



МИНИСТЕРСТВО ЦИФРОВОГО РАЗВИТИЯ,  
СВЯЗИ И МАССОВЫХ КОММУНИКАЦИЙ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования

«Поволжский государственный университет  
телекоммуникаций и информатики»

Льва Толстого ул., д. 23, г. Самара, 443010. Телефон: (846)333-58-56. E-mail: info@psuti.ru, www.psuti.ru  
ОКПО 01179900; ОГРН 1026301421992; ИНН/КПП 6317017702/631701001

11.09.2024

№

1677/21-04

На №

от

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе,

доктор технических наук, профессор

Горячкин Олег Валериевич

09

2024 г.



**ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ**

на диссертацию **Саяпина Кирилла Александровича** на тему «Синтез устройств согласования и фазового смещения радиосигналов», представленную к защите на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 1.3.4. «Радиофизика»

**Актуальность темы исследования**

К одним из наиболее важных элементов современных телекоммуникационных и радиолокационных систем относятся широкополосные устройства согласования и фазового смещения радиосигналов сверхвысоких частот. Частным случаем подобных устройств являются коаксиально-волноводные переходы и фиксированные фазовращатели.

Устройства согласования и фазового смещения радиосигналов исследуются довольно давно, и на протяжении длительного времени здесь был накоплен существенный мировой опыт, однако до сих пор многие практически важные вопросы, касающиеся создания этих устройств, остаются нерешёнными. В первую очередь это следует отнести к устройствам, предназначенным для эксплуатации в условиях комбинированного воздействия факторов внешней среды, существенно отличающихся от нормальных.

Примером таких устройств могут служить коаксиально-волноводные переходы высокого уровня мощности, работающие в составе негерметизированной аппаратуры бортовых ретрансляционных комплексов спутниковых систем телекоммуникации. От этих устройств требуется надежное функционирование в условиях воздействия деструктивных факторов космического пространства. Их разработка представляет собой сложный итерационный процесс, в ходе которого необходимо провести структурный и параметрический синтез, электродинамическое моделирование, тепловой анализ и анализ устойчивости к возникновению электрических пробоев. Решение таких задач осуществляется с привлечением специальных аналитических и численных методов математического анализа, в основе которых лежит использование мультифизических моделей устройств, связанных друг с другом через общие граничные условия.

Не менее актуальной задачей является поиск и исследование новых электродинамических структур устройств согласования и фазового смещения радиосигналов, имеющих улучшенные частотные характеристики и меньшие габариты в сравнении с существующими аналогами. Например, для бортовых радиоэлектронных модулей спутниковых систем связи востребованы коаксиально-волноводные переходы с подключением коаксиальной линии к волноводу через его узкую стенку. Разработка таких устройств невозможна без предварительного изучения процессов распространения, рассеяния и трансформации электромагнитных волн, осуществляемого в рамках строгих электродинамических моделей.

Учитывая сказанное выше, можно сделать вывод о том, что тема диссертационной работы Саяпина К.А., посвященной созданию и исследованию новых электродинамических структур устройств согласования и фазового смещения радиосигналов, является актуальной.

### **Оценка структуры и содержания работы**

Диссертационная работа состоит из введения, трёх глав, заключения, списка сокращений и списка использованной литературы. Диссертация изложена на 181 странице, включает в себя 82 рисунка и 22 таблицы.

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



**Первая глава** посвящена анализу современного состояния исследований структур коаксиально-волноводных переходов и фиксированных фазовращателей, методам их синтеза и анализа. Рассмотрены известные конструкции угловых и соосных коаксиально-волноводных переходов с ёмкостным и индуктивным типами связи, а также структуры электрических цепей фиксированных фазовращателей на основе связанных и одиночных линий передачи. Проанализированы факторы внешней среды, действующие на СВЧ-устройства в условиях негерметизированной платформы космического аппарата. Особое внимание при этом уделено зависимости электрической прочности электродинамических структур исследуемых устройств от величины атмосферного давления. Также кратко описаны методы синтеза и анализа электродинамических структур, использованные в диссертационной работе.

**Во второй главе** рассмотрены структуры коаксиально-волноводных переходов с емкостным и индуктивным типами электромагнитной связи, имеющие как угловую, так и соосную конфигурацию согласуемых линий передачи. Предложен ряд новых структур элементов согласования для коаксиально-волноводных переходов, позволяющих получить более совершенные частотные характеристики по сравнению с известными аналогами, а также реализовать новые конфигурации сопрягаемых линий передачи: например, рассмотрен переход, в котором подключение коаксиальной линии передачи к волноводу осуществлено через его узкую боковую стенку. Для устройств, ориентированных на применение в трактах с высоким уровнем СВЧ-мощности при пониженном атмосферном давлении, проведены исследования электрической прочности, включающие в себя анализ условий возникновения газового и мультипакторного разрядов.

**В третьей главе** рассмотрены новые структуры электрических цепей широкополосных и сверхширокополосных фиксированных фазовращателей. Приведены результаты теоретических исследований структур фазовращателей на основе одиночных неоднородных линий передачи с неоднородными короткозамкнутыми шлейфами, показавшие более совершенные характеристики предложенных структур по сравнению с известными аналогами с однородными шлейфами и подтвержденные многочисленными натурными экспериментами. Также проведены комплексные исследования фазосмещающих свойств структур фиксированных фазовращателей на основе связанных плавных и ступенчатых связанных линий передачи с несогласованными нагрузками, показавшие их превосходство в части частотных характеристик по сравнению со структурами с согласованными нагрузками.

**В заключении** сформулированы основные результаты и выводы, полученные в диссертационной работе.

**Область исследования диссертации** соответствует пунктам паспорта научной специальности 1.3.4. «Радиофизика» по физико-математическим наукам;

п. 1. Разработка физических основ генерации, усиления и преобразования колебаний и волн различной природы (электромагнитных, акустических, плазменных, механических), а также автоволн в неравновесных химических и биологических системах. Поиски путей создания высокоэффективных источников когерентного излучения миллиметрового, субмиллиметрового и оптического диапазонов, техническое освоение новых диапазонов частот и мощностей.

п. 2. Изучение линейных и нелинейных процессов излучения, распространения, дифракции, рассеяния, взаимодействия и трансформации волн в естественных и искусственных средах.

п. 3. Разработка и исследование новых электродинамических систем и устройств формирования и передачи радиосигналов: резонаторов, волноводов, фильтров и антенных систем в радио, оптическом и ИК –диапазоне.

Оформление диссертации соответствует требованиям ГОСТ Р 7.0.11-2011 и ГОСТ Р 7.0.5–2008. Автореферат выполнен с соблюдением установленных требований, достаточно точно отражает содержание диссертационной работы, полученные в ней теоретические и практические результаты и выводы.

#### **Новизна полученных результатов**

1. Проанализировано влияние формы зонда коаксиально-волноводного перехода с емкостной связью на его частотные характеристики электрическую прочность.

2. Исследованы новые структуры широкополосных уголкового коаксиально-волноводных переходов индуктивного типа, не имеющих в коаксиальном соединителе твёрдых прецизионных СВЧ-диэлектриков.

3. Исследованы структуры соосных широкополосных коаксиально-волноводных переходов индуктивного типа с согласующей секцией на основе отрезка полосковой линии передачи, обеспечивающей эффективную трансформацию ТЕМ-волны коаксиальной линии в основную волну волновода и, соответственно, более совершенные частотные характеристики в сравнении с известными аналогами.

4. Исследована структура соосных коаксиально-волноводных переходов на основе ступенчатого трансформатора на реберном волноводе, в которых реализован ёмкостной тип связи, имеющая улучшенные частотные характеристики в сравнении с аналогичными структурами с индуктивной связью.

5. Исследованы структуры уголкового коаксиально-волноводных переходов с индуктивным типом связи, в которых подключение коаксиальной линии передачи реализовано через узкую боковую стенку волновода.

6. Разработан специальный алгоритм электродинамического анализа возбуждения прямоугольного волновода и резонатора через щели связи системой коаксиально-волноводных переходов. Получены соотношения, определяющие условия возбуждения резонатора, содержащего диэлектрические элементы. Также получены соотношения,



позволяющие оценить критические значения напряженности электромагнитных полей в исследованных электродинамических структурах.

7. Исследованы новые структуры электрических цепей широкополосных фиксированных фазовращателей на основе неоднородных одиночных линий передачи с неоднородными короткозамкнутыми шлейфами, имеющие в 1,3-3,0 раза меньшую электрическую длину, чем структуры на основе однородных шлейфов.

8. Проведено комплексное теоретическое и экспериментальное исследование фазосмещающих свойств новой структуры электрической цепи на основе связанных линий передачи класса II, нагруженных короткозамкнутым шлейфом. Показано, что при равном числе ступеней предложенная структура обеспечивает меньшее значение коэффициента связи линий передачи и меньшее отклонение ФЧХ от заданного номинального значения по сравнению со структурами на С-звеньях.

9. Исследована новая структура микрополоскового широкополосного фиксированного фазовращателя с двухэлементным фазосдвигающим каналом на основе связанных линий передачи со шлейфами, обеспечивающая меньший коэффициент связи линий передачи, чем аналогичная структура на С-звеньях.

#### **Степень обоснованности и достоверности результатов исследования**

Обоснованность и достоверность основных научных положений, результатов и выводов диссертации подтверждаются корректной постановкой цели и задач исследования, выбором методов исследования, подтверждением теоретических результатов значительным числом экспериментальных исследований и сравнением их с результатами из известных работ, практическим применением результатов работы, подтвержденным актами внедрения, обсуждением основных положений и выводов диссертации на научных конференциях, публикацией полученных результатов в рецензируемых научных изданиях.

#### **Публикации**

Основные результаты диссертации опубликованы в 41 научной работе, в том числе в 11 статьях в научных изданиях из перечня ВАК по научной специальности 1.3.4. и в 2 статьях в изданиях, индексируемых в международных базах данных цитирования Web of Science и Scopus. Также имеется научная монография и патент на изобретение.

#### **Теоретическая и практическая значимость результатов, полученных автором диссертации**

Теоретическая значимость полученных результатов диссертационной работы заключается в том, что они вносят существенный вклад в исследование процессов распространения, дифракции, рассеяния, взаимодействия и трансформации волн в новых и уже известных структурах согласования линий передачи и фазового смещения

радиосигналов. Предложен ряд новых электродинамических структур коаксиально-волноводных переходов и фиксированных фазовращателей.

Практическая значимость результатов диссертации заключается в том, что синтезированные структуры коаксиально-волноводных переходов 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 фиксированных фазовращателей открывают перспективы освоения новых диапазонов частот.

### **Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации**

Результаты диссертационной работы рекомендуются к расширенному использованию на предприятиях радиоэлектронной промышленности РФ, для которых является актуальной задача создания широкополосных и сверхширокополосных пассивных СВЧ-компонентов с повышенной электрической прочностью. В частности, наибольший интерес полученные результаты представляют для таких предприятий, как АО «НПП «Алмаз» (г. Саратов), АО «НПП «Контакт» (г. Саратов), АО «НПП «Исток» им. Шокина» (г. Фрязино), АО «Концерн «Созвездие» (г. Воронеж), АО «ИРКОС» (г. Москва), АО «Концерн «Автоматика» (г. Москва), ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт радио имени М.И. Кривошеева» (г. Москва), АО «Научно-исследовательский институт «Экран» (г. Самара) и др.

### **Замечания по диссертационной работе**

1. Результаты работы выглядят несколько шире, нежели поставленные в диссертации задачи. По пункту 6 результатов диссертации в задачах ничего не обозначено. Диссертанту все же нужно было сделать это с учетом того, что разработанные в диссертации алгоритмы представляются важной частью научной и практической значимости работы.
2. Пункт 2 в выводах по третьей главе диссертации сформулирован так, что использование неоднородных шлейфов однозначно лучше однородных, что выглядит несколько необъективно. В целях компенсации данного момента диссертанту следовало кратко указать недостатки неоднородных шлейфов.
3. Алгоритм разработки и исследования, приведенный на рис.2.1 диссертации, выглядит не вполне логичным, и не соответствует общепринятым нормам представления алгоритмов. Как можно предположить, стрелки, выходящие сбоку, соответствуют отрицательному результату, полученному в текущем блоке. Перед схемотехническим моделированием, на наш взгляд, должен располагаться блок выбора геометрии коаксиально-волноводного перехода с соответствующим набором варьируемых параметров, к которому должны быть



направлены упомянутые выше стрелки. То есть, в случае несоответствия требуемым характеристикам необходимо осуществлять корректировку параметров выбранной геометрии, а не электродинамической модели, которая должна быть априорно адекватной разрабатываемому устройству.

4. При изучении материалов диссертации возник вопрос: как с точки зрения физики объяснить возникновение точки минимума для мощности коронного разряда, представленного на рис.2.9а и рис.2.22? Также в диссертации отсутствует интерпретация довольно интересного, на наш взгляд, эффекта — увеличение скорости снижения количества электронов в волноводе с ростом входной мощности (рис.2.7, 2.20).
5. В таблицах 3.1,3.2, 3.6, 3.7 приведены значения входных сопротивлений и электрических длин с точностью до шестого знака, а в таблицах 3.4,3.5 - удерживаются только два знака после запятой. Возникает вопрос - с какой точностью обеспечивается практическая реализация рассматриваемых устройств и о влиянии точности обеспечиваемой точности на их целевые характеристики? С одной стороны, в диссертации говорится, что расхождение между теоретическими и экспериментальными результатами обусловлены, в том числе, и технологическими допусками при изготовлении, однако нет информации о допусках при изготовлении опытных образцов.
6. На стр.146 диссертации говорится о том, что для численного решения интегрального уравнения (3.38) используется метод моментов, а для решения моментных уравнений была применена программа AXIEM пакета AWR Design Environment. Отметим, что интегральное уравнение (3.38) является векторным, а его ядра, с большой долей вероятности, содержат особенности различных типов, что делает решение (3.38) нетривиальной задачей. На наш взгляд, в диссертации следовало привести более подробную информацию об особенностях интегрального уравнения (3.38), методах его регуляризации и системах проекционных функций, используемых в рамках метода моментов.
7. Имеется ряд мелких замечаний по представлению материалов. В некоторых разделах диссертации очень не хватает рисунков, иллюстрирующих рассматриваемые структуры. Например, в разделе 1.1 это касается коаксиально-волноводных переходов, фиксированных фазовращателей, в разделе 2.6 на стр.89 — прямоугольного резонатора с окнами связи (имеется только словесное описание). Также без какой-либо расшифровки приводятся волноводы (WR90, WR229). Все это ухудшает восприятие материала. Здесь же не дается определение линий передач классов I и II при их первом упоминании в диссертации. В разделе 1.4.1 не приведены ссылки на литературу по методу моментов. Значения температурных шкал на рис.2.10 представлены в слишком малом масштабе. Также не вполне удачно, на наш взгляд, выбрана цветовая

палитра семейства кривых на рис.2.7, 2.20. Возможно, здесь следовало использовать маркеры линий.

Вместе с тем, указанные замечания не являются принципиальными, не снижают общей положительной оценки работы и носят, скорее, рекомендательных характер.

### **Заключение**

Диссертация Саяпина Кирилла Александровича на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований распространения и трансформации электромагнитных волн в электродинамических структурах устройств согласования и фазового смещения радиосигналов созданы новые типы коаксиально-волноводных переходов и фиксированных фазовращателей с более совершенными частотными характеристиками по сравнению с известными аналогами и повышенной электрической прочностью. Их применение в радиолокации, контрольно-измерительной аппаратуре, системах наземной и спутниковой связи позволит ощутимо повысить тактико-технические характеристики радиоэлектронной аппаратуры.

Также следует отметить основательный подход к задачам, решаемым в рамках диссертации. При этом решение поставленных задач демонстрирует высокий уровень подготовки Саяпина К.А.

Кандидатская диссертация полностью соответствует требованиям и критериям пп. 9-11, 13-14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г., № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, а её автор, Саяпин К.А., заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 1.3.4. «Радиофизика».

Диссертационная работа Саяпина К.А. и отзыв на неё обсуждены на расширенном заседании кафедры физики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики» (протокол заседания № 2 от 10.09.2024 года).

Отзыв составил:

Заведующий кафедрой физики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики», доктор физико-математических наук, доцент



\_\_\_\_\_  
Табачков Дмитрий Петрович