

На правах рукописи



САЯПИН Кирилл Александрович

**СИНТЕЗ УСТРОЙСТВ СОГЛАСОВАНИЯ И ФАЗОВОГО СМЕЩЕНИЯ
РАДИОСИГНАЛОВ**

Специальность 1.3.4. – Радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Саратов 2024

Работа выполнена на кафедре радиотехники и электродинамики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского».

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Давидович Михаил Владимирович

Официальные оппоненты: **Скобелев Сергей Петрович**, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник ПАО «Радиофизика», г. Москва.

Мучкаев Вадим Юрьевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Электронные приборы и устройства», ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», г. Саратов.

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики», г. Самара.

Защита состоится «11» октября 2024 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.392.01 при ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» по адресу: 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83, X корпус, 511 аудитория.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке имени В.А. Артисевич ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» и на сайте: <https://www.sgu.ru/research/dissertation-council/24-2-392-01/kandidatskaya-dissertaciya-sayapina-kirilla>

Автореферат разослан «_____» _____ 2024 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.2.392.01, д.ф.-м.н, доцент



Сысоев И.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Устройства согласования и фазового смещения радиосигналов сверхвысоких частот (СВЧ) являются важнейшими элементами современных радиотехнических систем¹. К таким устройствам в первую очередь относятся коаксиально-волноводные переходы (КВП) и фиксированные фазовращатели (ФФ). Они широко используются в системах радиолокации, наземной и спутниковой связи, в контрольно-измерительной аппаратуре и в радиолокационных станциях.

Несмотря на многолетний мировой опыт исследования устройств согласования и фазового смещения радиосигналов, многие практически важные вопросы их создания остаются нерешёнными. В первую очередь это относится к устройствам, предназначенным для эксплуатации в условиях комбинированного воздействия факторов внешней среды, существенно отличающихся от нормальных. Примером могут служить КВП высокого уровня мощности, предназначенные для работы в составе негерметизированной аппаратуры бортовых ретрансляционных комплексов (БРК) спутниковых систем телекоммуникации. Аппаратура БРК должна надёжно функционировать в условиях воздействия деструктивных факторов внешней среды. Синтез КВП для таких систем является сложным итерационным процессом, в ходе которого необходимо решить радиофизические задачи, описывающие различные аспекты функционирования КВП. К ним относятся задачи следующих типов:

- электродинамическое моделирование и параметрический синтез КВП с оптимальными частотными характеристиками,
- температурный анализ для получения оценки работоспособности в условиях воздействия внешних и внутренних (генерируемых внутри КВП) потоков тепловой мощности,
- анализ устойчивости к развитию электрических пробоев газоразрядного и вторично-эмиссионного (мультипакторного) типов в условиях работы на повышенных уровнях СВЧ-мощности.

Решение этих задач требует применения специальных аналитических и численных методов моделирования и анализа, основанных на использовании мультифизических моделей устройств, т. е. моделей, реализующих несколько радиофизических задач, связанных друг с другом через общие граничные или объёмные условия.

¹ Pozar D. Microwave Engineering. NJ: Wiley. – 2011. - P.752.

Также продолжают оставаться актуальными задачи поиска и исследования новых электродинамических структур устройств согласования и фазового смещения радиосигналов, обладающих повышенными эксплуатационными параметрами, малыми габаритными размерами и более технологичной конструкцией. В связи с миниатюризацией бортовой радиоэлектронной аппаратуры (БРА) востребованы КВП с новой конфигурацией согласуемых линий передачи (ЛП). Эффективная разработка таких устройств невозможна без предварительного изучения процессов распространения, рассеяния и трансформации волн в их электродинамических структурах.

Таким образом, можно отметить, что создание и исследование новых электродинамических структур устройств согласования и фазового смещения радиосигналов являются актуальными радиофизическими задачами, решение которых позволит создать необходимые условия для освоения новых рабочих диапазонов частот и улучшения тактико-технических характеристик радиоэлектронной аппаратуры различного назначения.

Цель работы заключается в создании новых электродинамических структур устройств согласования и фазового смещения радиосигналов с оптимальными характеристиками, в том числе для использования в условиях воздействия факторов открытого космического пространства.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Исследовать влияние формы емкостного зонда на частотные характеристики и электрическую прочность КВП.

2. Разработать и исследовать новые структуры малогабаритных КВП емкостного и индуктивного типов для прямоугольных волноводов, обладающие улучшенными частотными характеристиками и повышенной электрической прочностью.

3. Разработать и исследовать новые структуры электрических цепей широкополосных ФФ, состоящие из одиночных неоднородных ЛП с плавно- и ступенчато-неоднородными шлейфами, обеспечивающие улучшенные фазо- и амплитудно-частотные характеристики по сравнению с известными аналогами.

4. Разработать и исследовать новые структуры широкополосных ФФ на основе связанных ЛП класса II, нагруженных короткозамкнутым шлейфом, а также структуры, состоящие из двух одинаковых соединённых каскадно четырёхполюсников, каждый из которых выполнен в виде одного отрезка связанных ЛП, нагруженных короткозамкнутым шлейфом.

Предметом исследования являются синтез и анализ электродинамических структур устройств согласования и фазового смещения радиосигналов на основе новых топологий электрических цепей.

Объектом исследования являются новые электродинамические структуры устройств формирования и передачи радиосигналов: коаксиально-волноводные переходы емкостного и индуктивного типов; фиксированные фазовращатели с фазосдвигающим каналом на основе отрезков связанных и одиночных линий передачи со шлейфами различных типов; электродинамические системы в виде частично заполненного диэлектриком прямоугольного резонатора с окнами связи и коаксиально-волноводными переходами.

Методы исследования. Результаты диссертации получены с привлечением теории волновых матриц, теории многополюсников, методов многокритериальной оптимизации и натурального моделирования. В работе использованы методы вычислительной математики и прикладной электродинамики, программные комплексы электродинамического моделирования (AWR DE, CST MS).

Достоверность полученных в работе результатов обеспечивается корректным применением методов схемотехнического и электродинамического моделирования микроволновых многополюсников и подтверждается соответствием теоретических и экспериментальных данных, полученных с привлечением хорошо апробированных методов калибровки измерительной аппаратуры, а также сравнением их с результатами работ других авторов. В процессе реализации основных этапов процесса синтеза КВП и ФФ использовались корректные формулировки задач анализа и параметрической оптимизации.

Личный вклад соискателя. Результаты математического моделирования объектов исследования, представленные в настоящей работе, получены лично автором. Постановка задач и обсуждение результатов проводились совместно с научным руководителем, а также с В.П. Мещановым и Б.М. Кацем. Соискатель принимал непосредственно участие в разработке и описании новых структур синтезируемых устройств, в постановке и решении задач многокритериальной оптимизации параметров предложенных структур. Часть экспериментальных исследований КВП выполнена автором совместно с А.В. Воробьевым.

Научная новизна результатов работы, соответствующая паспорту научной специальности 1.3.4. – «Радиофизика» по физико-математическим наукам, заключается в следующем:

1. Проведен анализ влияния формы ёмкостного зонда на частотные характеристики коаксиально-волноводных переходов и их электрическую прочность (п. 1, 2, 3 паспорта научной специальности).

2. Разработаны и исследованы структуры уголкового КВП индуктивного типа, отличающиеся от известных отсутствием в коаксиальном соединителе твёрдых прецизионных СВЧ-диэлектриков, что положительно сказывается на частотных характеристиках рассматриваемых устройств и их электрической прочности (п. 1, 2, 3 паспорта научной специальности).

3. Разработаны и исследованы структуры соосных КВП индуктивного типа, отличающиеся от известных использованием согласующей секции на основе отрезка полосковой ЛП, позволяющей расширить рабочий диапазон частот КВП и повысить уровень согласования в нём (п. 1, 2, 3 паспорта научной специальности).

4. Разработаны и исследованы структуры соосных КВП, отличающиеся от известных использованием ёмкостного типа связи, позволяющего улучшить частотные характеристики устройства (п. 1, 2, 3 паспорта научной специальности).

5. Разработаны и исследованы структуры уголкового КВП с индуктивным типом связи, отличающиеся от известных подключением коаксиальной линии передачи через боковую узкую стенку волновода. Исследованы процессы трансформации волн в указанных структурах (п. 1, 2, 3 паспорта научной специальности).

6. Разработан специальный алгоритм электродинамического анализа возбуждения прямоугольного волновода и резонатора через щели связи системой произвольно ориентированных КВП. Получены соотношения, определяющие условия возбуждения резонатора, содержащего диэлектрические элементы. Также получены соотношения для оценки критических значений напряженности электромагнитных полей при проектировании бортовых СВЧ-устройств формирования и передачи сигналов (п. 3 паспорта научной специальности).

7. Предложены и исследованы новые структуры электрических цепей широкополосных ФФ на основе неоднородных одиночных ЛП с неоднородными шлейфами, имеющие в 1,3-3,0 раза меньшие габариты, чем структуры на основе однородных шлейфов (п. 1, 3 паспорта научной специальности).

8. Проведено комплексное теоретическое и экспериментальное исследование широкополосного ФФ с новой структурой электрической цепи, представляющей собой ступенчатую структуру класса II, нагруженную короткозамкнутым шлейфом. При равном числе ступеней предложенная структура обеспечивает меньшее значение коэффициента связи линий передачи и меньшее отклонение ФЧХ от заданного номинального значения по сравнению с ФФ на С-звеньях. Например, в случае трехступенчатой структуры для номинального фа-

зового сдвига $\varphi_0=90^\circ$ и коэффициента перекрытия рабочего диапазона частот $\kappa=3$ коэффициент связи уменьшился с 0,663 до 0,243, а фазовая ошибка снизилась с $1,93^\circ$ до $0,14^\circ$; при этом габаритные размеры ФФ уменьшаются в 1,5 раза по сравнению с прототипом. Численно исследовано влияние неоднородностей в местах сочленения микрополосковых связанных и одиночных ЛП, а также в области подключения шлейфа к отрезку связанных ЛП, на процессы распространения и рассеяния волн, дана оценка их влияния на частотные характеристики ФФ (п. 1, 2, 3 паспорта научной специальности).

9. Исследована новая структура микрополоскового широкополосного ФФ с двухэлементным фазосдвигающим каналом на основе связанных ЛП со шлейфом, обеспечивающая меньший коэффициент связи между линиями, чем аналогичная структура на С-звеньях (п. 1, 3 паспорта научной специальности).

Научная и практическая значимость. Синтезированные структуры КВП с емкостным и индуктивным типами связи, имеющие как соосную, так и уголковую конфигурацию, могут найти широкое применение в прецизионных измерительных комплексах и в системах наземной и спутниковой связи. Предложенные структуры электрических цепей широкополосных и сверхширокополосных ФФ открывают перспективы освоения новых диапазонов частот и могут служить компонентной базой для современных систем радиолокации.

Разработанные в диссертации принципы построения электродинамических систем, алгоритмы численного электродинамического и схемотехнического анализа и параметрической оптимизации позволяют осуществить и ускорить разработку устройств согласования и фазового смещения радиосигналов с улучшенными электродинамическими характеристиками и проводить исследования процессов распространения электромагнитных волн в таких системах с учетом их электрической прочности.

Часть результатов диссертации была получена в ходе выполнения НИОКР «Мультиплексор-И1Т», ОКР «Спутник», НИР «Импульс» в ООО «НПП «НИКА-СВЧ» (г. Саратов), что подтверждается актом внедрения, приложенном к диссертации. Другая часть результатов диссертации была получена в ходе выполнения гранта Российского научного фонда (проект №23-29-00879) и гранта Фонда содействия инновациям (проект №17ГРРЭС14/71669).

Результаты исследований, полученные при подготовке диссертации, были использованы при разработке СВЧ-устройств в ООО «НПП «НИКА-СВЧ» (г. Саратов), ООО «СВВ» (г. Москва), ФГУП НИИР-СОНИИР (г. Самара), а также в учебном процессе подготовки бакалавров по направлению «Радиофизика» в Институте физики ФГБОУ ВО «СГУ им. Н.Г. Чернышевского».

Положения и результаты, выносимые на защиту

1. Форма емкостного зонда оказывает определяющее влияние на электрическую прочность и частотные характеристики коаксиально-волноводного перехода. Сферический зонд обеспечивает максимальную электрическую прочность устройства за счёт равномерного распределения электрического поля в области согласования. Цилиндрический ступенчатый зонд позволяет добиться согласования перехода в наиболее широком диапазоне частот, но имеет низкую электрическую прочность. Зонды в форме конуса и цилиндра с фасками занимают промежуточное положение между сферическим и цилиндрическим зондами по достигаемым частотным характеристикам и электрической прочности.

2. Реализация в соосной структуре коаксиально-волноводного перехода на основе реберного волновода области согласования в виде отрезка полосковой линии передачи позволяет эффективно трансформировать ТЕМ-волну коаксиальной линии передачи в основную волну прямоугольного волновода, что приводит к расширению рабочей полосы частот устройства и улучшению уровня согласования. Аналогичный эффект достигается при реализации в области согласования емкостной связи реберного волновода с выступающей в волновод частью центрального проводника коаксиальной линии передачи, длина которой сопоставима или больше длины секции реберного волновода. Индуктивная петля связи оптимальной топологии позволяет реализовать новую конфигурацию коаксиально-волноводного перехода с подсоединением коаксиальной линии передачи через узкую стенку волновода.

3. Использование неоднородных шлейфов в широкополосных фиксированных фазовращателях на основе неоднородных одиночных линий передачи приводит к уменьшению электрической длины структуры в 1,3-3,0 раза по сравнению со структурами на основе однородных шлейфов при сопоставимых или лучших частотных характеристиках предлагаемой структуры, что объясняется дисперсионной характеристикой шлейфа.

4. Использование короткозамкнутого шлейфа в структуре фиксированных фазовращателей на основе связанных линий передачи класса II приводит к снижению коэффициента электромагнитной связи между линиями передачи более чем в 2,5 раза по сравнению со структурой на С-звеньях, что обусловлено дисперсионной характеристикой шлейфа. При этом электрическая длина предлагаемой структуры снижается в 1,5 раза по сравнению со структурой фиксированных фазовращателей класса I со шлейфом за счёт реализации фазового принципа формирования заданных фазо- и амплитудно-частотных характеристик. Построение многоэлементной микрополосковой структуры на основе от-

резков связанных линий передачи со шлейфом также позволяет обеспечить меньший коэффициент электромагнитной связи между линиями передачи по сравнению со структурой на С-звеньях.

Апробация результатов диссертационной работы. Основные положения и результаты работы были доложены на десяти всероссийских и международных научно-технических конференциях, в том числе на трех Всероссийских конференциях «Электроника и микроэлектроника СВЧ», (г. Санкт-Петербург, ЛЭТИ, 2021-2023 гг.), пяти Международных научно-технических конференциях «Радиолокация, навигация, связь» (Воронеж, ВГУ, 2019-2023 гг.), III Международной научно-практической конференции «САПР и моделирование в современной электронике» (г. Брянск, БГТУ, 2019 г.), 31-ой Международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (г. Севастополь, СевГУ, 2021 г.), Международном симпозиуме и Молодежной научной школе «Saratov Fall Meeting» (г. Саратов, СГУ, 2018 г.). Результаты диссертационного исследования были также доложены на заседаниях научно-технического совета ООО «НПП «НИКА-СВЧ» (Саратов, 2017-2023) и научных семинарах кафедры радиотехники и электродинамики Института физики СГУ им. Н.Г. Чернышевского.

Публикации. По теме диссертации опубликована 41 научная работа, в том числе 11 научных статей в ведущих периодических научных изданиях по профилю научной специальности диссертации, рекомендованных ВАК России (из них 8 статей в журналах категории К1), 2 статьи в изданиях, индексируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus, 7 статей, индексируемых в РИНЦ, 1 коллективная монография. Получен 1 патент РФ на изобретение.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав и заключения. Работа содержит 181 страницу, 82 рисунка, 22 таблицы. Список используемой литературы включает 205 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы диссертационного исследования, указаны цель работы и решаемые для её достижения задачи, представлены научная и практическая значимость результатов исследования, положения, выносимые на защиту, описана структура и объем диссертации.

Первая глава посвящена обзору известных структур КВП и ФФ, методам их синтеза и анализа. **В разделе 1.1** рассмотрены известные структуры уголкового и соосных КВП с ёмкостным и индуктивным типами связи. **Раздел 1.2** посвящен обзору известных структур электрических цепей ФФ на основе связанных и одиночных ЛП. А в **разделе 1.3** проведен анализ факторов внешней сре-

ды, действующих на устройства СВЧ в условиях негерметизированной платформы космического аппарата. Особое внимание уделено зависимости электрической прочности электродинамических структур от атмосферного давления. **Раздел 1.4** посвящен методам синтеза и анализа электродинамических структур, рассмотренных в диссертации.

Вторая глава посвящена созданию и исследованию структур коаксиально-волноводных переходов с емкостным и индуктивным типами электромагнитной связи. В **разделе 2.1** описан предлагаемый итеративный алгоритм синтеза КВП, особенность которого заключается в использовании эквивалентных схем и анализе электрической прочности электродинамической структуры перехода.

В **разделе 2.2** приведены результаты исследования угловых КВП с емкостным типом электромагнитной связи для прямоугольных волноводов стандартного и нестандартного сечений, предназначенных для использования в системах спутниковой связи. Посредством анализа электрических полей показано, что форма зонда оказывает определяющее влияние на электрическую прочность и частотные характеристики коаксиально-волноводного перехода. Сферический зонд обеспечивает максимальную электрическую прочность устройства за счёт равномерного распределения электрического поля в области согласования. Цилиндрический ступенчатый зонд позволяет добиться согласования перехода в наиболее широком диапазоне частот, но имеет низкую электрическую прочность. Зонды в форме конуса и цилиндра с фасками занимают промежуточное положение между сферическим и цилиндрическим зондами по достигаемым частотным характеристикам и электрической прочности.

Также приведены результаты исследования электрической прочности КВП емкостного типа для волноводов уменьшенной высоты, полученные с использованием различных численных и аналитических методов (рис. 1).

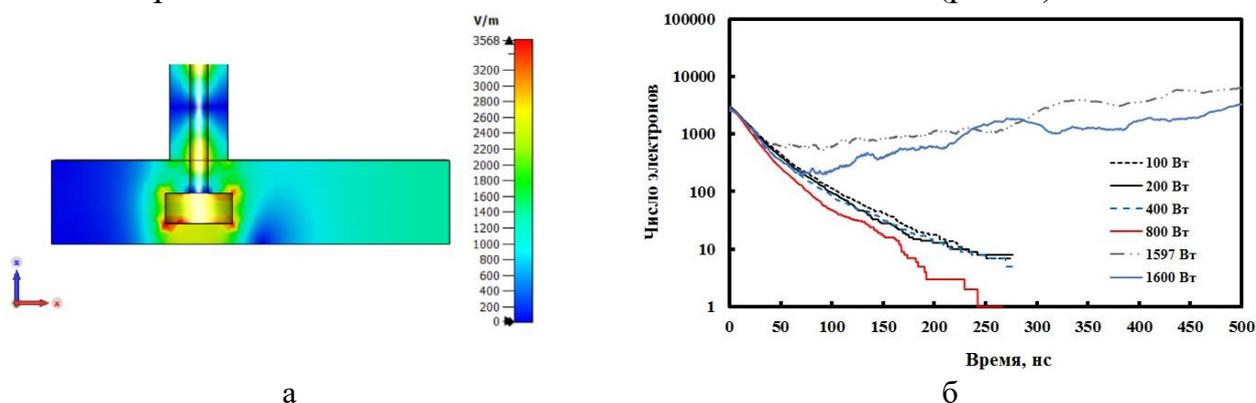


Рисунок 1 – Распределение электрического поля в продольном сечении электродинамической трехмерной модели КВП 61×10 мм – ТНС (а) и временная зависимость количества электронов в его волноводном канале (б)

В разделе 2.3 приведены результаты исследования структур уголкового КВП с индуктивным типом связи. В них элемент согласования выполнен в виде n -ступенчатого трансформатора на основе П-образного волновода. Используя полученные с помощью эквивалентной схемы начальные приближения, была синтезирована конечно-элементная электродинамическая модель КВП и получены оптимальные частотные характеристики при $n = 1, 2, 3$. По приведенной методике были разработаны и исследованы трехступенчатые КВП с коаксиального канала 2,92/1,27 мм на прямоугольные волноводы сечением (мм): 35×15, 19×9,5, 16×8, 11×5,5, 7.2×3,4, 6.2×3,1 61×10, 72×10 (рис. 2).



Рисунок 2 – Некоторые типы разработанных коаксиально-волноводных переходов (а), нижняя часть корпуса коаксиально-волноводного перехода для канала 7,2×3,4 мм (б)

Измерения параметров КВП проведены в однопортовом режиме с использованием нагрузок короткого замыкания трех типов: $|\Gamma_1| = 1, \arg \Gamma_1 = \varphi_1; |\Gamma_2| = 1, \arg \Gamma_2 = \varphi_2; |\Gamma_3| = 1, \arg \Gamma_3 = \varphi_3$. Экспериментальное исследование КВП производилось с помощью векторного анализатора цепей Rohde & Schwarz ZVA40.

Полученное максимальное значение коэффициента отражения экспериментального образца КВП для волновода 16×8 мм на 5 дБ выше, чем у электродинамической модели, но при этом не превышает -28,5 дБ во всем рабочем диапазоне частот волновода (12...17,5 ГГц), вносимые потери не более 0,2 дБ (рис. 3). Пороговая мощность мультипакторного пробоя для двухступенчатого КВП 61×10 мм – 2,92/1,27 мм составила порядка

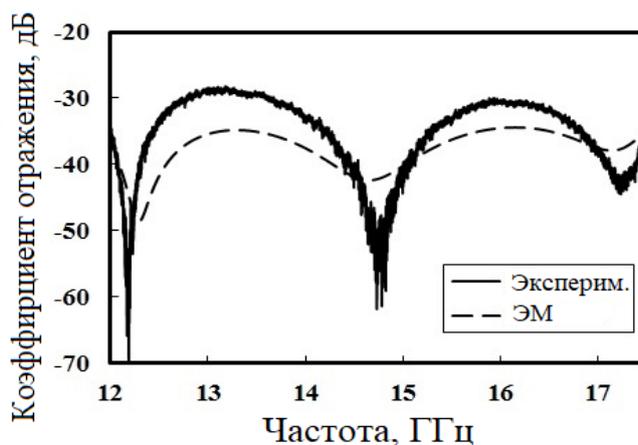


Рисунок 3 – Частотная зависимость коэффициента отражения КВП 16×8 мм: электродинамическая модель (пунктирная линия), экспериментальный образец (сплошная линия)

1900 Вт, что на 800 Вт больше, чем для зондовой структуры.

В разделе 2.4 приведены результаты исследования соосных КВП с индуктивным типом связи (рисунок 4), отличающихся от известных структур наличием элемента согласования 3, представляющего собой отрезок полосковой линии передачи. Такая модификация позволила значительно улучшить частотные характеристики КВП

(рис. 5, а). В случае волноводов уменьшенной высоты повысить уровень согласования (рисунок 5, б) позволило использование дополнительной согласующей полости 6 (рисунок 4).

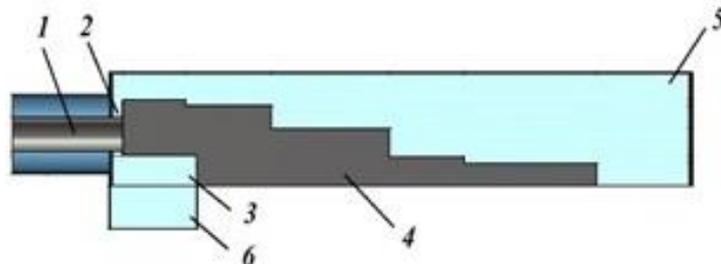


Рисунок 4 – КВП для волновода уменьшенной высоты 61x10 мм в продольном сечении: 1 и 5 – коаксиальная и волноводная линии передачи, 4 – ступенчатый трансформатор, 2, 3, 6 – согласующие полости

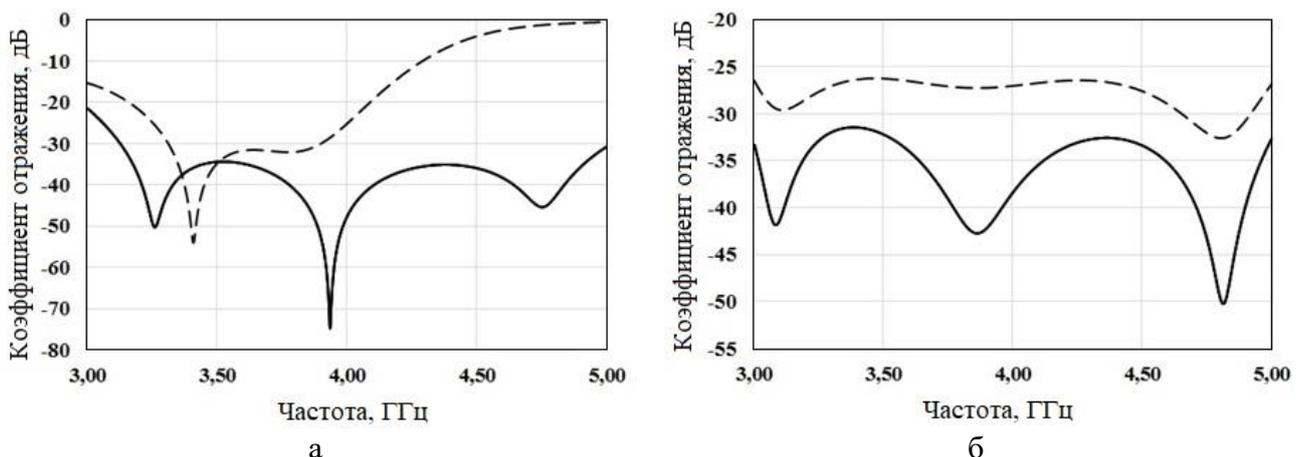


Рисунок 5 – Частотные зависимости коэффициента отражения КВП: для классической² (пунктирная линия) и модифицированной (сплошная линия) топологий для волновода WR229 (а); для базовой структуры только с полостями 2 и 3 (пунктирная линия) и структуры с дополнительной согласующей полостью 6 (сплошная линия) для волновода 61x10 мм (б)

В разделе 2.5 приведены результаты исследования структуры КВП с индуктивным типом связи, отличающейся от известных структур тем, что связь коаксиальной линии с волноводом осуществляется через его узкую боковую стенку. Одна из исследованных структур представлена на рисунке 6, её частотные характеристики – на рисунке 7.

Проведено численное исследование влияния геометрических размеров данной структуры КВП на её частотные характеристики. В отличие от соосных то-

² Бахтеев И.Ш. и др. Учет влияния мультипакторного разряда в коаксиально-волноводных переходах для систем космической связи // Радиотехника. – 2018. – №11. – С. 47-51.

пологий, элемент согласования в предложенной структуре смещен относительно оси волновода к его узкой боковой стенке. При этом определено, что оптимальные параметры достигаются, когда данный элемент смещен либо к стенке, через которую осуществляется соединение ЛП, либо к противоположной стенке.

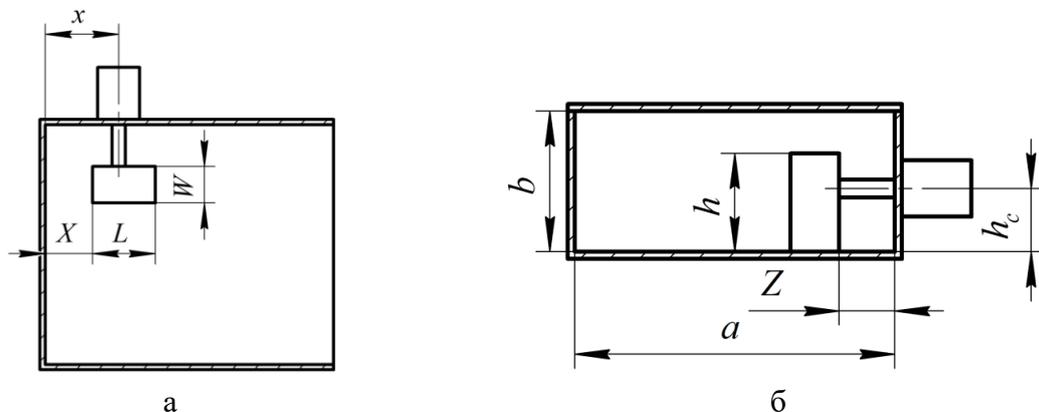


Рисунок 6 – Продольное (а) и поперечное (б) сечение трехмерной модели КВП 23x10 мм – 2,92/1,27 мм

В разделе 2.6 приведены результаты исследования структур соосных КВП с ёмкостным типом связи. Реализация в соосной структуре КВП на основе реберного волновода в области согласования емкостной связи реберного волновода с выступающей в волновод частью центрального проводника коаксиальной линии передачи, длина которой сопоставима или больше длины секции реберного волновода, позволяет добиться высокого уровня согласования в узкой полосе частот. Так, для КВП 23×10 мм в диапазоне частот 9,2...11,0 ГГц значение коэффициента отражения не превышает -27,5 дБ. Вносимые потери не более 0,06 дБ в том же диапазоне.

Изучение процессов распространения и трансформации волн в рассмотренной структуре показало возможность расширения рабочего диапазона частот до полного диапазона волновода за счет использования трансформаторов на основе отрезков П-образного волновода и других элементов связи.

В разделе 2.7 описана электродинамическая модель возбуждения частично заполненного диэлектриком резонатора несколькими КВП через окна связи.

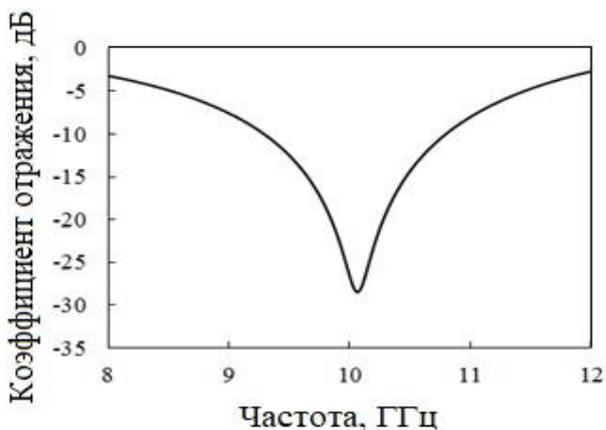


Рисунок 7 - Коэффициент отражения портов электродинамической модели КВП 23x10 мм – 2,92/1,27 мм

Получены итерационные соотношения для возбуждения резонатора в виде прямоугольного параллелепипеда с диэлектрическим слоем через несколько окон связи в его стенках, питаемых через КВП (рисунок 8). Использовано разложение поля по полной системе соленоидальных функций прямоугольного резонатора. Получены формулы для коэффициентов разложения и расчета полей. При заданных электрических полях в окнах связи входящая в резонатор мощность рассчитывается на основе вектора Пойнтинга.

В разделе 2.8 дана оценка электрической прочности прямоугольного резонатора. Приведены соотношения для оценки значения критических полей при проектировании бортовых СВЧ-устройств согласования и фазового смещения радиосигналов.

Третья глава посвящена решению задач синтеза и анализа широкополосных ФФ с новыми структурами электрических цепей на основе одиночных и связанных линий передачи со шлейфами. Задачи электродинамического анализа микрополосковых структур ФФ решались с помощью метода моментов.

В разделе 3.1 для структуры фазосдвигающего канала, образованной одиночной ступенчатой ЛП с короткозамкнутым ступенчатым шлейфом, разработана математическая модель в приближении Т-волн и численный метод решения двухкритериальной задачи оптимизации.

В результате решения задачи синтеза получено два решения, отличающихся отношениями длин и волновых сопротивлений отрезков ЛП. По сравнению с аналогами достигнуто существенное снижение электрической длины структуры при сопоставимых частотных характеристиках (таблица 1), что обусловлено частотными характеристиками неоднородного шлейфа (рисунок 9).

В разделе 3.2 приведены результаты синтеза ФФ со структурой фазосдвигающего канала в виде одиночной плавной ЛП с короткозамкнутым плавным шлейфом в приближении Т-волн, а также результаты схемотехнического и электродинамического моделирования.

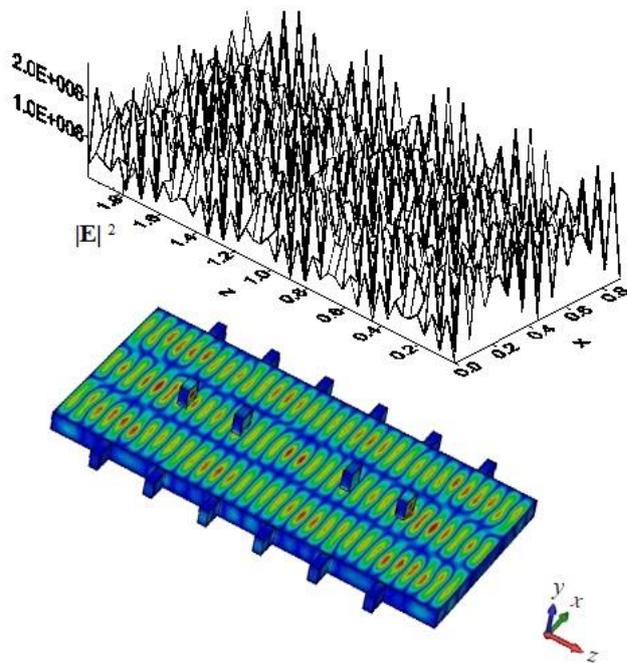
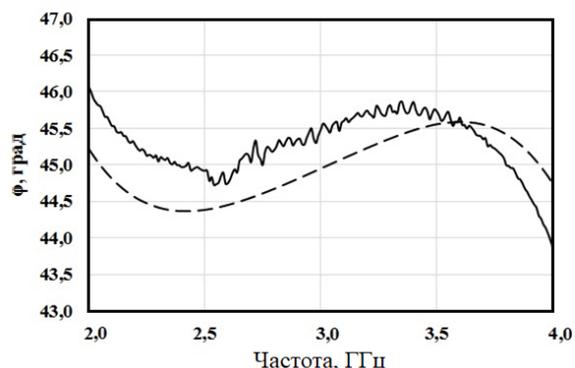


Рисунок 8 – Распределение $|E|^2$ (B^2/m^2) в плоскости x, z при $y=b/2$ на основе теории возбуждения (сверху) и моделирование в пакете CST MS (снизу)



а



б

Рисунок 9 – Фазосдвигающий канал на основе одиночной ЛП со ступенчатым шлейфом первого типа в измерительной оснастке (а) и ФЧХ электродинамической модели (пунктирная линия) и экспериментального образца (сплошная линия) ФФ на его основе (б)

Показано, что оптимальной является ромбовидная форма шлейфа. Измерение электрических параметров микрополоскового экспериментального образца ФФ с коэффициентом перекрытия рабочей полосы частот $\kappa = 2$ показало, что отклонение ФЧХ от заданного номинального значения $\varphi_0 = 45^\circ$ не превышает $1,1^\circ$, а КСВН составляет не более 1,13 в диапазоне частот 2...4 ГГц.

Таблица 1 – Параметры ФФ с фазосдвигающим каналом (ФК) на основе трехступенчатых одиночных ЛП ($\varphi_0 = 45^\circ$, $\kappa = 2$): $\Delta\varphi$ – отклонение ФЧХ от номинального значения φ_0 , $\Theta_{\text{ФК}}$ – электрическая длина ФК, κ – коэффициент перекрытия рабочего диапазона

Тип структуры	Первый тип	Второй тип	Класс I ³	Класс II ⁴
$\Delta\varphi$, град	0,5297	0,5800	0,4461	0,4333
КСВН	1,04801	1,05300	1,02002	1,02746
$\Theta_{\text{ФК}}$, град	127,54481	203,54150	360	303,97032

В разделе 3.3 приведены решения задач синтеза и анализа микрополоскового ФФ со структурой фазосдвигающего канала в виде связанными плавных ЛП с короткозамкнутым плавным шлейфом.

Результаты измерений экспериментального образца в рабочем диапазоне частот 1...2 ГГц показали, что номинальное экспериментальное значение φ_0 составляет $89,8^\circ$, отклонение ФЧХ от номинала $\Delta\varphi = 1,5^\circ$, КСВН не более 1,25. Выявлено, что в сравнении со структурой на основе связанных однородных ЛП, использование плавных ЛП позволяет минимизировать влияние неоднородности в месте сочленения связанных ЛП и шлейфа.

³ Губин Д.С., Креницкий А.П., Мещанов В.П., Шикова Л.В. Синтез фазовращателей на основе ступенчатой одиночной линии передачи со шлейфом // Радиотехника и электроника. – 2010. – Т. 55. – № 2. – С. 162-167.

⁴ Губин Д.С., Креницкий А.П., Мещанов В.П., Шикова Л.В. Синтез фазовращателей на основе ступенчатой одиночной линии передачи класса II со шлейфом // Радиотехника и электроника. – 2004. – Т. 49. – №7. – С. 801-805.

В разделе 3.4 приведены результаты комплексного исследования фазосмещающих свойств структуры класса II со шлейфом. Изложена постановка задачи синтеза, дан анализ полученных результатов теоретического и экспериментального исследования.

Показано преимущество исследуемых структур ФФ на связанных ЛП класса II с несогласованными нагрузками по сравнению с известными ФФ на связанных ЛП класса II с согласованными нагрузками. Оно заключается в том, что исследованные ФФ при равном числе ступеней, одинаковых номинальных значениях φ_0 и ширине рабочей полосы частот имеют существенно меньшие значения коэффициентов связи K и максимального отклонения $\Delta\varphi_0$ функции фазового сдвига от номинального значения φ_0 по сравнению с ФФ на С-звеньях. Например, для $\varphi_0 = 90^\circ$ и $n = 3$ коэффициент связи K уменьшается с 0,66 до 0,24, а $\Delta\varphi_0$ уменьшается с $1,93^\circ$ до $0,14^\circ$. Теоретические и экспериментальные частотные характеристики показаны на рисунке 10.

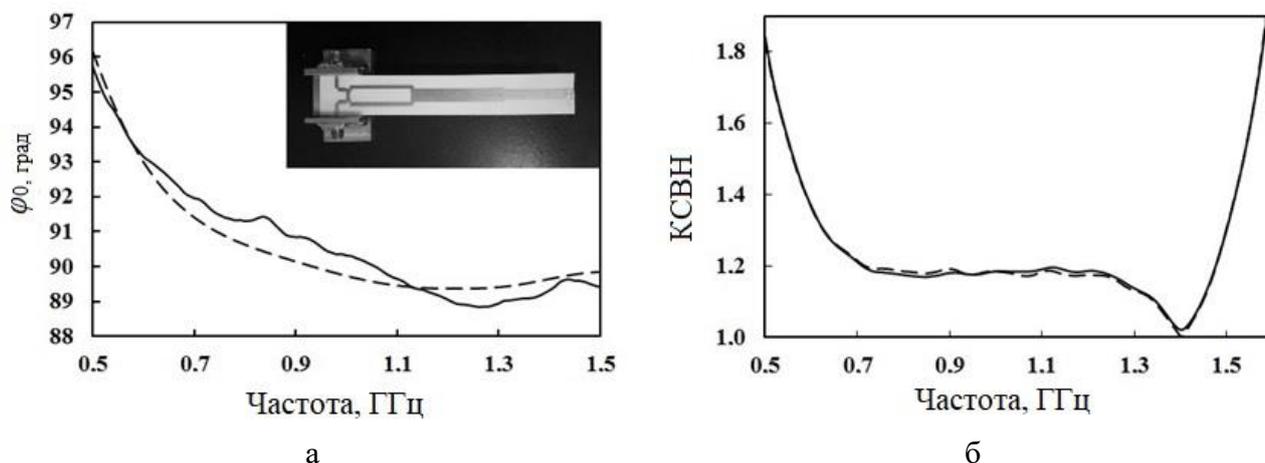


Рисунок 10 – ФЧХ (а) и частотная зависимость КСВН (б) ФФ класса II со шлейфом:
пунктир – электродинамическая модель; сплошная линия – эксперимент

Реализация рассматриваемой структуры на микрополосковой ЛП имеет свои особенности. Для сведения к нулю коэффициента связи между одиночными линиями необходимо располагать их на значительное расстояние друг от друга (рисунок 11), но поскольку в структуре класса II соединяются между собой одиночные и связанные ЛП, то в местах их сочленения возникают ступенчатые неоднородности, приводящие к значительному рассогласованию фазосдвигающего канала и искажению его ФЧХ.

Проведено исследование влияния скачкообразных неоднородностей на частотные характеристики элементов ФФ. С учетом полученных результатов, в местах ступенчатых неоднородностей структуры введены плавные переходы. Электродинамическое моделирование модифицированного фазосдвигающего

канала показало, что максимальное значение КСВН его портов не превышает 1,3, а отклонение ФЧХ от номинального значения составляет $0,5^\circ$. Использование при синтезе метода декомпозиции, заключающегося в использовании в одной модели элементов как схмотехнической, так и электродинамической моделей, позволило минимизировать различия частотных характеристик математических моделей различного уровня. Отсутствие скачков волнового сопротивления в области соединения отрезков ЛП создает все предпосылки для расширения рабочей полосы частот устройства и улучшению согласования в ней.

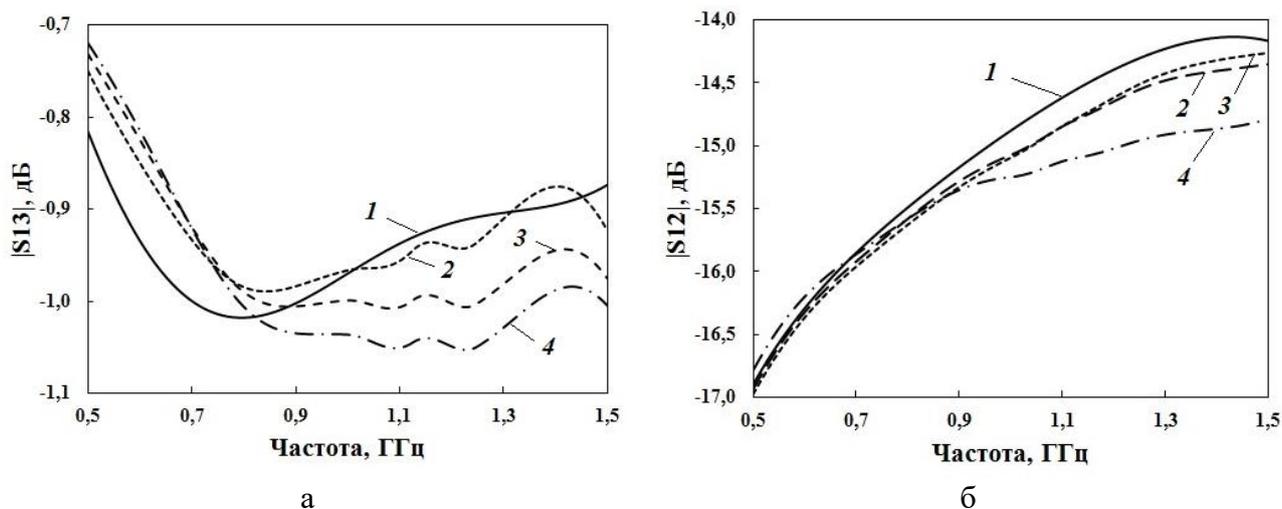


Рисунок 11 – Коэффициенты передачи $|S12|$ и $|S13|$ схмотехнической модели (кривая 1) и электродинамических моделей каскадного соединения связанных и одиночных линий при зазоре между одиночными линиями $S = 3,3$ мм (кривая 2), 5,3 мм (кривая 3), 6,3 мм (кривая 4)

В разделе 3.5 рассмотрена микрополосковая модель ФФ с двухэлементной структурой фазосдвигающего канала, образованной отрезками однородных ЛП с короткозамкнутыми шлейфами. На основе решения в приближении Т-волн для случая $\varphi_0=90^\circ$, $\kappa=2$ был синтезирован микрополосковый ФФ (рисунок 12) с рабочим диапазоном частот 0,67...1,33 ГГц.

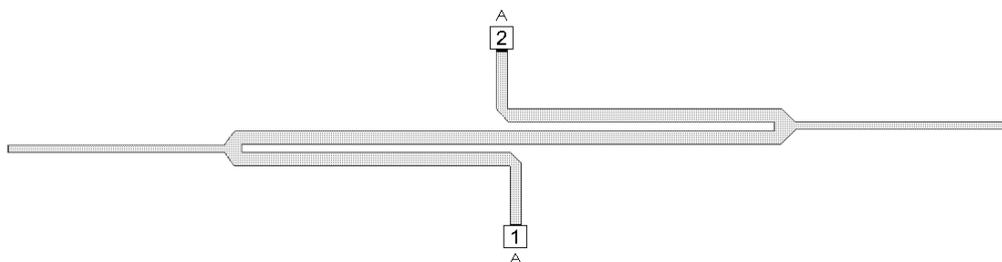


Рисунок 12 – Топология двухэлементной структуры фазосдвигающего канала

Электродинамическое моделирование показало, что отклонение ФЧХ от заданного номинального значения не превышает 2° , а КСВН составляет не более 1,1. В сравнении со структурой на основе С-звена коэффициент связи меж-

ду ЛП снизился с 0,12 до 0,08, что положительно сказывается на физической реализуемости устройства и его электрической прочности.

Также выявлено, что введение соединительного отрезка между элементами приводит к ухудшению согласования структуры и увеличению фазовой ошибки.

Основные результаты диссертационной работы

В результате проведения диссертационной работы получены следующие новые теоретические и экспериментальные результаты:

1. Форма емкостного зонда имеет определяющее влияние на электрическую прочность и частотные характеристики КВП. Наибольшую электрическую прочность имеет сферический зонд. Ступенчатый зонд позволяет добиться наилучшего согласования, однако не отличается высокой электрической прочностью. Зонды других типов занимают промежуточное положение как по частотным характеристикам, так и по электрической прочности.

2. Разработан алгоритм оптимального синтеза КВП, базирующийся на использовании эквивалентной схемы, отличающийся тем, что он обеспечивает меньшее время оптимизации электродинамической модели перехода и позволяет учитывать его электрическую прочность. Это позволяет не только вычислять параметры матрицы рассеяния (коэффициенты отражения и передачи), но и определять уровень допустимой рабочей СВЧ-мощности.

3. Показано, что реализация в соосной структуре коаксиально-волноводного перехода на основе реберного волновода области согласования в виде отрезка полосковой линии передачи позволяет эффективно трансформировать ТЕМ-волну коаксиальной линии передачи в основную волну прямоугольного волновода, что приводит к расширению рабочей полосы частот устройства и улучшению уровня согласования в ней. Индуктивная петля связи оптимальной топологии позволяет реализовать новую конфигурацию коаксиально-волноводного перехода с подсоединением коаксиальной линии передачи через узкую стенку волновода.

4. Численно и экспериментально исследованы структуры малогабаритных КВП индуктивного типа для прямоугольных волноводов стандартного и нестандартного сечений. Теоретически они позволяют обеспечить уровень согласования с коэффициентом отражения не более -30,0 дБ во всем рабочем диапазоне прямоугольного волновода. Отсутствие твердых диэлектриков в коаксиальном соединителе позволяет повысить технологичность и электрическую прочность предложенных структур КВП. Оптимальный выбор конфигурации

полости согласования в соосной структуре позволяет значительно повысить уровень согласования КВП.

5. Разработаны и исследованы электродинамические структуры малогабаритных КВП индуктивного типа, в которых подключение коаксиальной ЛП к волноводу осуществлено через его узкую боковую стенку. Получено несколько конфигураций элемента согласования, представляющего собой индуктивную петлю связи, обеспечивающих высокий уровень согласования при малых габаритах КВП.

6. Предложена и исследована электродинамическая структура соосного КВП, отличающаяся от известных аналогов тем, что в ней реализован емкостной тип связи. Это значительно упрощает конструкцию и повышает её технологичность.

7. Получены соотношения, определяющие условия возбуждения прямоугольного резонатора, содержащего диэлектрические элементы. Приведены соотношения, позволяющие оценивать значения критических полей при разработке, проектировании и создании новых бортовых устройств СВЧ обработки и передачи сигналов.

8. Исследованы новые структуры электрических цепей ФФ на основе неоднородных одиночных линий передачи с плавно- и ступенчато-неоднородными шлейфами, имеющие в 1,3-3,0 раза меньшие габаритные размеры, чем структуры на основе однородных шлейфов. Полученные результаты моделирования подтверждены экспериментально на микрополосковых опытных образцах.

9. Проведено комплексное теоретическое и экспериментальное исследование новой структуры электрической цепи широкополосного ФФ, которая представляет собой структуру класса II, нагруженную короткозамкнутым шлейфом. При равном числе ступеней рассмотренная структура обеспечивает меньшее значение коэффициента связи линий и меньшее отклонение ФЧХ от заданного номинального значения по сравнению с ФФ на С-звеньях. Снижение коэффициента связи приводит к увеличению зазора между ЛП, а, следовательно, к увеличению электрической прочности ФФ и повышению его технологичности.

10. Численно исследовано влияние неоднородностей в местах сочленения связанных и одиночных ЛП, а также в области подключения шлейфа к отрезку связанных ЛП на характеристики ФФ на связанных ЛП класса II со шлейфом. Определена степень влияния паразитной связи между одиночными ЛП на частотные характеристики устройства. Полученные результаты использованы при

синтезе плавно-ступенчатой структуры микрополоскового ФФ со шлейфом, показавшей лучшие характеристики, чем у прототипа.

11. Показано, что структура двухэлементного широкополосного микрополоскового ФФ на основе связанных ЛП со шлейфами обеспечивает меньший коэффициент связи между линиями, чем аналогичная структура на С-звеньях. Введение соединительного отрезка ненулевой длины между элементами приводит к увеличению рассогласования и фазовой ошибки ФФ.

Результаты диссертационной работы найдут применение в разработках известных и новых типов устройств СВЧ, предназначенных для работы в составе негерметизированной аппаратуры бортовых радиотрансляционных комплексов спутниковых систем телекоммуникации.

Список основных публикаций по теме диссертации

Статьи, в ведущих рецензируемых научных изданиях, включенных в перечень ВАК Минобрнауки РФ

1. Саяпин К.А., Алексеев В.В., Мещанов В.П., Шерстюков Д.Н. Исследование широкополосных фиксированных фазовращателей на основе связанных плавных линий передачи со шлейфом // Радиотехника. 2018. № 9. С. 38-42.
2. Саяпин К.А., Воробьев А.В., Кац Б.М., Мещанов В.П. Малогабаритные соосные коаксиально-волноводные переходы // Радиотехника. 2019. Т. 83. № 7(10). С.117-122.
3. Саяпин К.А., Воробьев А.В., Кац Б.М., Корчагин А.И., Купцов А.Ю. Численное моделирование и экспериментальное исследование температурного дрейфа параметров волноводного полосно-пропускающего фильтра // Радиотехника. 2019. Т. 83. № 7 (10). С. 13-19.
4. Саяпин К.А., Воробьев А.В., Кац Б.М., Корчагин А.И., Купцов А.Ю., Мещанов В.П. Однопортовые измерения электрических параметров коаксиально-волноводных переходов // Радиотехника. 2019. № 7(10). Т. 83. С.136-142.
5. Саяпин К.А., Кац Б.М. и др. Жидкостные волноводные нагрузки высокого уровня мощности // Радиотехника. 2019. Т. 83. № 8 (12). С. 115-119.
6. Саяпин К.А., Алексеев В.В., Семенчук В.В., Мещанов В.П., Шерстюков Д.Н. Исследование фиксированных фазовращателей на основе одиночной ступенчатой линии передачи со ступенчатым шлейфом // Радиотехника. 2019. Т. 83. № 7 (10). С. 66-72.
7. Мещанов В.П., Саяпин К.А., Шерстюков Д.Н. Фиксированный фазовращатель на основе одиночной линии передачи, нагруженной плавно-неоднородным короткозамкнутым шлейфом // Радиотехника. 2020. Т. 84. № 7 (14). С. 13-19.
8. Саяпин К.А., Мещанов В.П., Модифицированная структура коаксиально-волноводного перехода индуктивного типа // Радиотехника. 2022. Т. 86. № 12. С. 131-136.
9. Саяпин К.А., Корчагин А.И., Семенчук В.В., Мещанов В.П., Туркин Я.В., Шерстюков Д.Н. Комплексные исследования фазосмещающих свойств ступенчатой структуры класса II на связанных линиях передачи с несогласованными нагрузками // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2021. Т.21. №3. С. 264-274.

10. Саяпин К.А., Давидович М.В., Кобец А.К., Метод простых итераций с коррекцией сходимости и метод минимальных невязок в задачах плазмоники // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2021. Т. 24. № 3. С. 18-27.

11. Саяпин К.А., Давидович М.В., Кобец А.К. Возбуждение прямоугольного резонатора через окно связи в конвейерной установке СВЧ-нагрева // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2022. Т.25. №4. С.88-89.

***Публикации в рецензируемых научных изданиях,
входящих в международную базу данных Scopus и WoS***

12. Sayapin K., Davidovich M., Yafarov R. Simulation Of Field Emission In A Heated-Less Magnetron // 2020 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering, APEDE. 2020. P. 34-36.

13. Саяпин К.А., Алексеев В.В., Мещанов В.П. Исследование широкополосного фазовращателя на основе связанных плавных линий передачи со шлейфом // Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2018. Материалы международной научно-технической конференции. 2018. С. 493-498.

Монография

14. Саяпин К.А. и др. Устройства согласования линий передачи. Исследования для наземной и спутниковой связи. Внедрение в производство. / Под ред. В.П. Мещанова. М.: Радиотехника, 2019. 374 с.

Патент на изобретение

15. Саяпин К.А., Мещанов В.П. Микрополосковый фиксированный СВЧ фазовращатель. Патент на изобретение: № 2799991. Дата регистрации: 14.07.2023.

Публикации в других научных изданиях

16. Саяпин К.А., Кац Б.М. Широкополосные элементы связи для многозондовых рефлектометров // Сборник трудов XXIX Международной научно-технической конференции. Воронеж. 2023. Т. 5. С. 205-210.

17. Саяпин К.А., Кац Б.М., Корчагин А.И. Аксессуары измерительных СВЧ-трактов // Радиолокация, навигация, связь. Сборник трудов XXVI Международной научно-технической конференции, в 6 т. Воронеж. 2020. С. 23-29.

18. Саяпин К.А., Кац Б.М., Мещанов В.П. Угловые коаксиально-волноводные переходы индуктивного типа // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества. Тезисы докладов I Российской научной конференции. Омск. 2020. С. 159-160.

19. Саяпин К.А., Кац Б.М., Корчагин А.И. Разработка и мультифизическое моделирование коаксиально-волноводного перехода высокой мощности // Радиолокация, навигация, связь. Сборник трудов XXVI Международной научно-технической конференции, в 6 т. Воронеж. 2020. С. 148-156.

20. Саяпин К.А., Кац Б.М., Мещанов В.П. Разработка компактных соосных коаксиально-волноводных переходов для волноводов нестандартного сечения // Радиолокация, навигация, связь. Сборник трудов XXV Международной научно-технической конференции, в 6-ти томах. 2019. С. 40-44.

21. Саяпин К.А., Кац Б.М., Мещанов В.П. Разработка и исследование коаксиально-волноводных переходов индуктивного типа // Электроника и микроэлектроника СВЧ. 2021. Т. 1. С. 400-403.

22. Саяпин К.А. Модифицированная структура коаксиально-волноводных переходов индуктивного типа // *Электроника и микроэлектроника СВЧ*. 2022. Т.1. С. 511-513.
23. Саяпин К.А., Мещанов В.П. Разработка волноводных комплектов калибровочных мер и измерительной оснастки для векторных анализаторов цепей // *Сборник трудов XXVIII Международной научно-технической конференции*. В 6-ти томах. Воронеж. 2022. С. 188-195.
24. Саяпин К.А., Кац Б.М. Вакуум-плотное окно вывода энергии СВЧ на основе ступенчатого круглого волновода // *Радиолокация, навигация, связь*. Сборник трудов XXVII Международной научно-технической конференции. Воронеж. 2021. С. 145-149.
25. Саяпин К.А., Давидович М.В., Глухова О.Е., Колесов Г.И. Анализ вакуумного резонансно-туннельного диода // *СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии*. 2021. № 3. С. 269-270.
26. Саяпин К.А., Гуляев Ю.В., Мещанов В.П., Елкин В.А., Кац Б.М., Комаров В.В., Коплевацкий Н.А., Лопатин А.А., Рытик А.П., Байбурун В.Б. Разработка комплекса низкоинтенсивного микроволнового облучения водосодержащих биологических материалов и его применение // *Успехи современной радиоэлектроники*. 2022. Т. 76. № 6. С. 5-12.
27. Саяпин К.А., Гуляев Ю.В., Мещанов В.П., Кац Б.М., Коплевацкий Н.А., Лопатин А.А., Ёлкин В.А., Комаров В.В., Байбурун В.Б., Рытик А.П. Воздействие импульсным СВЧ излучением на образцы пищевой продукции с целью увеличения показателей ее микробиологической безопасности и сроков хранения // *Проблемы особо опасных инфекций*. 2022. № 3. С. 70-74.
28. Саяпин К.А., Мещанов В.П., Давидович М.В. Новые структуры и устройства фазового смещения радиосигналов // *Научные исследования студентов Саратовского государственного университета: материалы итоговой студенческой научной конференции*. 2018. С. 50-51.
29. Саяпин К.А., Мещанов В.П., Шерстюков Д.Н. Математическое моделирование и экспериментальное исследование микрополосковых фазовращателей на основе одиночной линии передачи со ступенчатым шлейфом // *Электроника и микроэлектроника СВЧ*. 2021. Т. 1. С. 395-399.
30. Саяпин К.А., Мещанов В.П. Разработка широкополосного дифференциального микрополоскового фазовращателя // *Проблемы оптической физики и биофотоники. SFM-2018: материалы Международного симпозиума и Молодежной научной школы Saratov Fall Meeting 2018* // под ред. Г.В. Симоненко, В.В. Тучина. 2018. С. 59-64.
31. Саяпин К.А., Шерстюков Д.Н. Новые структуры и устройства широкополосного фазового смещения радиосигналов // *Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций*. 2020. № 3. С. 121.
32. Саяпин К.А., Мещанов В.П., Шерстюков Д.Н. Новые структуры дифференциальных фазовращателей на базе одиночных линий передачи // *Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества. Тезисы докладов I Российской научной конференции*. Омск. 2020. С. 178-179.
33. Саяпин К.А., Кац Б.М., Мещанов В.П. Компактный двухдиапазонный полосно-пропускающий фильтр // *Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества. Тезисы докладов I Российской научной конференции*. Омск. 2020. С. 158.
34. Саяпин К.А., Корчагин А.И. Синтез фазовращателей на связанных линиях передачи класса II, нагруженных короткозамкнутым шлейфом // *Успехи современной радиоэлектроники*. 2020. Т. 74. № 12. С. 45-53.

35. Саяпин К.А., Куцько П.П., Мещанов В.П., Шерстюков Д.Н. Сверхширокополосные фиксированные фазовращатели на связанных ступенчатых линиях передачи класса II со шлейфом // Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч. тр. - Красноярск: Сиб. федер. ун-т. 2018. С. 303-305.
36. Саяпин К.А., Мещанов В.П., Шерстюков Д.Н. Особенности реализации фиксированных фазовращателей на связанных микрополосковых линиях передачи со шлейфом // Успехи современной радиоэлектроники. 2021. Т. 75. № 6. С. 27-33.
37. Саяпин К.А., Глухова О.Е., Слепченков М.М. Применение программного пакета открытого доступа Qucs в учебном процессе для моделирования микроволновых устройств // САПР и моделирование в современной электронике. Сборник научных трудов III Международной научно-практической конференции. 2019. С. 243-246.
38. Саяпин К.А., Алексеев В.В., Мещанов В.П., Семенчук В.В. Моделирование фиксированного фазовращателя на основе плавно-ступенчатых связанных линий передачи класса II // Радиолокация, навигация, связь. Сборник трудов XXVI Международной научно-технической конференции, в 6 т. Воронеж. 2020. С. 43-47.
39. Саяпин К.А., Мещанов В.П. Синтез и численное исследование микрополоскового двухэлементного фиксированного фазовращателя // Электроника и микроэлектроника СВЧ. 2023. С. 156-160.
40. Саяпин К. А., Давидович М. В., Колесов Г. И. Поверхностные плазмоны в структурах с металлическими пленками и графеновыми листами // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. 2021. Вып. 3. С. 280-281.
41. Саяпин К.А., Давидович М.В., Колесов Г.И. О формах интегральных и интегродифференциальных уравнений вибраторных антенн и сходимости алгоритмов // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. 2021. Вып. 3. С. 141-142.