

На правах рукописи



Коренев Андрей Викторович

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ И КОНТРОЛЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ
ПАРАМЕТРОВ КОАКСИАЛЬНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ В РАСШИРЕННОМ
ТЕМПЕРАТУРНОМ ДИАПАЗОНЕ

Специальность 2.2.14 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР)

- Научный руководитель:** **Фатеев Алексей Викторович**,
кандидат технических наук, доцент,
ТУСУР, г. Томск
- Официальные оппоненты:** **Горбачёв Анатолий Петрович**,
доктор технических наук, доцент, ФГБОУ
ВО «Новосибирский государственный
технический университет», г. Новосибирск
- Сусяев Валентин Иванович**,
кандидат физико-математических наук,
доцент, ФГАОУ ВО «Национальный
исследовательский Томский
государственный университет», г. Томск
- Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное
учреждение «Главный научный
метрологический центр» Министерства
обороны Российской Федерации,
г. Мытищи

Защита диссертации состоится «19» декабря 2023 г. в 09 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.415.01, созданного на базе ТУСУР по адресу: г. Томск, пр. Ленина, 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники по адресу: г. Томск, ул. Красноармейская, 146 и на сайте <https://postgraduate.tusur.ru/urls/iasyf3q6>

Автореферат разослан « ____ » _____ 2023г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 24.2.415.01
доктор физ. -мат. наук, профессор



А. Е. Мандель

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования и степень ее проработанности

Потребности систем связи и радиолокации, беспилотных летательных аппаратов, измерительной и ракетно-космической техники требуют развития технологии и улучшения технических характеристик коаксиальных сверхвысокочастотных (СВЧ) соединителей и переключателей. Для удовлетворения потребностей к устройствам в этих сферах необходимо улучшать их стойкость ко внешним воздействующим факторам, таким как: температура окружающей среды, вибрационные и ударные нагрузки. Немаловажным является развитие технологии с целью снижения себестоимости производства.

Обзор исторического развития технологии коаксиальных СВЧ соединителей представлен Д.Г. Брайантом (J.H. Bryant) [67], сооснователем компании Omni-Spectra и профессором Мичиганского университета, М.А. Маори (Mario A. Maury Jr.) [7], сооснователем Maury Microwave.

Современное состояние технологии и обзор конструкций зарубежных и отечественных соединителей описаны в многочисленных работах К.Б. Джуриного [11, 71–73] из ФГУП «НПП «Исток», в диссертации А.В. Исакова [1], в публикациях ведущих мировых производителей соединителей – Huber+Suhner AG [25], Corning Gilbert Inc [4] и других.

Электромеханические коаксиальные СВЧ переключатели представляют собой разновидность реле, у которых контактная система оптимизирована для пропускания высокочастотных сигналов, а для подключения внешних устройств используются коаксиальные соединители со стандартными интерфейсами. Такие переключатели выпускаются многими зарубежными фирмами, среди которых наиболее известны Dow-Key Microwave, Radiall, Keysight Technologies, Teledyne Microwave [18,19,21]. В настоящее время идет бурное развитие и расширение линейки выпускаемых переключателей китайскими производителями – China electronics technology instruments, 41st Institute of CETC, [66, 68].

В СССР лидером по разработке и производству высокочастотных реле был завод «Радиореле» г. Харьков, который выпускал переключатели РПА16, РПА14, РЭВ16, РЭВ14. АО «НПК «Северная заря» г. Санкт-Петербург до сих пор выпускает реле РПА 13. Все эти изделия к настоящему времени устарели. Самое высокочастотное изделие – РПА 14 – обладает рабочей полосой частот не более 2 ГГц при КСВн 1,43 и развязкой, не превышающей 20 дБ на этой частоте [102].

В настоящее время отечественные предприятия только начинают осваивать электромеханические СВЧ переключатели с техническими характеристиками на уровне лучших мировых образцов.

Улучшение основных технических характеристик СВЧ соединителей и переключателей проводится не только путем разработки новых методик и подходов к согласованию элементов конструкции [1, 45, 60, 62, 80], но и во многом путем внедрения новых диэлектрических материалов в конструкции [23, 29, 53, 67, 74].

Применение новых диэлектриков в высокочастотных устройствах требует исследования их электрофизических свойств в необходимом диапазоне частот и при требуемых внешних температурных воздействиях.

Для измерения электрофизических параметров материалов было разработано множество методов [37, 38, 40, 41, 43, 44, 52, 58]. Это многообразие обусловлено формой и свойствами измеряемых образцов, диапазоном частот проведения измерений, необходимой точностью и другими факторами. Тем не менее, существует потребность в разработке способов измерения электрофизических параметров образцов нестандартной формы, обусловленной особенностями технологии производства коаксиальных СВЧ устройств.

Цель работы

Разработка методики измерения и контроля электрофизических параметров коаксиальных изоляторов в расширенном температурном диапазоне.

Задачи исследования

Поставленная цель достигается решением следующих задач:

1. Разработка методики измерения эффективных электрофизических параметров изоляторов в нормальных условиях.
2. Исследование методики для использования ее в расширенном температурном диапазоне.
3. Применение методики для разработки СВЧ устройств, работающих при температуре до плюс 300 °С.
4. Применение методики для контроля электрофизических параметров изоляторов сложной формы в производственном процессе.

Научная новизна

- Разработана новая методика измерения эффективных электрофизических параметров изоляторов коаксиальных СВЧ устройств на основе четвертьволнового резонатора.
- Предложены новые функциональные зависимости, описывающие возникающие в резонаторе паразитные эффекты, которые влияют на измеряемые параметры диэлектриков.
- Впервые получены высокотемпературные зависимости эффективных электрофизических параметров материалов изоляторов соединителей AR200, ПЭЭК–5Г, ПИ–ПР–20, что позволило разработать не имеющий аналогов высокотемпературный соединитель.

Практическая значимость

1. Разработанная методика измерения электрофизических параметров изоляторов сложной формы внедрена в производственный процесс для измерения параметров изоляторов коаксиальных СВЧ устройств, что позволило отказаться от проведения измерений ряда размеров деталей и тем самым увеличить эффективность их контроля.
2. С помощью предложенной методики получены температурные зависимости электрофизических параметров термостойких материалов.

Разработан и внедрен в производство не имеющий аналогов коаксиальный СВЧ соединитель, обладающий максимальной рабочей температурой плюс 300°С.

3. Применение изоляторов оригинальной конструкции с контролем их электрофизических параметров в производственном процессе позволило разработать и внедрить в производство коаксиальные СВЧ переключатели с высокочастотными характеристиками на уровне лучших мировых аналогов.

Методы исследования

Для решения поставленных задач применялись методы матричной алгебры, электромагнитное моделирование методом конечных элементов, анализ распространения электромагнитных волн во временной области, резонаторные методы исследования диэлектриков.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Предложенные функциональные зависимости паразитных эффектов от конструкции четвертьволнового резонатора и материала образца в нем позволяют учесть влияние этих эффектов при расчете эффективной диэлектрической проницаемости образца с значением не более 4 в диапазоне частот до 12 ГГц и проводить измерения эффективной диэлектрической проницаемости полимерных изоляторов с погрешностью не более 4%.

2. Методика измерения электрофизических параметров изоляторов с использованием четвертьволнового резонатора обеспечивает проведение измерений в диапазоне температур до плюс 300°С, что позволяет разрабатывать коаксиальные СВЧ устройства с расширенным рабочим температурным диапазоном и без ухудшения параметров по сравнению с аналогичными устройствами, работающими в стандартном температурном диапазоне.

3. Применение методики четвертьволнового резонатора для контроля параметров изоляторов коаксиальных устройств, вместо измерения геометрических размеров, позволило применить конструкцию со сложной конфигурацией поперечного сечения внутренних полостей, вместо круглой конфигурации, и достичь на 26% более низкой эффективной диэлектрической проницаемости с сохранением жесткости конструкции и пропорциональным увеличением частотного диапазона.

Достоверность результатов

Экспериментальные результаты получены на современном радиоизмерительном и испытательном оборудовании с подтвержденными техническими и метрологическими характеристиками. Достоверность полученных результатов определяется их совпадением в пределах допустимой погрешности, с результатами измерений на поверенном измерительном оборудовании по утвержденным методикам, а также с измерениями на установках Государственного первичного эталона диэлектрической проницаемости.

Публикации

Основные результаты диссертационных исследований были опубликованы в 10 научных работах, из них 3 публикации в рекомендованных ВАК РФ журналах, 5 - в сборниках конференций различных уровней.

Апробация результатов

Полученные результаты докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

1. VIII–я региональная конференция «Наука и практика: проектная деятельность – от идеи до внедрения» г. Томск, 2019г.
2. 30–я международная крымская конференция «СВЧ–техника и телекоммуникационные технологии» г. Севастополь, 2020 г.
3. VIII–я Всероссийская научно-техническая конференция «СВЧ–2020» г. Омск, 2020г.
4. 31–я международная крымская конференция «СВЧ–техника и телекоммуникационные технологии» г. Севастополь, 2021г.
5. IV–я международная научная конференция «Шарыгинские чтения 2022» г. Томск, 2022г.

Реализация и внедрение результатов исследований

Работа выполнена на кафедре СВЧиКР ТУСУР.

В рамках данной работы и ОКР «Луч» разработан и серийно выпускается на АО «Иркутский релейный завод» по техническим условиям ФИМД.460831.001 ТУ коаксиальный СВЧ переключатель ПСВЧ–2П2Н, что подтверждается актом внедрения. Результаты разработки методики измерения эффективных электрофизических параметров изоляторов сложной формы были внедрены в технологический процесс производства коаксиальных соединителей переключателя, что позволило исключить контроль некоторых геометрических размеров изоляторов и удешевить их производственный цикл. По результатам работы оформлен акт внедрения.

Разработан и серийно выпускается на АО «Иркутский релейный завод» по техническим условиям ФИМД.430421.006 ТУ в трех исполнениях, коаксиальный СВЧ соединитель СРГ–50–32–011 с интерфейсом SMA, с рабочим диапазоном частот до 20 ГГц и рабочим температурным диапазоном до плюс 300°С. По результатам работы оформлен акт внедрения.

В рамках ОКР «Волна» на АО «Иркутский релейный завод» разработана универсальная контактная система СВЧ переключателя с диапазоном частот до 18 ГГц. Разработанная контактная система в настоящее время используется в конструкциях прототипов переключателей 2П3Н.

Личный вклад автора

Большинство представленных в диссертации исследований проводились по инициативе автора. Совместно с научным руководителем обсуждались цели работы и пути их достижения, а также результаты работы. Большинство статей в рамках диссертационного исследования были написаны в соавторстве с Гошиным Г.Г. Три публикации выполнены без соавторов. Личный вклад включает построение моделей, оптимизацию высокочастотных параметров конструкций, подготовку экспериментальных образцов, разработку измерительных установок, проведение измерений, обработку экспериментальных результатов. Разработка конструкций устройств в рамках диссертационного исследования проводилась совместно с работниками АО «Иркутский релейный завод».

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Объем работы составляет 128 страниц машинописного текста, включая приложение из 3 страниц, 73 рисунка, 15 таблиц и список литературы из 108 наименований.

Краткое содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены цель и задачи исследования, показаны научная новизна, практическая значимость работы, достоверность полученных результатов, изложены положения, выносимые на защиту.

В разделе 1.1 **первой главы** проведен краткий обзор типовой конструкции коаксиальных СВЧ соединителей и анализ работ, направленных на улучшение их радиотехнических параметров. Выявлено, что одним из способов улучшения параметров соединителей является использование в их конструкциях изоляторов сложной формы. Отмечено, что применение таких изоляторов создает сложности контроля их геометрических размеров в производственном процессе.

В разделе 1.2 проведен обзор двух типов конструкций коаксиальных СВЧ переключателей. Определен технический уровень изделий крупнейших мировых производителей. Выявлена роль изоляторов коаксиальных соединителей в конструкции контактных систем переключателей, их влияние на высокочастотные характеристики. Выдвинуто предположение, что использование новых материалов диэлектриков, обладающих стабильностью геометрических размеров и низкими потерями в конструкции изоляторов сложной формы позволит улучшить основные параметры контактных систем СВЧ переключателей.

В разделе 1.3 дан краткий обзор полимеров, применяемых в конструкциях коаксиальных СВЧ устройств. Проведен обзор технических характеристик трех перспективных полимерных материалов: полиэфирэфиркетон (ПЭЭК), полиимид (ПИ) и Арфлон (AR200), которые могут быть использованы для создания высокотемпературных коаксиальных соединителей и контактных систем СВЧ переключателей с улучшенными характеристиками. Анализ технических характеристик материалов и публикаций на эту тему говорит об отсутствии данных о температурных зависимостях диэлектрических свойств, а также наличии зависимости этих параметров от технологии переработки, что говорит о необходимости проведения дополнительных исследований и разработки методики контроля эффективных диэлектрических параметров изоляторов в технологическом процессе производства.

В разделе 1.4 проведен краткий обзор методов измерения диэлектрических параметров материалов с акцентом на те из них, которые возможно адаптировать для измерения параметров изоляторов соединителей. По результатам обзора сделан вывод о том, что наиболее перспективным является метод четвертьволнового коаксиального резонатора. Для использования этого метода с целью контроля диэлектрических параметров

изоляторов соединителей необходимо исследовать возникающие в них паразитные эффекты.

Во **второй главе** описаны исследования паразитных эффектов, возникающих в четвертьволновых резонаторах, и методика измерения диэлектрической проницаемости изоляторов сложной формы с помощью таких резонаторов. В подразделе 2.1 приведены базовые элементы конструкции четвертьволнового коаксиального резонатора, распределение амплитуд компонент поля вдоль его длины, основные базовые соотношения, используемые для расчета, соображения по выбору размеров элементов.

В подразделе 2.2 представлена оценка точности моделирования параметров резонаторов различной конфигурации методом конечных элементов. В серии симуляций варьировались настройки решателей, способы аппроксимации геометрии и тип сетки. Определены режимы, обеспечивающие необходимую точность симуляций, которые использованы в дальнейшей работе.

В подразделе 2.3 приведены результаты исследования влияния открытого конца на резонансную частоту резонатора. Предложен метод аппроксимации краевой емкости, учитывающий эффективные диэлектрические параметры образца, проведено сравнение аппроксимации с результатами моделирования МКЭ (рисунок 1).

В подразделе 2.4 предложена конструкция возбуждителя резонатора и исследовано его влияние на резонансную частоту (l_B). Путем моделирования МКЭ получены зависимости $l_B(\sqrt{Z})$ для резонаторов разных конструкций (рисунок 2). Обнаружено и аппроксимировано влияние образца на l_B для разных величин ϵ (рисунок 3). Предложен способ учета l_B , исходя из измеренной величины импеданса резонатора на резонансной частоте и ϵ образца.

В подразделе 2.5 рассмотрен случай резонатора с неполным заполнением (рисунок 4).

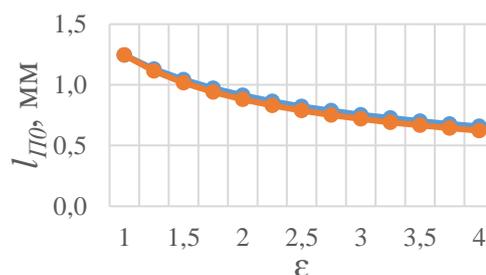


Рисунок 1 – Зависимость величины просачивания поля от ϵ образца. Синяя линия – расчет МКЭ, оранжевая – аппроксимация

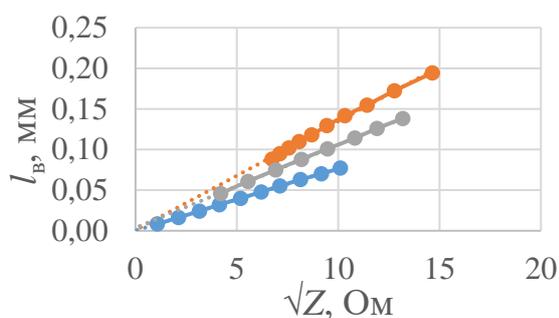


Рисунок 2 – Зависимость l_B от \sqrt{Z} разных конструкций резонаторов

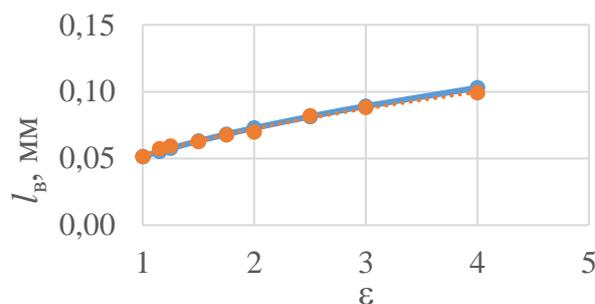


Рисунок 3 – Зависимость l_B от ϵ образца.

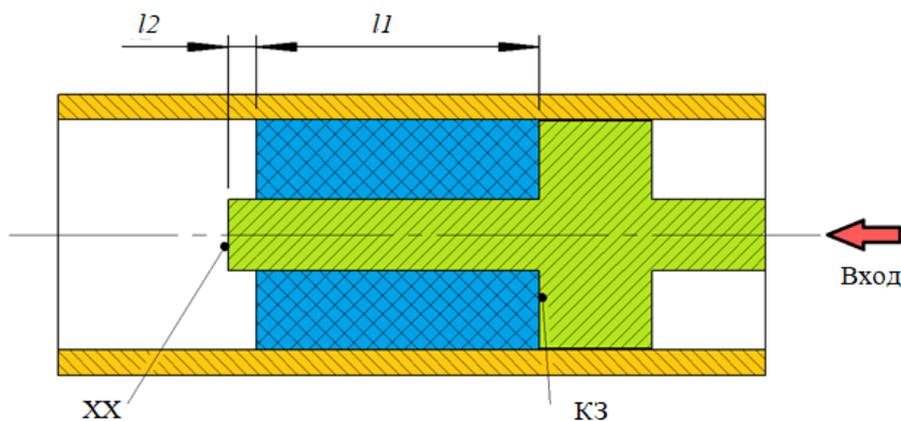


Рисунок 4 – Схема четвертьволнового резонатора с неполным заполнением

Предложен расчет резонансной частоты путем расчета импеданса на стыке линий l_1 и l_2 (рисунок 4), полученного путем трансформации импедансов открытого конца и возбуждателя. Проведено сравнение величины ошибки расчета при разной длине образца, с методом аппроксимации влияния изолятора при полном заполнении (рисунки 5, 6).

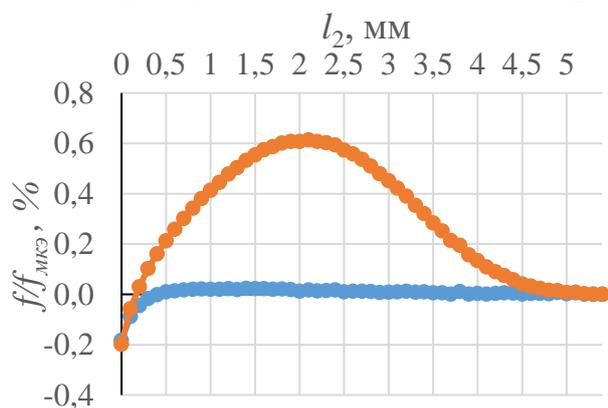


Рисунок 5 – Зависимость ошибки расчета f_0 при разных методах аппроксимации. Оранжевая линия – аппроксимация через $\epsilon_{\text{ср}}$, синяя линия – с использованием модифицированной методики

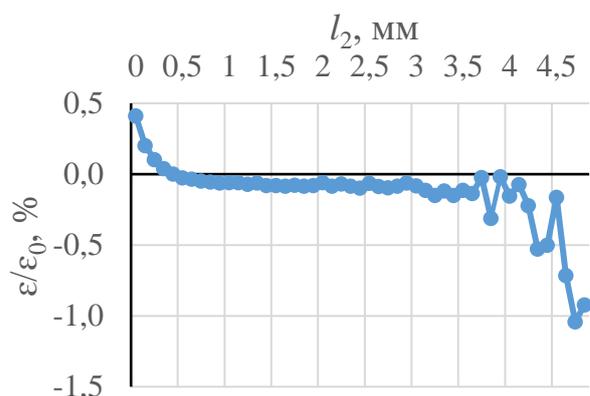


Рисунок 6 – Зависимость ошибки расчета ϵ образца от величины рецессии изолятора

В подразделе 2.6 изложена методика измерений параметров изоляторов из материалов AR200, ПЭЭК, ПИ с учетом предложенных аппроксимаций. Измерения проводились на резонаторах с изоляторами, предназначенными для соединителей типа N (рисунок 7).



Рисунок 7 – Внешний вид измеряемых изоляторов и резонаторов: 1 – корпус резонатора № 1, 2 – центральный проводник с возбудителем резонатора № 1, 3 – изолятор из ПЭЭК с внутренними полостями, 4 – изолятор из AR200, 5 – корпус резонатора № 2, 6 – центральный проводник с возбудителем резонатора № 2, 7 – изолятор из ПИ

Результаты измерений (таблица 1) сравнивались с предварительно измеренными на эталонной установке параметрами стандартных образцов материалов, изготовленных из тех же партий, что и изоляторы. Результаты, полученные методом четвертьволнового резонатора с помощью предложенных аппроксимаций, отличаются от измерений на эталонной установке не более чем на 2% от номинального значения ϵ .

Таблица 1. Результаты измерений и расчетов диэлектрической проницаемости изоляторов

Изолятор	f_0 , МГц	Z_0 , Ом	k	$l_{п0}$, мм	$\epsilon_{эфф}$	ϵ_{ref}
Резонатор № 1						
Воздух	11505	54,5	0,017	1,245	1,000	–
AR200	8958	117,6	0,017	1,245	2,085	2,06
ПЭЭК	8988	55,9	0,017	1,245	2,016	–
Резонатор № 2						
Воздух	11757	10,3	0,027	1,060	1,000	–
ПИ	7671	85,4	0,027	1,060	3,168	3,23

В подразделе 2.7 приведена оценка точности методики измерения эффективной диэлектрической проницаемости. Оценен вклад различных составляющих в общую погрешность измерения (таблица 2): Θ_0 – погрешность измерения эталонного значения ϵ , Θ_Δ – погрешность, связанная с повторяемостью установки образца, Θ_L – погрешность измерения длины центрального проводника.

Таблица 2. Значения составляющих в общую погрешность измерения

Θ_{l1} , %	Θ_L , %	$\Theta_{l_{п0}}$, %	Θ_f , %	Θ_Z , %	Θ_Δ , %	Θ_0 , %
0,29	1,29	0,33	0,01	0,27	1,59	2,00

Вычислена общая погрешность, которая составила не более 4% от измеряемой величины:

$$\theta_\Sigma = k \sqrt{\sum_{i=1}^m \theta_i^2} = k \sqrt{\theta_{l1}^2 + \theta_L^2 + \theta_{l_{п0}}^2 + \theta_f^2 + \theta_Z^2 + \theta_\Delta^2 + \theta_0^2} = 3.67\% . \quad (1)$$

Предложенная методика была внедрена в производственный процесс АО «Иркутский релейный завод» и позволила контролировать $\varepsilon_{эфф}$ изоляторов сложной формы без измерения их геометрической формы.

В **третьей главе** описана разработка и исследование параметров изоляторов коаксиального СВЧ перехода с повышенной работоспособностью в температурном диапазоне до плюс 300°C. В подразделе 3.1 изложена методика расчета $tg\delta_{эфф}$ изоляторов. Приведены все используемые соотношения, которые применяются при расчете с использованием большинства резонаторных методов. Предложена аппроксимация омической добротности резонатора с использованием зависимости потерь в резонаторе от частоты пропорциональной $\sqrt{f_0}$. Коэффициент заполнения резонатора находится путем численного моделирования МКЭ резонатора с образцом для нахождения изменения резонансной частоты при изменении $\varepsilon_{эфф}$ образца в небольших пределах. В подразделе 3.2 приведены результаты измерения $tg\delta_{эфф}$. Полученное среднее значение $5,9 \times 10^{-4}$ отличается от эталонного на 3,5% при добротности резонаторов 600 ... 700 на частоте порядка 8,5 ГГц. Максимальное отклонение от среднего значения составило 27 %.

В подразделе 3.3 описана процедура разработки перехода с интерфейсом типа SMA с рабочим температурным диапазоном до плюс 300°C. За основу взята конструкция перехода СРГ–50–751 (рисунок 8).

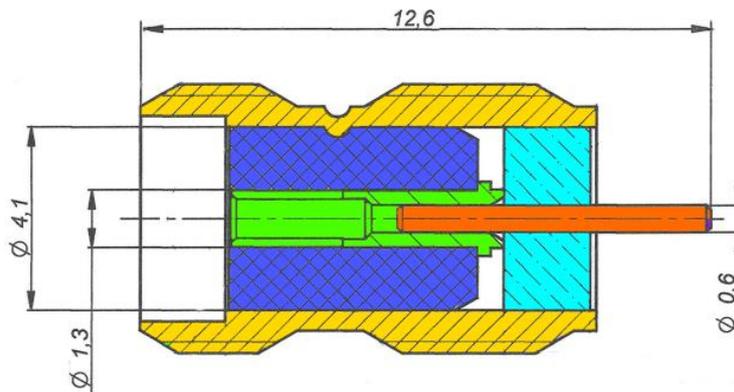


Рисунок 8 – Внутреннее устройство соединителя СРГ–50–751. Синим цветом обозначен изолятор из Ф–4, голубым – стекло С–52, желтым – корпус, оранжевым – центральный проводник металlostеклянного спая, зеленым – центральный проводник с двумя цапгами

Для повышения температурного диапазона перехода на замену изолятору из Ф–4 была разработана новая конструкция, которая полностью механически совместима с оригинальной и может быть изготовлена из ПЭЭК или ПИ, которые отличаются более высокой жесткостью и температурной стойкостью. Из-за разной диэлектрической проницаемости материалов в новой конструкции изолятора выполнены отверстия, позволяющие снизить его $\varepsilon_{эфф}$ до необходимой величины (рисунок 9).

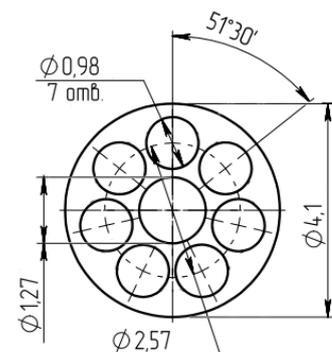


Рисунок 9 – Поперечное сечение изолятора новой конструкции

По разработанной конструкции были изготовлены изоляторы из материала ПЭЭК.

Эффективные диэлектрические параметры изоляторов из AR200 и ПЭЭК были измерены методом четвертьволнового резонатора (рисунок 10).

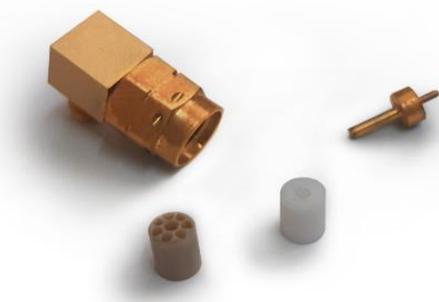


Рисунок 10 – Внешний вид четвертьволнового резонатора для изоляторов соединителей типа SMA с изоляторами из Ф-4 и ПЭЭК

Параметры изоляторов с ПЭЭК сравнивались с параметрами Ф-4 и признаны удовлетворительными. S-параметры модифицированных переходов с изоляторами из ПЭЭК были измерены с помощью векторного анализатора цепей (рисунок 11). КСВн оказался ниже, чем у оригинальных, а вносимые потери отличаются в большую сторону, не более чем на 0,03 дБ.

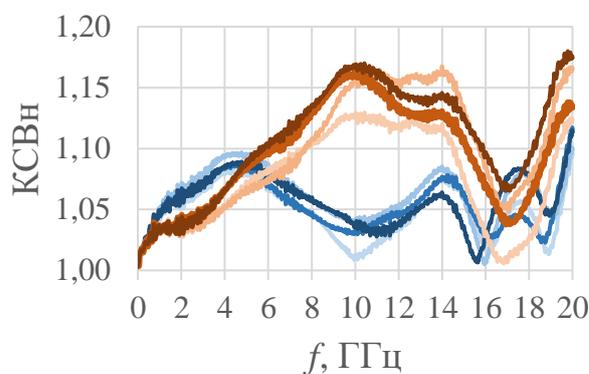
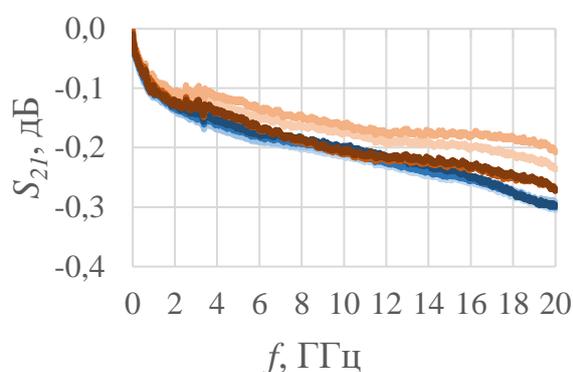


Рисунок 11 – Параметры соединителей с изоляторами из ПЭЭК и Ф-4: слева – вносимые потери; справа – КСВн. Оттенками оранжевого обозначены соединители с Ф-4, синего – с ПЭЭК

В подразделе 3.4 описана разработка измерительной оснастки и устройство испытательной установки, предназначенной для проведения исследований температурных зависимостей эффективных диэлектрических параметров изолятора, разработанного в подразделе 3.3.

Исследование диэлектрических свойств изоляторов при температурах до плюс 300°C проводились в испытательной камере (рисунок 12), дополнительно оборудованной измерителями температуры для контроля нагрева корпуса резонатора и оснастки.



Рисунок 12 – Испытательная камера с окном ввода измерительной оснастки на боковой стороне и двумя дополнительными измерителями температуры

Для проведения испытаний была разработана измерительная оснастка (рисунок 13), выдерживающая высокие температуры в камере и позволяющая создать необходимую разницу температур между резонатором в камере и кабельной сборкой, с соединителями типа SMA со стандартным температурным диапазоном до плюс 155°C, снаружи.



Рисунок 13 – Внешний вид измерительной оснастки

В составе оснастки использованы модифицированные переходы ПК2–18–01Р–13Р и ПК2–18–01–13Р с изоляторами из ПИ.

В подразделе 3.5 приведены результаты исследования температурных зависимостей электрофизических параметров ПИ (рисунок 14) на эталонной установке с изготовлением образца стандартной формы и по предложенной методике. Результаты измерения хорошо согласуются друг с другом.

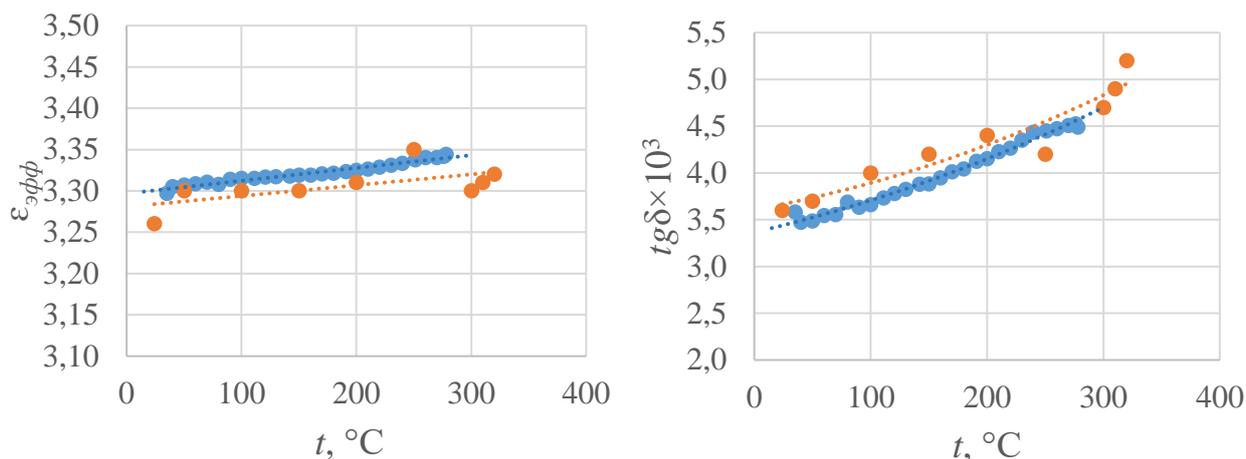


Рисунок 14 – Температурные зависимости ε (слева) и $tg\delta$ (справа) полиимида ПИ–ПР–20 полученные на эталонной установке (оранжевый) и по предложенной методике (синий)

По предложенной методике измерены электрофизические параметры изоляторов из ПИ, ПЭЭК и из AR200 с помощью разработанной оснастки. Результаты измерений (рисунок 15) говорят о невозможности использования ПЭЭК в соединителях при температурах до плюс 300°C из-за резкого увеличения $tg\delta$ после плюс 175°C.

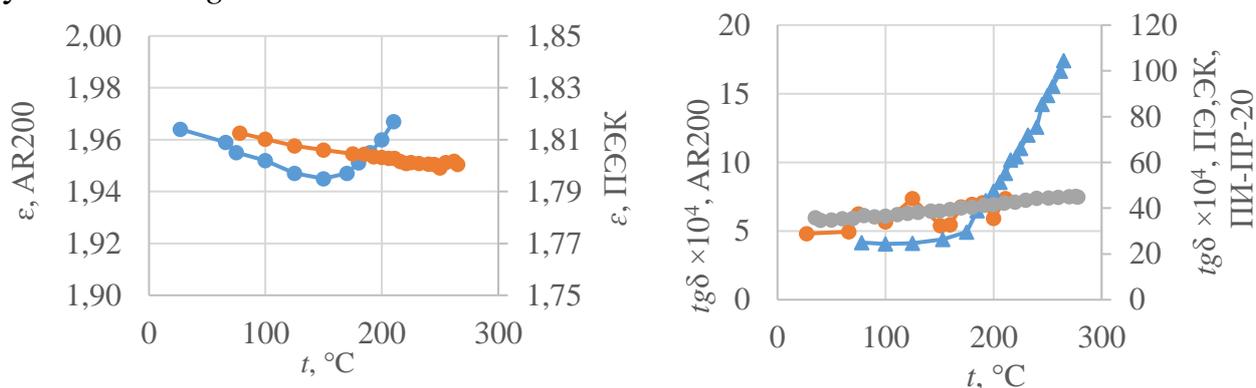


Рисунок 15 – Зависимость $\varepsilon_{эфф}$ (слева) и $tg\delta$ (справа) от температуры для изоляторов из AR200 (синий), ПЭЭК (оранжевый) и ПИ (серый).

В результате проведенных исследований в высокотемпературных переходах в качестве материала изолятора выбран ПИ. Модифицированные переходы с этим материалом в настоящее время серийно выпускаются на АО «Иркутский релейный завод» в трех исполнениях под наименованием СРГ–50–32–011.

Четвертая глава посвящена разработке контактных систем электромеханических СВЧ переключателей, в конструкции которых используются коаксиальные соединители с изоляторами сложной формы.

В подразделе 4.1 приведено описание СВЧ переключателя (рисунок 16) и его основные характеристики. Для этого переключателя разработана контактная система с трансферной схемой коммутации 2П2Н, рабочим диапазоном частот до 12,4 ГГц. КСВн контактной системы составляет не более 1,35, вносимые потери не более 0,5 дБ и изоляция не менее 75 дБ во всем рабочем частотном диапазоне.

Переключатель обладает поляризованной, бистабильной электромагнитной системой. В его составе присутствуют низкочастотные контакты для индикации положения контактной системы СВЧ.



Рисунок 16 – Внешний вид и электрическая принципиальная схема СВЧ переключателя 2П2Н

Подраздел 4.2 посвящен разработке контактной системы 2П2Н (рисунок 17). Коммутация в системе проводится с помощью подвижного центрального проводника прямоугольной коаксиальной

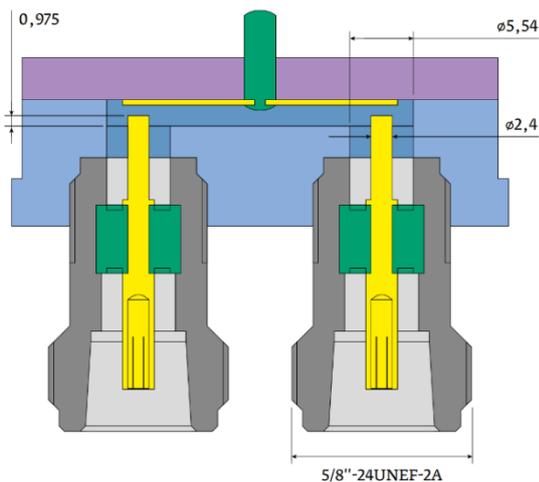


Рисунок 17 – Конструкция СВЧ тракта переключателя

линии, на который воздействует электромагнитная система. Приведена процедура расчета линии с подвижным контактом.

Для соединителей переключателя разработаны изоляторы из AR200 и ПЭЭК. Последний показал лучшие результаты благодаря его жесткости и стабильности геометрических размеров. Для снижения $\epsilon_{эфф}$ изолятора в нем были выполнены встречные полости достаточно сложной формы (рисунки 18, 19). Такая форма позволила снизить $\epsilon_{эфф}$ на 26%, по сравнению с круглыми

полостями, и сохранить жесткости конструкции. Из-за особенностей конструкции изолятора его контроль геометрическими методами оказался трудозатратен, поэтому при их изготовлении на АО «Иркутский релейный завод» использована разработанная методика. Методика и результаты измерения этих изоляторов описаны в подразделе 2.4.

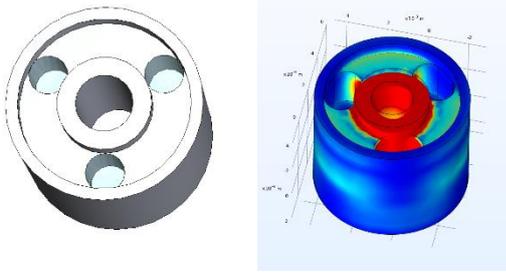


Рисунок 18 – Изолятор из ПЭЭК с отверстиями круглой формы (слева).

Красным цветом выделены места максимальной деформации изолятора при давлении на центральный проводник (справа)

В подразделе 4.3 приведены результаты измерений S -параметров контактной системы 2П2Н (рисунок 20, 21) и рефлектограмма контактной системы (рисунок 22). Также была измерена стабильность контактной системы, которая за 500 циклов коммутации составила не более -55 дБ по S_{11} и не более $0,02$ дБ по S_{21} . Результаты измерений говорят о высоких достигнутых характеристиках, которые соответствуют лучшим мировым аналогам.

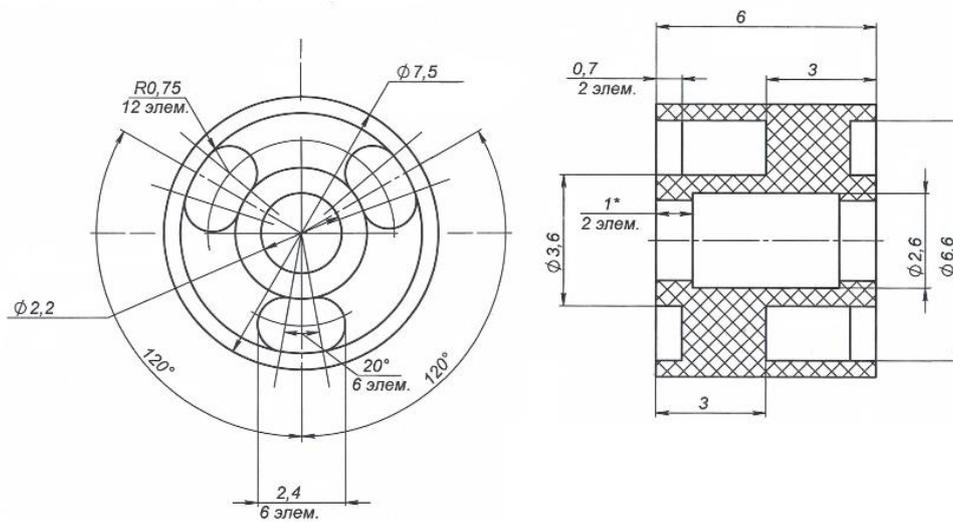


Рисунок 19 – Изолятор СВЧ переключателя из ПЭЭК

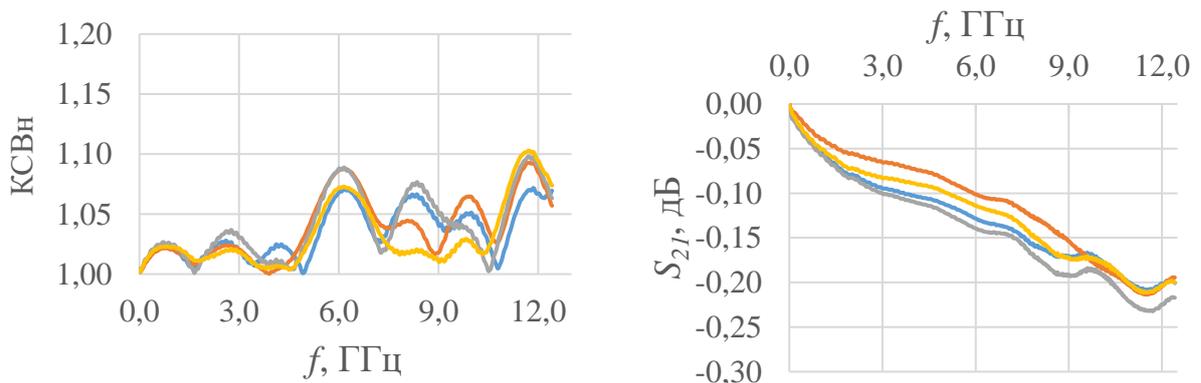


Рисунок 20 – КСВн (слева) и вносимые потери (справа) разработанной контактной системы переключателя 2П2Н

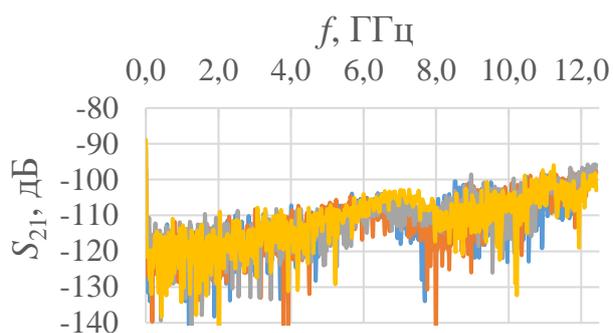


Рисунок 21 – Изоляция контактной системы переключателя 2П2Н

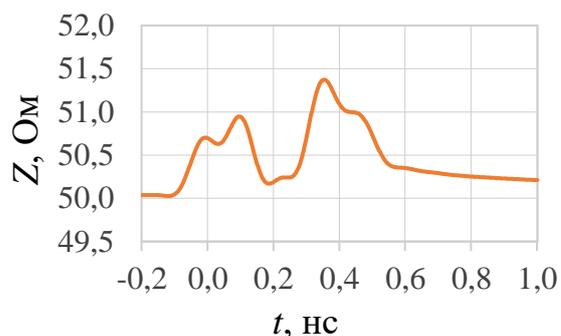


Рисунок 22 – Рефлектограмма волнового сопротивления замкнутого контакта

Разработанная контактная система была испытана на воздействие мощных радиочастотных сигналов в различных режимах, среди которых режим с импульсным сигналом с пиковой мощностью 12,3 кВт на частоте 1030 МГц со скважностью 625 и режим с пиковой мощностью 600 Вт на частоте 9600 МГц со скважностью 10. Контактная система выдержала все режимы испытаний, не допустив электрического пробоя. Нагрев корпуса переключателя составил менее 58°C.

СВЧ переключатель с разработанной контактной системой в настоящее время серийно выпускается на АО «Иркутский релейный завод» под наименованием ПСВЧ–2П2Н–N–1–28, что подтверждается актом внедрения.

В подразделе 4.4 описаны ключевые моменты разработки и конструкция контактной системы СВЧ переключателя 2П3Н с соединителями типа SMA и рабочим диапазоном частот до 18 ГГц (рисунок 23).

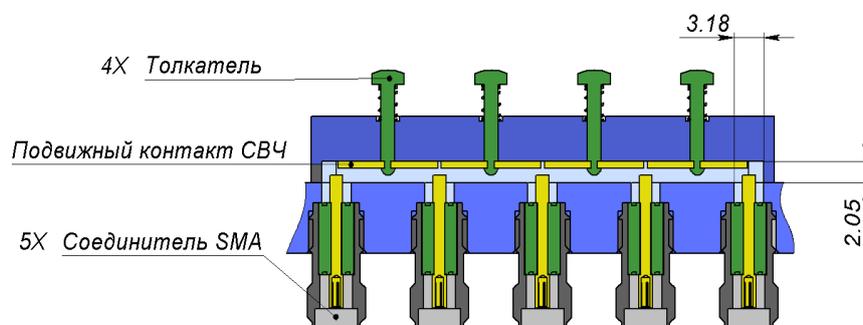


Рисунок 23 – Устройство контактной системы 2П3Н

Помимо уменьшенных габаритов линии передачи, которое обусловлено более широким частотным диапазоном, в контактной системе используется соединитель SMA, который отличается центральным проводником цельной конструкции, которая стала возможной благодаря применению изолятора с разрезом. Разрез необходим для осуществления сборки соединителя, но влияет на эффективные диэлектрические параметры изолятора.

Влияние разреза было исследовано с помощью метода четвертьволнового резонатора, а результаты изложены в подразделе 4.5. Моделирование показало достаточную чувствительность метода для проведения такого рода измерений.

Были проведены измерения партии изоляторов из AR200 с выполненными разрезами с помощью специально изготовленного резонатора

по методике для случая с неполным заполнением. В результате установлен разброс значений $\varepsilon_{эфф}$ изоляторов в диапазоне от 1,98 до 2,02.

Результаты измерений параметров контактных систем 2ПЗН с изоляторами с разрезом приведены в подразделе 4.6. Достигнутый результат свидетельствует о низком уровне КСВн, малых потерях (рисунок 24) и достаточно высокой изоляции (рисунок 25), которые соответствуют уровню лучших мировых аналогов.

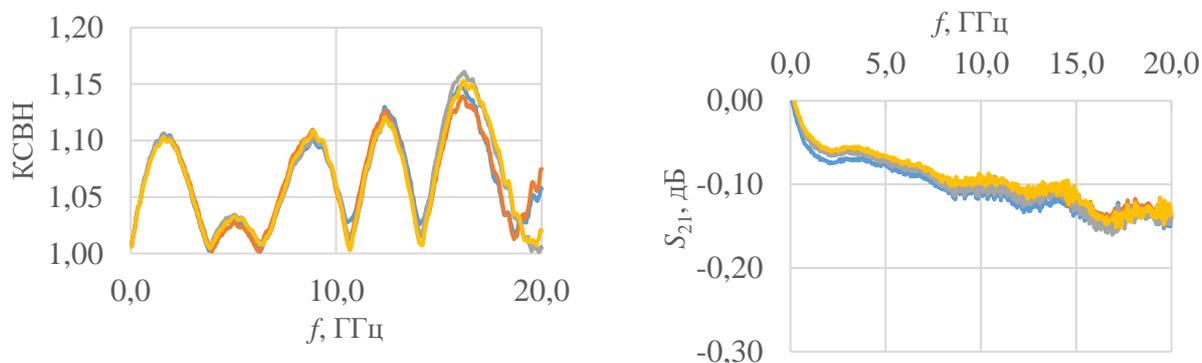


Рисунок 24 –КСВн (слева) и вносимые потери (справа) разработанной контактной системы СВЧ переключателя 2ПЗН

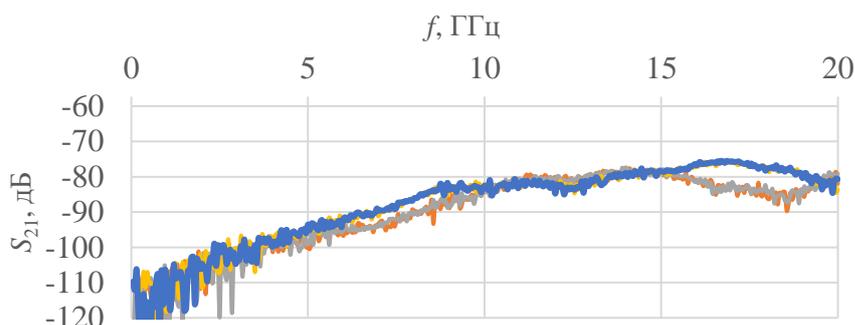


Рисунок 25 – Изоляция СВЧ переключателя 2ПЗН

Анализ измеренных параметров контактной системы во временной области показал наличие соответствия между волновым сопротивлением участков с изоляторами на рефлектограмме и измеренными значениями $\varepsilon_{эфф}$ методом четвертьволнового резонатора.

Основные результаты работы

В результате выполнения работы поставленная цель была достигнута, задачи решены.

1. Разработана методика измерения электрофизических параметров изоляторов коаксиальных СВЧ соединителей с использованием метода четвертьволнового резонатора. Методика была успешно применена при разработке СВЧ устройств и в технологическом процессе их производства для контроля изоляторов сложной формы.

2. Исследованы температурные зависимости электрофизических параметров изоляторов коаксиальных соединителей, выполненных из материалов AR200, ПИ-ПР-20 и ПЭЭК-5Г. Разработана и описана измерительная оснастка, которая использована для проведения измерений с помощью разработанной методики.

3. Разработана конструкция коаксиально-микрополоскового перехода с интерфейсом типа SMA и рабочим температурным диапазоном до плюс 300°C, что превышает соответствующий параметр аналогов. Разработанный переход обладает более низким КСВн по сравнению с оригиналом и серийно выпускается на АО «Иркутский релейный завод», что подтверждено актом внедрения.

4. Разработана конструкция высокочастотной контактной системы СВЧ переключателя 2П2Н с использованием оригинальной конструкции изоляторов, которая позволила снизить эффективную диэлектрическую проницаемость на 26% с сохранением жесткости конструкции. Контактная система обладает высокочастотными характеристиками на уровне лучших мировых аналогов и используется в конструкции СВЧ переключателя ПСВЧ 2П2Н, который серийно выпускается на АО «Иркутский релейный завод», что подтверждается актом внедрения. В производственном процессе изготовления изоляторов соединителей контактной системы использована разработанная методика, что позволило исключить измерение геометрических размеров внутренних полостей.

5. Разработана конструкция СВЧ переключателя 2П3Н с рабочим диапазоном частот до 18 ГГц. Применена конструкция изоляторов с разрезом и исследовано влияние разреза на $\epsilon_{эфф}$ изоляторов, благодаря чему удалось упростить конструкцию коаксиальных соединителей и добиться высокочастотных характеристик на уровне лучших мировых аналогов.

Дальнейшие работы в рамках данной тематики могут быть продолжены в направлении доработки конструкции резонатора с целью улучшения повторяемости результатов измерений, оптимизации возбуждателя.

Результаты диссертации опубликованы в следующих работах

1. **Корнев А.В.,** Гошин Г.Г. Учет паразитных эффектов при измерении эффективной диэлектрической проницаемости методом четвертьволнового резонатора // *Ural Radio Engineering Journal*. – 2021. – N 5(3):207–319. – С. 272–284.
2. **Корнев А.В.,** Результаты применения материала Арфлон AR200 для изготовления СВЧ устройств // *Наука и практика: проектная деятельность — от идеи до внедрения. Мат. VIII рег. конф.* – Томск: Изд-во ТУСУРа. – 2019. – ч.2. – С. 546–548.
3. **Корнев А.,** Гошин Г. Особенности разработки электромеханического СВЧ–переключателя // *Электроника: НТБ*. – 2021. – N 1. – С. 92–96.
4. **Корнев А.В.,** Гошин Г.Г. Модифицированная методика измерения электрофизических параметров опорных шайб соединителей методом четвертьволнового резонатора // *Ural Radio Engineering Journal*. – 2022. – N 6(1). – С. 67–81.
5. **Корнев А.В.,** Гошин Г.Г. Исследование диэлектрических параметров опорных шайб соединителей при воздействии высоких температур. // *Шарыгинские чтения. IV межд. н. конф. ...: мат. конф.* – Томск: Изд-во Томск. гос. ун–та систем упр. и радиоэлектроники. – 2022. – С. 89–94.
6. **Корнев А.В.** Особенности разработки контактной системы СВЧ переключателя диапазона частот до 18ГГц // *Ural Radio Engineering Journal*. – 2023. – N 7(1). – С. 23–36.
7. **Корнев А.В.,** Гошин Г.Г. Измерение эффективной диэлектрической проницаемости опорных шайб коаксиальных соединителей // *СВЧ–техника и телекоммуникационные технологии*. – 2021. – N 3. – С. 332–333.
8. **Корнев А.В.,** Гошин Г.Г. Разработка печатных плат для измерения S–параметров соединителей для печатного монтажа типа SMP // *СВЧ–2020. VIII Всерос. н.–т. конф.* – Омск: изд-во ОмГТУ. – 2020. – С.110–117.
9. **Корнев А.В.,** Гошин Г.Г. Мощный электромеханический СВЧ переключатель диапазона частот до 12,4 ГГц // *СВЧ–техника и телекоммуникационные технологии*. – 2020. – N 2. – С. 227–228.
10. **Корнев А.В.** Особенности применения коаксиально-микроразветвляющих переходов для поверхностного монтажа типа SMP // *Электроника: НТБ*. – 2019. – N 5. – С. 106–111.