

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Уральский федеральный университет имени  
первого Президента России Б.Н. Ельцина»

На правах рукописи



**ФОМИН Дмитрий Геннадьевич**

Методика проектирования объемно-модульных частотно-селективных  
СВЧ устройств и её применение

2.2.14. Антенны, СВЧ устройства и их технологии

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени кандидата  
технических наук

Екатеринбург – 2023

Работа выполнена на кафедре инфокоммуникационных технологий ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)».

**Научный руководитель:** доктор технических наук, доцент,  
**ДАРОВСКИХ Станислав Никифорович**

**Официальные оппоненты:**

**ОСТАНКОВ Александр Витальевич**, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный технический университет», г. Воронеж, заведующий кафедрой радиотехники;

**ТАБАКОВ Дмитрий Петрович**, доктор физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики», г. Самара, заведующий кафедрой физики;

**ШАБУНИН Сергей Николаевич**, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», заведующий кафедрой радиоэлектроники и телекоммуникаций Института радиоэлектроники и информационных технологий – РтФ.

Защита состоится «28» сентября 2023 г. в 14:00 ч на заседании диссертационного совета УрФУ 2.2.04.12 по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,  
<https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?id=12&rid=4825>

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 г.

Ученый секретарь  
диссертационного  
совета



Игнатков Кирилл  
Александрович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Частотно-селективные СВЧ устройства нашли широкое применение в составе радиоприемных и радиопередающих модулей современных радионавигационных и радиолокационных систем, а также в составе измерительных комплексов оценки электрофизических свойств материалов. Для реализации необходимых характеристик частотно-селективных СВЧ устройств к настоящему времени разработано несколько технологий их построения, применение каждой из которых зависит от таких факторов как: поступающая на вход устройства мощность СВЧ сигнала, диапазон рабочих частот, габариты разрабатываемого устройства, допустимые потери. Основной особенностью этих технологий является плоскостное построение разрабатываемых частотно-селективных СВЧ устройств. Такое конструктивное исполнение создает проблему, связанную с ухудшением их габаритных характеристик при увеличении необходимого числа частотно-селективных звеньев, каналов «приема–передачи» СВЧ сигнала и т.д. С другой стороны, применение однослойных СВЧ плат приводит к сложности замены отдельных функциональных узлов. В этих случаях требуется замена всей платы, что экономически и технологически невыгодно.

В этой связи для разрешения указанной проблемы необходима разработка новой технологии построения частотно-селективных СВЧ устройств. Такая технология связана с объемно-модульным их построением, основными достоинствами которого являются: возможность многократного уменьшения габаритных показателей пассивных СВЧ устройств с сохранением их электрических параметров, характерных для традиционной однослойной технологии; реализация принципа декомпозиции многослойной структуры; реализация бесконтактной связи между слоями. Все перечисленные достоинства позволяют реализовать каждую составную часть многослойной конструкции СВЧ устройства в виде конструктивно обособленной и законченной платы, с унифицированными габаритными и присоединительными размерами, а также стандартным способом электромагнитной связи между слоями, позволяющим конструировать из отдельных базовых элементов устройства СВЧ диапазона с заданными электродинамическими характеристиками. Однако, несмотря на перечисленные достоинства объемно-модульной технологии, потенциальные возможности её использования еще не определены из-за наличия проблем разработки соответствующих методик её реализации. В этой связи *актуальной* является разработка методики проектирования объемно-модульных частотно-селективных СВЧ устройств и оценка эффективности её применения.

**Степень разработанности темы исследования** характеризуется следующими основными достижениями. Наиболее известные работы в области разработки пассивных СВЧ устройств, в том числе частотно-селективных СВЧ устройств, связаны с известными отечественными и зарубежными учеными: Д.М. Сазоновым, А.Л. Фельдштейном, Б.И. Гвоздевым, Е.И. Нефёдовым, Дж.Л. Альтманом, Б.А. Беляевым и др. Ведущими фирмами изготовителями указанных устройств являются: Mini-Circuits, Anaren, Murata и др.

При разработке методики проектирования объемно-модульных частотно-селективных СВЧ устройств за основу были взяты исследования, проведенные отечественными учеными: Б.И. Гвоздевым, Е.И. Нефёдовым, Н.В. Дударевым и др. Анализ результатов проведенных ими исследований свидетельствует о том, что в настоящее время не исследована методика проектирования объемно-модульных частотно-селективных СВЧ устройств при использовании схмотехнических аналогий элементов их конструкций.

**Объектом диссертационного исследования** являются объемно-модульные частотно-селективные СВЧ устройства.

**Предметом диссертационного исследования** является методика проектирования объемно-модульных частотно-селективных СВЧ, а также оценка эффективности ее применения.

#### **Цель и задачи диссертационной работы**

*Цель диссертационной работы:* разработать методику проектирования объемно-модульных частотно-селективных СВЧ устройств и оценить эффективность ее применения.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие задачи:

1. Выполнить анализ современного состояния разработки и исследования частотно-селективных СВЧ устройств. Обосновать актуальность темы диссертации и сформулировать основное направление её исследования.

2. Разработать методику проектирования объемно-модульных частотно-селективных СВЧ устройств. Провести исследование базового конструктивного элемента объемно-модульных частотно-селективных СВЧ устройств – многослойного полосково-щелевого перехода, используя методы математического, схемотехнического, компьютерного моделирования и эксперимента.

3. На основании разработанной методики проектирования объемно-модульных частотно-селективных СВЧ устройств выполнить её апробацию на примере пассивных составных частей антенно-фидерного тракта инфокоммуникационных систем различного назначения.

**Научная новизна** работы состоит в следующем:

1. Методика проектирования объемно-модульных частотно-селективных СВЧ устройств, базовым структурным элементом которой является многослойный полосково-щелевой переход, в отличие от существующих методик проектирования аналогичных по конструктивному исполнению устройств, основана на использовании схемотехнических аналогий элементов их конструкций и обеспечивает погрешность расчета электрических и конструктивных параметров не более 13 % в сравнении с другими методиками, основанными на использовании специализированных программ электродинамического моделирования.

2. Математическая модель электромагнитной связи в многослойном полосково-щелевом переходе, основанная на матричном представлении его эквивалентной схемы, в отличие от ранее разработанных, позволяет получить математические выражения, устанавливающие зависимости для: частот, соответствующих нулевым значениям функции коэффициента отражения; частот и амплитуд экстремумов функции коэффициента отражения, а также частот и амплитуд пульсаций функции коэффициента передачи многослойного полосково-щелевого перехода от волновых сопротивлений его резонаторов.

3. Конструкция многослойного полосково-щелевого перехода в отличие от конструкции известного объёмного полосково-щелевого перехода, позволяет реализовать режимы возбуждения первой, второй и третьей мод его щелевого резонатора, что обеспечивает увеличение ширины полосы частот согласования с антенно-фидерным трактом (коэффициент отражения менее - 10 дБ) на 20 % по сравнению с конструкцией при одномодовом возбуждении щелевого резонатора. Это определяется появлением дополнительных нулевых значений в функции коэффициента отражения от частоты. При этом расположение полосковых резонаторов должно соответствовать отличной от нуля амплитуде напряженности электрического поля вдоль щелевого резонатора для каждой из мод.

4. Применение разработанной методики проектирования объемно-модульных частотно-селективных СВЧ устройств, позволило разработать конструкции:

- оригинального объемно-модульного полосно-пропускающего фильтра на основе многослойного полосково-щелевого перехода с несимметричными полосковыми линиями, отличающегося многослойным расположением частотно-селективных звеньев;
- оригинального объемно-модульного частотно-разделительного СВЧ устройства, отличающегося многослойным расположением частотно-селективных звеньев, где связь между общим входом и выходными каналами осуществляется за счет межслойной электромагнитной связи;
- оригинального объемно-модульного частотно-перестраиваемого СВЧ устройства, отличающегося возможностью изменения частоты его резонанса и предназначенного для оценки диэлектрических свойств материалов резонансным методом.

На объемно-модульные частотно-селективные СВЧ устройства, разработанные в рамках апробации методики проектирования по п.1, получены патенты РФ, что подтверждает новизну технических решений.

**Теоретическая значимость** результатов работы состоит в разработке методики проектирования объемно-модульных частотно-селективных СВЧ устройств на основе применения схмотехнических аналогий элементов их конструкций.

**Практическая значимость** результатов диссертации заключается в том, что:

- впервые исследована схмотехническая модель базового структурного элемента объемно-модульной технологии: многослойный полосково-щелевой переход. При этом показана хорошая сходимость результатов схмотехнического моделирования с результатами компьютерного моделирования и экспериментальными исследованиями;
- впервые применена методика проектирования объемно-модульных частотно-селективных СВЧ устройств при разработке: широкополосного полосно-пропускающего фильтра на основе многослойного полосково-щелевого перехода с симметричными полосковыми линиями; широкополосного полосно-пропускающего фильтра на основе многослойного полосково-щелевого перехода с несимметричными полосковыми линиями; частотно-разделительного СВЧ устройства с объемно-модульным расположением частотно-селективных звеньев (каналов); частотно-перестраиваемого СВЧ устройства на основе многослойной полосково-щелевой технологии, предназначенного для оценки диэлектрических свойств СВЧ материалов;
- применение разработанной методики позволяет проектировать объемно-модульные частотно-селективные СВЧ устройства при проведении опытно-конструкторских разработок без использования дорогостоящих специализированных программ решения электродинамических задач.

**Методология и методы диссертационного исследования**

При теоретическом исследовании объемно-модульных частотно-селективных СВЧ устройств использовались методы электродинамики, в том числе, теория длинных линий, матричное представление параметров СВЧ многополюсников, а также методы теории электрических цепей.

Корректность разработанной методики проектирования объемно-модульных частотно-селективных СВЧ устройств подтверждена результатами компьютерного моделирования при использовании специализированных программ электродинамического моделирования, а также данными натуральных экспериментов, полученных с помощью векторных анализаторов цепей OBZOR TR1300/1, CABAN R180-01.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Методика проектирования объемно-модульных частотно-селективных СВЧ устройств включает следующие этапы: декомпозиция (разбиение) конструкции прототипа разрабатываемого СВЧ устройства на функционально законченные блоки, каждый из которых реализуется в отдельно взятом слое многослойной конструкции; разработка эквивалентных схем для каждого из функциональных блоков и последующее их объединение в общую эквивалентную схему разрабатываемого устройства; моделирование эквивалентной схемы разрабатываемого устройства; сравнительная оценка полученных результатов моделирования с требованиями, предъявляемыми к разрабатываемому СВЧ устройству; корректировка параметров элементов эквивалентной схемы для достижения требуемых характеристик. По результатам схематехнического моделирования выполняется пересчет элементов эквивалентной схемы в конструктивные элементы разрабатываемого СВЧ устройства с учетом особенностей его построения. Методика проектирования частотно-селективных СВЧ устройств, основанная на схематехнических аналогиях элементов их конструкций, в отличие от существующих методик позволяет осуществлять процесс разработки объемно-модульных СВЧ устройств с электромагнитной связью между их слоями.

2. Математическая модель электромагнитной связи в многослойном полосково-щелевом переходе, основанная на матричном представлении его эквивалентной схемы, позволяет оценить частоты, соответствующие нулевым значениям функции коэффициента отражения; частоты и амплитуды экстремумов функции коэффициента отражения, а также частоты и амплитуды пульсаций функции коэффициента передачи.

3. Симметричное смещение полосковых резонаторов относительно центра щелевого резонатора определяет количество возбуждаемых мод последнего. Такая конструкция многослойного полосково-щелевого перехода позволяет осуществить возбуждение первой, второй и третьей мод его щелевого резонатора, направленное на увеличение ширины полосы частот согласования с антенно-фидерным трактом (коэффициент отражения менее -10 дБ) на 20 % по сравнению с конструкцией при одномодовом возбуждении щелевого резонатора.

4. Методика проектирования объемно-модульных частотно-селективных СВЧ устройств по п.1, основанная на применимости схематехнических аналогий элементов их конструкции, позволяет осуществлять их разработку, параметры которых сопоставимы с результатами проектирования указанных устройств при использовании специализированных программ электродинамического моделирования. Погрешность определения основных электрических параметров исследуемых СВЧ устройств составляет не более 13 %.

**Достоверность защищаемых положений и результатов диссертационной работы** основывается на применении методов математического и компьютерного анализа, получивших экспериментальное подтверждение при использовании макетов разработанных объемно-модульных частотно-селективных СВЧ устройств. Достоверность экспериментальных результатов обеспечена применением поверенного векторного анализатора цепей. Результаты исследований прошли апробацию на международных конференциях и опубликованы в рецензируемых научных журналах.

#### **Апробация результатов работы и публикации**

Материалы, представленные в диссертационной работе, прошли апробацию на 8 конференциях различных уровней:

Международная конференция «VII International Conference «Engineering & Telecommunication — En&T-2020», Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Москва; Международная конференция «2021 IEEE Ural-Siberian Conference on Biomedical Engineering, Radioelectronics and

Information Technology (USBREIT)», Екатеринбург; Международная конференция «2021 IEEE 22nd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM)», Алтай; Международная конференция «VIII International Conference «Engineering & Telecommunication — En&T-2021», Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Москва; Международная конференция «Antenna Design and Measurement International Conference 2021» (ADMInC'21), Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»), Санкт-Петербург; 64-я Всероссийская научная конференция МФТИ, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Москва; Тринадцатая научная конференции аспирантов и докторантов, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Челябинск; Четырнадцатая научная конференции аспирантов и докторантов, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Челябинск.

#### **Внедрение результатов исследования**

Результаты диссертационного исследования использованы при реализации гранта РФФИ 20-43-740006, а также рекомендованы для внедрения в учебный и производственный процессы.

#### **Соответствие диссертации паспорту научной специальности**

Полученные в диссертации научные результаты соответствуют пунктам 2 и 9 из перечня областей исследований для специальности 2.2.14. Антенны, СВЧ устройства и их технологии согласно её паспорту:

пункту 2 – Исследование характеристик антенн и микроволновых устройств для их оптимизации и модернизации, что позволяет осваивать новые частотные диапазоны, обеспечивать электромагнитную совместимость, создавать высокоэффективную технологию и т. д.;

пункту 9 – Разработка методов автоматизированного проектирования и оптимизации антенных систем и микроволновых устройств широкого применения.

#### **Публикации**

По теме диссертационного исследования опубликовано 23 научных работы, в том числе 14 статей в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, из них 7 работ — в изданиях, входящих в международную реферативную базу данных, систему цитирования Scopus; 4 патента РФ на разработанные устройство и полезные модели.

**Сведения о личном вкладе автора.** Все результаты, представленные в диссертационной работе, получены при личном участии автора диссертации.

#### **Структура и объем диссертационной работы**

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списков сокращений и литературы, и приложений. Общий объем диссертационной работы составляет 172 страницы, 123 рисунка, 22 таблицы и 2 приложения.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность разработки методики проектирования объемно-модульных частотно-селективных СВЧ устройств для применения в составе современных радиотехнических систем. Сформулированы цель и основные задачи диссертационного исследования; научная новизна; положения, выносимые на защиту; сведения о теоретической и практической значимости полученных результатов, а также методологические подходы, используемые при выполнении исследования.

**В первой главе** представлен обзор современного состояния проблемы применения частотно-селективных СВЧ устройств в радиотехнических системах. На примере приемно-передающего СВЧ модуля представлено функциональное назначение таких частотно-селективных СВЧ устройств как: полосно-пропускающие фильтры, фильтры промежуточной частоты, частотно-разделительные устройства. Определены основные технологии их реализации, а также указаны преимущества и недостатки каждой из перечисленных технологий. Приведены основные принципы объемно-модульного построения СВЧ устройств, в том числе перечислены основные их достоинства и недостатки. Сформулированы основное направление диссертационного исследования и задачи для достижения поставленной цели.

**Во второй главе** представлены результаты разработки методики проектирования объемно-модульных частотно-селективных СВЧ устройств. В качестве центрального объекта исследования принят многослойный полосково-щелевой переход, обеспечивающий электромагнитную связь между слоями многослойной конструкции устройства. Разработана и исследована эквивалентная схема многослойного полосково-щелевого перехода. Обосновано применение математической модели электромагнитной связи в конструкции многослойного полосково-щелевого перехода. Представлены результаты экспериментального исследования его макета. Исследованы одномодовый и многомодовый режимы работы многослойного полосково-щелевого перехода, позволяющие расширить его полосу согласования с антенно-фидерным трактом. Проанализированы распределения электромагнитных полей полосково-щелевого перехода при его одномодовом и многомодовом режимах работы.

*Разработанная методика проектирования объемно-модульных частотно-селективных СВЧ устройств включает следующие этапы:* декомпозиция (разбиение) конструкции прототипа разрабатываемого СВЧ устройства на функционально законченные блоки, каждый из которых реализуется в отдельно взятом слое многослойной конструкции; разработка эквивалентных схем для каждого из функциональных блоков и последующее их объединение в общую эквивалентную схему разрабатываемого устройства; моделирование эквивалентной схемы разрабатываемого устройства; сравнительная оценка полученных результатов моделирования с требованиями, предъявляемыми к разрабатываемому СВЧ устройству; корректировка параметров элементов эквивалентной схемы для достижения требуемых характеристик. По результатам схемотехнического моделирования выполняется пересчет элементов эквивалентной схемы в конструктивные элементы разрабатываемого СВЧ устройства с учетом особенностей его построения.

*В основу решения задачи исследования базового конструктивного элемента объемно-модульной технологии – многослойного полосково-щелевого перехода* положено обоснование его адекватной эквивалентной схемы (рисунки 1, 2) и проведение сравнительной оценки результатов её схемотехнического моделирования с результатами моделирования указанного перехода при использовании специализированного программного обеспечения и эксперимента.

Конструкция многослойного полосково-щелевого перехода (рисунки 1, 2) представляет собой двухпортовое СВЧ устройство, включающее в себя: две полосковых линии с обрывом на конце; металлическое основание с вырезанным в нем щелевым резонатором, расположенным перпендикулярно полосковым линиям; диэлектрические основания. Длина щелевого резонатора составляет половину длины волны на центральной частоте. При этом полосковые линии пересекаются с проекцией щелевого резонатора и заканчиваются обрывом на расстоянии четверти длины волны от места пересечения. Участок каждой полосковой линии от места пересечения с проекцией щелевого резонатора и до места обрыва образует полосковый резонатор. Для



подключения элементов антенно-фидерного тракта используются СВЧ разъемы. Соединение диэлектрических оснований между собой осуществляется за счет механических креплений. Описанная выше конструкция позволяет осуществлять частотно-селективную передачу СВЧ сигнала с одной полосковой линии на другую посредством возбуждения щелевого резонатора, расположенного между ними.

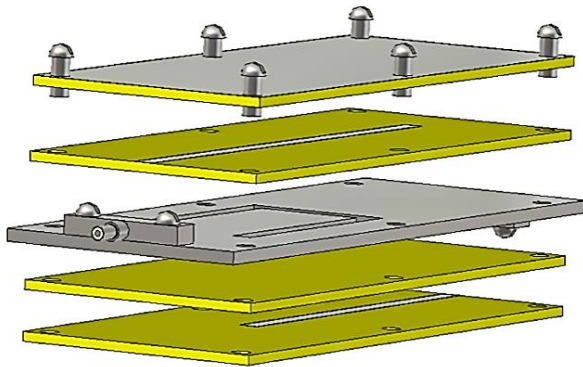


Рисунок 1 – Многослойный полосково-щелевой переход с симметричными полосковыми линиями

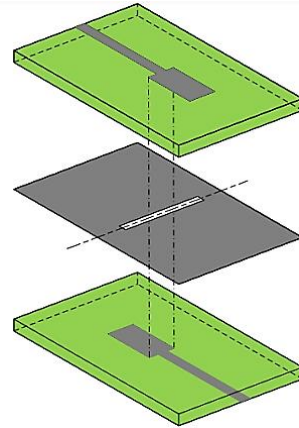


Рисунок 2 – Многослойный полосково-щелевой переход с несимметричными полосковыми линиями

Эквивалентная схема указанного перехода (рисунок 3) включает в себя: входную и выходную полосковые линии, которые представлены в виде двухпроводных линий (волновое сопротивление  $Z_{в}$ , электрическая длина  $\theta_1$ ); полосковые резонаторы, которые представлены в виде двухпроводных линий (волновое сопротивление  $Z_{пр}$ , электрическая длина  $\theta_2$ ) с емкостью  $C_{хх}$  на конце, учитывающей краевой эффект разомкнутого конца полоскового резонатора; щелевой резонатор, который представлен в виде параллельного включения двух двухпроводных линий (волновое сопротивление  $Z_{щр}$ , электрическая длина  $\theta_3$ ) с коротким замыканием на конце; трансформаторы с коэффициентом трансформации  $N_1:1$ .

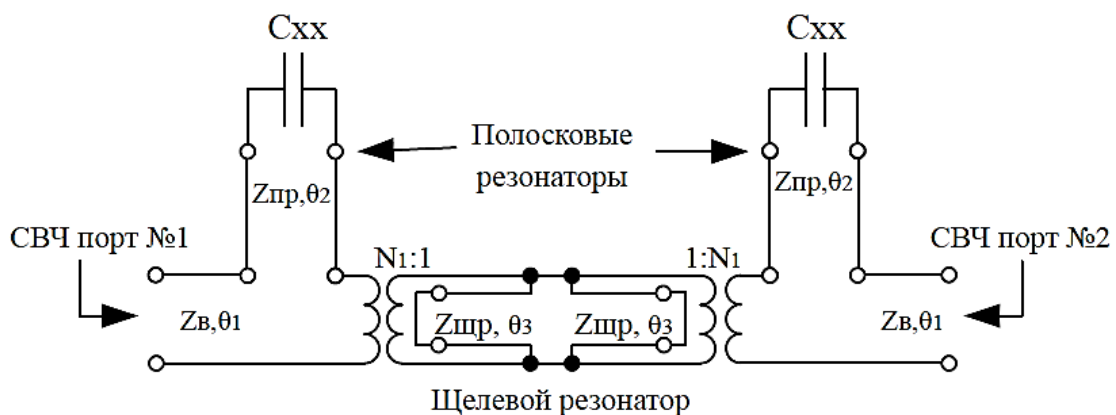


Рисунок 3 – Эквивалентная схема многослойного полосково-щелевого перехода

Из рисунка 3 следует, что эквивалентная схема многослойного полосково-щелевого перехода представляет собой каскадное соединение четырехполюсников, каждый из которых характеризуется своей матрицей А-параметров. Результирующая матрица А-параметров  $[A_{\Sigma}]$  определяется согласно выражению (1):

$$[A_{\Sigma}] = [A_1] \times [A_2] \times [A_3] \times [A_4] \times [A_5], \quad (1)$$

где  $[A_1]$ ,  $[A_5]$  – матрицы А-параметров полосковой линии,  $[A_2]$ ,  $[A_4]$  – матрицы А-параметров полоскового резонатора,  $[A_3]$  – матрица А-параметров щелевого резонатора.

При исключении из выражения (1) матриц  $[A_1]$ ,  $[A_5]$ , как не влияющих на амплитудно-частотные характеристики четырехполюсников, а также при: 1) равенстве электрической длины полосковых резонаторов и электрической длины половины щелевого резонатора ( $\theta = \theta_2 = \theta_3$ ); 2) нормированных относительно 50 Ом волновых сопротивлений полосковых и щелевого резонаторов; 3) значении коэффициента трансформации  $N_1=1$ , получено следующее выражение для матрицы А-параметров  $[A_{\Sigma}]$ :

$$[A_{\Sigma}] = \begin{bmatrix} 1 - \frac{2z_{\text{НПР}}}{z_{\text{НЦР}}} \text{ctg}^2 \theta & \frac{2z_{\text{НПР}}}{j} \text{ctg} \theta - \frac{2z_{\text{НПР}}^2}{jz_{\text{НЦР}}} \text{ctg}^3 \theta \\ \frac{2}{jz_{\text{НЦР}}} \text{ctg} \theta & 1 - \frac{2z_{\text{НПР}}}{z_{\text{НЦР}}} \text{ctg}^2 \theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

При использовании (2) получены выражения (3, 4), определяющие частоты, которые соответствуют нулевым значениям функции коэффициента отражения  $S_{11}$ :

$$\text{ctg} \theta = 0 \quad (3)$$

$$\text{ctg} \theta = \pm \frac{\sqrt{z_{\text{НПР}} z_{\text{НЦР}} - 1}}{z_{\text{НПР}}} \quad (4)$$

Из (3) следует, что одно нулевое значение функции коэффициента отражения  $S_{11}$  будет на центральной частоте ( $\theta = \pi/2$ ). Еще два нулевых значения определяются согласно выражению (4) при выполнении условий:  $z_{\text{НПР}} z_{\text{НЦР}} > 1$ ,  $z_{\text{НПР}} > 0$ . Таким образом, в функции коэффициента отражения  $S_{11}$  многослойного полосково-щелевого перехода может наблюдаться три нулевых значения.

Частоты экстремумов функции коэффициента отражения  $S_{11}$  ( $\frac{\partial S_{11}(\theta)}{\partial \theta} = 0$ ) определяются согласно выражению (5):

$$\text{ctg} \theta = \pm \frac{1}{z_{\text{НПР}}} \sqrt{\frac{z_{\text{НПР}} z_{\text{НЦР}} - 1}{3}} \quad (5)$$

Полученные выражения (3–5) позволяют проводить анализ следующих параметров амплитудно-частотной характеристики многослойного полосково-щелевого перехода:

- 1) Частот, соответствующих нулевым значениям функции коэффициента отражения  $S_{11}$ ;
- 2) Частот и амплитуд экстремумов функции коэффициента отражения  $S_{11}$ ;
- 3) Частот и амплитуд пульсаций функции коэффициента передачи  $S_{21}$  (используя закон сохранения энергии для пассивного СВЧ устройства).

Из выражений (3–5) также следует, что все вышеперечисленные параметры амплитудно-частотной характеристики многослойного полосково-щелевого перехода определяются соотношением волновых сопротивлений его полосковых и щелевого резонаторов.

На этапе перехода от элементов эквивалентных схем к элементам конструкции выполняется пересчет значений волнового сопротивления и электрической длины длинных линий, используемых при схемотехническом моделировании в геометрические размеры элементов-резонаторов (длина, ширина). В составе конструкций многослойного

полосково-щелевого перехода можно выделить следующие основные конструктивные элементы: симметричные и несимметричные полосковые линии, щелевую линию в составе двухслойной диэлектрической структуры, экранированную щелевую линию. Полосковые линии являются хорошо изученными и не требуют проведения дополнительных исследований. В рамках настоящей работы было проведено компьютерное моделирование щелевой линии. Результаты моделирования показали, что волновое сопротивление щелевой линии в составе двухслойной диэлектрической структуры изменяется в пределах от 40 Ом до 60 Ом при отношении ширины щелевой линии ( $W$ ) к толщине подложки ( $h$ ): от 0,1 до 0,33 при использовании материала ФАФ-4Д толщиной 1 мм; и от 0,25 до 0,6 при использовании материала Arlon AD1000 толщиной 1,27 мм. Из результатов моделирования экранированной щелевой линии было выявлено, что величина её волнового сопротивления более чем на порядок меньше волнового сопротивления щелевой линии передачи в составе двухслойной диэлектрической структуры и изменяется в пределах от 3 Ом до 15 Ом. Её значение зависит от ширины экранов, толщины диэлектрических подложек, а также от их материала.

При исследовании многослойного полосково-щелевого перехода с симметричными полосковыми линиями проведены его схемотехническое и компьютерное моделирования, а также экспериментальное исследование его макета (рисунок 4). При схемотехническом моделировании были заданы следующие параметры: центральная частота 1400 МГц, волновое сопротивление полосковых резонаторов 50 Ом, длина щелевого резонатора на центральной частоте  $\lambda/2$ , длина полосковых резонаторов на центральной частоте  $\lambda/4$ , волновое сопротивление щелевой линии 6 Ом. При компьютерном моделировании были использованы следующие исходные данные: материал подложек на основе фольгированного диэлектрика Arlon AD350 толщиной 1,524 мм; размеры полосковых линий составляют (65 × 1,6) мм; длина П-образного щелевого резонатора 60 мм; ширина резонатора 0,8 мм; длина отрезка полоскового резонатора 26 мм; размер оснований (100 × 40) мм. Результаты моделирований и экспериментальные данные представлены в виде графических зависимостей S-параметров в диапазоне частот (рисунок 5).

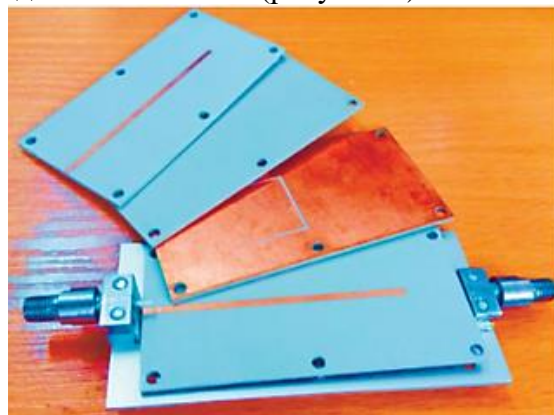


Рисунок 4 – Фотографии макета многослойного полосково-щелевого перехода с симметричными полосковыми линиями

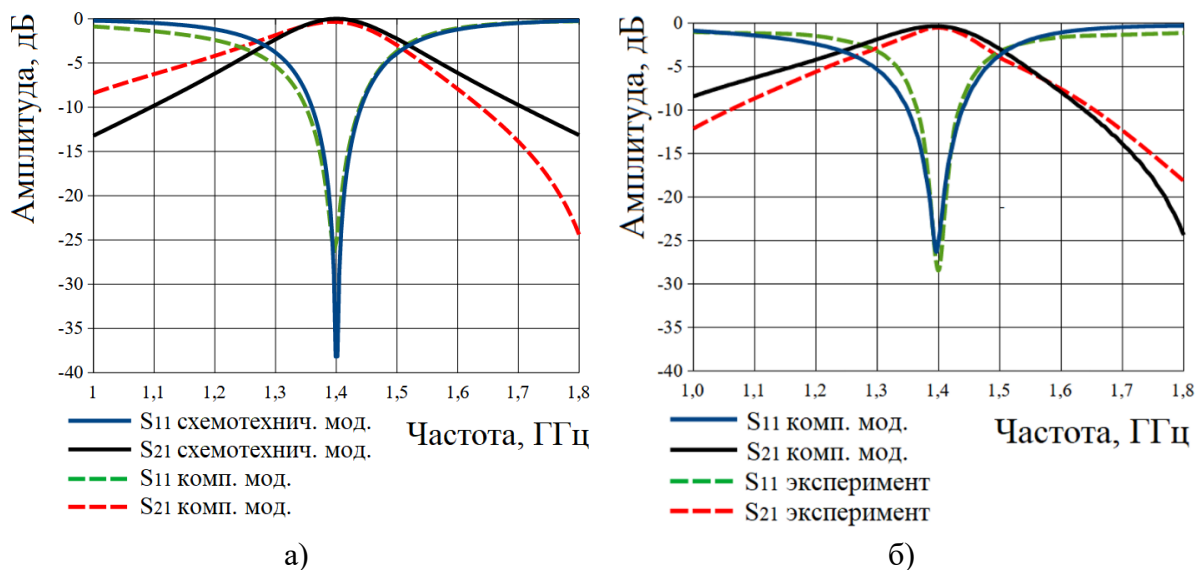


Рисунок 5 – Графические зависимости S-параметров в диапазоне частот, полученные по результатам: а) схемотехнического и компьютерного моделирования, б) экспериментального исследования и компьютерного моделирования

Из анализа представленных графических зависимостей (рисунок 5) следует, что отклонение границы полосы пропускания, полученной по результатам схемотехнического моделирования от границы полосы пропускания, полученной по результатам компьютерного моделирования, не превышает 0,03 ГГц (2,1 % относительно центральной частоты). Отклонение границы полосы пропускания, полученной по результатам экспериментального исследования от границы полосы пропускания, полученной по результатам компьютерного моделирования, не превышает 0,04 ГГц (2,8 % относительно центральной частоты). Таким образом, эквивалентная схема многослойного полосково-щелевого перехода с симметричными полосковыми линиями является корректной, что подтверждается результатами компьютерного моделирования и экспериментальными данными. Для обеспечения широкополосности амплитудно-частотной характеристики многослойного полосково-щелевого перехода необходимо использование щелевого резонатора в составе двухслойной диэлектрической структуры с несимметричными полосковыми линиями.

При исследовании эквивалентной схемы многослойного полосково-щелевого перехода с несимметричными полосковыми линиями проведено её схемотехническое моделирование. По результатам моделирования были определены следующие зависимости: 1) с увеличением волнового сопротивления щелевого резонатора увеличивается ширина полосы пропускания по уровню -3 дБ коэффициента передачи  $S_{21}$  (рисунок 6 а); 2) с увеличением волнового сопротивления полосковых резонаторов уменьшается ширина полосы пропускания по уровню -3 дБ коэффициента передачи  $S_{21}$  (рисунок 6 б).

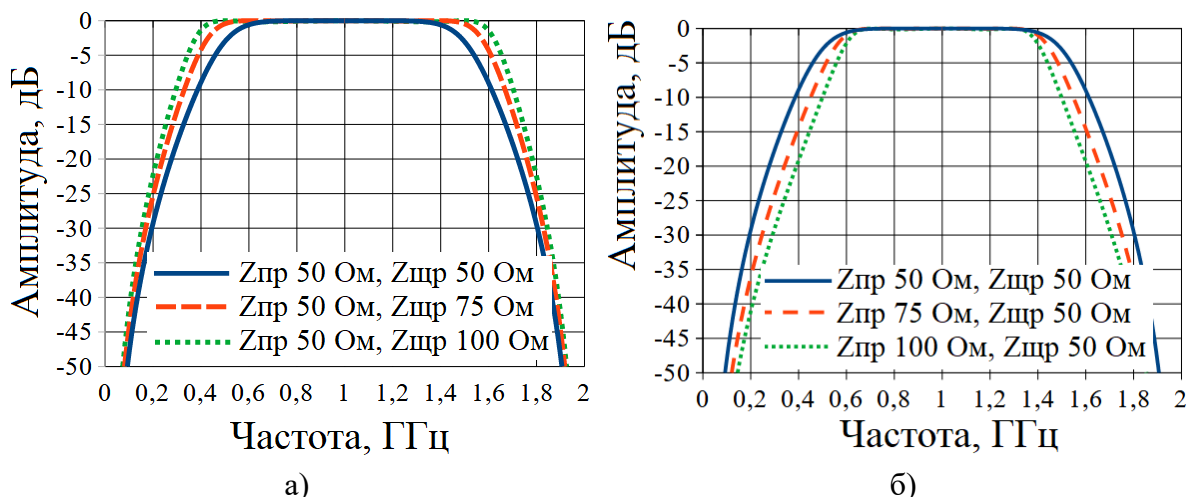


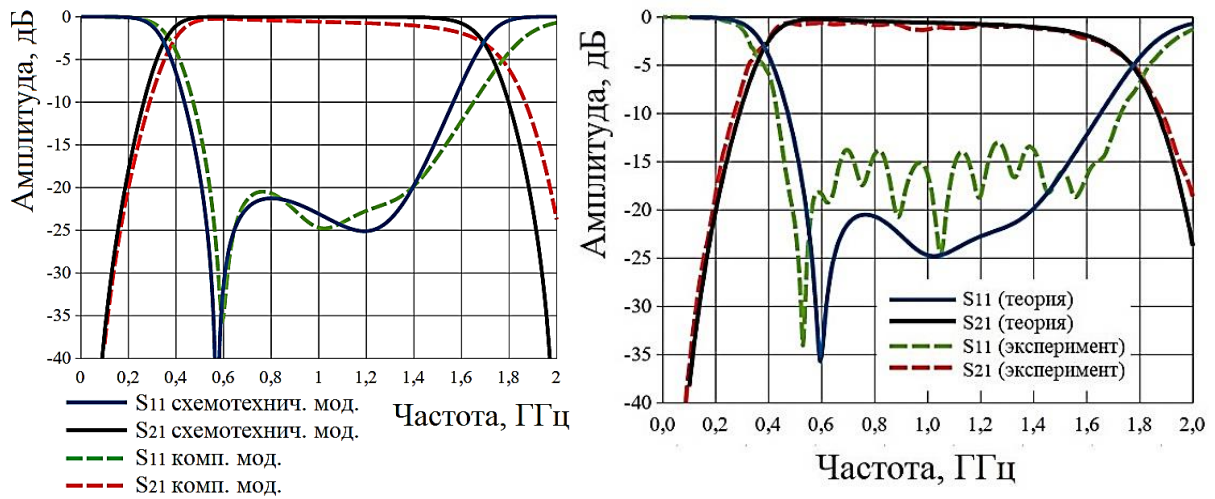
Рисунок 6 – Графические зависимости коэффициента передачи ( $S_{21}$ ) многослойного полосково-щелевого перехода в диапазоне частот при: а) фиксированном волновом сопротивлении полосковых резонаторов, б) фиксированном волновом сопротивлении щелевого резонатора

Для подтверждения полученных результатов были проведены экспериментальное исследование макетов, а также компьютерное моделирование. При компьютерном моделировании были использованы следующие исходные данные: материал оснований ФАФ-4Д толщиной 1 мм; центральная частота 1000 МГц; волновое сопротивление полосковых резонаторов 33,5 Ом (ширина 5 мм); электрическая длина полосковых резонаторов с учетом краевого эффекта 85 градусов (длина 45 мм); волновое сопротивление щелевого резонатора 60 Ом, 90 Ом, 105 Ом, что соответствует ширине 0,35 мм, 0,7 мм, 1 мм; электрическая длина щелевого резонатора 180 градусов (длина 102 мм). Результаты исследований для случая с волновым сопротивлением щелевого резонатора 90 Ом представлены на рисунке 7. Конструкции макетов печатных плат (рисунок 8) по своим габаритным размерам, а также по размерам основных своих элементов соответствуют моделям, используемым при компьютерном моделировании.

Из анализа представленных графических зависимостей следует, что отклонение границы полосы пропускания составляет не более 0,05 ГГц (5 % относительно центральной частоты). Таким образом, теоретические результаты и заключения на их основе, полученные в процессе исследования эквивалентной схемы многослойного полосково-щелевого перехода с несимметричными полосковыми линиями являются экспериментально подтвержденными. Эквивалентная схема многослойного полосково-щелевого перехода с несимметричными полосковыми линиями является корректной, что подтверждается результатами компьютерного моделирования и экспериментальными данными.

В процессе исследования многослойного полосково-щелевого перехода была определена возможность возбуждения многомодового режима его щелевого резонатора, что позволяет расширить диапазон рабочих частот и увеличить прямоугльность его амплитудно-частотных характеристик. Для этого требуется обеспечить необходимое положение полосковых резонаторов относительно центра щелевого резонатора. Эквивалентная схема многослойного полосково-щелевого перехода с возбуждением многомодового режима щелевого резонатора (рисунок 9) имеет отличие от ранее исследованной (рисунок 3). Щелевой резонатор на этой схеме представлен как два короткозамкнутых отрезка линии передачи, разделенных двухпроводной линией, длина которой определяется расстоянием между полосковыми резонаторами.

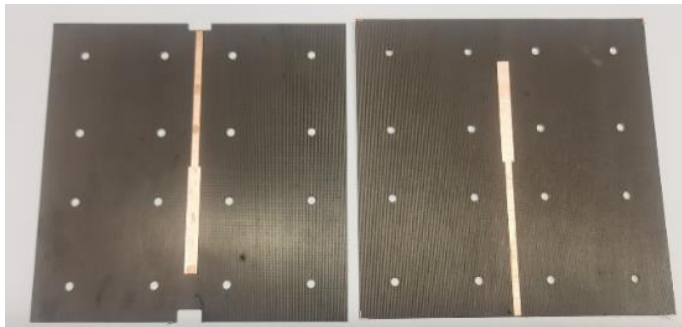




а)

б)

Рисунок 7 – Графические зависимости S-параметров многослойного полосково-щелевого перехода ( $Z_{пр}=33,5 \text{ Ом}$ ,  $Z_{щр}=90 \text{ Ом}$ ) в диапазоне частот, полученные по результатам: а) схематехнического и компьютерного моделирования, б) экспериментального исследования и компьютерного моделирования



а)



б)

Рисунок 8 – Фотографии макетов печатных плат с: а) полосковыми резонаторами, б) щелевыми резонаторами разной ширины (0,35 мм, 0,7 мм, 1 мм)

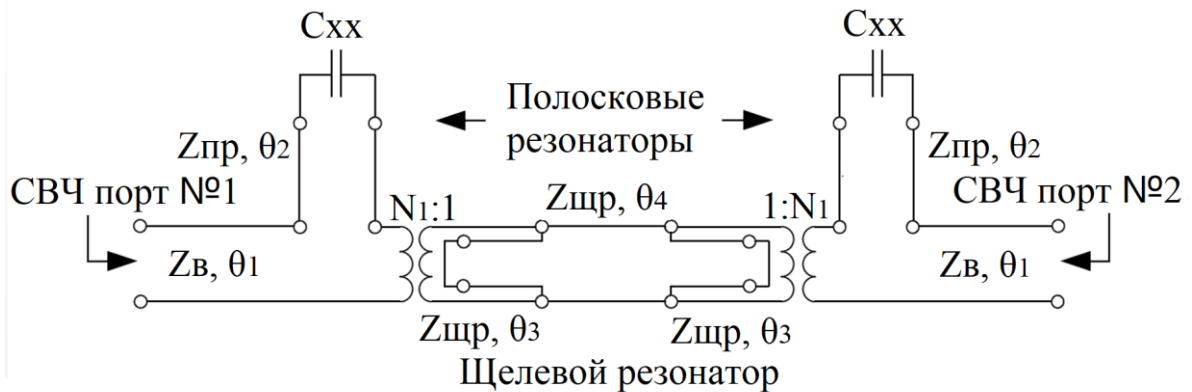


Рисунок 9 – Эквивалентная схема многослойного полосково-щелевого перехода при многомодовом возбуждении его щелевого резонатора

Возбуждение первых трех мод щелевого резонатора обеспечивается при смещении каждого из полосковых резонаторов на расстояние четверти длины щелевого резонатора относительно его центра (расстояние между полосковыми резонаторами – половина длины щелевого резонатора). Длина щелевого резонатора соответствует половине длины волны, соответствующей частоте основной его моды. Распределение напряженности электрического поля для каждой из мод, полученное по результатам компьютерного моделирования, представлено на рисунке 10. Фотография макета многослойного полосково-щелевого перехода с возбуждением первых трех мод щелевого резонатора представлена на рисунке 11 а. Результаты схематехнического и компьютерного моделирования, а также экспериментальные данные представлены на рисунке 11 б, в.

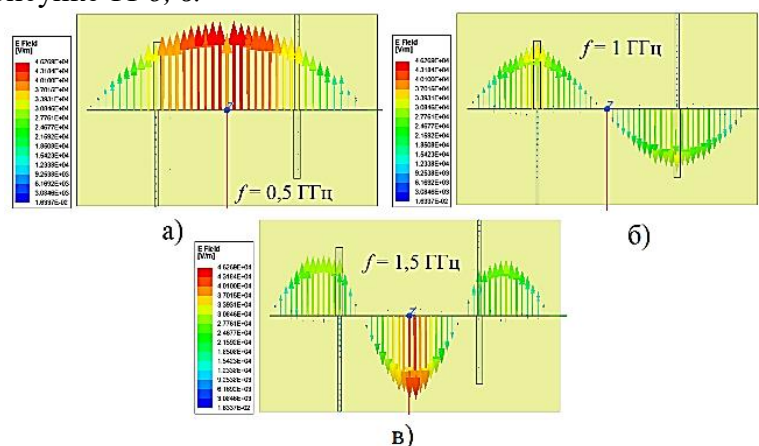


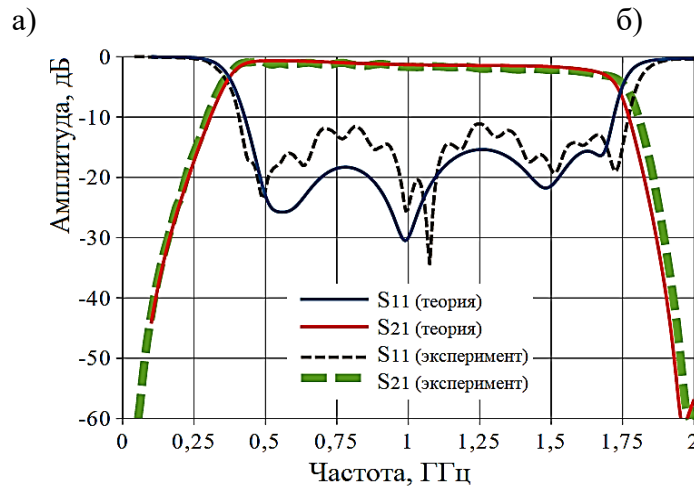
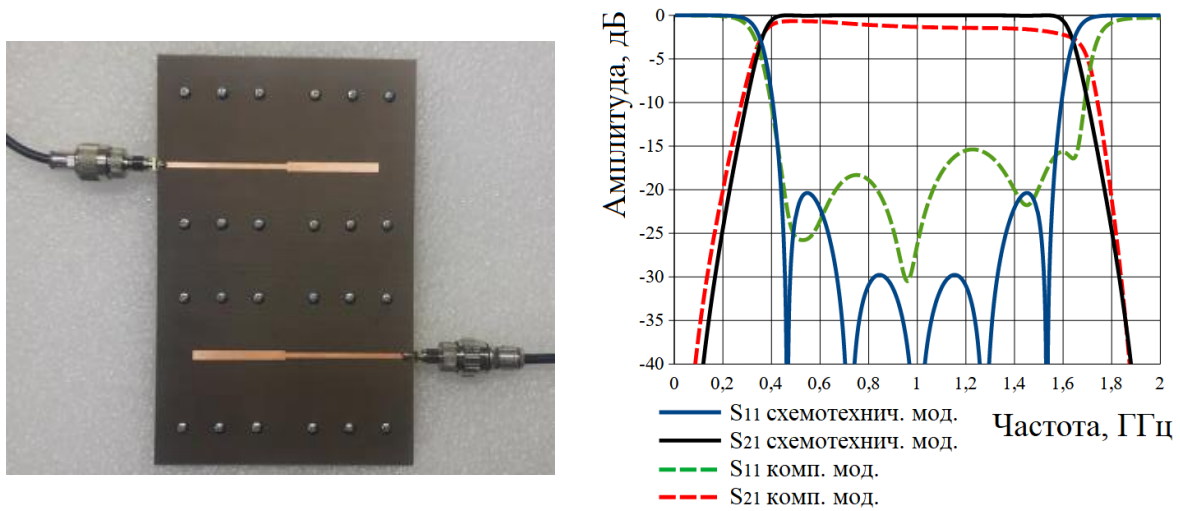
Рисунок 10 – Распределение напряженности электрического поля вдоль щелевого резонатора на частоте: а) 0,5 ГГц, б) 1 ГГц, в) 1,5 ГГц

Из анализа результатов моделирования следует, что в функции коэффициента отражения от частоты образуется два дополнительных нулевых значения, что позволяет расширить полосу согласования с антенно-фидерным трактом (по уровню коэффициента отражения менее -10 дБ) на 20 %. Из представленных распределений напряженности электрического поля вдоль щелевого резонатора (рисунок 10) можно сделать выводы о том, что оно имеет синусоидальный характер с различным периодом его повторения в зависимости от частоты. Это соответствует характеру распределения электрического поля вдоль двухпроводной линии с коротким замыканием на конце. Равенство нулю амплитуды напряженности электрического поля в непосредственной близости к коротким краям щелевого резонатора объясняется выполнением граничных условий для касательной составляющей электрического поля на поверхности металла.

Основной итог решения задачи разработки методики проектирования объемно-модульных частотно-селективных СВЧ устройств и исследования базового конструктивного их элемента – многослойного полосково-щелевого перехода состоит в том, что обоснованы основные её положения; теоретически и экспериментально доказана возможность применения схематехнических аналогий для проектирования объемно-модульных СВЧ устройств, где электромагнитная связь между слоями обеспечивается при применении их базового конструктивного элемента – многослойного полосково-щелевого перехода.

**В третьей главе** представлены результаты проектирования объемно-модульных частотно-селективных СВЧ устройств при использовании разработанной методики. При этом разработаны: широкополосный полосно-пропускающий фильтр на основе многослойного полосково-щелевого перехода с симметричными полосковыми линиями; широкополосный полосно-пропускающий фильтр на основе многослойного полосково-щелевого перехода с несимметричными полосковыми линиями; частотно-разделительное СВЧ устройство с объемно-модульным расположением частотно-

селективных звеньев (каналов); частотно-перестраиваемое СВЧ устройство, предназначенное для оценки диэлектрических свойств СВЧ материалов.



в)

Рисунок 11 – а) Фотография макета многослойного полосково-щелевого перехода с возбуждением первых трех мод щелевого резонатора; графические зависимости S-параметров в диапазоне частот, полученные по результатам: б) схематехнического и компьютерного моделирования; в) компьютерного моделирования и экспериментального исследования

Конструкция широкополосного полосо-пропускающего фильтра на основе многослойного полосково-щелевого перехода с симметричными полосковыми линиями состоит из двух полосковых линий передачи с П-образными полосковыми резонаторами, расположенными на диэлектрических основаниях один над другим. При этом между диэлектрическими основаниями расположен металлический экран с вырезанным П-образным щелевым резонатором. П-образные полосковые резонаторы перекрещиваются с щелевым резонатором в двух местах и заканчиваются обрывом. Для рассмотренной конструкции широкополосного полосо-пропускающего фильтра проведены схематехническое и компьютерное моделирование, а также экспериментальное исследование его макета.

Из анализа полученных зависимостей S-параметров широкополосного полосо-пропускающего фильтра на основе многослойного полосково-щелевого перехода с симметричными полосковыми линиями следует, что результаты теоретического и



экспериментальных исследований имеют хорошее качественное и количественное согласование друг с другом и отличаются не более чем на 5,5 % относительной ширины полосы пропускания.

*Широкополосный полосно-пропускающий фильтр на основе многослойного полосково-щелевого перехода с несимметричными полосковыми линиями* может быть представлен в виде двух вариантов конструкций: 1) объемной, где частотно-селективные звенья расположены друг над другом на разных диэлектрических основаниях; 2) плоской, где частотно-селективные звенья расположены на одном диэлектрическом основании.

Объемная конструкция полосно-пропускающего фильтра (ППФ) (рисунок 12 а) представляет собой вертикальную объемно-модульную структуру, состоящую из двух многослойных полосково-щелевых переходов, расположенных вертикально один над другим. Волновое сопротивление полосковых резонаторов 50 Ом, волновое сопротивление щелевых резонаторов 50 Ом. Для представленной конструкции ППФ проведены схемотехническое и компьютерное моделирование. Результаты моделирования представлены на рисунке 12 б. Эквивалентная схема ППФ с объемной конструкцией представлена на рисунке 13.

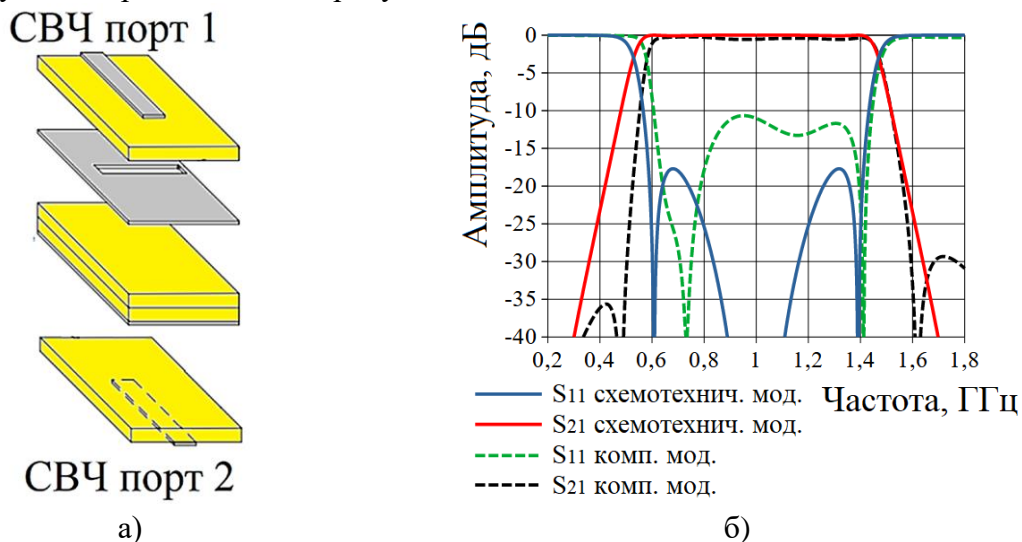


Рисунок 12 – а) ППФ с объемной конструкцией, б) результаты его схемотехнического и компьютерного моделирования

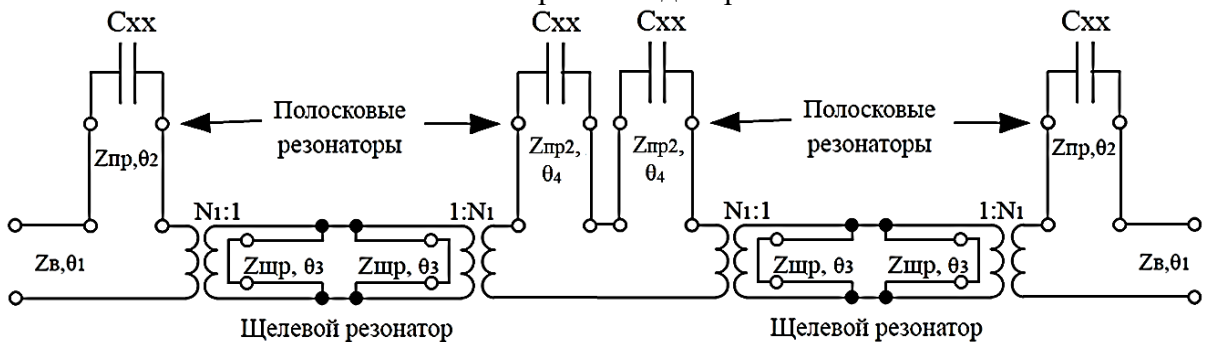


Рисунок 13 – Эквивалентная схема ППФ с объемной конструкцией

*Конструкция частотно-разделительного СВЧ устройства* (рисунок 14 а) представляет собой объемно-модульное устройство с тремя высокочастотными разъемами. При этом в её состав входят: диэлектрические основания, полосковая линия первого канала, общая полосковая линия, полосковая линия второго канала, щелевые резонаторы, выполненные в металлических основаниях. Также в состав конструкции

частотно-разделительного СВЧ устройства входит металлический экран, обеспечивающий развязку между первым и вторым каналами. Для теоретического исследования частотно-разделительного СВЧ устройства разработана его эквивалентная схема (рисунок 14 б), а также проведено компьютерное моделирование. При этом были использованы следующие исходные данные: центральная частота первого канала 1800 МГц; центральная частота второго канала 2450 МГц; длина щелевых резонаторов  $\lambda/2$  на центральной частоте для каждого канала; волновое сопротивление щелевых резонаторов 3 Ом; длина полосковых резонаторов  $\lambda/4$  на центральной частоте для каждого канала; волновое сопротивление полосковых резонаторов 50 Ом.

Результаты схмотехнического и компьютерного моделирования представлены на рисунке 15. Из их анализа следует, что они имеют хорошее качественное и количественное согласование. Также по результатам моделирования получено, что величина коэффициента затухания на центральной частоте каждого из каналов составляет не более 1,2 дБ. Величина электромагнитной развязки между каналами составляет не менее 27 дБ.

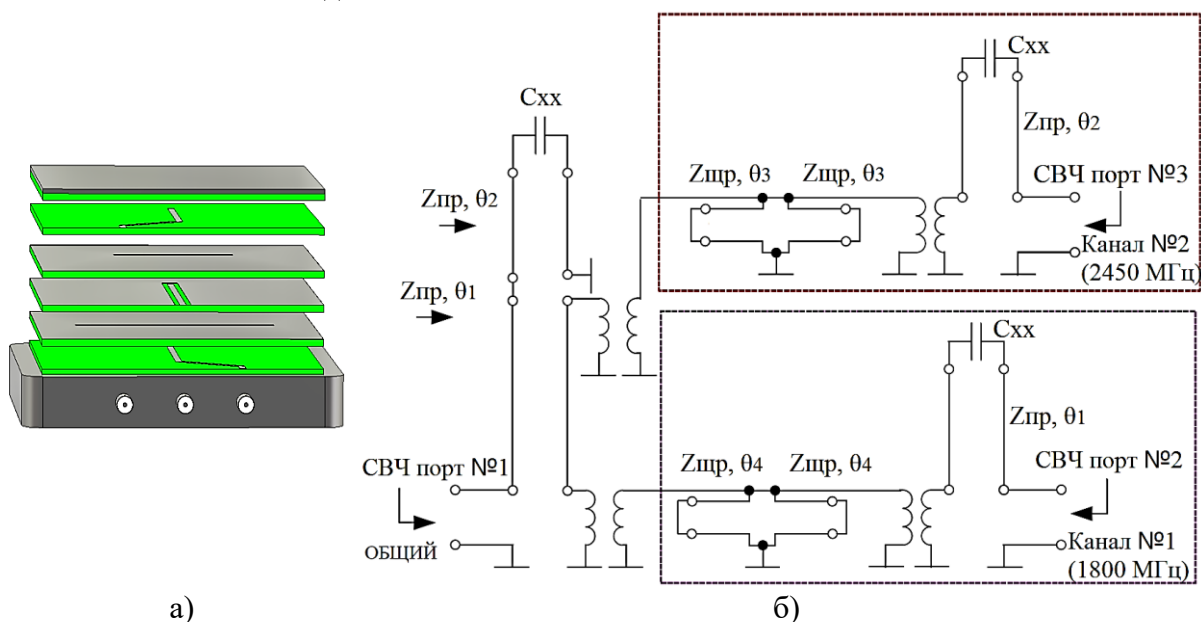


Рисунок 14 – а) Конструкция объемно-модульного частотно-разделительного СВЧ устройства, б) эквивалентная схема

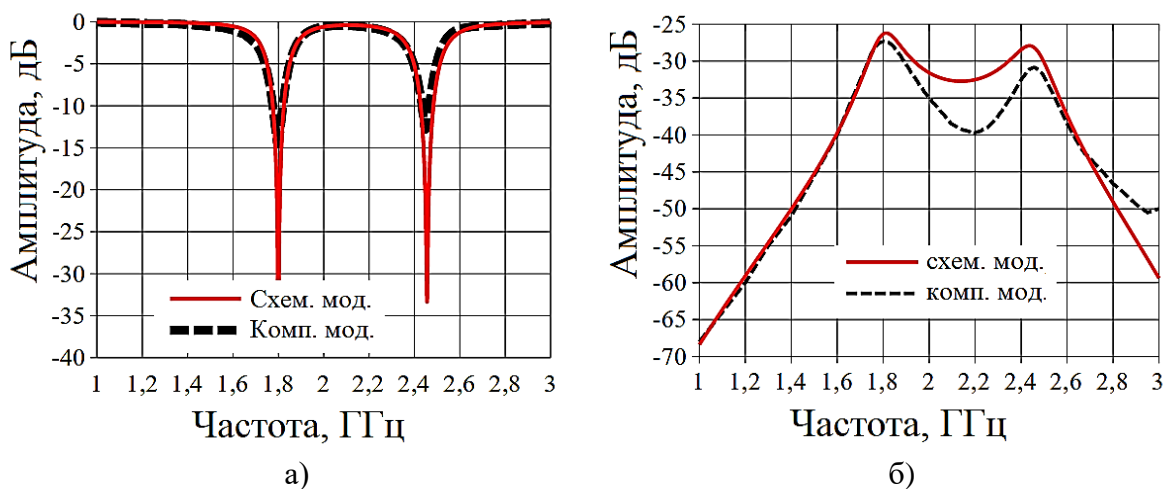
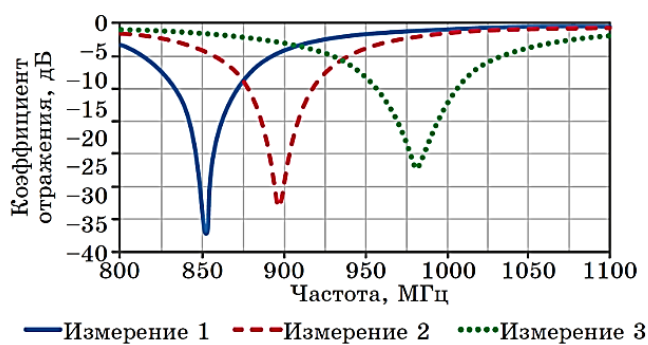


Рисунок 15 – Графические зависимости: а) коэффициента отражения ( $S_{11}$ ) общего СВЧ порта, б) электромагнитной развязки ( $S_{32}$ ) между 1-ым и 2-ым каналами

Конструкция объемно-модульного частотно-перестраиваемого СВЧ устройства для оценки диэлектрических свойств СВЧ материалов основана на применении многослойного полосково-щелевого перехода с П-образным щелевым резонатором (рисунок 1). Отличительной его особенностью от рассмотренных ранее конструкций является наличие проводящей перемычки, расположенной вплотную к металлическому основанию в специальных пазах и электрически замыкающей длинные кромки щелевого резонатора в месте своего размещения. При перемещении перемычки вдоль щелевого резонатора происходит изменение (смещение) частоты резонанса многослойного полосково-щелевого перехода.



а)



б)

Рисунок 16 – а) Графические зависимости коэффициента отражения ( $S_{11}$ ) в диапазоне частот от положения перемычки при заполнении щелевого резонатора порошковым материалом  $\text{BaFe}_{10}\text{Ti}_2\text{O}_{19}$ ; б) экспериментальное исследование макета

Теоретические и экспериментальные исследования с использованием макета СВЧ устройства (рисунок 16 а, б) по оценке диэлектрической проницаемости частично замещенного титаном гексаферрита бария  $\text{BaFe}_{10}\text{Ti}_2\text{O}_{19}$  показали хорошее качественное и количественное совпадение. Полученные результаты оценки диэлектрических свойств частично замещенного титаном гексаферрита бария согласуются с номинальными значениями, полученными методом Николсона-Росса-Вейера (погрешность оценки относительной диэлектрической проницаемости исследуемых материалов составляет не более 5 %).

В **Заключении** диссертации сформулированы достигнутые результаты и основные выводы по работе:

1. Анализ современного состояния проблемы реализации и применения частотно-селективных СВЧ устройств определяет актуальность проведения исследований в части их проектирования на основе объемно-модульной технологии. Преимуществами такой технологии являются: кратное улучшение массогабаритных характеристик пассивных СВЧ устройств, унификация размеров плат, используемых в составе многослойной конструкции, а также бесконтактный способ их связи между собой, за счет которого обеспечивается технологичность изготовления и возможность оперативной замены одного или нескольких слоев в процессе эксплуатации.

2. Разработана методика проектирования объемно-модульных частотно-селективных СВЧ устройств при использовании схемотехнических аналогий элементов их конструкции. Основными этапами ее применения являются: декомпозиция (разбиение) конструкции прототипа разрабатываемого СВЧ устройства на функционально законченные блоки, каждый из которых реализуется в отдельно взятом слое многослойной конструкции; разработка эквивалентных схем для каждого из

функциональных блоков и последующее их объединение в общую эквивалентную схему разрабатываемого устройства; моделирование эквивалентной схемы разрабатываемого СВЧ устройства; сравнительная оценка полученных результатов моделирования с требованиями, предъявляемыми к разрабатываемому СВЧ устройству; корректировка параметров элементов эквивалентной схемы для достижения требуемых характеристик. По результатам схмотехнического моделирования выполняется пересчет элементов эквивалентной схемы в конструктивные элементы разрабатываемого СВЧ устройства с учетом особенностей его построения. Применение разработанной методики проектирования позволяет оптимизировать процесс разработки частотно-селективных СВЧ устройств различного назначения и их конструктивного исполнения.

В рамках представленной выше методики проектирования разработана эквивалентная схема базового элемента объемно-модульной технологии – многослойного полосково-щелевого перехода. На основании разработанной эквивалентной схемы разработана матричная математическая модель многослойного полосково-щелевого перехода. Получены математические выражения, позволяющие провести расчет частот, соответствующих нулевым значениям функции коэффициента отражения, а также оценить ширину амплитудно-частотной характеристики многослойного полосково-щелевого перехода в зависимости от волновых сопротивлений его резонаторов. Верификация математической модели подтверждена схмотехническим и компьютерным моделированием, а также экспериментальными данными. Результаты теоретических исследований, полученных в результате схмотехнического моделирования эквивалентной схемы многослойного полосково-щелевого перехода, согласуются с результатами компьютерного моделирования и экспериментальными данными, полученными на макетах многослойного полосково-щелевого перехода при различных конструктивных его особенностях. Наибольшее отклонение теоретических результатов, полученных при моделировании эквивалентной схемы от экспериментальных данных и результатов компьютерного моделирования составляет не более 13 %.

На основании проведенных исследований установлено:

- основным параметром, влияющим на ширину амплитудно-частотных характеристик многослойного полосково-щелевого перехода, является волновое сопротивление резонаторов. С увеличением волнового сопротивления щелевого резонатора увеличивается ширина амплитудно-частотных характеристик многослойного полосково-щелевого перехода; с увеличением волнового сопротивления полосковых резонаторов – уменьшается;
- в функции коэффициента отражения многослойного полосково-щелевого перехода может наблюдаться три нулевых значения, положение которых определяется соотношением волновых сопротивлений полосковых и щелевого резонаторов;
- частоты и амплитуды экстремумов функции коэффициента отражения многослойного полосково-щелевого перехода определяются соотношением волновых сопротивлений полосковых и щелевого резонаторов;
- амплитуда пульсаций функции коэффициента передачи многослойного полосково-щелевого перехода определяется соотношением волновых сопротивлений полосковых и щелевого резонаторов;
- применение многослойного полосково-щелевого перехода с симметричными полосковыми линиями позволяет разработать частотно-селективные СВЧ устройства с узкополосной амплитудно-частотной характеристикой (полоса пропускания не более 15 %). Применение многослойного полосково-щелевого перехода с несимметричными полосковыми линиями позволяет разработать частотно-селективные СВЧ устройства с

широкополосной амплитудно-частотной характеристикой (полоса пропускания не менее 70 %).

Применение конструкции многослойного полосково-щелевого перехода с режимом возбуждения первой, второй и третьей мод его щелевого резонатора позволяет увеличить ширину полосы частот согласования с антенно-фидерным трактом (коэффициент отражения менее -10 дБ) на 20 % по сравнению с конструкцией при одномодовом возбуждении щелевого резонатора. Это определяется появлением дополнительных нулевых значений в функции коэффициента отражения от частоты. При этом доказано, что расположение полосковых резонаторов должно соответствовать отличной от нуля амплитуде напряженности электрического поля вдоль щелевого резонатора для каждой из мод. Компьютерное моделирование распределения электромагнитных полей многослойного полосково-щелевого перехода показало, что они соответствуют распределениям напряжения и тока в длинных линиях с учетом граничных условий на их конце.

3. Использование разработанной методики проектирования объемно-модульных частотно-селективных СВЧ устройств позволило разработать:

- широкополосный полосно-пропускающий фильтр на основе многослойного полосково-щелевого перехода с симметричными полосковыми линиями с относительной шириной полосы пропускания, близкой к 50 %, относительно значения центральной частоты. Спроектированное частотно-селективное СВЧ устройство может быть использовано в составе помехоустойчивых инфокоммуникационных систем различного назначения;

- широкополосный полосно-пропускающий фильтр на основе многослойного полосково-щелевого перехода с несимметричными полосковыми линиями. Из результатов моделирования следует, что с добавлением частотно-селективного звена в конструкцию многослойного полосково-щелевого перехода уменьшается коэффициент прямоугольности амплитудно-частотных характеристик с 1,44 до 1,23. На представленный широкополосный полосно-пропускающий фильтр получен патент РФ на изобретение устройства, что подтверждает новизну технического решения;

- оригинальное объемно-модульное частотно-разделительное СВЧ устройство на базе двух многослойных полосково-щелевых переходов, характеризующееся развязкой между каналами более 27 дБ. На представленное частотно-разделительное СВЧ устройство получен патент РФ на полезную модель, что подтверждает новизну технического решения;

- оригинальное частотно-перестраиваемое СВЧ устройство для оценки диэлектрических свойств порошковых материалов резонансным методом. При этом погрешность оценки относительной диэлектрической проницаемости исследуемых материалов составляет не более 5 % относительно номинальных значений, полученных методом Николсона-Росса-Вейера. На представленное частотно-перестраиваемое СВЧ устройство получен патент РФ на полезную модель, что подтверждает новизну технического решения.

Разработанные вышеперечисленные частотно-селективные СВЧ устройства на основе объемно-модульной технологии их построения с указанными параметрами свидетельствуют о высокой эффективности примененной методики их проектирования на основе схмотехнических аналогий (отклонение основных электрических и конструктивных параметров не более 13 %) по сравнению с методиками проектирования, основанными на решении электродинамических задач в строгой их постановке.

### Публикации по теме диссертации

*Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ:*

1. Фомин, Д.Г. Определение частотно-селективных параметров объемного полосково-щелевого перехода / Д.Г. Фомин, Н.В. Дударев, С.Н. Даровских // Антенны. – 2020. – № 5 (267). – С. 49–55; 0,4375 п.л./0,37 п.л.
2. Fomin, D.G. Scattering matrix simulation of the volumetric strip-slot transition and estimation of its frequency properties / D.G. Fomin, N.V. Dudarev, S.N. Darovskikh // Journal of Physics: Conference Series. – 2020 – Vol. 1679(2). – P. 1–6; (Scopus); 0,375 п.л./0,3 п.л.
3. Dudarev, N.V. Miniaturization of the volumetric strip-slot transition and investigation of its matrix of S-parameters / N.V. Dudarev, D.G. Fomin, S.N. Darovskikh // 2020 International Conference Engineering and Telecommunication. – 2020. – P. 1–4; (Scopus); 0,25 п.л./0,2 п.л.
4. Фомин, Д.Г. Частотно-перестраиваемое устройство на основе многослойного полосково-щелевого перехода и его применение для измерения диэлектрических свойств материалов / Д.Г. Фомин, Н.В. Дударев, С.Н. Даровских // Ural Radio Engineering Journal. – 2021. – № 5(3). – С. 225–238; 0,875 п.л./0,7 п.л.
5. Фомин, Д.Г. Резонансные свойства многослойного полосково-щелевого перехода и его использование для СВЧ-измерений диэлектрических свойств материалов / Д.Г. Фомин, Н.В. Дударев, С.Н. Даровских, Д.С. Клыгач, М.Г. Вахитов // Радиотехника. – 2021. – Т. 85, № 8. – С. 101–110; 0,625 п.л./0,5 п.л.
6. Фомин, Д.Г. Особенности применения объемно-модульной технологии в проектировании СВЧ электронных устройств / Д.Г. Фомин, Н.В. Дударев, С.Н. Даровских, Д.С. Клыгач, М.Г. Вахитов // Ural Radio Engineering Journal. – 2021 – №5(2). – С. 91–103; 0,8125 п.л./0,56875 п.л.
7. Фомин, Д.Г. Сопоставление значений электродинамических параметров симметричной щелевой линии, полученных разными методами / Д.Г. Фомин, Н.В. Дударев, С.Н. Даровских // Радиотехника. – 2021. – Т. 85, № 4. – С. 138–146; 0,5625 п.л./0,45 п.л.
8. Фомин, Д.Г. Анализ методов измерения диэлектрических свойств материалов в СВЧ диапазоне длин волн / Д.Г. Фомин, Н.В. Дударев, С.Н. Даровских // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. – 2021. – № 6. – С. 1–12; 0,75 п.л./0,6 п.л.
9. Фомин, Д.Г. Сверхширокополосный полосно-пропускающий фильтр на основе многослойного полосково-щелевого перехода / Д.Г. Фомин, Н.В. Дударев, С.Н. Даровских // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. – 2021. – №10. – С. 1–19; 1,1875 п.л./1 п.л.
10. Fomin, D.G. Duplexer Based on Volumetric Modular Technology / D.G. Fomin, N.V. Dudarev, S.N. Darovskikh // 2021 IEEE 22nd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM). – 2021 – P. 97–100; (Scopus); 0,25 п.л./0,2 п.л.
11. Fomin, D.G. Study of the Ultra-Wideband Band-Pass Filter with a Variable Number of Frequency-Selective Elements and the Possibility of Vertical Design / D.G. Fomin, N.V. Dudarev, S.N. Darovskikh // 2021 Antennas Design and Measurement International Conference (ADMInC). – 2021. – P. 6–9; (Scopus); 0,25 п.л./0,2 п.л.
12. Dudarev, N.V. Scattering matrix simulation of broadband band-pass filter based on a multilayer technology / N.V. Dudarev, D.G. Fomin, S.N. Darovskikh // 2021 International Conference Engineering and Telecommunication (En&T). – 2021. – P. 1–3; (Scopus); 0,1875 п.л./0,15 п.л.
13. Dudarev, N.V. The Volume-Modular Technology in the Design of Passive Microwave Devices / N.V. Dudarev, D.G. Fomin, S.N. Darovskikh, D.S. Klygach, M.G. Vakhitov // Proceedings – 2021 Ural Symposium on Biomedical Engineering,

Radioelectronics and Information Technology, USBEREIT 2021. – 2021. – P. 225–227; (Scopus); 0,1875 п.л./0,15 п.л.

14. Klygach, D.S. Permittivity Measurement for Powder Materials Using a Volumetric Strip-slot Junction / D.S. Klygach, M.G. Vakhitov, A.B. Khashimov, N.V. Dudarev, D.G. Fomin, A.L. Shestakov // 2021 International Conference Engineering and Telecommunication (En&T). – 2021. – P. 1–4; (Scopus); 0,25 п.л./0,1 п.л.

*Патенты РФ:*

15. Патент 205448 Российская Федерация, МПК H01P 5/02. Объемный полосково-щелевой переход с П - образной щелью / Н.В. Дударев, Д.Г. Фомин, Д.С. Клыгач, М.Г. Вахитов; заявитель и патентообладатель НИУ ЮУрГУ – № 2021106071, заявл. 10.03.2021; Оpubл. 15.07.2021, Бюл. № 20.

16. Патент 208172 Российская Федерация, МПК H01P 1/213. Дуплексер на основе объёмных полосково-щелевых переходов / Н.В. Дударев, Д.Г. Фомин; заявитель и патентообладатель НИУ ЮУрГУ–№ 2021119621; заявл. 05.07.2021, Оpubл. 07.12.2021, Бюл. № 34.

17. Патент 209940 Российская Федерация, МПК H01P 5/02. Объёмный полосково-щелевой переход с П-образной щелью регулируемой длины / Д.Г. Фомин, Н.В. Дударев; заявитель и патентообладатель НИУ ЮУрГУ–№ 2021133551; заявл. 18.11.2021, Оpubл. 24.03.2022, Бюл. № 9.

18. Патент 2780960 Российская Федерация, МПК H01P1/203. Многослойный широкополосный СВЧ фильтр / Д.Г. Фомин, Н.В. Дударев; заявитель и патентообладатель НИУ ЮУрГУ– № 2021135272; заявл. 01.12.2021, Оpubл. 04.10.2022, Бюл. № 28.

*Другие публикации:*

19. Фомин, Д.Г. Исследование объемного полосково-щелевого перехода с П-образным щелевым резонатором / Д.Г. Фомин, Н.В. Дударев, С.Н. Даровских, В.К. Баранов // Ural Radio Engineering Journal. – 2020. – №5(3). – С. 277–292; 1 п.л./0,8 п.л.

20. Фомин, Д.Г. Система СВЧ-измерений по методу Николсона-Росса-Вейера / Д.Г. Фомин, Н.В. Дударев // Материалы тринадцатой научной конференции аспирантов и докторантов. Челябинск. – 2021. – С. 83–88; 0,375 п.л./0,3 п.л.

21. Фомин, Д.Г. Сверхширокополосный полосно-пропускающий фильтр на основе микрополоскового перехода для обеспечения высокого уровня скрытности инфокоммуникационных систем / Д.Г. Фомин, Н.В. Дударев, С.Н. Даровских // Вестник УрФО. Безопасность в информационной сфере. – 2021. – № 3 (41). – С. 30–37; 0,5 п.л./0,4 п.л.

22. Фомин, Д.Г. Моделирование полосно-пропускающих фильтров на основе многослойной технологии / Д.Г. Фомин, С.Н. Даровских, Н.В. Дударев, И.И. Прокопов, С.В. Дударев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2022. – № 1. – С. 77–87; 0,6875 п.л./0,5 п.л.

23. Фомин, Д.Г. Экспериментальное исследование полосно-пропускающих фильтров на основе многослойной технологии / С.Н. Даровских, Д.Г. Фомин, Н.В. Дударев, Д.С. Клыгач, М.Г. Вахитов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2022. – № 4. – С. 48–55; 0,5 п.л./0,4 п.л.