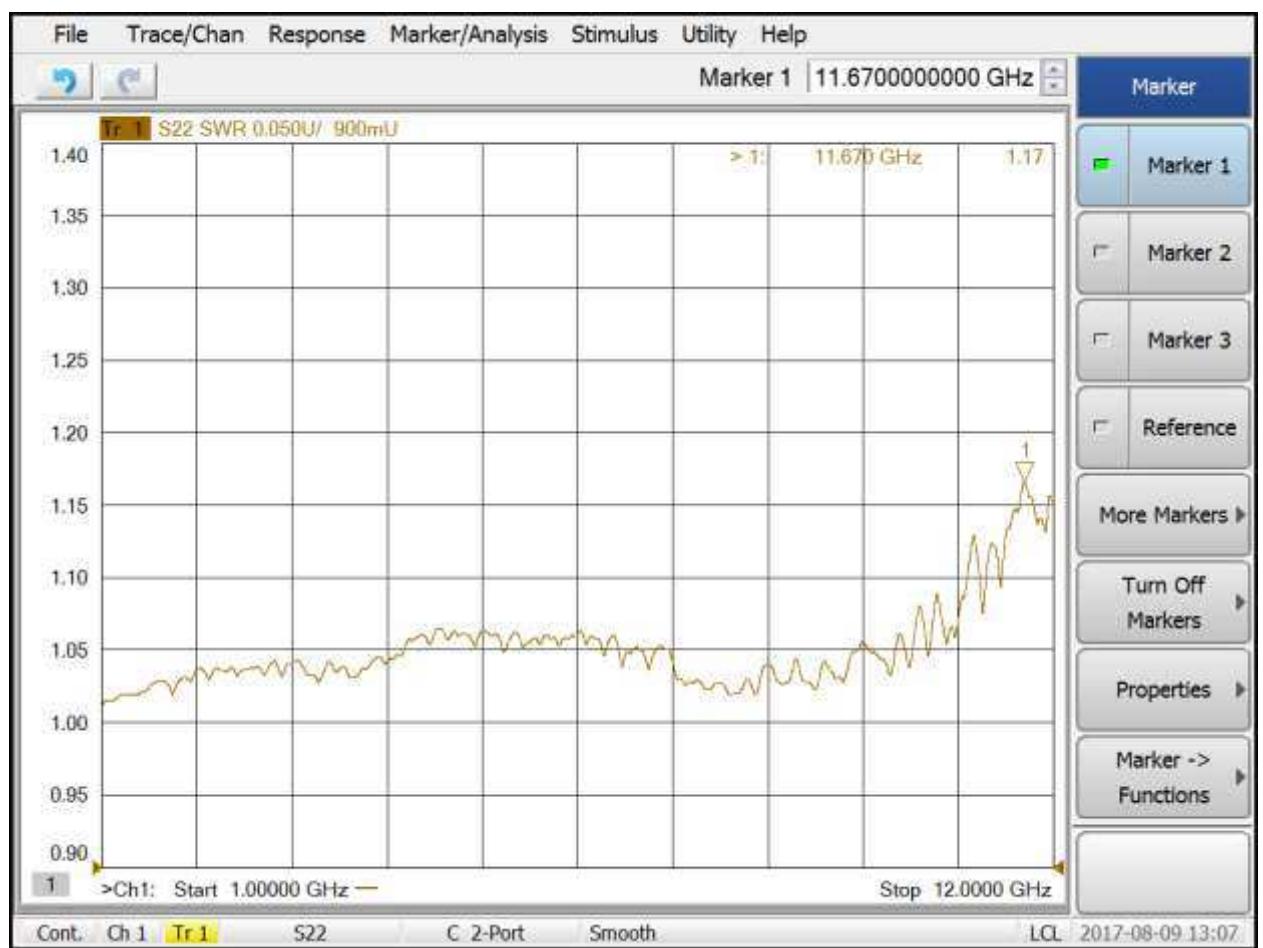


Рисунок 38 – КСВн тестовой кабельной сборки

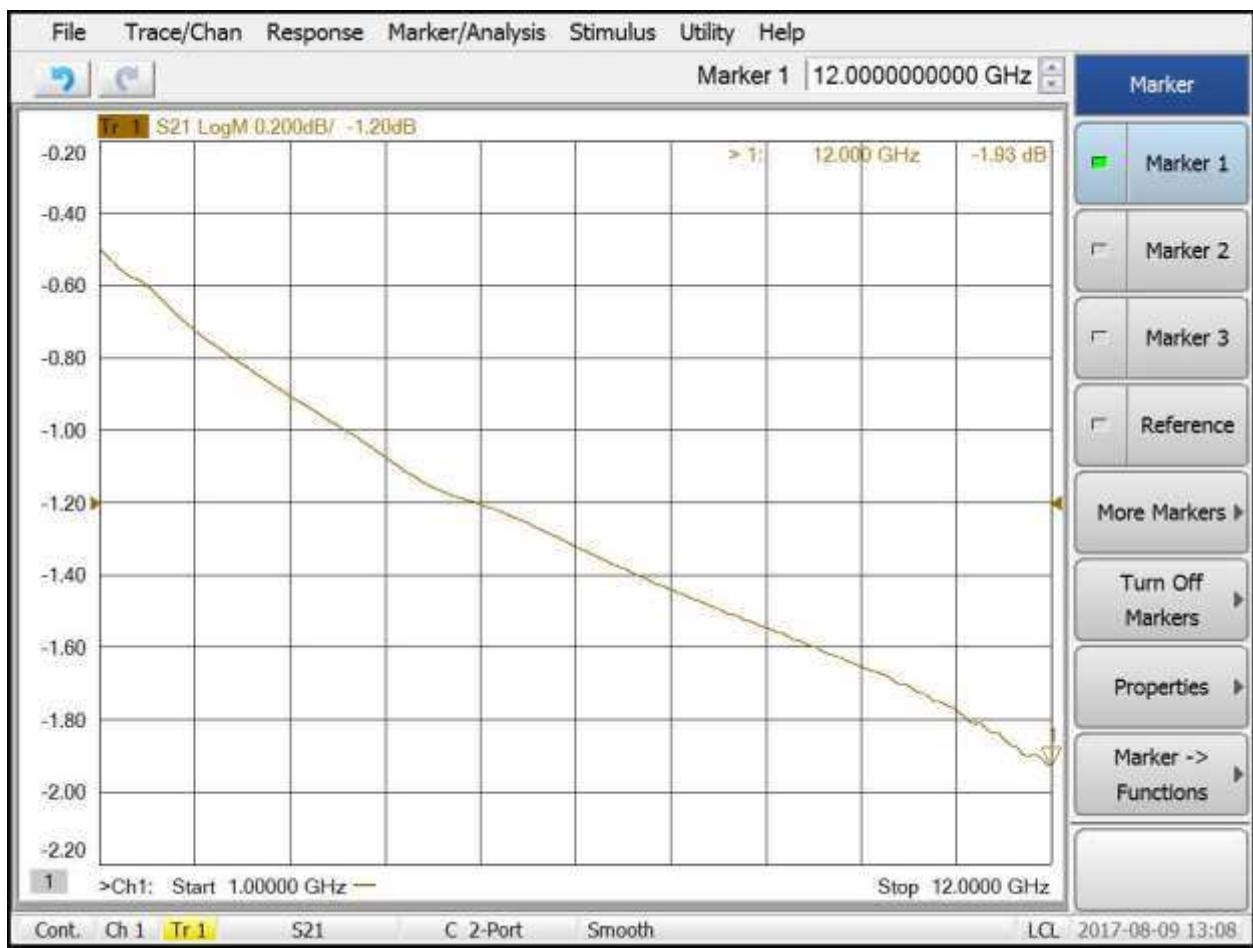


Рисунок 39 – Передаточная характеристика тестовой кабельной сборки

6 Технология создания кабельных сборок и подтверждение характеристик

6.1 Технология создания кабельных сборок

Технологический процесс производства высокочастотной кабельной сборки с соединителями типов SK, SMA, N, PC3,5, TNC, BNC методом бесконтактной полуавтоматической пайки можно представить в виде технологической карты, представленной в таблице 8.

Обрезка кабеля и зачистка выполняется с применением зачистного станка с число-программным управлением Coax Strip 5500, который позволяет:

- а) выполнить торцовку кабеля;
- б) удалить внешнюю изоляцию, оплетку, фольгу и диэлектрик на участках требуемой длины (в соответствии с конструкцией соединителя), не допуская при этом повреждения центрального проводника кабеля.

После обрезки на Coax Strip кабель принимает вид, представленный на рисунке 40.

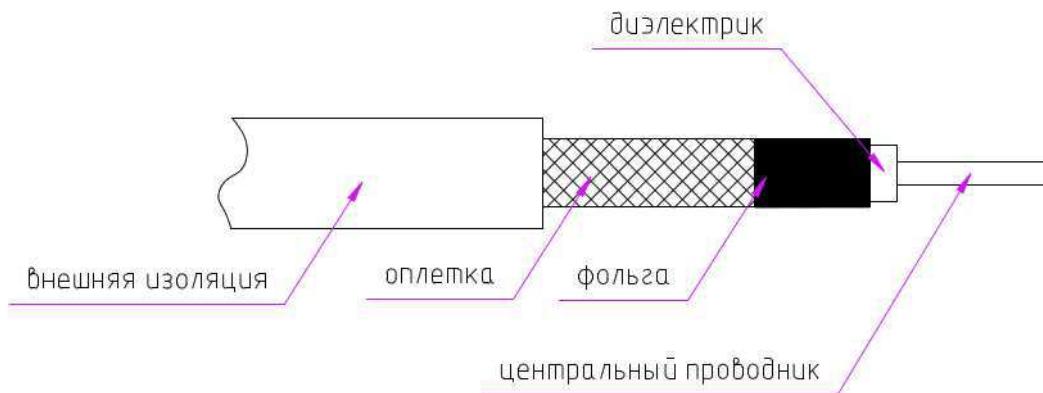


Рисунок 40 – зачищенный конец кабеля после обрезки

Обрезка кабеля на роторном станке с числовым программным управлением позволяет избежать деформации диэлектрика, приводящей к рассогласованию в месте установки соединителя.

Таблица 9 – Технологическая карта

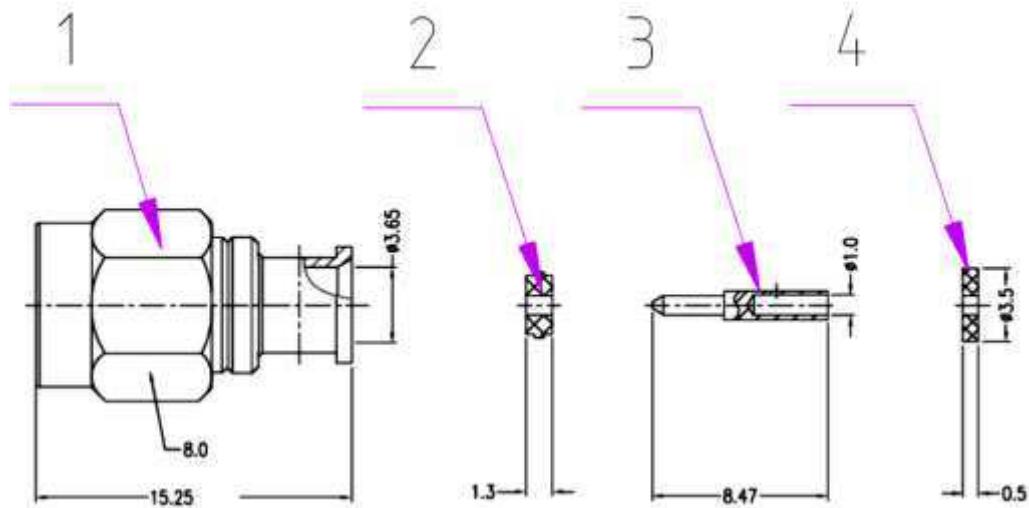
№ операции	Наименование операции	Тип соединителя							Применяемое оборудование								
		SMA	PC-3,5	SK (2,92 mm)	2,4 mm	TNC	BNC	N	зачистной станок Coax Strip 5500	Установка для бесконтактной пайки соединителей ООО "СРТ"	ВАЦ N5245A	набор инструментов 74_2-0-070/71	ванная паяльная СТ-1300А	термопинцет с контроллером температуры	станция паяльная Lukey-852D+	кабельный принтер	комплект вьверки соединителей
1	Обрезка кабеля	X	X	X	X	X	X	X									
2	Зачистка кабеля	X	X	X	X	X	X	X									
3	Снятие фаски центральной жилы	X	X	X	X	X	X	X				X					
4	Лужение оплетки	X	X	X	X	X	X	X				X					
5	Лужение центральной жилы	X	X	X	X	X	X	X				X					
6	Пайка центрального проводника соединителя	X	X	X	X	X	X	X						X			
7	Установка ограничительного кольца центрального проводника соединителя	X	X	X	X							X					
8	Установка диэлектрического сердечника соединителя	X	X			X	X	X									
9	Пайка соединителя центральной жилы	X	X	X	X	X	X	X						X			
10	Позиционирование	X	X	X	X						X						
11	Пайка корпуса соединителя к оплётке кабеля	X	X	X	X	X		X		X							
12	Контроль присоединительных размеров	X	X	X	X												X
13	подготовка термоусадочной трубы	X	X	X	X	X		X								X	
14	Нагрев термоусадочной трубы	X	X	X	X	X		X								X	
15	Контроль радиотехнических характеристик готовой кабельной сборки	X	X	X	X	X		X			X						
16	Контроль электрической целостности кабельной сборки					X	X			X							

Перед монтажом соединителя необходимо снять фаску с центральной жилы кабеля и одеть ограничительное кольцо центрального контакта. Это необходимо для того, чтобы сопоставить посадочные размеры соединителя с зачищенными участками кабеля.

После этого нужно залудить центральную жилу (для некоторых типов кабелей так же требуется лужение оплетки перед пайкой).

Лужение осуществляется припоем ПОС-61 в паяльной ванне СТ-1300А при температуре расплава 240 °C.

Конструкция соединителя SMA вилка для кабеля (HFS)SMS-141 представлена на рисунке 41.



1 – корпус; 2 – диэлектрик соединителя; 3 – центральный контакт; 4 – ограничительное кольцо центрального контакта

Рисунок 41 – Конструкция соединителя (HFS)SMS-141

Центральный контакт соединителя паяется к центральной жиле кабеля с помощью одноконтурного термопинцета с контроллером температуры до упора в ограничительное кольцо. Перед пайкой на внутреннюю поверхность центрального контакта наносится припой ПОС-61 в количестве ~0,12 г. (3 см проволоки диаметром 0,8 мм).

Качество пайки контролируется визуально через технологическое кольцо толстой части центрального контакта. При успешной пайки в отверстии видна ванночка припоя.

После того, как центральный контакт соединителя припаян, устанавливается диэлектрик соединителя и полученная конструкция вставляется в корпус.

Вид соединителя с кабелем в разрезе представлен на рисунке 42.

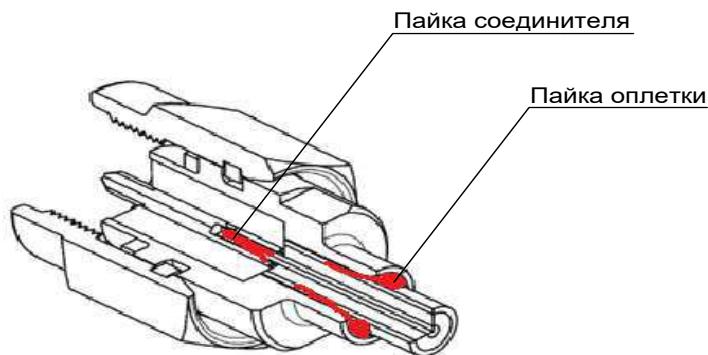


Рисунок 42 – Конструкция соединителя в разрезе

Наиболее ответственной операцией при выполнении монтажа соединителя является пайка оплетки к корпусу соединителя, производимая с помощью установки, разработанной ООО «СРТ». От качества пайки оплетки зависят такие РТХ кабельной сборки как электротермичность и КСВ.

Пайка производится припоем ПОС-61 с применением пассивного флюса «жидкая канифоль». Припой в формате проволоки наматывается на место пайки в количестве витков, зависящем от диаметра. Заготовка (кабель с соединителем) устанавливается в позиционер установки для пайки и фиксируется прижимными губками. Далее процесс пайки происходит автоматически и не зависит от оператора (оператор запускает установку нажатием на педаль).

Для работы с соединителем (HFS)SMS-141 (приведен в качестве примера и как наиболее распространенный) оптимальные параметры установки бесконтактной пайки соединителей представлены в таблице 10.

Таблица 10 – Параметры бесконтактной пайки соединителя

Параметр	Значение	Единица измерения
Мощность генератора ТВЧ	8	кВт
Скважность	60	% от периода колебаний
Рабочая частота, кГц	24	кГц
Количество витков катушки	3	шт
Внешний диаметр трубы в катушке	3,7	мм
Внутренний диаметр намотки	18	мм
Длительность импульса пайки	3,1	с
Диаметр проволоки припоя	1	мм
Число витков припоя	3	шт

Внешний вид качественного соединения оплетка-корпус представлен на рисунке 44.



Рисунок 44 – Результат бесконтактной пайки корпуса соединителя

После припаивания оплетки область пайки необходимо отмыть от флюса раствором изопропилового спирта.

Места пайки оплетки к корпусу соединителя защищаются термоусадочной трубкой с помощью термовоздушной паяльной станции.

После монтажа обоих соединителей необходимо проконтролировать присоединительные размеры на соответствие типу соединителя. Если присоединительные размеры находятся не в допуске, то такой соединитель может повредить ответную часть пристыковке.

Номенклатура кабельных сборок созданных в ходе работы представлена в таблице 11 и на рисунках 45 – 47.

Таблица 11 – Номенклатура разработанных кабельных сборок

Наименование	SRT-HF	SRT-FL	SRT-PS
Доступные типы соединителей	SMA, SK-2,92 мм, PC-3,5, N, 2,4 mm		
Верхняя граница частоты, ГГц*	18	18	18
Масса кабеля, г/м	38	45	73
Минимальный радиус изгиба, мм	8	10	16
Диапазон рабочих температур, С (определен аналитически)	-65...+165	-65...+165	-55...+200
Возможность работы в вакууме (определен аналитически)	нет	нет	да
Технологические особенности	формируемые вручную	гибкие	фазостабильные
Изображение	рисунок 45	рисунок 46	рисунок 47



Рисунок 45 – Кабельная сборка SRT-HF



Рисунок 46 – Кабельная сборка SRT-FL



Рисунок 47 – Кабельная сборка SRT-PS

6.2 Подтверждение радиочастотных характеристик

6.2.1 Подтверждение радиотехнических характеристик, указанных в техническом задании

Для подтверждения РТХ изготовленных кабельных сборок использовался ВАЦ с комплектом технологической оснастки. На момент проведения измерений РТХ все оборудование было поверено и имело интервал до следующей поверки не менее 3-х месяцев.

Состав оборудования использовавшегося для измерений РТХ представлен в таблице 12.

Таблица 12 – Состав измерительного оборудования

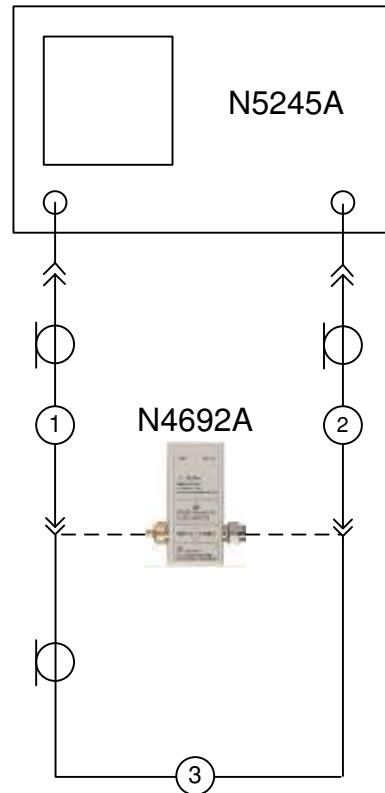
Тип	Наименование	Примечание
ВАЦ	N5245A	измерение потерь и КСВн
Фазостабильные кабели NMD	85133-60032	
Электронный калибровочный модуль	N4692A	Калибровка ВАЦ

Схема измерительного стенда для измерения S-параметров кабельной сборки представлена на рисунке 48. Калибровочный модуль N4692A используется для исключения влияния тестовых фазостабильных кабелей на результат измерения.

Параметры настройки ВАЦ представлены в таблице 13.

Таблица 13 – Параметры настройки ВАЦ

Параметр	Значение	
	при калибровке	при измерении
Мощность источника, дБм	-5	-5
Аттенюатор источника, дБ	0	0
Диапазон частот, ГГц	1...26,5	1...26,5
Количество точек, шт	16001	16001
Количество усреднений, шт	50	10
Фактор сглаживания, %	0	1



1, 2 – тестовые кабели 85133-60032; 3 – тестируемая кабельная сборка

Рисунок 48 – Схема измерений

Для подтверждения РТХ были отобраны три кабельные сборки в соответствии с таблицей 14.

Таблица 14 – Кабельные сборки для подтверждения РТХ

Тип	Наименование	Соединители	Длина, м
SRT-HF	HF-3-SKm-SKm	SK-2,92m, H+S	3,4
SRT-FL	FL-1-SKm-SKm	SK-2,92m, H+S	1,0
SRT-PS	PS-3-SKm-SKm	SK-2,92m, H+S	1,0

Результаты измерения потерь и КСВн для кабельных сборок из таблицы 14 представлены на рисунках 49 – 51.



Рисунок 49 – Измеренные PTX кабельной сборки SRT-HF

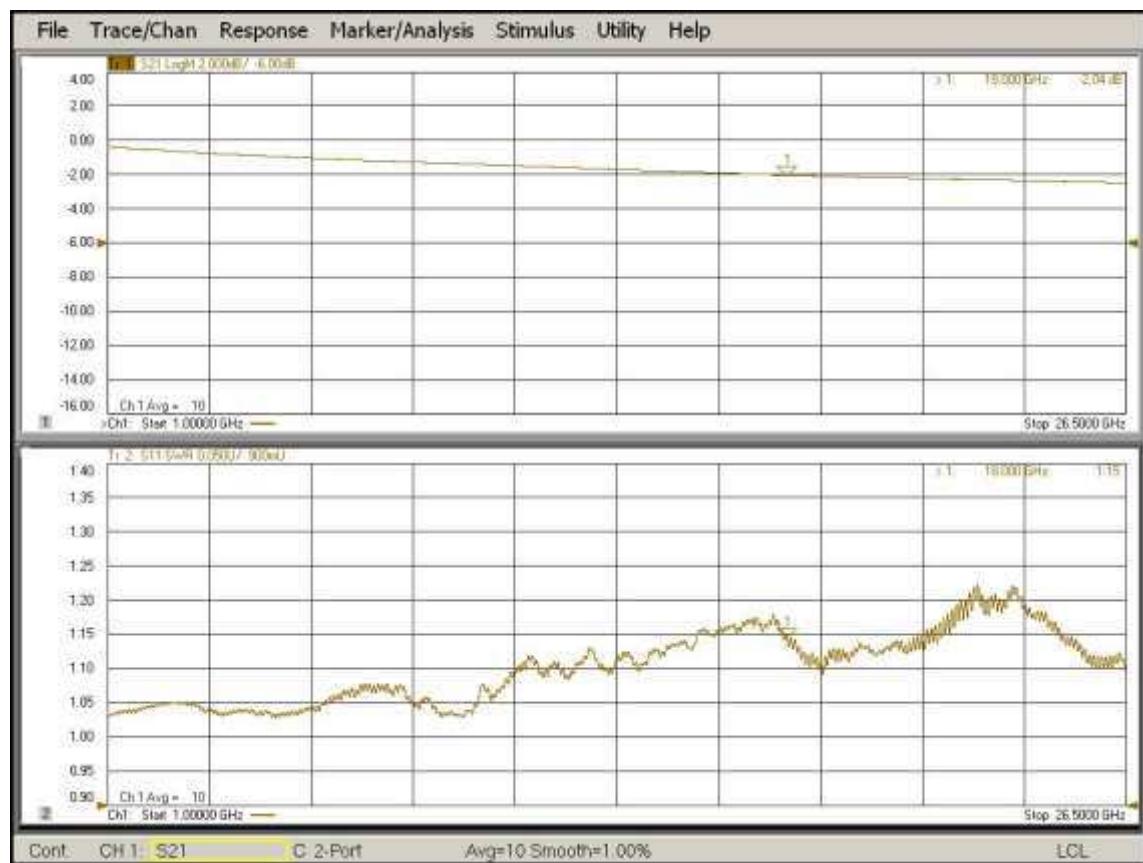


Рисунок 50 – Измеренные PTX кабельной сборки SRT-FL

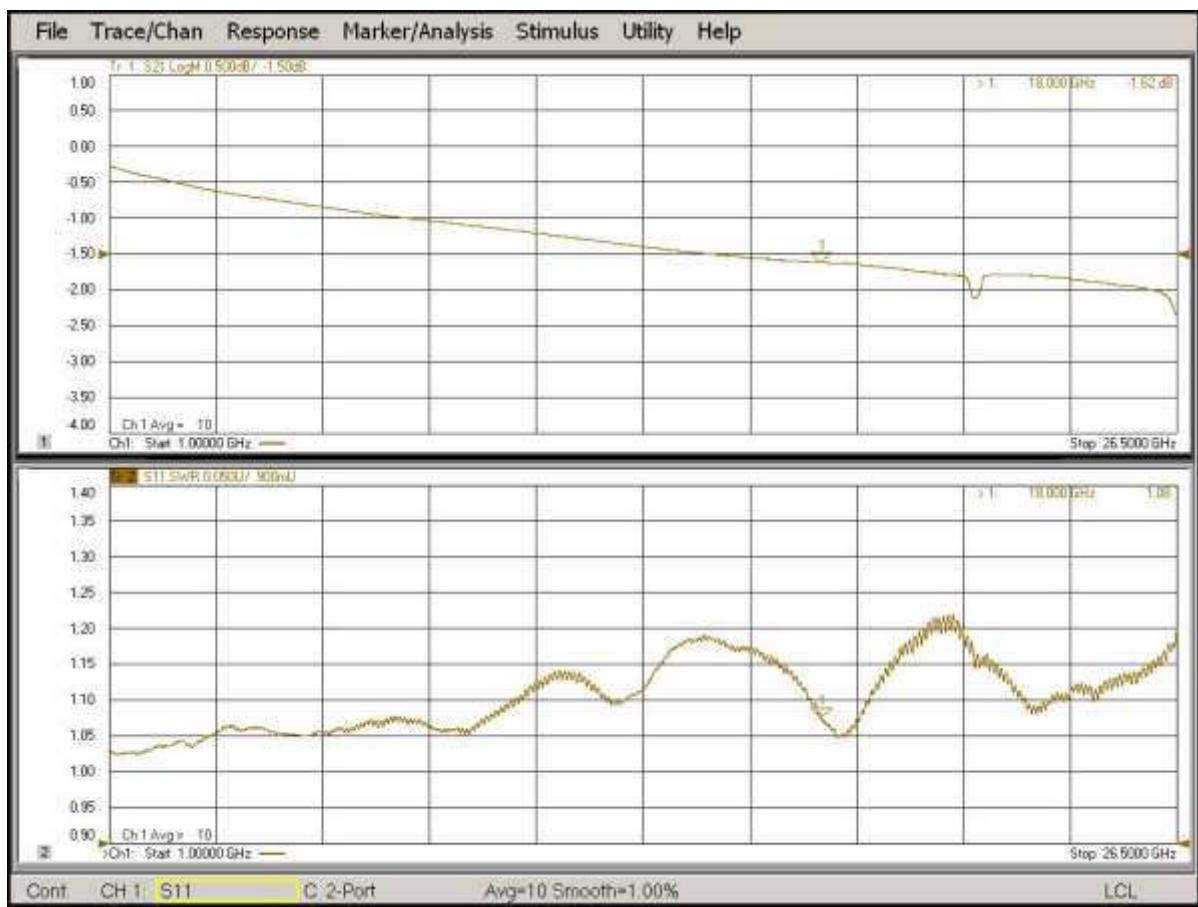


Рисунок 51 – Измеренные PTX кабельной сборки SRT-PS

Условные названия диапазонов частот, согласно классификации IEEE, представлены в таблице 15.

Таблица 15 – Классификация диапазонов частот

Название диапазона	Частоты РЛС, ГГц	Частоты ССС, ГГц
L		1,0...2,0
S		2,0...4,0
C	4,0...8,0	4,0...7,0
X	8,0...12,0	7,0...10,7
Ku	12,0...18,0	10,7...18,0
K	18,0...26,5	18,3...20,2; 27,5...31,5
Ka	26,5...40,0	

Согласно принятому обозначению диапазонов частот, максимальная частота диапазона Ku составляет 18 ГГц.

В таблице 16 представлена калькуляция погонных потерь и КСВн созданных кабельных сборок на частоте 18 ГГц (худший случай).

Таблица 16 – Калькуляция погонных потерь и КСВн

Кабельная сборка	Длина, м	Потери на частоте 18 ГГц, дБ					КСВн	
		в сборке	²⁾ в соед.	погонные в кабеле	в сборке длиной 1м	³⁾ по ТЗ	1) изм.	³⁾ по ТЗ
SRT-HF	3,40	7,57	0,10	2,20	2,23	2,00	1,06	1,25
STR-FL	1,00	2,04	0,10	1,94	2,04		1,14	
SRT-PS	1,00	1,62	0,10	1,52	1,62		1,07	

¹⁾ Худшее значение в диапазоне частот до 18 ГГц.
²⁾ Худший случай по заявлению производителя.
³⁾ Не более.

На рисунке 52 представлены зависимости погонных потерь от частоты в диапазоне частот до 18 ГГц кабельных сборок SRT-PS и Radiall 121607300.

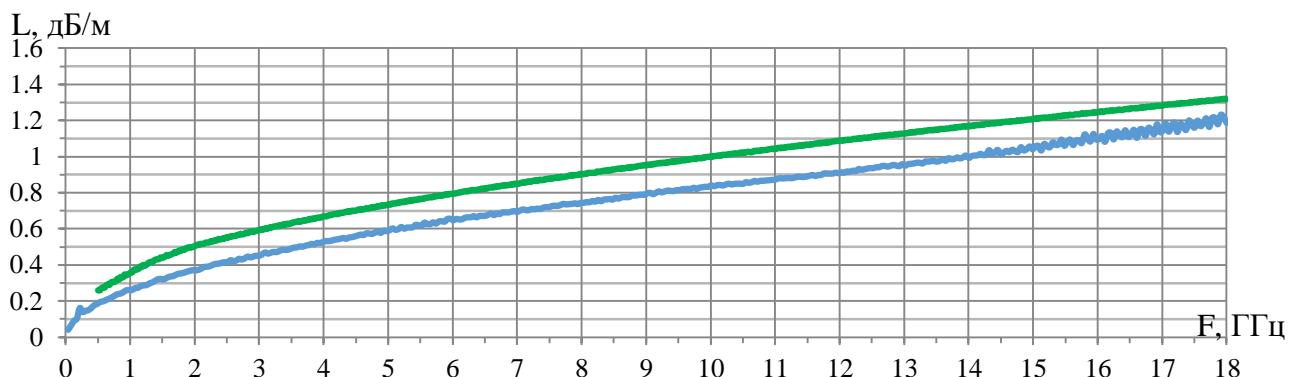


Рисунок 53 – Погонные потери для кабельных сборок SRT-PS и Radiall 121607300

На рисунке 54 представлены зависимости КСВн от частоты в диапазоне частот до 18 ГГц кабельных сборок SRT-PS и Radiall 121607300.

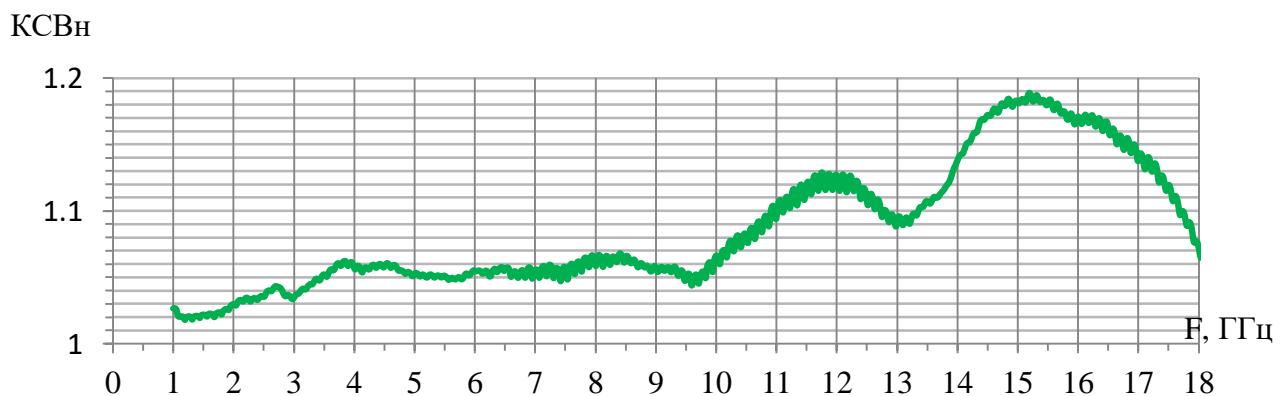


Рисунок 54 – КСВн кабельных сборок SRT-PS и Radiall 121607300

Таким образом, РТХ кабельных сборок типа SRT-PS полностью отвечают требованиям, ТЗ и соответствуют характеристикам распространённого импортного аналога.

6.2.2 Результаты испытаний кабельных сборок на радиоизлучение и сравнительный анализ эффективности экранирования

Для оценки качества разработанной технологии с точки зрения эффективности экранирования проведены испытания на RE для двух кабельных сборок идентичной длины, собранных из идентичных компонентов:

- кабельная сборка, созданная вручную, с применением ручного паяльника;
- кабельная сборка, созданная по технологии ООО «СРТ».

Испытания проводились на частотах 8 ГГц, 18 ГГц и 26,5 ГГц скалярным способом в закрытой БЭК.

Состав измерительного оборудования представлен в таблице 17.

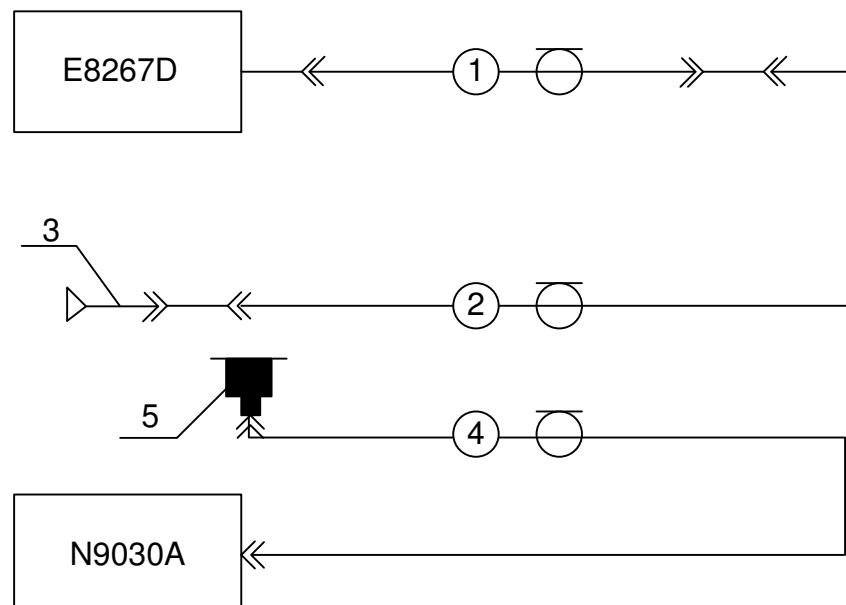
Таблица 17 – Состав измерительного оборудования

Тип	Наименование	Кол.	Примечание
Анализатор спектра	N9030A	1	измерение уровня внешнего излучения
Генератор сигналов	E8267D	1	инжектируемый сигнал
Калибровочный набор стандарта WR-51	N7005E37	1	используется КВП
Согласованная нагрузка 2,92мм	-	1	розетка
Тестовые кабели	TV-SF 404A	2	длина 3м
Переход 2,92 мм	-	1	розетка – розетка
Переход 2,4 мм – 2,92 мм	-	1	розетка – вилка

На момент проведения испытаний активное оборудование было поверено и имело интервал до следующей поверки не менее 3-х месяцев.

Перед проведением испытаний выполнялось измерение помеховой обстановки в БЭК с включенным измерительным оборудованием без подачи несущей частоты. Уровень внешних помех не превышал минус 90 дБм, что ниже шумовой дорожки АС при выбранных настройках.

Схема испытательного стенда для оценки радиоизлучения кабельных сборок представлена на рисунке 55.



1,4 – тестовые кабели TV-SF 404А; 3 – согласованная нагрузка;
5 – тестовый КВП из состава N7005Е37

Рисунок 55 – Испытательный стенд для RE тестов

На рисунках 56 – 58 представлены спектрограммы с КВП для кабельной сборки, созданный ручным способом.

На рисунках 59 – 61 представлены спектрограммы с КВП для кабельной сборки, созданной по технологии ООО «СРТ».

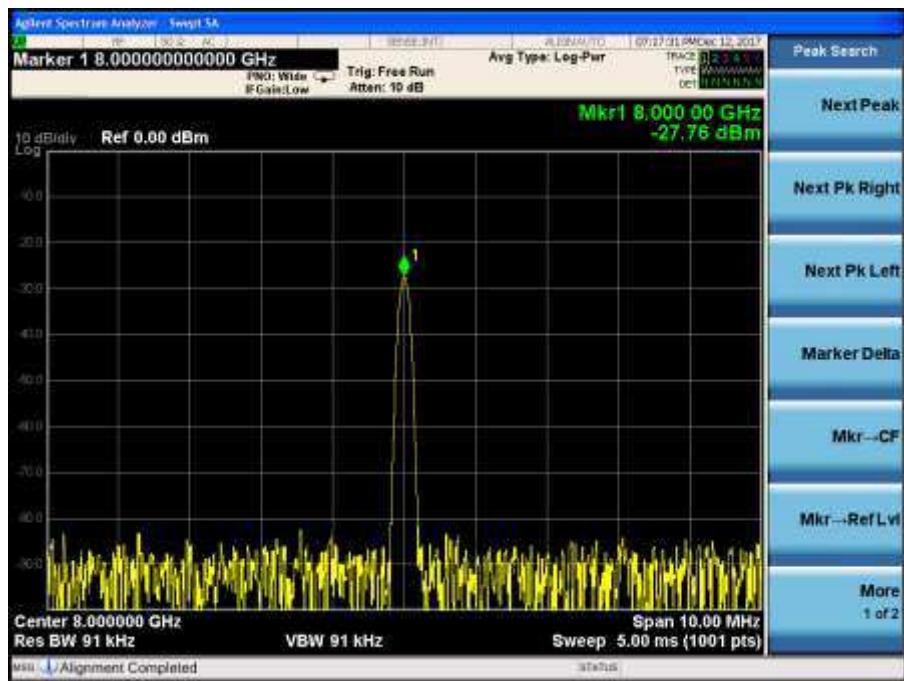


Рисунок 56 – Результат RE-теста для кабельной сборки, полученной вручную на частоте 8 ГГц

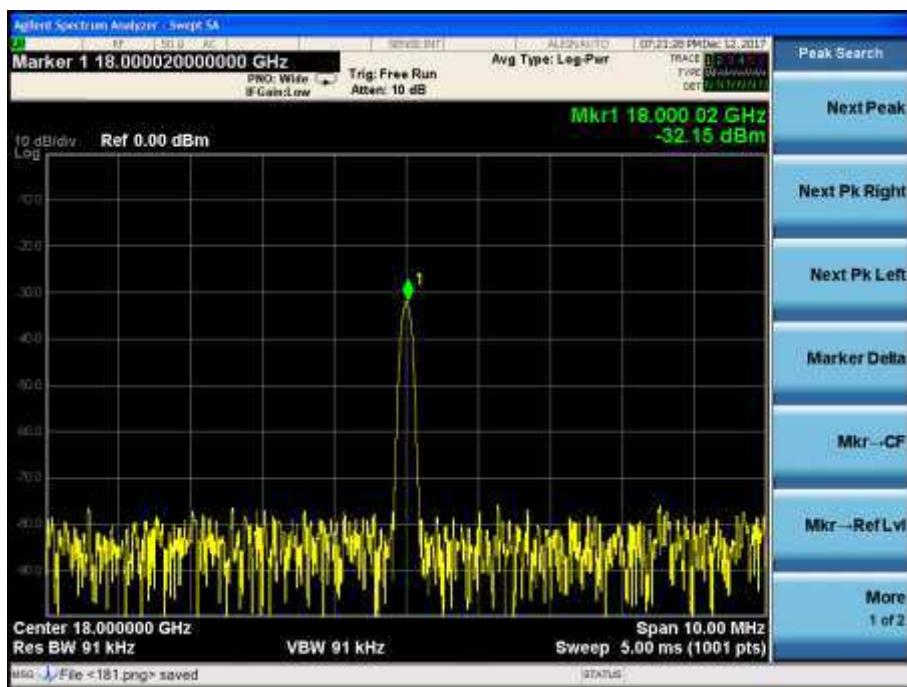


Рисунок 57 – Результат RE-теста для кабельной сборки, полученной вручную на частоте 18 ГГц

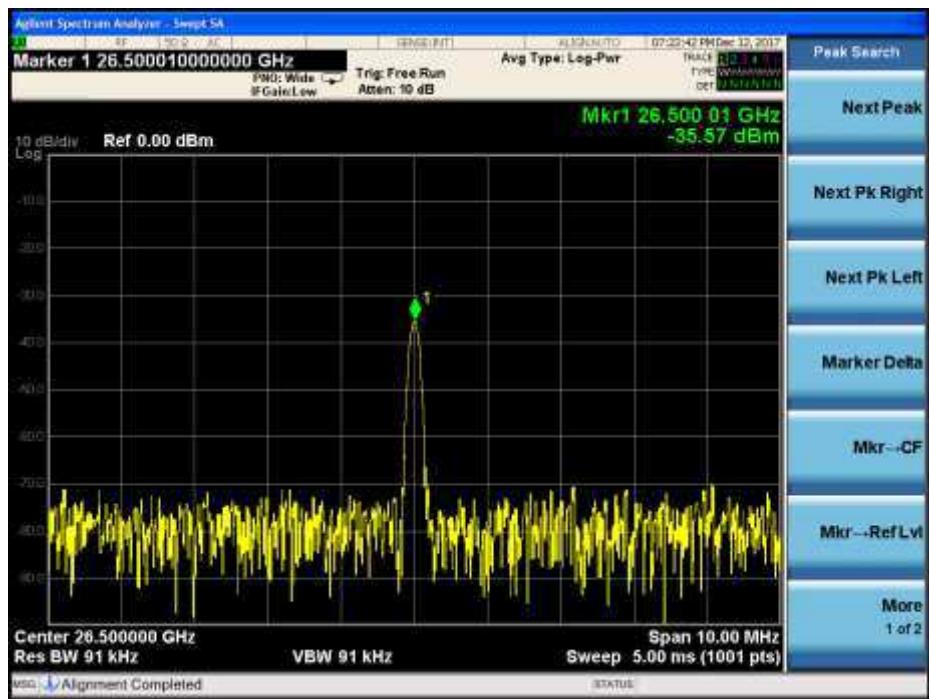


Рисунок 58 – Результат RE-теста для кабельной сборки, полученной вручную на частоте 26,5 ГГц

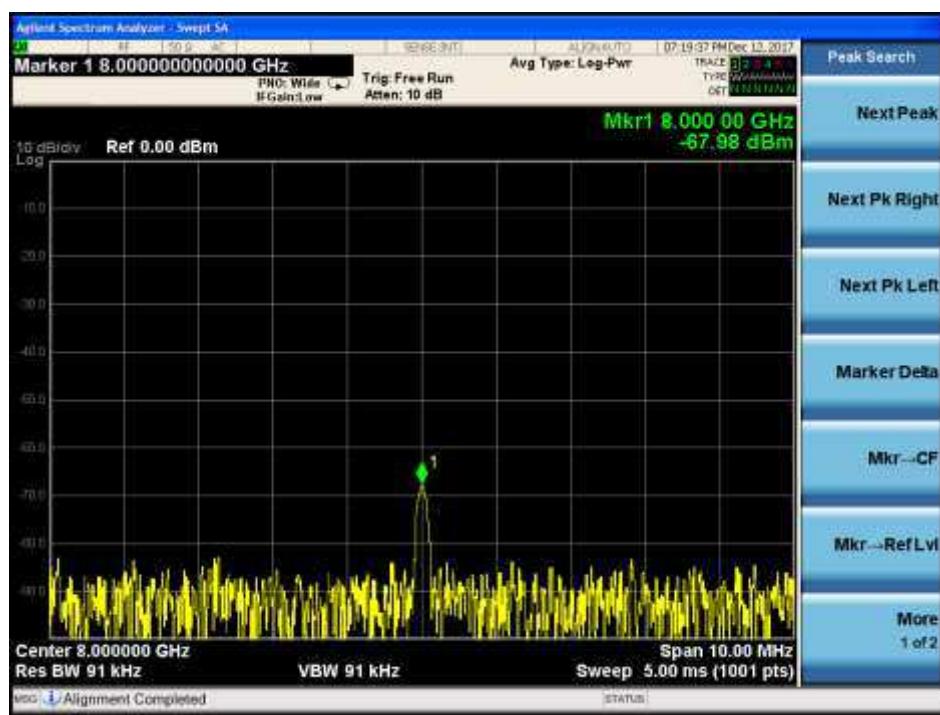


Рисунок 59 – Результат RE-теста для кабельной сборки, полученной по технологии ООО «СПТ» на частоте 8 ГГц

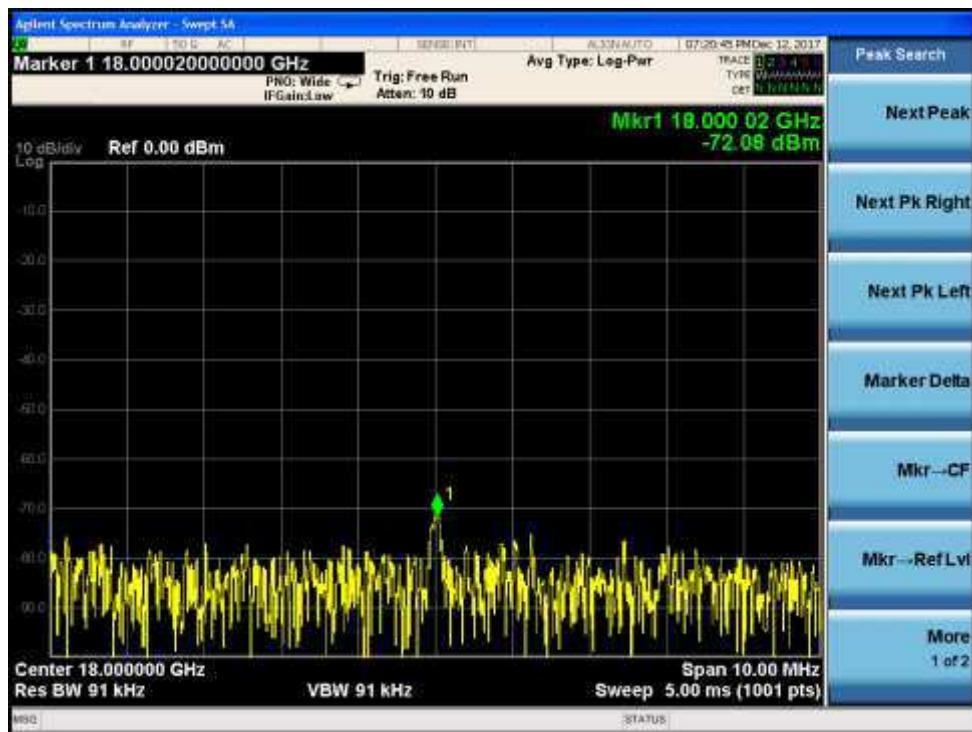


Рисунок 60 – Результат RE-теста для кабельной сборки, полученной по технологии ООО «СРТ» на частоте 18 ГГц

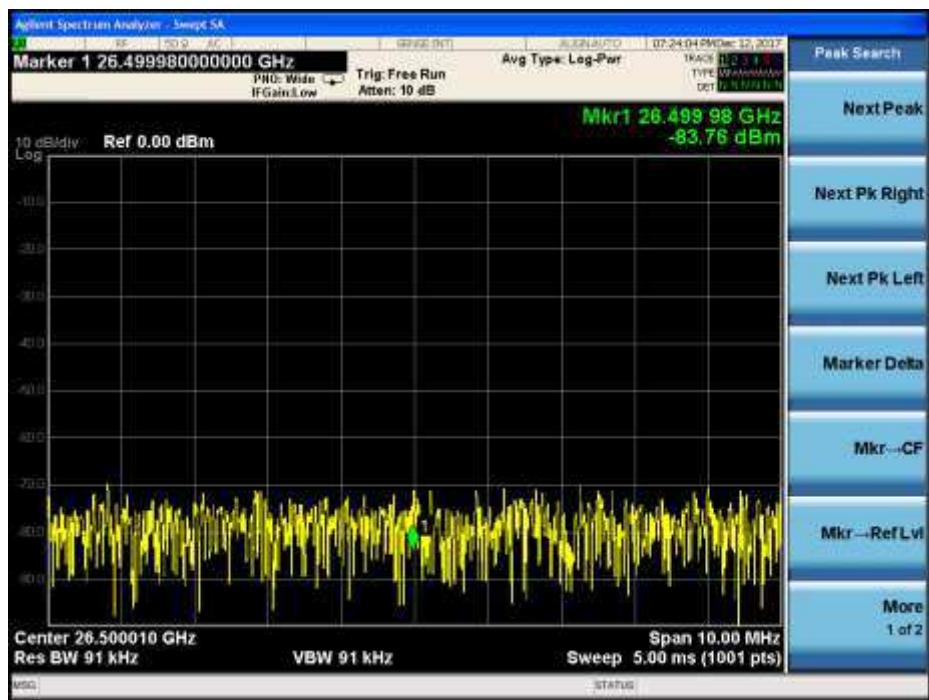


Рисунок 61 – Результат RE-теста для кабельной сборки, полученной по технологии ООО «СРТ» на частоте 26,5 ГГц

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы проведен анализ конструкции ретрансляционной полезной нагрузки космического аппарата, выявлены основные радиотехнические характеристики бортового ретранслятора, зависящие от качества сверхвысокочастотных кабельных сборок.

Проведено исследование влияния особенностей конструкции и производственного процесса на радиотехнические характеристики сверхвысокочастотных кабельных сборок.

Разработана оригинальная технология производства кабельных сборок с бесконтактной пайкой соединителей, обеспечивающая радиотехнические и эксплуатационные характеристики на уровне ведущих мировых производителей. Предложенная технология производства позволяет минимизировать человеческий фактор и повысить повторяемость результата по сравнению с традиционной (ручной) технологией производства.

Разработана и реализована оригинальная установка полуавтоматической пайки соединителей кабельных сборок.

Созданы образцы кабельных сборок, удовлетворяющие требованиям для применения в составе полезной нагрузки космического аппарата и обладающие конкурентоспособными характеристиками при меньшей стоимости.

Созданные образцы успешно прошли испытания на воздействие факторов космического пространства. Результаты испытаний подтверждают эффективность разработанной технологии.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

BNC	- байонетное соединение;
DTP	- цифровой коммутатор/обработчик;
RE	- radioemission, радиогерметичность;
RS	- radiosensitivity, радиовосприимчивость;
AC	- аппаратный сигнал;
АЦП	- аналого-цифровой преобразователь;
АЧХ	- амплитудно-частотная характеристика;
БРК	- бортовой ретрансляционный комплекс;
БЭК	- безэховая камера;
ВАЦ	- векторный анализатор цепей;
ВЧ	- высокая частота (высокочастотный);
ГВЗ	- групповое время запаздывания;
ИП	- источник питания;
КА	- космический аппарат;
КУС	- канальный усилитель;
КВП	- коаксиально-волноводный переход;
КСВн	- коэффициент стоячей волны;
ЛБВ	- лампа бегущей волны;
ЛИ	- летные испытания;
ЛУЛБВ	- линеаризующий УЛБВ;
МПН	- модуль полезной нагрузки;
МСС	- модуль служебных систем;
МШУ	- малошумящий усилитель;
НАЧХ	- неравномерность амплитудно-частотной характеристики;
НГВЗ	- неравномерность группового времени запаздывания;
НО	- направленный ответвитель;
ПН	- полезная нагрузка;
ПЧ	- промежуточная частота;
РТР	- ретранслятор;
РТХ	- радиотехнические характеристики;
РЧ	- радиочастотный;
СВЧ	- сверхвысокая частота;
СВП	- структурных возвратных потерь;
ССС	- спутниковые системы связи;
ТВК	- термовакуумная камера;
ТВЧ	- токи высокой частоты;

- ТЗ - техническое задание;
- ТР - трансформатор;
- УКВ - ультракороткие волны;
- УЛБВ - усилитель на лампе бегущей волны;
- УМ - усилитель мощности;
- УУ - устройство управления;
- ФЧХ - фазо-частотная характеристика;
- ШИМ - широтно-импульсная модуляция;
- ЭИИМ - эквивалентная изотропно излучаемая мощность;
- ЭМС - электромагнитная совместимость;
- ЭТВИ - электротермовакуумные испытания.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Орлов, А.Г. Бортовой ретрансляционный комплекс (БРК) 1спутника связи. Принципы работы, построение / А.Г. Орлов, Н.Н. Севастьянов. – Томск: Издательский дом Томского государственного университета,2014 – 208с.
- 2 Бурдуковская, Н.Н. Методика измерения коэффициента экранирования высокочастотных соединителей без демонтажа / Н.Н. Бурдуковская, Д.А. Большаков // Высшая школа. 2016. №22. С. 70 - 74.
- 3 Бурдуковская, Н.Н Анализ ошибок автоматического исключения влияния оснастки при измерениях на векторном анализаторе цепей / Н.Н. Бурдуковская, Д.А. Большаков // Гагаринские чтения – 2017: XLIII Международная молодежная научная конференция: Сборник тезисов докладов: Москва: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), (5-19 апреля 2017 г., Москва) МАИ. Москва, 2017 С.599 – 600.
- 4 Трифанов, И.О. Анализ факторов определяющих радиочастотные характеристики сверхвысокочастотных кабельных сборок / И.О. Трифанов // Высшая школа. 2019. №5. С. 53 - 57.
- 5 Трифанов, И.О. Особенности проектирования сверхвысокочастотных коаксиальных кабельных сборок / И.О. Трифанов // «Шарыгинские чтения» I Всероссийская научная конференция ведущих научных школ в области радиолокации, радионавигации и радиоэлектронных систем передачи информации, посвященная памяти профессора Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники академика Германа Сергеевича Шарыгина: 18 - 19 сентября 2019, г. Томск Издательство ТУСУРа 2019 С.239-245
- 6 Дансмор, Дж. П. Настольная книга инженера Измерения параметров СВЧ-устройств с использованием передовых методик векторного анализа цепей. – Москва : Техносфера, 2018. – 736 с.
- 7 ГОСТ 20911 «Техническая диагностика. Термины и определения».
- 8 Спилкер, Дж. Цифровая спутниковая связь. Москва : Связь, 1979.
- 9 Bruce R. Elbert The satellite communication applications handbook Second edition Artech House, Inc Boston London 2004 533c.
- 10 Bolshakov, D. A. Most important factors affecting radio frequency characteristics of microwave cable assemblies / D.A. Bolshakov, I. O. Trifanov, N. N. Burdukovskaya, K. V. Shugurova // IOP Conf.Series: Materials Science and Engineering 734 (2020) 012002.
- 11 G. Morelli, A. Mainguet and M. Eustace Automated operations of large GEO telecom satellites with digital transparent processors (DTP) challenges and lessons learned 2018 / DOI: 10.2514/6.2018-2666.
- 12 MIL-STD-461. Requirements for the Control of Electromagnetic Interference / Characteristics of Subsystems and Equipment – U.S. Department of Defense Interface/ Standart, 10 December 2007 (Revision F).
- 13 SPELL (Satellite Procedure Execution Language and Library) 2018.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Общая электрическая схема БРК С диапазона

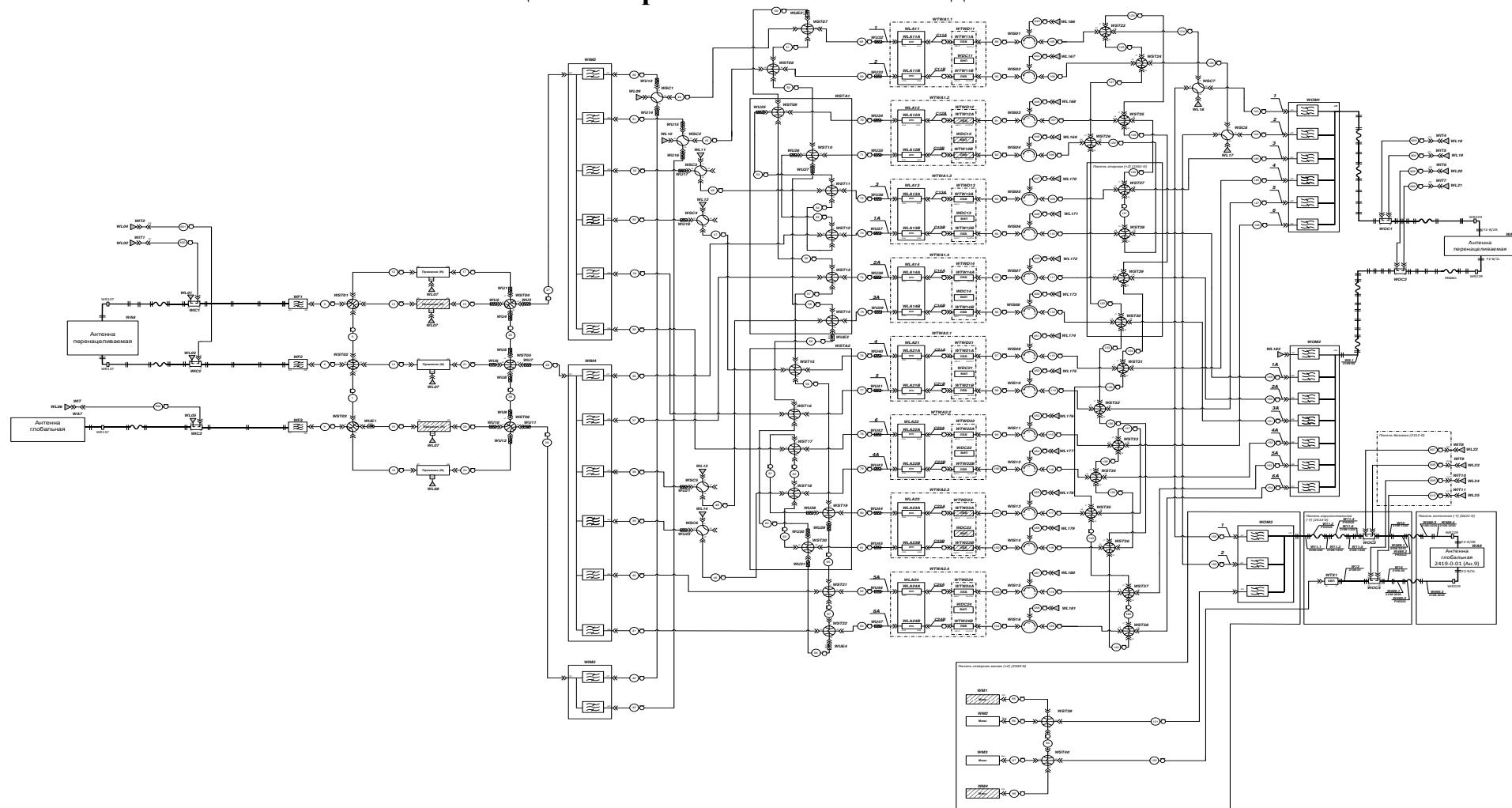


Рисунок А.1 – Общая электрическая схема БРК С диапазона

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Проверка ВЧ соединений на электротерметичность

Подготовка к испытаниям.

Для проведения проверки на электротерметичность МПН КА необходим предварительный этап контроля помеховой обстановки. В условиях отключенного оборудования МПН проводится измерение уровня спектральных составляющих помех. Полученные данные позволяют сделать вывод об исправности оборудования и уровнях промышленных помех на рабочем месте испытаний, что важно с точки зрения точности получаемых результатов. В нормальных условиях полученное значение мощности не должно превышать -50 дБм (на входе анализатора спектра при использовании в качестве антенны КВП).

Далее для получения достоверных результатов необходимо провести калибровку технологического оборудования (КВП и тестовые коаксиальные кабели).

Схема калибровки представлена на рисунке Б.1.

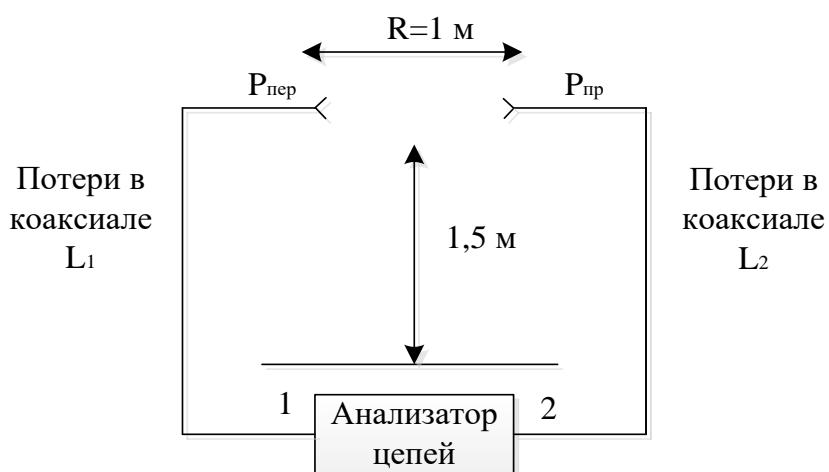


Рисунок Б.1 – Испытательная схема для калибровки КВП

Значения потерь в кабелях L_1 и L_2 получают измерением с помощью ВАЦ. После получения значений L_1 и L_2 рассчитывается коэффициент усиления по центральным частотам, он необходим для определения предельного уровня излучения для каналов МПН.

Расчет коэффициента усиления осуществляется по формуле (Б.1). Важное замечание: расчет для каждого диапазона проводится отдельно и на центральной частоте диапазона.

$$G = \frac{4\pi RF}{C} \sqrt{\frac{P_{\text{пр}}}{P_{\text{пер}}}}, \quad (\text{Б.1})$$

где G – коэффициент усиления;
 R – расстояние =1м, м;
 F – частота, МГц;
 C – скорость света, м/с;
 $P_{\text{пр}}$ – мощность приема = $P_a - L_2$, Вт;
 P_a – мощность анализатора и L_2 - потери в коаксиале, Вт;
 $P_{\text{пер}}$ – мощность передачи = $P_s - L_1$, Вт;
 P_s – мощность на генераторе и L_1 - потери в коаксиале, Вт.

Полученное значение для удобства дальнейших расчетов переводится в децибеллы (дБ).

Процесс испытаний проходит в два этапа: проверка на радиоизлучение и проверка на радиовосприимчивость.

Проверка ВЧ соединений на радиоизлучение.

Первым этапом является проверка выходной секции на радиоизлучение (RE). Испытания на радиоизлучение проводятся на низком уровне усиления в режиме насыщения для обеспечения максимальной энергетики полезного сигнала. Фиксируются уровни сигнала, вблизи ВЧ соединений на участке тракта после УМ (выходная секция ствола/канала).

На рисунке Б.2 представлена обобщенная схема испытательной системы для проведения RE испытаний на радиоизлучение.

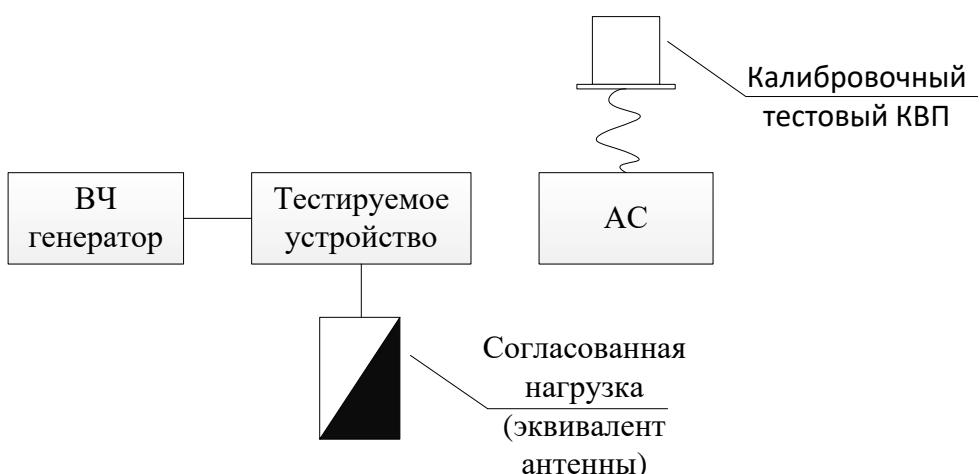


Рисунок Б.2 – Общий принцип методики RE испытаний

Наихудший случай наблюдается при минимальном усиении и максимальной выходной мощности ствола/канала (в режиме насыщения УМ).

Процесс испытаний на радиоизлучение:

В первую очередь необходимо определить передающие антенны и панели МПН (на которых находится МПН). По характеристикам и расположению передающих антенн и панелей МПН, вычисляют

напряженность поля на панелях МПН приходящее с рефлекторов антенн и ослабление на панелях.

После этого необходимо рассчитать мощность с каждой панели КА. Полученные данные позволяют произвести расчет коэффициента эффективности экранирования.

Связь между мощностью паразитного излучения, мощностью внутри конструкции МПН и коэффициентами экранирования и ослабления панели МПН:

$$P_{\text{ПАН}} = P_0 - X_{\mathcal{E}} - X_{\text{ВЧ}},$$

где $P_{\text{пан}}$ – мощность внутри конструкции МПН;

P_0 – мощность паразитного излучения;

$X_{\mathcal{E}}$ – коэффициент эффективности экранирования панели МПН;

$X_{\text{ВЧ}}$ - коэффициент ослабления внутри конструкции МПН.

Коэффициент ослабления используется для расчета напряженности электромагнитного поля внутри конструкции МПН.

На рисунке Б.3 представлена схема испытаний МПН на RE.

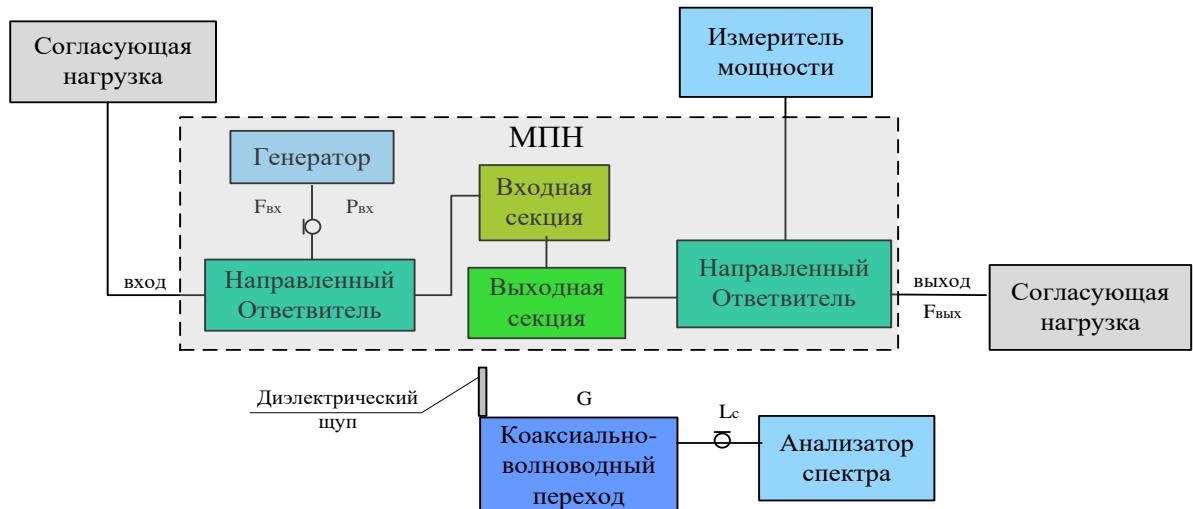


Рисунок Б.3 – Схема подключения оборудования для испытаний на ВЧ излучение (RE)

Под выходной секцией МПН понимаются ВЧ тракты МПН от входных КУС до выходных НО.

Корпус МПН имеет большие размеры по сравнению с длиной волны электромагнитного поля интерференции для микроволнового диапазона волн. Электромагнитная среда внутри модуля МПН обусловлена габаритами и параметрами оборудования.

Таким образом, анализ результатов RE испытаний заключается в определении напряженности поля внутри МПН, по средствам определения

значения величины мощности побочной утечки от ВЧ оборудования с МПН, учитывая геометрические и электрические характеристики.

Измерение уровня мощности помехи $P_{\text{пр}}$ для RE испытаний целесообразно производить на центральной частоте канала. Данное измерение проводится с целью определения качества ВЧ соединений выходной секции МПН.

Порядок испытываемых ВЧ соединений, входящих в состав определенной конфигурации, определяется путем следования от выхода УЛБВ до выходного интерфейса МПН для соответствующей конфигурации.

Предельный уровень излучения, фиксируемый анализатором спектра $P_{\text{пр}}$, дБм рассчитывается для центральных выходных частот МПН в соответствии с формулой (Б.2):

$$P_{\text{пр}} = E + G - 20\log F - L_C - N, \quad (\text{Б.2})$$

где $P_{\text{пр}}$ – предельное показание анализатора спектра, дБ;

E – напряженность электрического поля на расстоянии в 1 метр до тестируемого разъема, дБмкВ/м;

G – коэффициент усиления КВП, дБ;

F – выходная частота канала, МГц;

L_C – потери в коаксиальном кабеле, дБ;

N – фактор ослабления для RE, дБ.

Расчет для разных диапазонов проводится отдельно, по причине различных значений ослабления в кабеле L_C и усиления КВП G .

Проверка ВЧ соединений на радиовосприимчивость.

Второй этап включает в себя проверку входной секции на радиовосприимчивость (RS- radiated susceptibility). На данном этапе следует использовать высокий уровень усиления для обеспечения максимальной чувствительности к внешней помехе.

Испытания RS необходимо проводить в линейном режиме.

Для обеспечения сохранности оборудования целесообразно выдерживать дистанцию от КВП до тестируемого соединения порядка 15 см, таким образом, одновременно исключается вероятность повреждения тестируемого оборудования и обеспечивается достаточная чувствительность.

$$\text{ЭИИМ} = \frac{E^2 * R^2}{30}, \quad (\text{Б.3})$$

где E – напряженность электрического поля на расстоянии 1 м до тестируемого разъема.

Внешняя помеха с КВП подается со смещением на 100кГц относительно несущей, для возможности оценки отношения помехи к несущей частоте на выходе МПН.

На рисунке Б.4 представлена обобщенная схема испытательной системы для проведения RS испытаний на радиовосприимчивость.

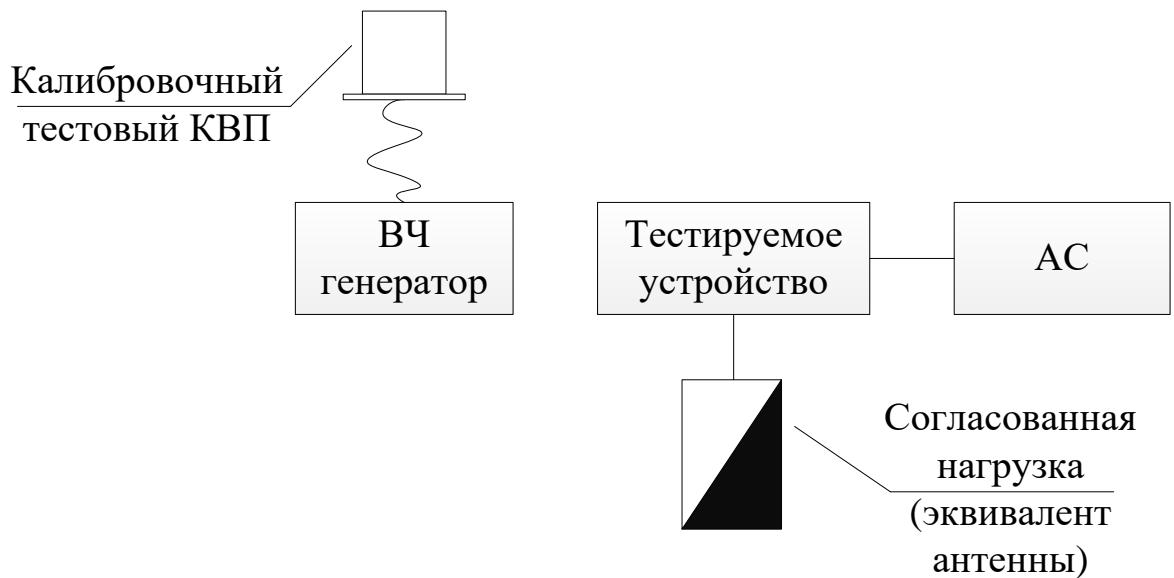


Рисунок Б.4 – Общий принцип методики RS испытаний

При формировании требования к RS к предельно допустимому расчетному значению следует прибавить системный запас (определяется требованием оборудованию).

Расчет ЭИИМ проводится для ВЧ соединений входной секции, по формуле (Б.3), т.е. для соединений, расположенных между НО и входами усилителей мощности.

На рисунке Б.5 представлена схема испытаний МПН на RS.

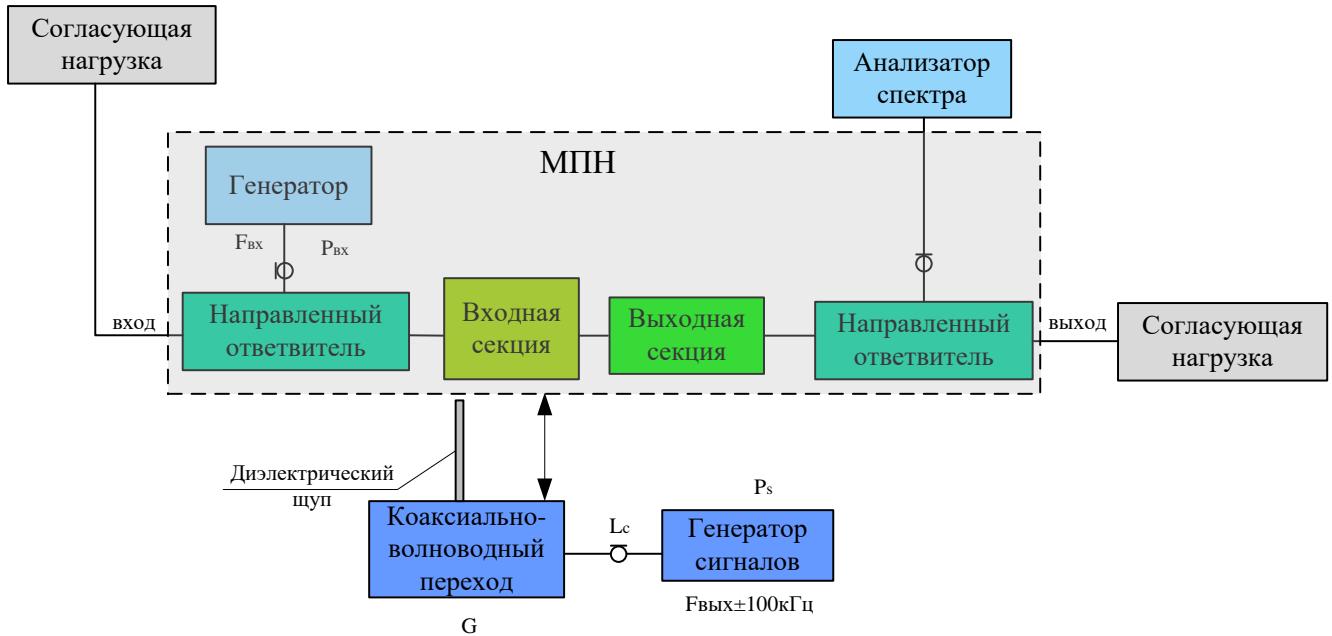


Рисунок Б.5 - Схема подключения оборудования для испытаний на ВЧ восприимчивость (RS)

Под входной секцией МПН понимаются ВЧ тракты от входных НО до входов в УМ.

В состав входной секции МПН входят следующие приборы:

- входные НО;
- приемники (МШУ, конвертеры);
- комплект входных и каналых фильтров (входных мультиплексоров);
- комплект ВЧ кабелей и волноводов;
- мало шумящий усилитель и понижающие конверторы;
- комплект ВЧ переключателей.

Порядок испытываемых на ВЧ восприимчивость ВЧ трактов, входящих в состав конфигурации определенного ствола, определяется путем следования от входного НО данного ствола до входа УЛБВ.

Уровень мощности генератора, требуемый для создания необходимого уровня внешней помехи определяется как:

$$P_S = 20 \log E + L_C - G - M, \quad (\text{Б.4})$$

где P_S – уровень мощности генератора, дБ;

E – электрическое поле, подаваемое на испытываемое ВЧ соединение, В/м;

L_C – потери в коаксиальном кабеле, дБ;

G – коэффициент усиления КВП, дБ;

M – фактор ослабления для RS, дБ.

Расчет по формуле (Б.4) следует выполнить отдельно для разных диапазонов, учитывая различные значения ослабления в кабеле L_C и усиления КВП G.

Оценка результатов измерений проводится путем сравнения полученных значений анализатором спектра с предельно допустимым уровнем мощности, рассчитанным по (Б.4).

В случае если полученные значения не удовлетворяют требованиям, необходимо произвести проверку моментов затяжки, и когда требуется произвести затяжку на $\frac{1}{4}$ оборота. По итогам данной процедуры принимается решение о необходимости очистки контактов. Волноводный стык разбирается, спиртом или ацетоном промываются фланцы. Дальнейшая подстыковка производится с заменой контактной прокладки и пружинных шайб на новые.

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Отчет по результатам электротермовакуумным испытаниям созданных кабельных сборок

B1 Настоящий отчет содержит результаты испытаний по оценке влияния пониженного давления, а также пониженной и повышенной температур на характеристики кабельных сборок серии PS-Z.

B1.1 В ходе испытаний производились измерения полной матрицы S-параметров. Измерения проводились с помощью векторного анализатора цепей N5244A с параметрами в соответствии с таблицей В.1.

Таблица В.1 – Параметры ВАЦ при проведении измерений

Диапазон измерения, ГГц	Мощность измерения, дБмВт	Кол-во усреднений	Фактор сглаживания, %	Количество точек, шт.	Форматы вых. данных
0,03...33	0	30	0	1601	S2P (Log Mag); jpg

B1.2 Оборудование, используемое при калибровке ВАЦ и измерениях, представлено в таблице В.2.

Таблица В.2 – Перечень использованного оборудования

Тип оборудования	Обозначение	Кол-во
ВАЦ	N5245A	1
Калибровочный модуль	N4693A	1
Кабели ВЧ 3 м (измерительные)	TV-SF102EA 3000 mm	2
Переходы 2,4/2,92 мм	32SMA-50-0-100/111NE	2
Камера термовакуумная	ABBES	1

B2 Условия испытаний

B2.1 Давление в ТВК $\leq 10^{-6}$ мм рт. ст;

B2.2 Диапазон температур в ТВК от минус 65°C до +145°C;

B2.3 Шаг изменения температуры 10 °C.

B2.4 Время выдержки на каждом температурном шаге ≥ 20 минут.

B3 Результаты и их анализ

B3.1 Кривая зависимости коэффициента передачи S21 на частоте 33 ГГц испытываемой кабельной сборки от температуры представлена на рисунке В.1.

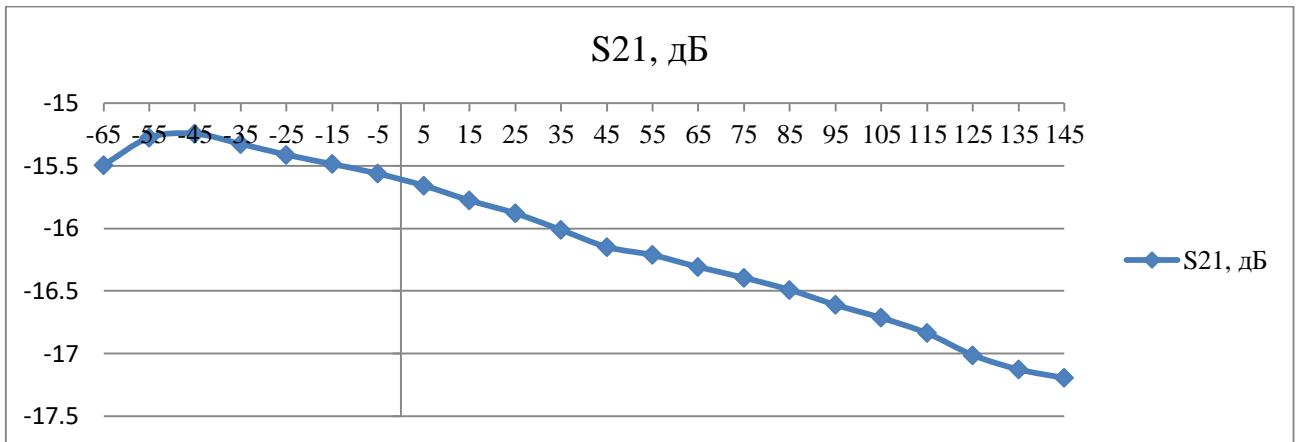


Рисунок В.1 – температурная зависимость параметра S21 испытываемой кабельной сборки

В3.2 Результаты измерений на всех температурных полках представлены на рисунках В.2 - В.25 приложения В.

В4 Выводы

- 1) Кабельные сборки серии PS-Z подтвердили работоспособность в диапазоне температур от минус 65°C до +145°C.
- 2) Кабельные сборки серии PS-Z подтвердили работоспособность при давлении $\leq 10^{-6}$ мм рт. ст. в диапазоне температур от минус 65°C до +145°C.
- 3) Коэффициент передачи (потери) кабельных сборок PS-Z-7-SKm-SKm соответствует требованиям.
- 4) Коэффициент стоячей волны кабельных сборок PS-Z-7-SKm-SKm соответствует требованиям ТЗ.
- 5) По окончанию испытаний кабельная сборка PS-Z-7-SKm-SKm не утратила механических свойств, не ухудшила внешний вид и может быть использована в дальнейшем.
- 6) Кабельные сборки серии PS-Z признать выдержавшими испытания.

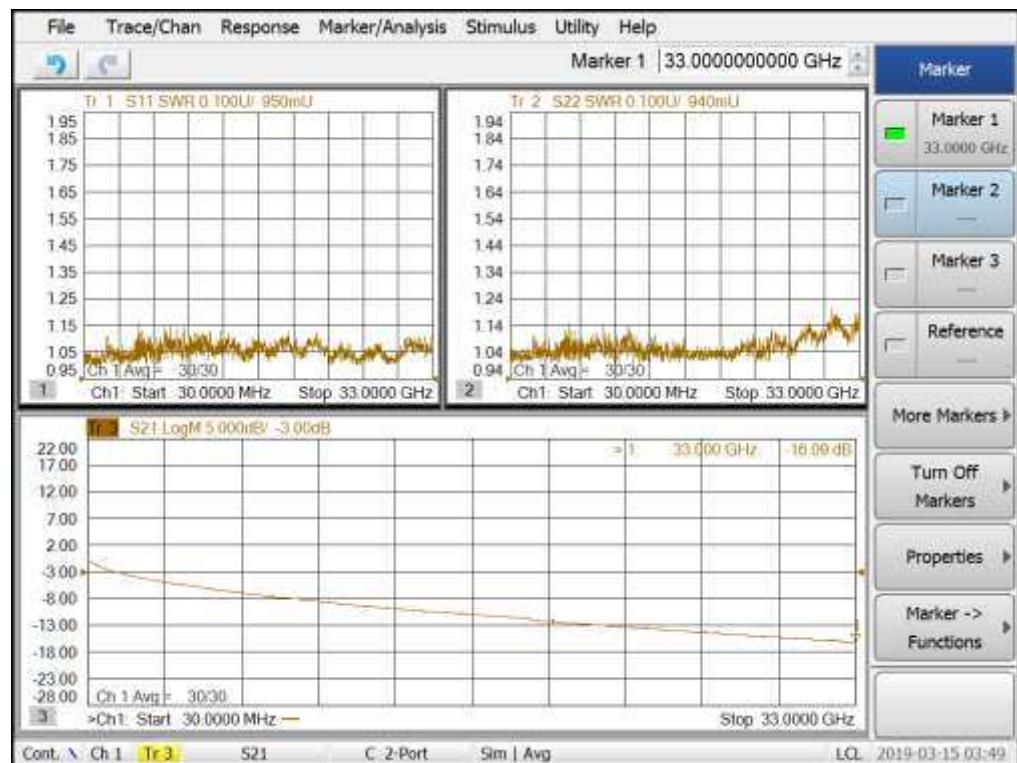


Рисунок В.2 – Испытания с открытой крышкой перед ЭТВИ

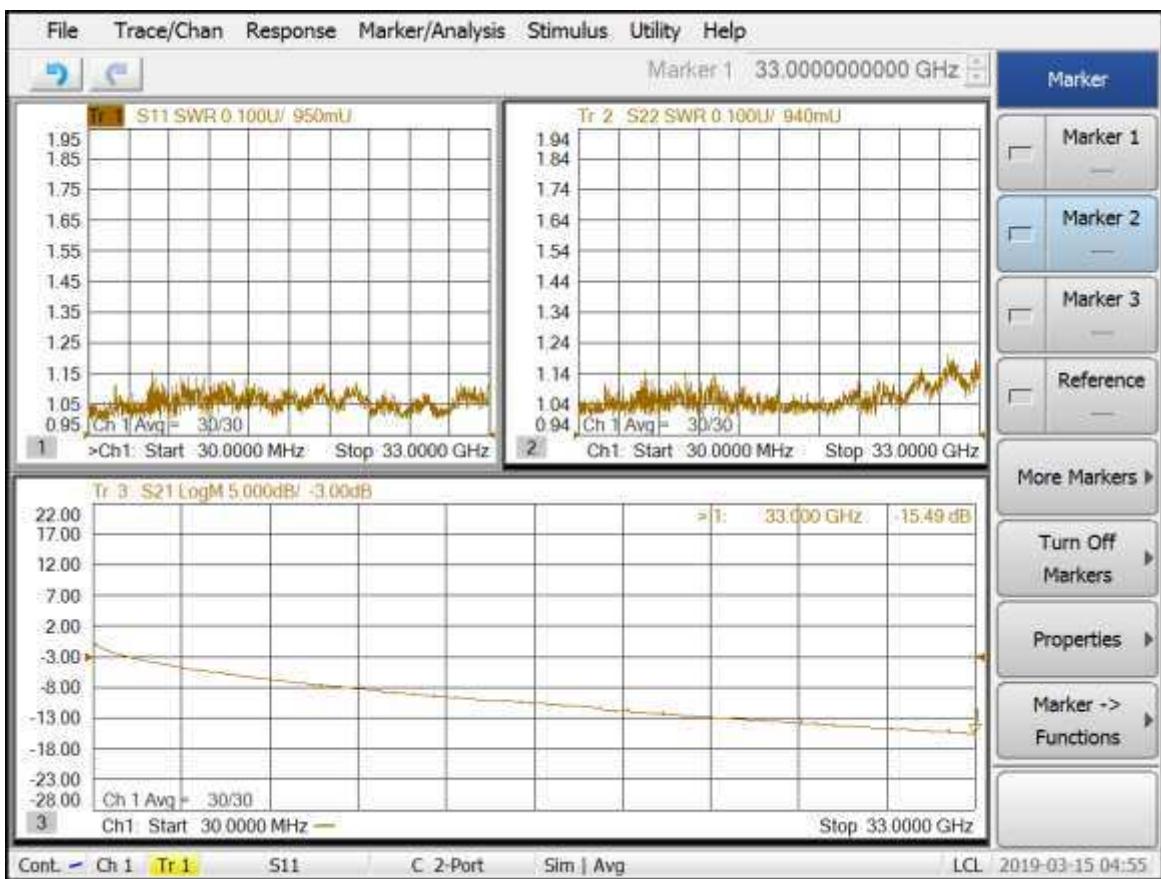


Рисунок В.3 – Испытания при температуре минус 65°C

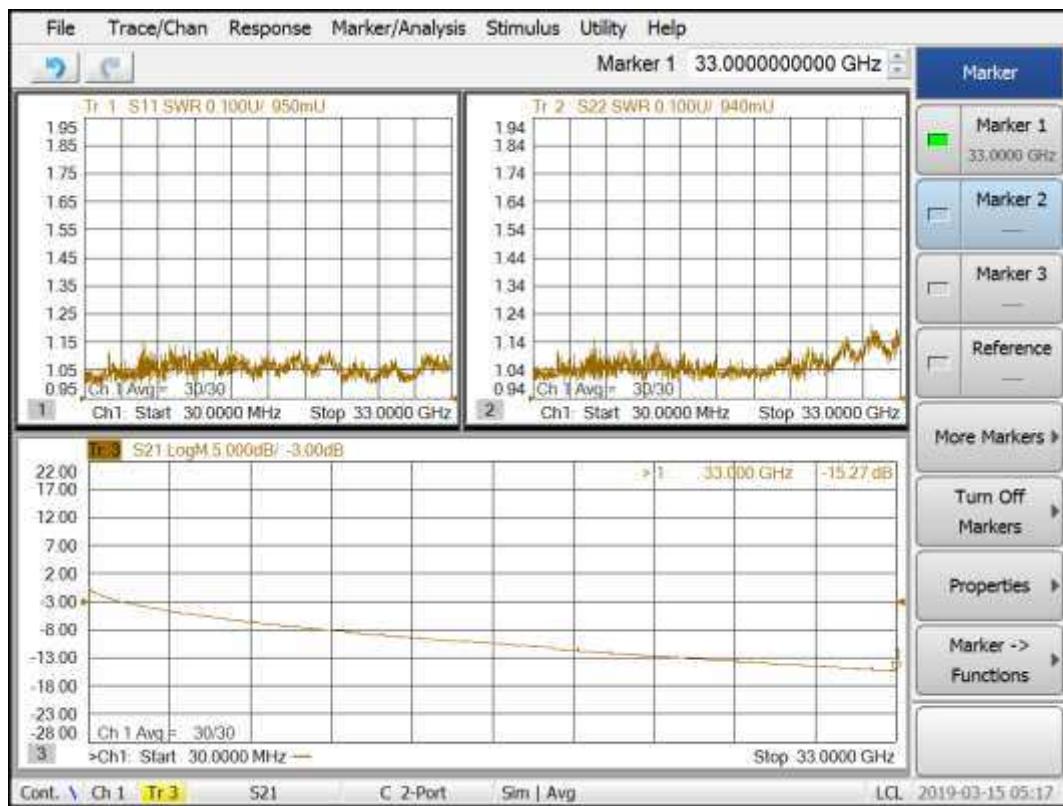


Рисунок В.4 – Испытания при температуре минус 55°C

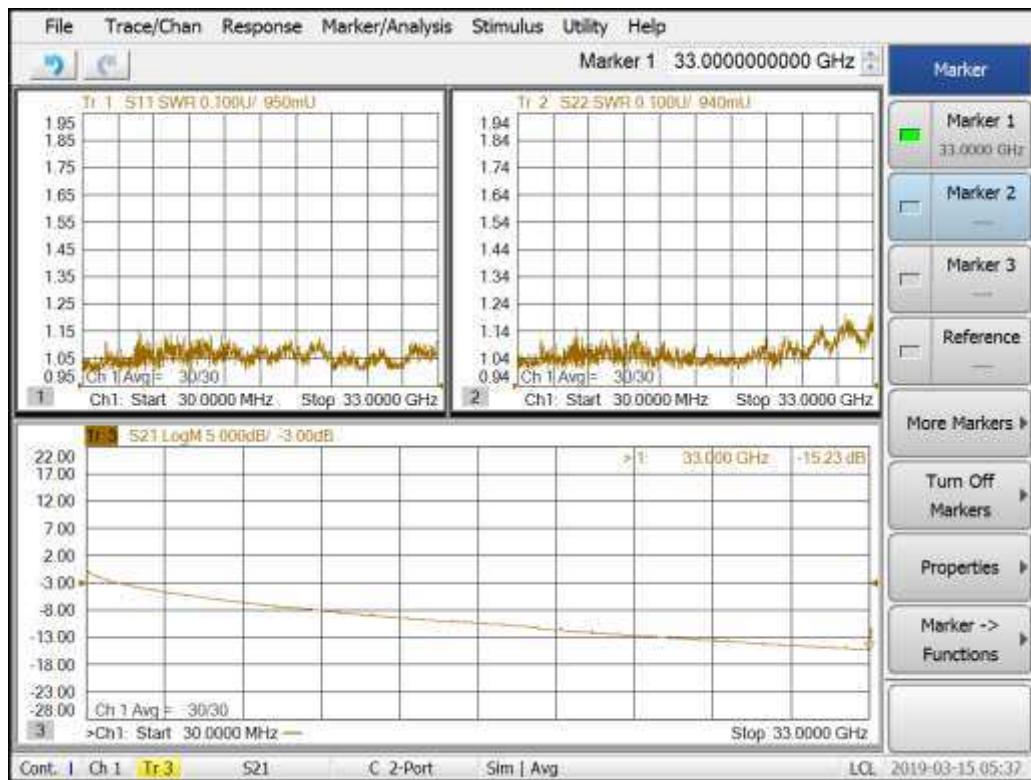


Рисунок В.5 – Испытания при температуре минус 45°C

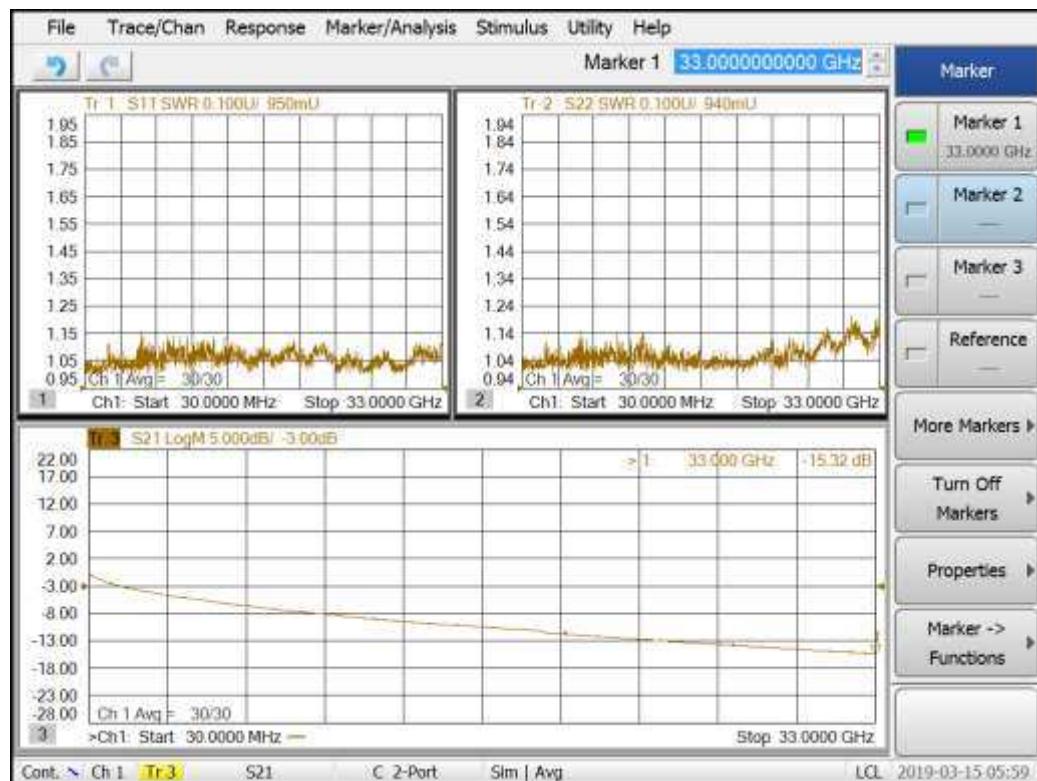


Рисунок В.6 – Испытания при температуре минус 35°C

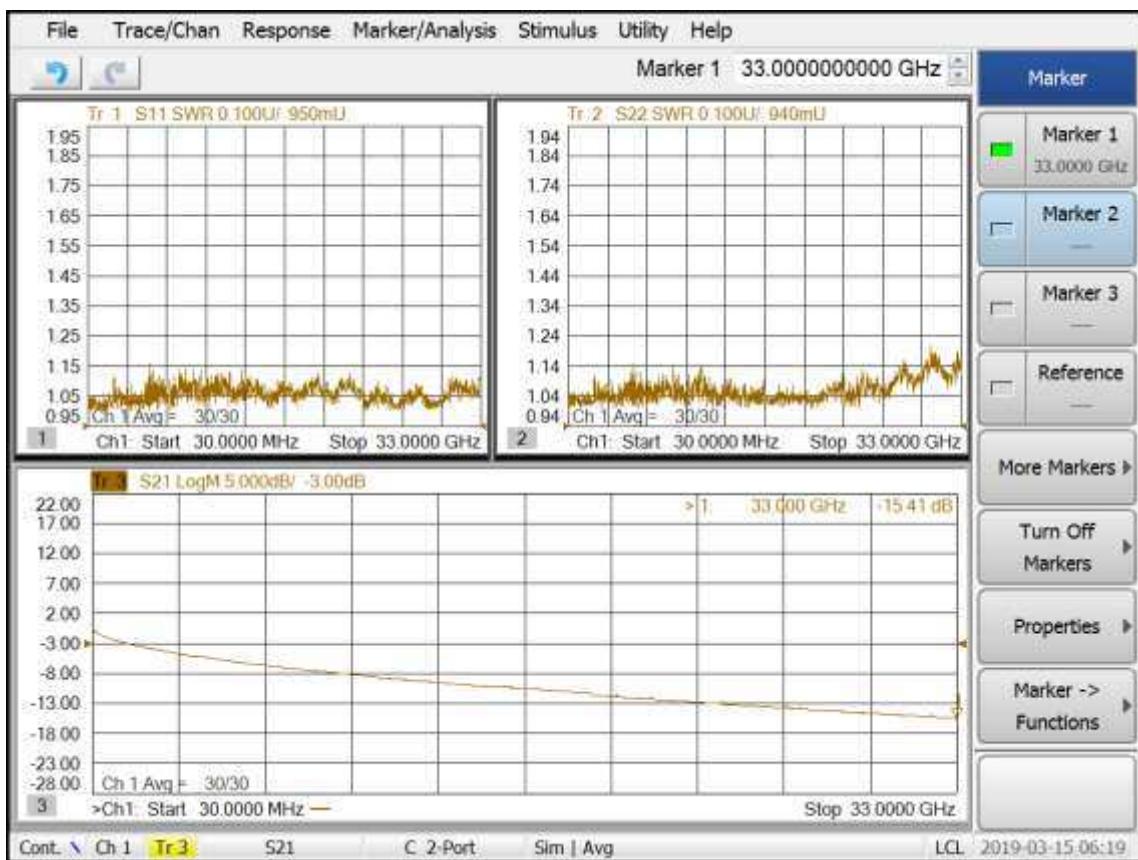


Рисунок В.7 – Испытания при температуре минус 25°C

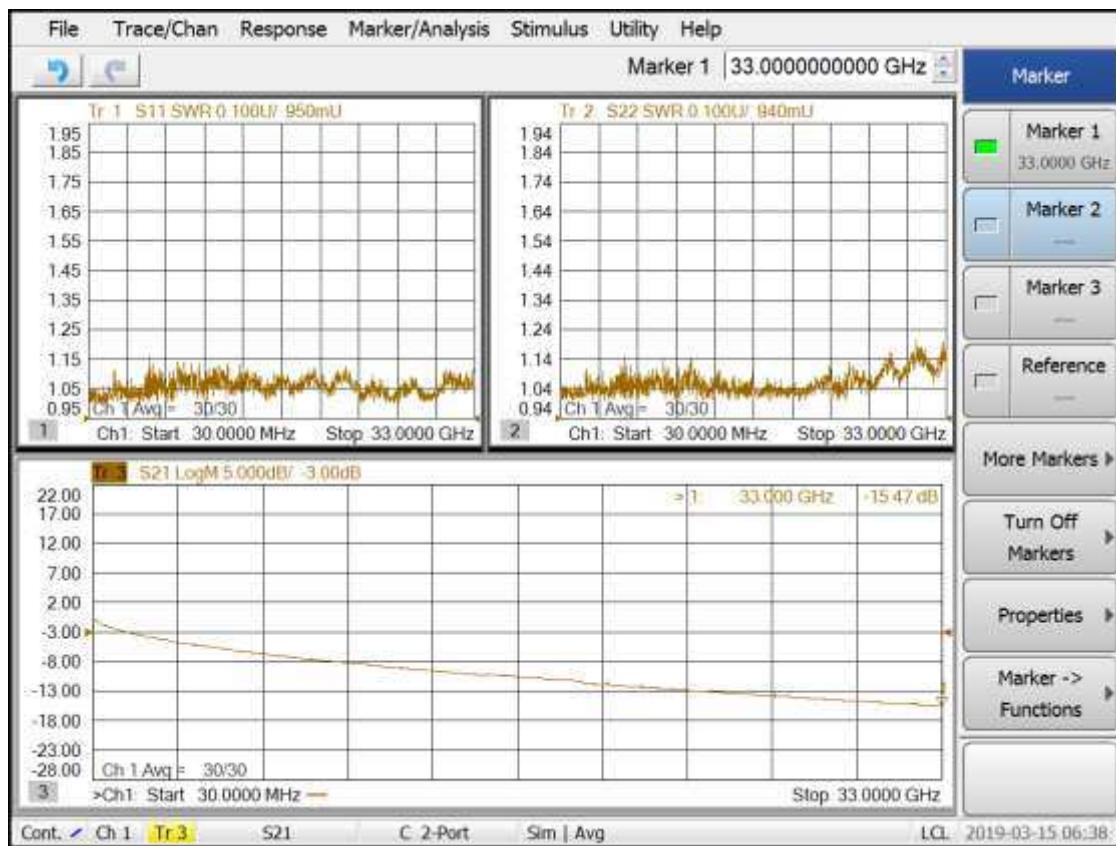


Рисунок В.8 – Испытания при температуре минус 15°C

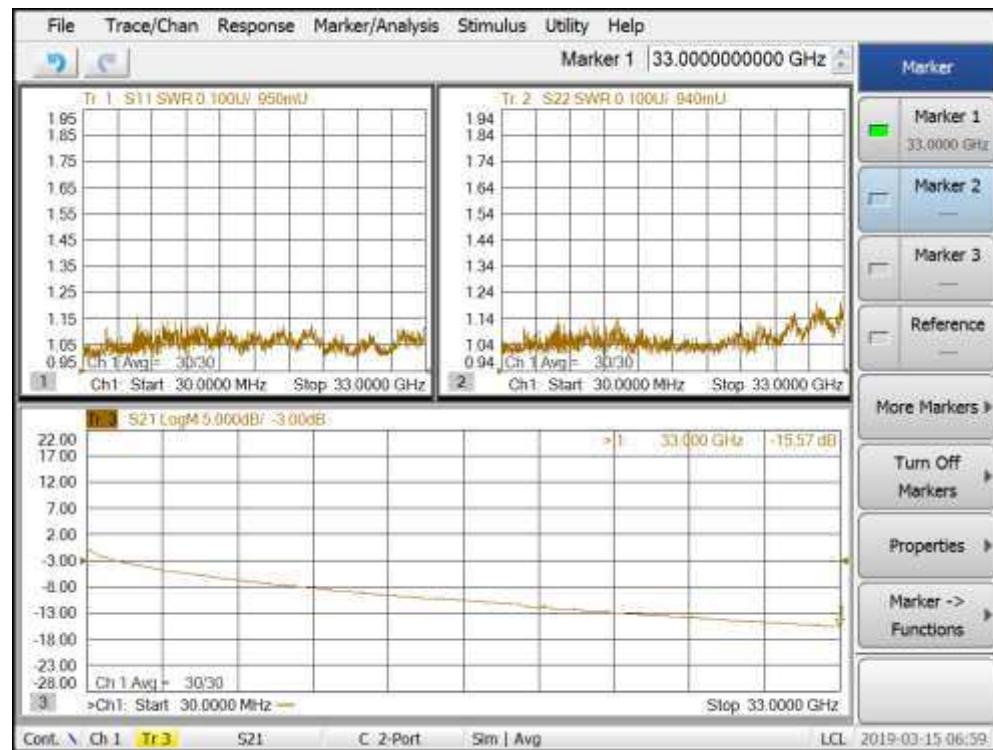


Рисунок В.9 – Испытания при температуре минус 5°C

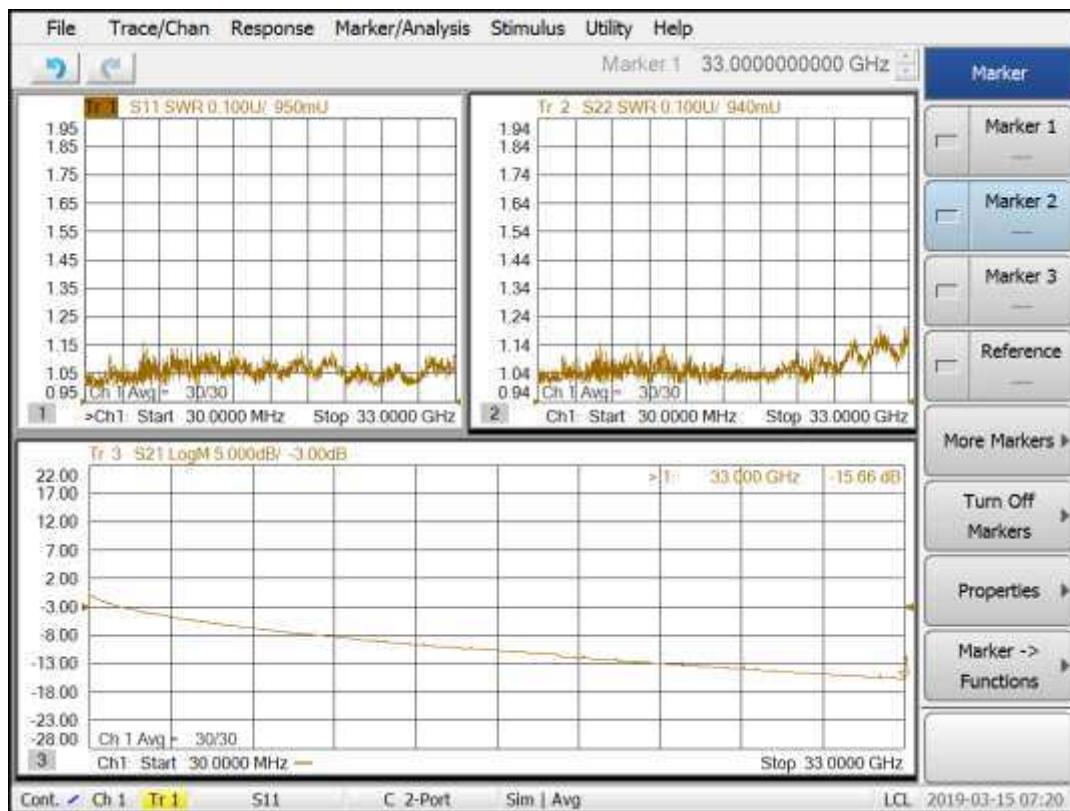


Рисунок В.10 – Испытания при температуре 5°C

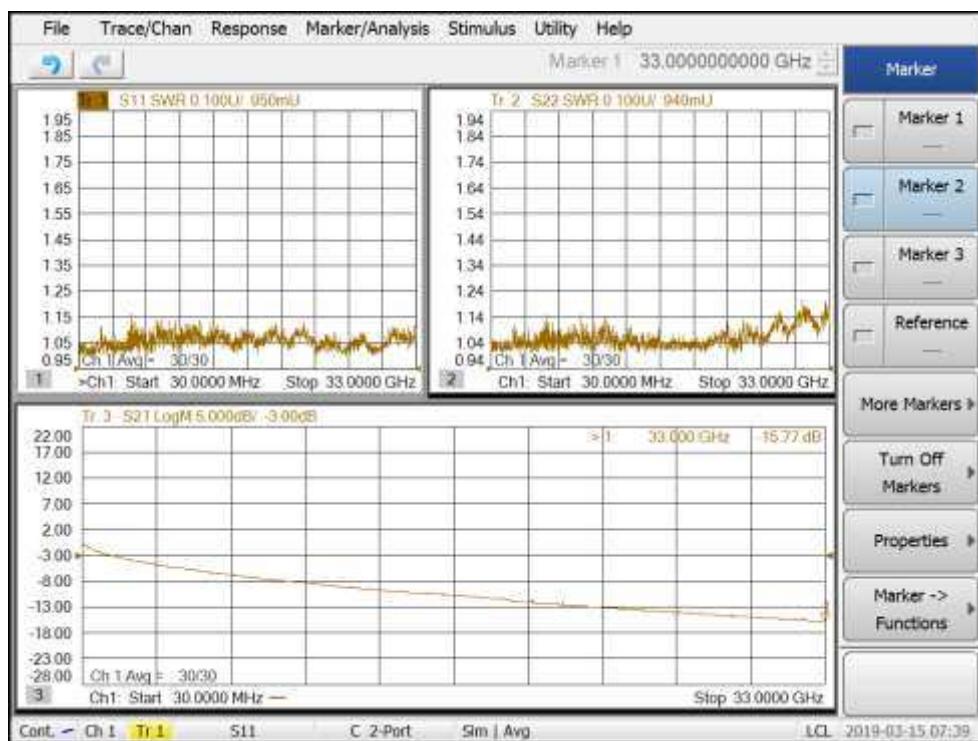


Рисунок В.11 – Испытания при температуре 15°C

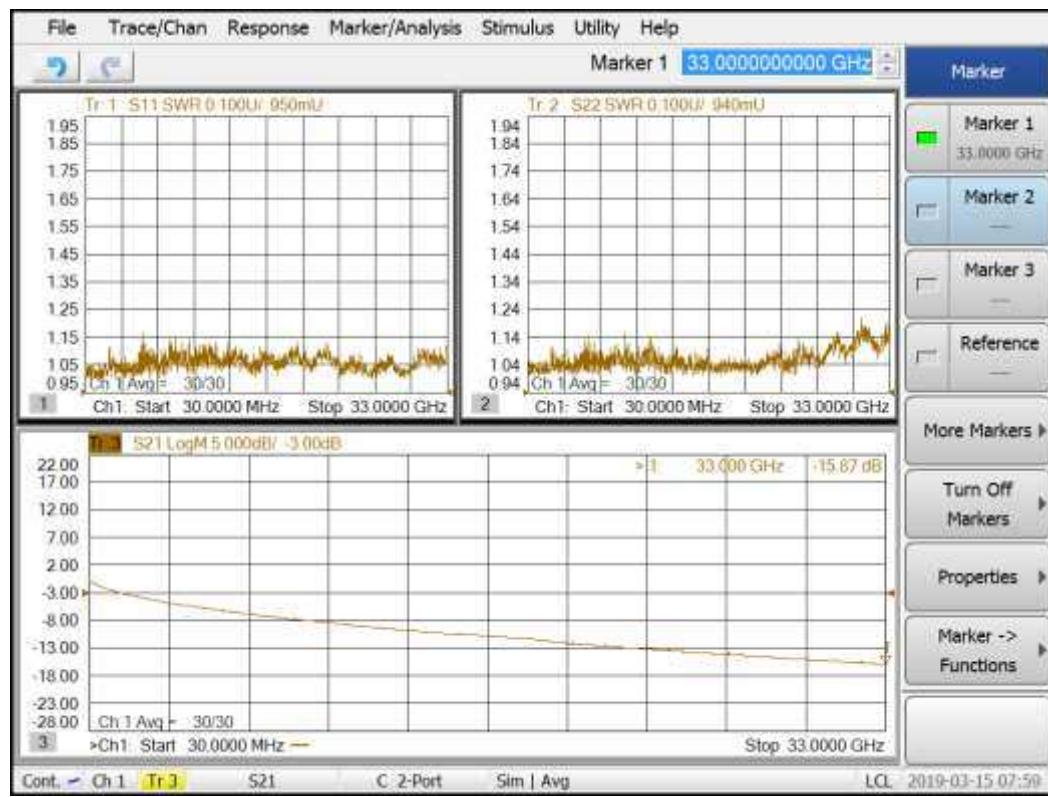


Рисунок В.12 – Испытания при температуре 25°С

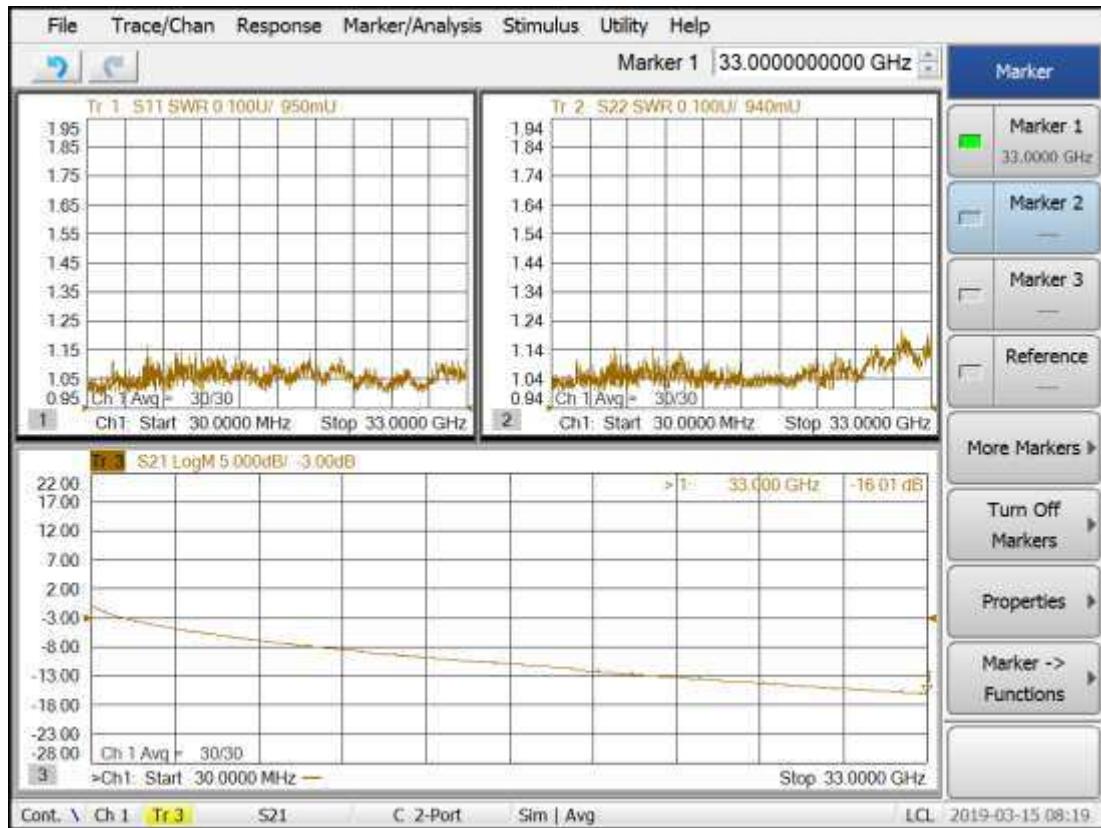


Рисунок В.13 – Испытания при температуре 35°С

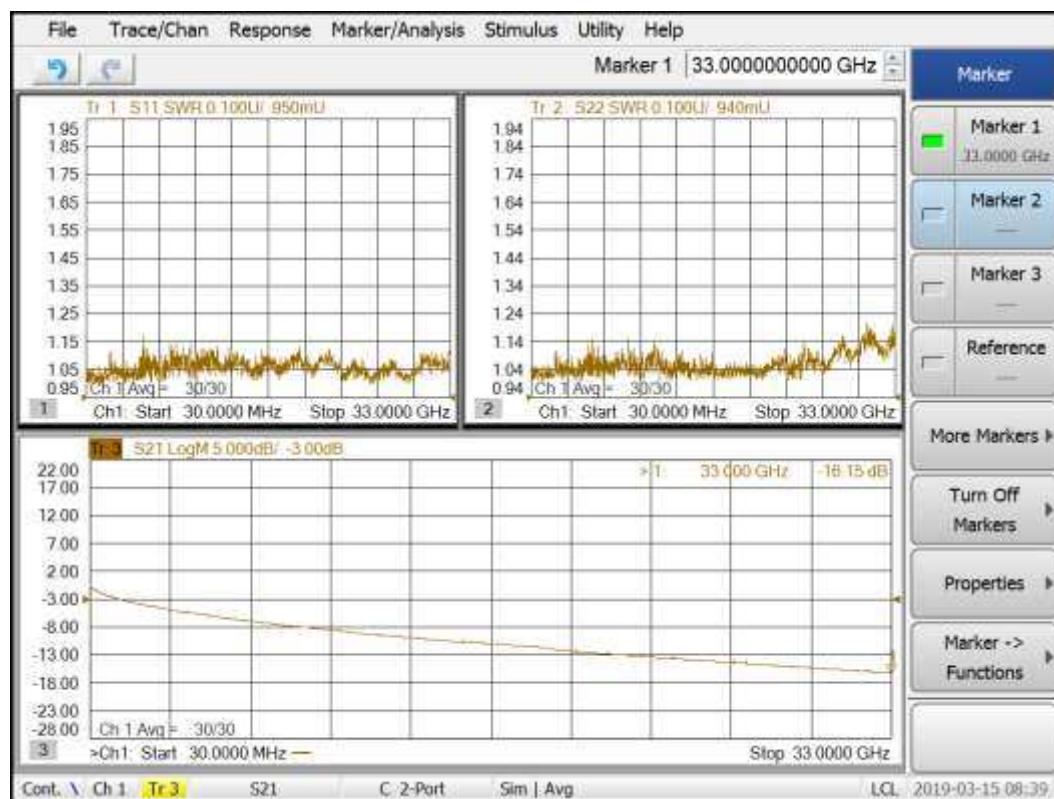


Рисунок В.14 – Испытания при температуре 45°С

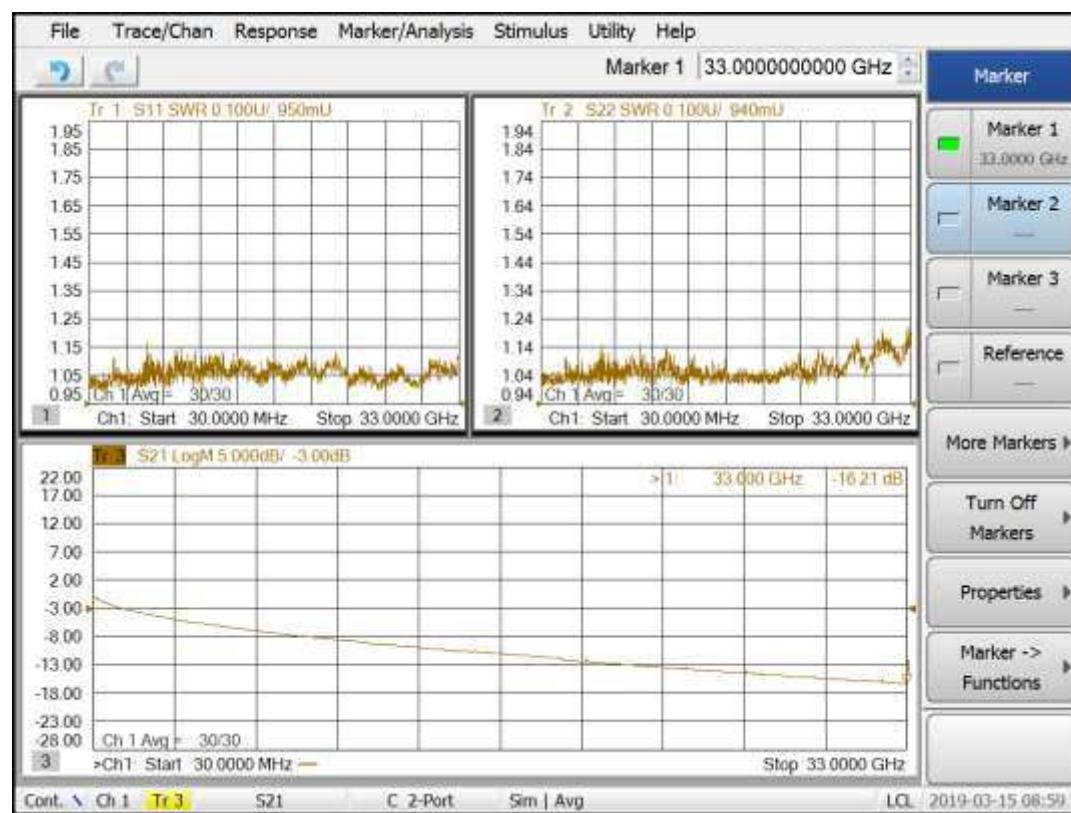


Рисунок В.15 – Испытания при температуре 55°С

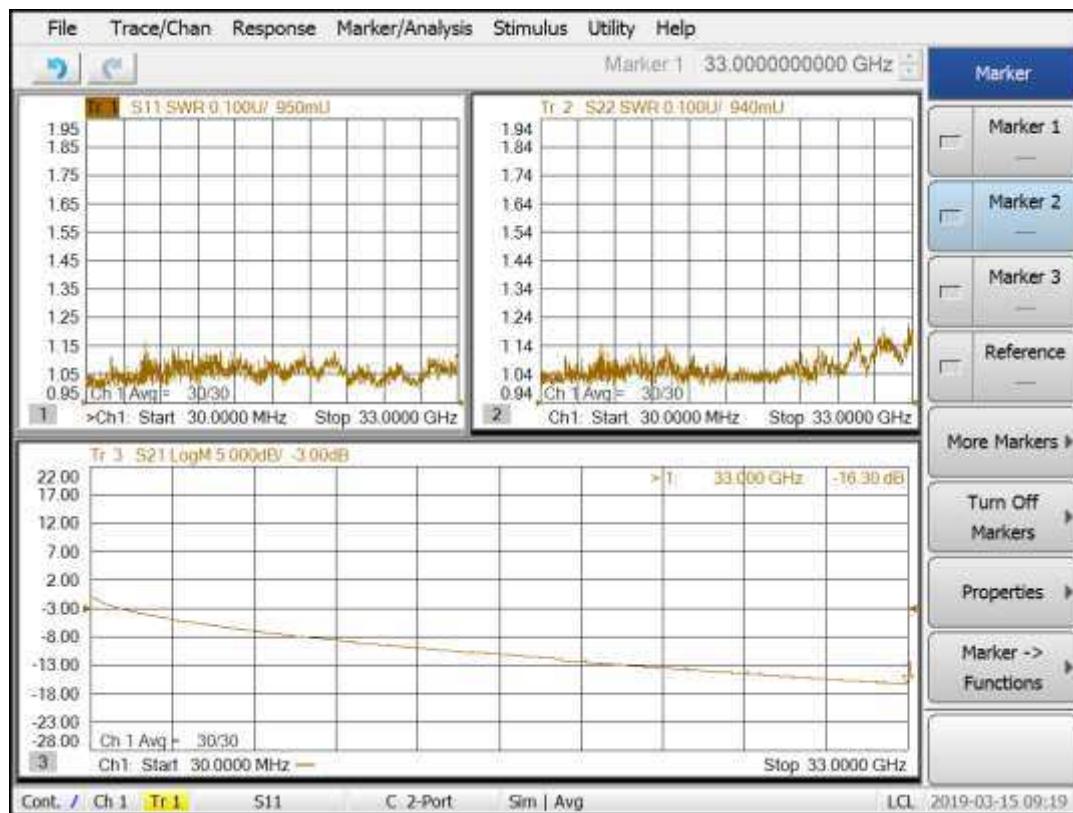


Рисунок В.16 – Испытания при температуре 65°С

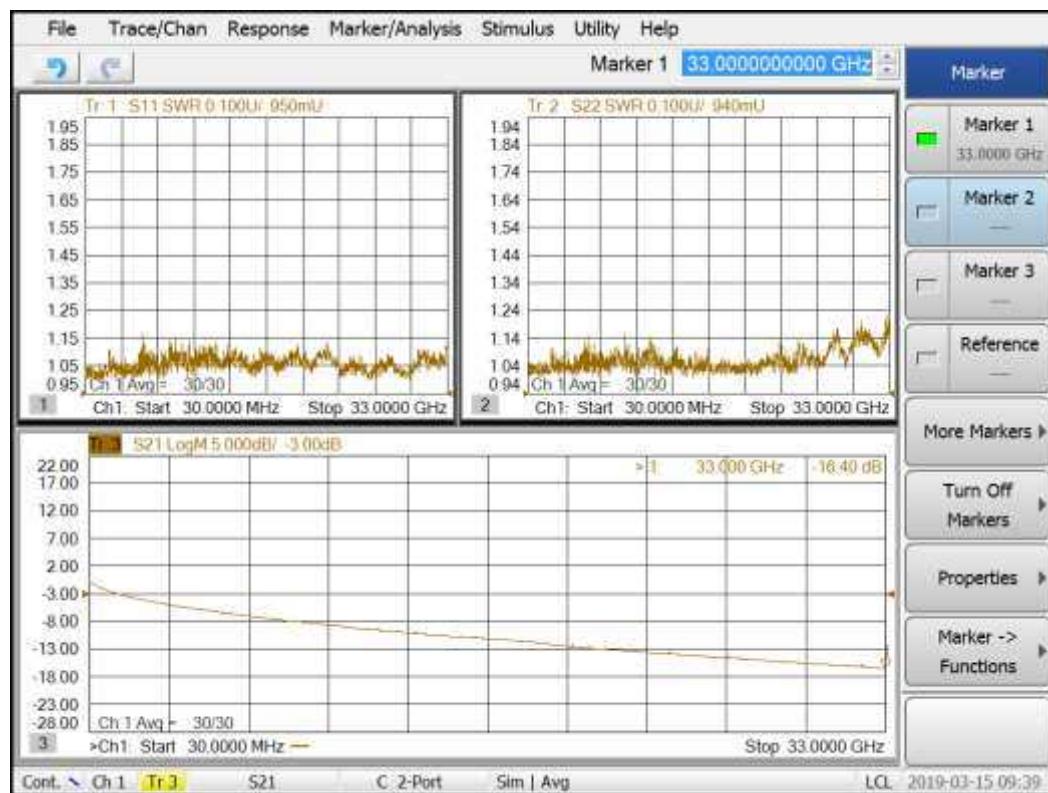


Рисунок В.17 – Испытания при температуре 75°С

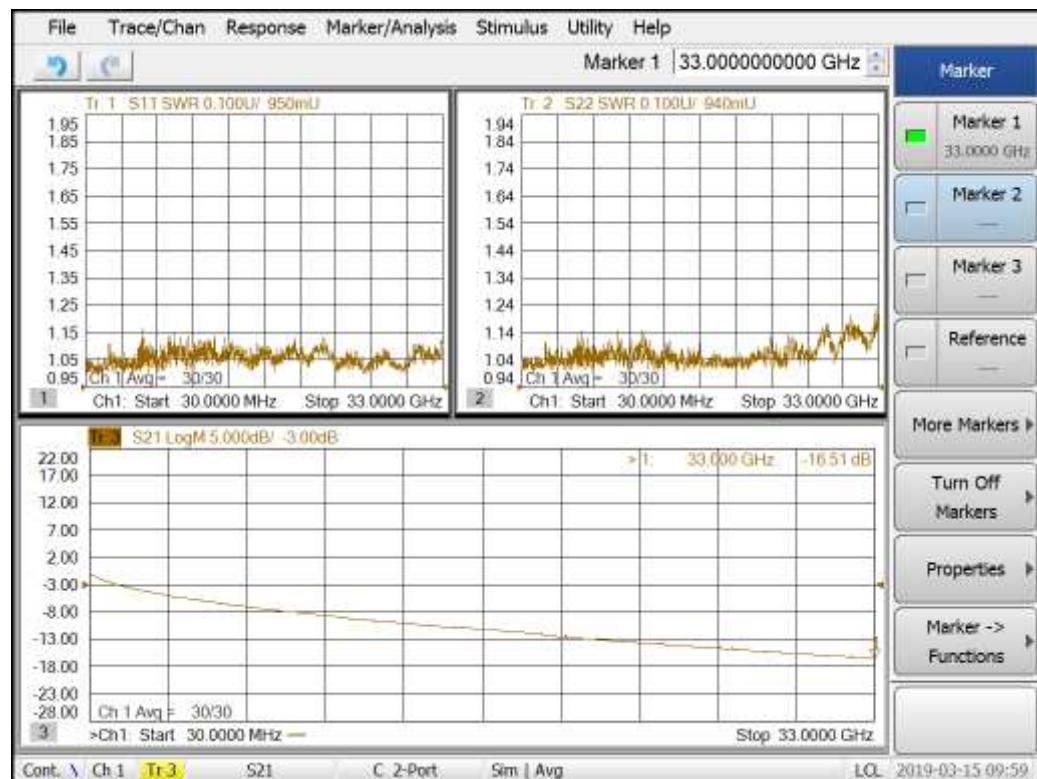


Рисунок В.18 – Испытания при температуре 85°C

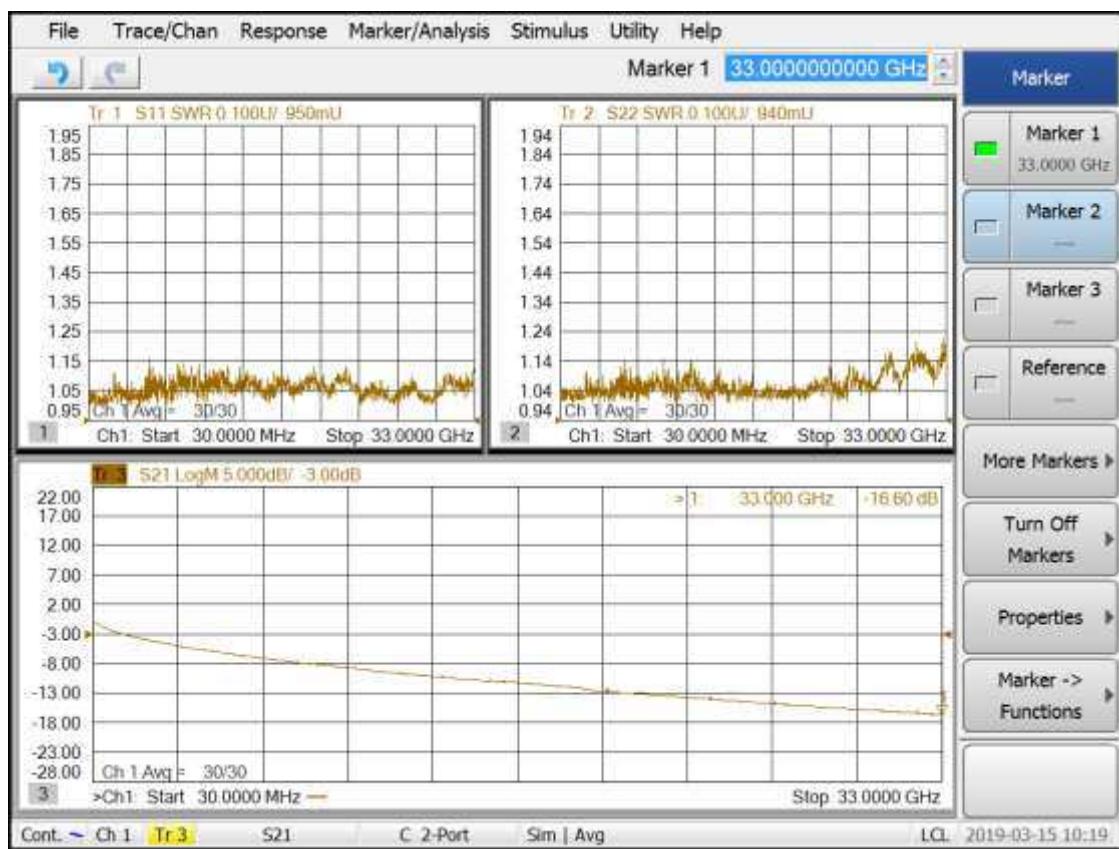


Рисунок В.19 – Испытания при температуре 95°C

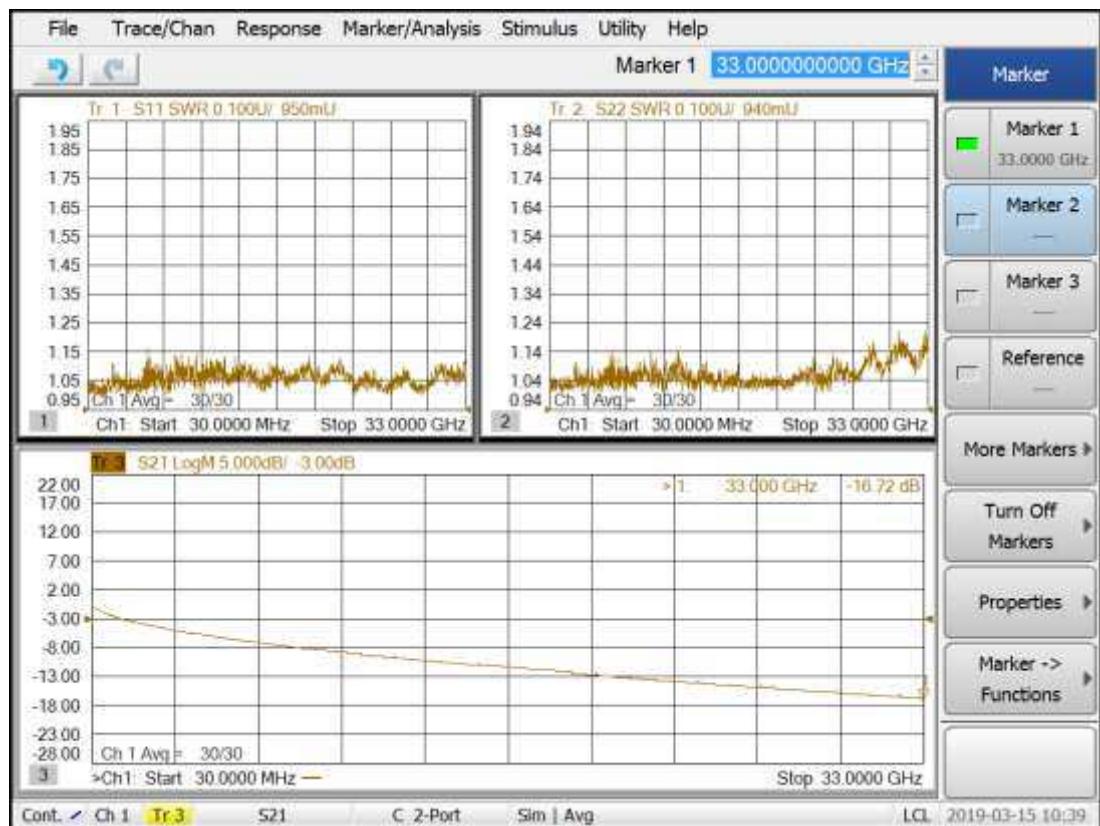


Рисунок В.20 – Испытания при температуре 105°C

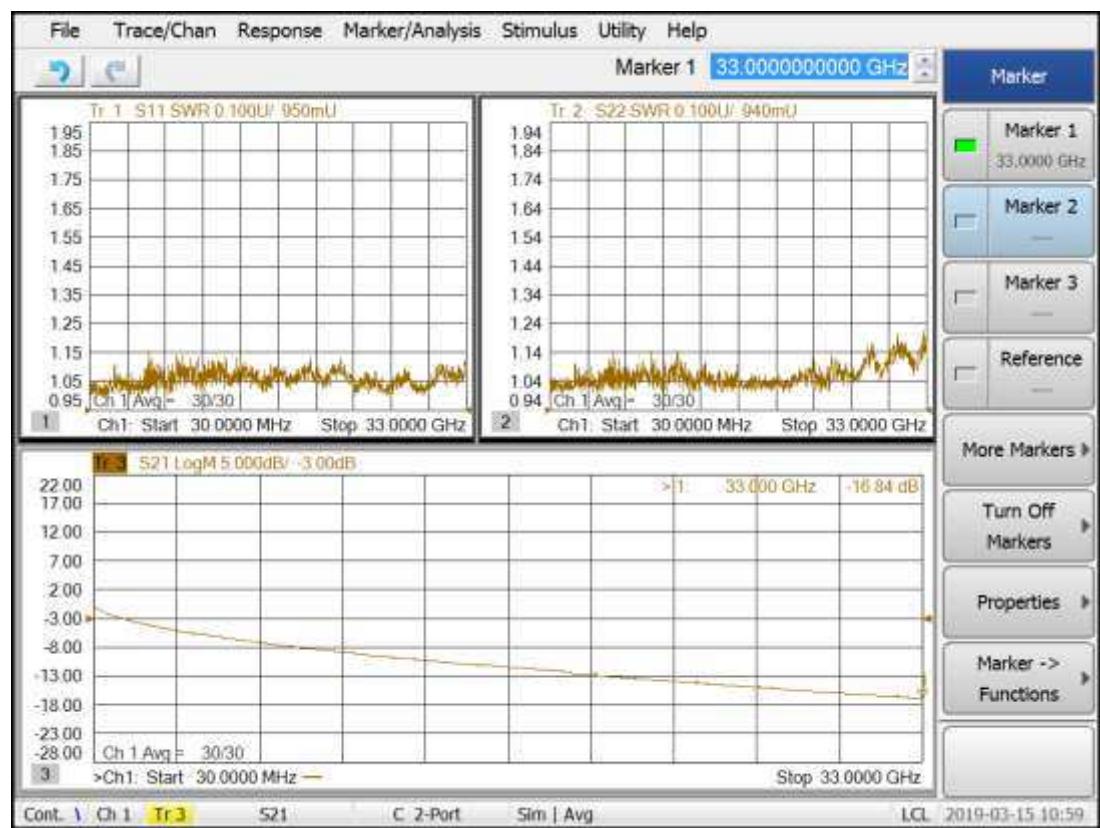


Рисунок В.21 – Испытания при температуре 115°C

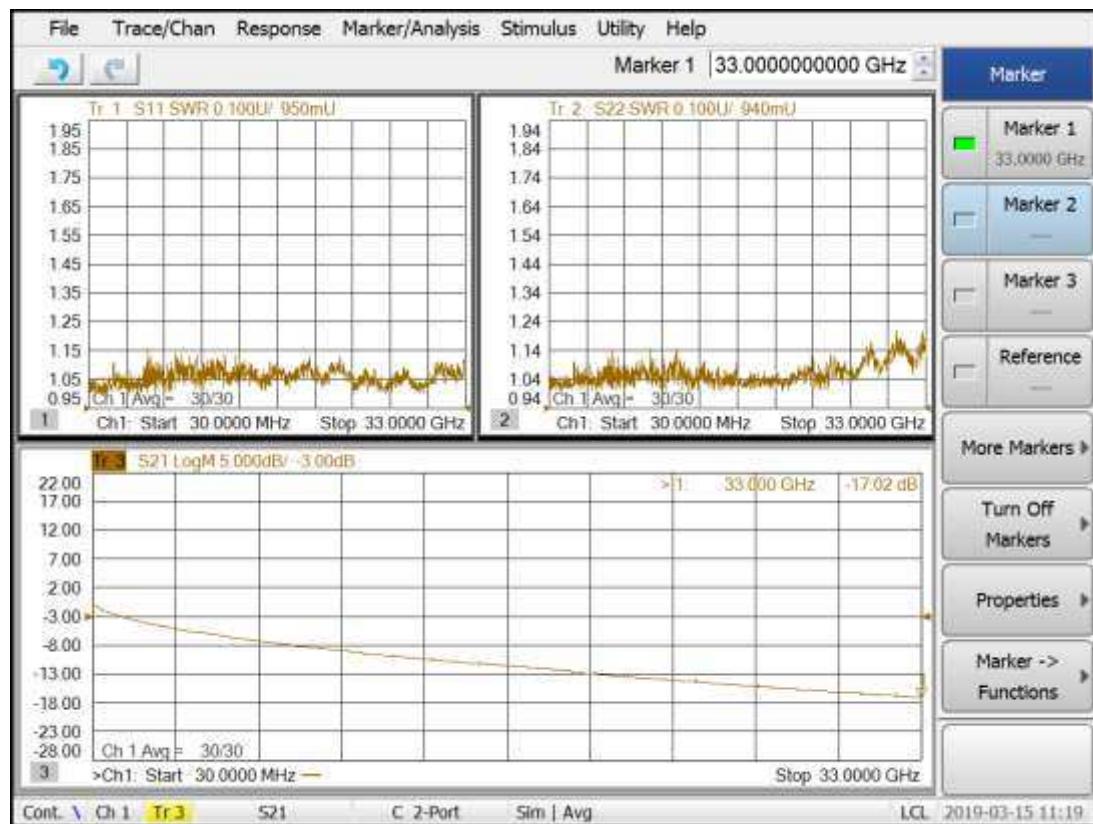


Рисунок В.22 – Испытания при температуре 125°С

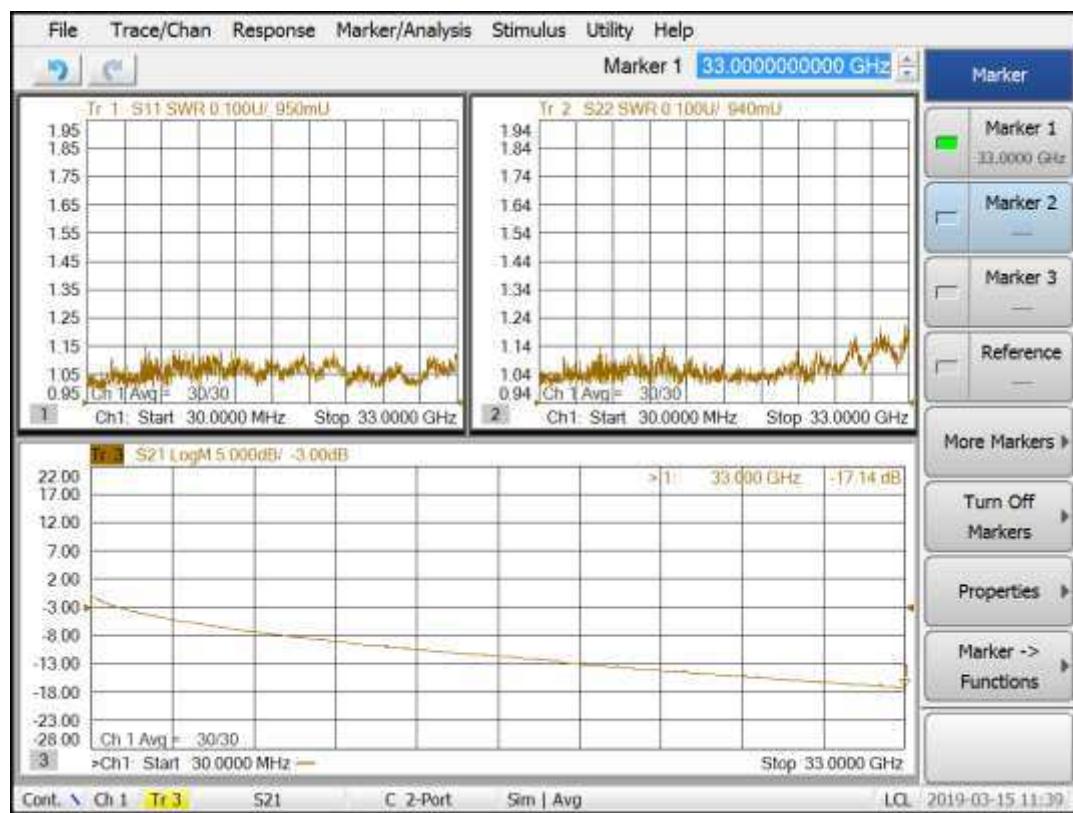


Рисунок В.23 – Испытания при температуре 135°С

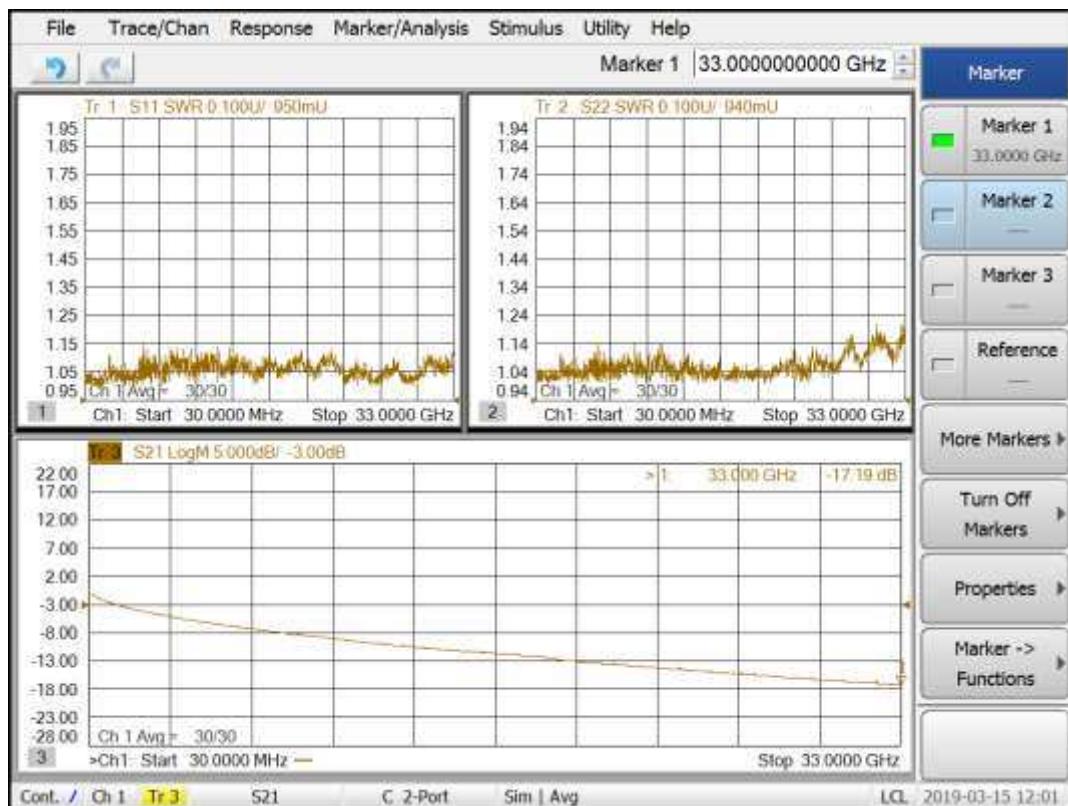


Рисунок В.24 – Испытания при температуре 145°C

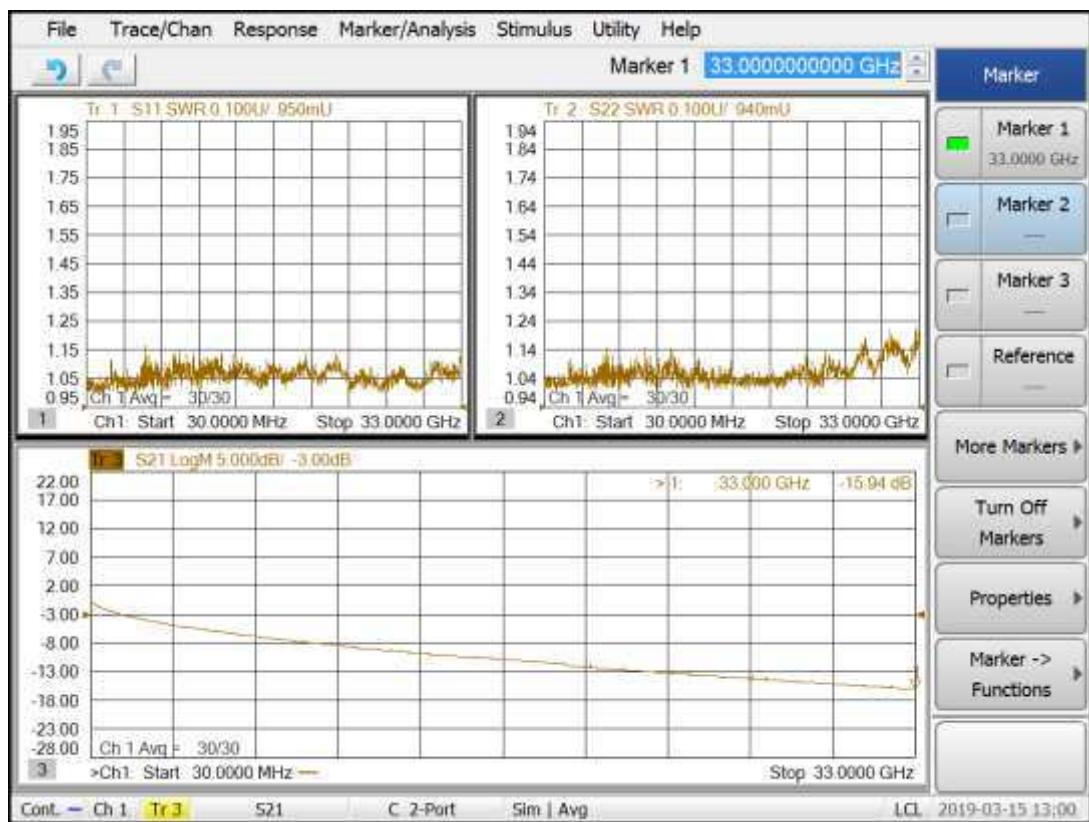


Рисунок В.25 – Испытания с открытой крышкой после завершения ЭТВИ

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Расчет доз облучения при испытаниях на устойчивость к космической радиации

Г1 Облучение проводится электронами на линейном ускорителе ЭЛУ-4, аттестованном в соответствии с ГОСТ РВ 20.57.415.-97 и ГОСТ РВ 20.57.308-98 с изменениями и дополнениями.

Г2 Облучение проводится в вакууме.

Г3 Геометрические размеры поля электронного облучения – 40x40 см.

Г4 Средняя энергия электронов E в плоскости размещения образцов – 4 МэВ.

Г5 Образцы для облучения скомпонованы в группы так, чтобы их линейные размеры в направлении облучения не превышали значений, определяемых из выражения:

$$E \geq 10 \cdot (L \cdot \rho)^{0.76},$$

где E – Энергия электронов в МэВ;

L – линейный размер (толщина) группы образцов в направлении облучения;

ρ – плотность образцов.

Г6 Средняя плотность потока электронов в месте размещения образцов:

$$\varphi_e = 1,15 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$$

Г7 Погрешность измерения средней энергии не более 8 %.

Г8 Погрешность измерения средней плотности потока электронов φ_e в плоскости облучения не более 6 %.

Г9 Погрешность мониторинга и поддержания средней плотности потока в процессе облучения не более 5 %.

Г10 Расчет нормы испытаний:

$$D = \varphi_e \cdot t \cdot \delta \cdot (1 - \delta_e)^{-1} = \Phi_e \cdot \delta \cdot (1 - \delta_e)^{-1},$$

где t – время облучения;

Φ_e – интегральный поток электронов;

δ – удельная поглощенная доза по кремнию;

δ_e – погрешность измерения плотности потока электронов.

Г11 Удельная поглощенная доза о кремнию (δ) для электронов с энергией 4 МэВ – $2,55 \cdot 10^{-8}$ рад·см $^{-2}$ ·электрон $^{-1}$.

Г12 Перечень кабельных сборок подвергаемых облучению представлен в таблице Г.1.

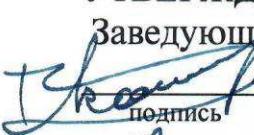
Таблица Г.1 – Перечень кабельных сборок

Обозначение по КД	Тип кабельных сборок	Длина, мм	Кол., шт	Интенсивность облучения, рад/с	Суммарная поглощенная доза, рад
RR-1-SKm-SKm	гибкие, устойчивые к ФКП	1000	1	2000	$3,95 \cdot 10^6$
RR-1-SKm-SKm	гибкие, устойчивые к ФКП	1000	1	2000	$5,39 \cdot 10^6$
RR-1-SKm-SKm	гибкие, устойчивые к ФКП	1000	1	2000	$5,77 \cdot 10^6$

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт космических и информационных технологий
Институт

Межинститутская базовая кафедра
«Прикладная физика и космические технологии»
кафедра

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
 B.E. Косенко
подпись инициалы, фамилия
« 19 » 06 2020 г

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

«Исследование и разработка технологии производства сверхвысокочастотных
кабельных сборок для нужд космической промышленности»
тема

27.04.03 «Системный анализ и управление»
код и наименование направления

27.04.03.06 «Основы проектирования космических аппаратов»
код и наименование магистерской программы

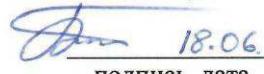
Научный
руководитель


Главный учёный секретарь
НТС АО «ИСС», д-р техн.
наук, проф-р
подпись, дата 18.06.2020
должность, ученая степень

E.N. Головёнкин

инициалы, фамилия

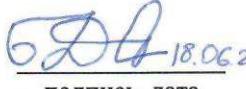
Выпускник


18.06.2020
подпись, дата

И.О. Трифанов

инициалы, фамилия

Рецензент


6ДД 18.06.2020
подпись, дата
Ведущий инженер АО
«ИСС», канд.техн.наук
должность, ученая степень

Д.А. Большаков

инициалы, фамилия

Нормоконтролер


18.06.2020
подпись, дата
Профессор МБК ПФиКТ, д-
р техн. наук, доцент
должность, ученая степень

В.Е. Чеботарев

инициалы, фамилия

Красноярск 2020