

На правах рукописи

**Донченко Алексей Витальевич**

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОМПЛЕКСНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ  
ПРОНИЦАЕМОСТИ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ  
ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В ВОЛНОВОДАХ  
СЛОЖНЫХ СЕЧЕНИЙ**

Специальность 01.04.03 - Радиофизика

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Ростов-на-Дону – 2018

Работа выполнена на кафедре радиофизики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южный федеральный университет».

Научный руководитель: Заргано Геннадий Филиппович,  
доктор физико-математических наук,  
профессор

Официальные оппоненты: Шеин Александр Георгиевич,  
доктор физико-математических наук,  
профессор, ФГБОУ ВО  
«Волгоградский государственный  
технический университет», профессор  
кафедры физики.

Черкесова Лариса Владимировна,  
доктор физико-математических наук,  
доцент, ФГБОУ ВПО «Донской  
государственный технический  
университет», профессор кафедры  
математики и информатики.

Ведущая организация: ФГУП «Ростовский-на-Дону научно-  
исследовательский институт  
радиосвязи»

Защита состоится «21» декабря 2018 г. В 14 час. на заседании диссертационного совета Д 212.208.10 в Южном федеральном университете по адресу: 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге, д.5, Южный федеральный университет, физический факультет, ауд. 318.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке им. Ю.А. Жданова Южного федерального университета по адресу: г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге, д. 21 Ж и на сайте:

<http://hub.sfedu.ru/diss/>

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 г.

Учёный секретарь диссертационного  
совета Д 212.208.10, доктор физико-  
математических наук, профессор

Г.Ф. Заргано

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Активное развитие науки и техники СВЧ, телекоммуникационных и радиолокационных систем, систем спутниковой связи ставит перед учёными и инженерами задачу по усовершенствованию структурных элементов СВЧ-устройств: элементов антенно-фидерного тракта, фильтров, фазовращателей, генераторов, резонаторов и т.д. Характеристики таких устройств можно улучшить, если при их создании использовать определённое диэлектрическое заполнение. Так размещение образца диэлектрика внутри волновода приводит к существенному изменению его электродинамических характеристик: критических частот и постоянных распространения. Также существенно искажаются структуры электромагнитных полей, так как в волноводах с неоднородным диэлектрическим заполнением распространяются гибридные HE- и EH-волны.

Развитие материаловедения, а именно создание новых типов интеллектуальных и композитных материалов, открывает новые возможности для использования их в СВЧ-диапазоне. Так, например, применение в СВЧ приборостроении интеллектуальных материалов позволило бы создавать устройства нового поколения с управляемыми параметрами. Однако использование диэлектриков в СВЧ-диапазоне сопряжено с определёнными трудностями. Необходимо с высокой точностью знать их комплексную диэлектрическую проницаемость. Кроме того, так как диэлектрическая проницаемость ряда материалов сильно зависит от частоты, необходимо определять её значение в широком диапазоне частот.

Существует большое количество методик измерения диэлектрической проницаемости материалов. Однако все они обладают рядом ограничений. Методы, использующие различные резонаторы, позволяют измерять значения комплексной диэлектрической проницаемости с высокой точностью, но только на одной частоте или в очень узком частотном диапазоне. Методы свободного пространства и волноводные методы, хотя и являются относительно широкополосными, обладают более низкой точностью

измерений. Существует и другая проблема. Большое количество современных материалов представляет собой тонкие пластины или плёнки. Измерение параметров таких материалов, как правило, производят с помощью микрополосковых резонаторов, однако такая методика даёт хорошую точность только на частотах порядка нескольких ГГц. На более высоких частотах, из-за увеличения потерь электромагнитной энергии, точность измерений существенно снижается. Эту проблему можно решить, используя в качестве измерительных ячеек прямоугольные волноводы, обладающие меньшими потерями. В этом случае образец диэлектрика размещается так, чтобы полностью заполнять поперечное сечение волновода. Такой способ при измерении пластин и тонких плёнок сопряжён с технологическими трудностями и требует повышенного расхода материала. Кроме того, приведённый подход не даёт высокой точности измерений из-за того, что электромагнитная волна взаимодействует с диэлектриком на очень маленьком участке волновода равным толщине образца. Следовательно, изменения характеристик электромагнитной волны, по которым судят о величине диэлектрической проницаемости, очень малы, что существенно снижает точность проводимых измерений.

Эти проблемы можно было бы решить, используя в качестве измерительной ячейки волновода сложных сечений (ВСС), такие как П- или Н- волноводы. Они являются более широкополосными и перекрывают частотный диапазон, для покрытия которого, потребовалось бы 3-5 комплектов на стандартных прямоугольных волноводах. Кроме того, за счёт размещения образца в максимуме электромагнитного поля основной волны в геометрическом центре волновода, увеличивается влияние диэлектрика на характеристики основной волны, и, как следствие, увеличивается точность измерений. При измерении тонких плёнок образец можно разместить над гребнем волновода — вдоль направления распространения волн. Такой подход позволяет не только уменьшить расход материала, но и повысить точность измерений за счёт удлинения участка волновода, на котором происходит взаимодействие волны и диэлектрика.

На основе приведённых аргументов можно сделать вывод, что разработка новой широкополосной методики измерений диэлектрической проницаемости материалов в СВЧ-диапазоне является актуальной задачей.

**Предметом исследований** являются Н- и П-волноводы с неоднородным диэлектрическим заполнением, а также изучение зависимости их электродинамических характеристик от величины комплексного диэлектрического заполнения, с целью дальнейшего применения этих волноводов в качестве измерительных ячеек устройств определения диэлектрической проницаемости материалов.

**Целью работы** является разработка широкополосной методики определения комплексной диэлектрической проницаемости материалов на СВЧ с использованием волноводов сложных сечений.

**Основные задачи**, решаемые в диссертации:

1. Разработать алгоритм и программу расчёта электромагнитных полей, критических частот и постоянных распространения гибридных типов волн в ВСС с учётом особенностей поля вблизи диэлектрического и металлического рёбер.
2. Разработать алгоритм и программу визуализации структуры электромагнитных полей гибридных НЕ- и ЕН-волн, распространяющихся в волноводах с кусочно-слоистым диэлектрическим заполнением.
3. Разработать алгоритм и программу расчёта потерь электромагнитной энергии при распространении гибридной волны по волноводу с кусочно-слоистым диэлектрическим заполнением.
4. Рассчитать критические частоты, постоянные распространения, потери электромагнитной энергии гибридных волн, визуализировать структуры гибридных типов НЕ- и ЕН-волн на рабочих частотах и в критическом режиме для Н- и П-волноводов с различным диэлектрическим заполнением. Выработать рекомендации по оптимальному поперечному сечению волноведущей структуры и расположению в ней диэлектрического образца.
5. Решить обратную задачу – разработать алгоритм расчёта комплексной диэлектрической проницаемости материала по

известным характеристикам гибридных типов волн: постоянной распространения, коэффициенту затухания, геометрическим размерам волновода и образцов. На основе разработанного алгоритма создать программу расчёта комплексной диэлектрической проницаемости размещённого в волноводе материала.

6. Разработать методику измерений, провести измерения и рассчитать комплексную диэлектрическую проницаемость эталонных образцов в широком диапазоне частот. Провести анализ получаемых результатов и оценку точности измерений.

**Научная новизна** диссертационной работы определяется:

1. Развитием метода частичных областей (МЧО) с учётом влияния диэлектрического и металлического рёбер волновода на структуру электромагнитного поля для анализа электромагнитных полей гибридных типов волн семейства ВСС с неоднородным диэлектрическим заполнением с учётом потерь в диэлектрике.
2. Разработкой алгоритма моделирования и визуализации полей гибридных типов HE- и EH-волн, распространяющихся в ВСС с кусочно-слоистым диэлектрическим заполнением.
3. Разработкой методики учёта потерь электромагнитной энергии при распространении гибридных волн в ВСС с неоднородным диэлектрическим заполнением.
4. Результатами расчётов и визуализацией структур электромагнитных полей гибридных волн в критическом режиме и на рабочих частотах для семейства ВСС с кусочно-слоистым диэлектрическим заполнением.
5. Разработкой методики однозначного определения фазового сдвига гибридных типов волн в ВСС с кусочно-слоистым диэлектрическим заполнением.
6. Разработкой методики экспериментальных измерений комплексной диэлектрической проницаемости материалов в широкой полосе частот с использованием П- и Н-волноводов.

**Практическая значимость работы** заключается в том, что разработанная методика измерений позволяет с высокой точностью проводить определение комплексной диэлектрической проницаемости материалов в широкой полосе частот СВЧ диапазона. Кроме того, она

позволяет проводить измерения комплексной диэлектрической проницаемости объёмных образцов; образцов из тонких диэлектрических плёнок, нанесённых на подложки; жидких и газообразных материалов.

Необходимо отметить, что разработанный алгоритм расчёта электродинамических характеристик ВСС с неоднородным диэлектрическим заполнением может быть эффективно использован для разработки различных СВЧ-устройств, таких как фазовращатели, направленные ответвители и фильтры, в конструкциях которых активно используются диэлектрические материалы.

Программное обеспечение, разработанное с применением приведённых в работе алгоритмов, может быть использовано для создания на его основе автоматизированного программного комплекса по проектированию и разработке СВЧ-устройств нового поколения. Результаты расчётов электродинамических характеристик ВСС могут быть эффективно применены для создания новых и усовершенствования существующих систем связи, навигации, контроля и локации в СВЧ-диапазоне.

Результаты диссертации успешно использованы в учебном процессе в бакалавриате и магистратуре физического факультета ЮФУ при подготовке специалистов по направлениям «Радиофизика» и «Инфокоммуникационные технологии и системы связи».

**Достоверность и обоснованность получаемых результатов** работы обеспечивается строгой постановкой задач и строгими математическими методами их решения, использованием хорошо сходящихся электродинамических алгоритмов, учитывающих особенности поведения электромагнитных полей внутри моделируемых структур и адекватно отражающих поведение реальных физических объектов с учётом потерь электромагнитной энергии в диэлектрике. Полученные результаты подтверждены сходимостью получаемых данных, сравнительным анализом с результатами, представленными в известной литературе, а также с результатами численного моделирования исследуемых структур с помощью пакетов прикладных программ, использующих сеточные методы. Достоверность результатов расчетов по представленной методике, подтверждена проведённым экспериментом по

определению комплексной диэлектрической проницаемости эталонных образцов, изготовленных из различных материалов.

**Основные результаты и положения, выносимые на защиту:**

1. Развитие метода частичных областей применительно к расчёту электродинамических характеристик волноводов сложных сечений с кусочно-слоистым диэлектрическим заполнением с учётом потерь в диэлектрике.
2. Универсальные алгоритмы и пакеты прикладных программ, позволяющие с высокой точностью рассчитывать электромагнитные поля, критические частоты, комплексные постоянные распространения гибридных типов волн в волноводах сложных сечений с кусочно-слоистым диэлектрическим заполнением.
3. Методика моделирования и визуализации трёхмерных структур электромагнитных полей гибридных типов в волноводах сложных сечений с кусочно-слоистым диэлектрическим заполнением.
4. Результаты моделирования электромагнитных полей и расчёта критических частот и постоянных распространения гибридных типов волн с учётом потерь в волноводах сложных сечений с кусочно-слоистым диэлектрическим заполнением.
5. Результаты анализа трёхмерного электромагнитного поля гибридных типов волн в волноводах сложных сечений для оптимального размещения диэлектрических образцов с целью достижения максимальной чувствительности измерений.
6. Методика однозначного определения фазового сдвига в волноводящих структурах с диэлектрическими образцами различной длины.
7. Программное обеспечение, результаты расчётов и экспериментальных измерений комплексной диэлектрической проницаемости различных материалов в волноводах сложных сечений, полученные с применением разработанных методик.

**Личный вклад автора.** Автором лично были получены аналитические выражения и создана программа, позволяющая рассчитывать электромагнитные поля и характеристики гибридных типов волн в ВСС. Также разработана прикладная программа построения пространственных картин электромагнитных полей



гибридных типов волн в ВСС с неоднородным диэлектрическим заполнением. Автором выполнены все расчёты характеристик электромагнитных полей НЕ- и ЕН-волн. Кроме того, предложены методики учёта потерь в диэлектрике и экспериментального определения комплексной диэлектрической проницаемости материалов с использованием Н- и П-волноводов в качестве измерительных ячеек. Разработан алгоритм однозначного определения фазового сдвига гибридных типов волн. Автором проведены все расчёты и экспериментальные измерения комплексной диэлектрической проницаемости различных образцов материалов, а также проведены все сравнения и оценки точности теоретических и экспериментальных результатов.

**Апробация работы.** Материалы диссертационной работы докладывались на следующих международных конференциях:

- конференция «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации» г. Суздаль: 2013 г., 2015 г., 2016 г.;
- конференция «Актуальные проблемы электронного приборостроения» г. Саратов: 2014 г., 2016 г., 2018 г.;
- конференция «Излучение и рассеяние электромагнитных волн» Таганрог – Дивноморское: 2015 г., 2017 г.;
- конференция «Актуальные проблемы электронного приборостроения» г. Новосибирск: 2018 г.
- 38th Progress In Electromagnetics Research Symposium. St Petersburg: 2017;

Кроме того, результаты диссертационной работы были использованы при выполнении: гранта президента Российской Федерации МД-118.2017.9 «Разработка и создание сверхкомпактных волноводных селективных устройств на сложных многослойных металлодиэлектрических структурах с управляемыми характеристиками для перспективных авиационных и спутниковых инфокоммуникационных систем» и гранта РФФИ №16-37-00148 мол\_а «Исследование возможностей создания сверхкомпактных и высокочастотных волноводных частотно-селективных устройств на

сложных резонансных элементах для современных авиационных и спутниковых инфокоммуникационных систем».

**Публикации по результатам диссертационной работы.**

Основные результаты, полученные в рамках данной диссертации, были опубликованы в 14 научных трудах. В российских журналах, входящих в перечень ВАК, 3 статьи. В международном журнале, входящем в базу Scopus, 1 статья. В трудах международных научных конференций: 10 работ.

**Структура диссертации.** Основные разделы диссертации включают: введение, четыре главы, заключение и список литературы из 122 наименований. Работа содержит 52 рисунка, 23 таблицы и 141 страницу текста.

### **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и основные задачи диссертации, показана практическая значимость и новизна работы, приведены структура диссертации, результаты и положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** проведён краткий обзор и анализ известной литературы, посвящённой эффективным и точным методам измерения комплексной диэлектрической проницаемости материалов на СВЧ, показаны их преимущества и недостатки.

Представлена классификация описанных методов, согласно которой все методы измерений комплексной диэлектрической проницаемости на СВЧ разделились на следующие группы: методы, использующие направленные волны, методы свободного пространства, резонансные методы. Представлен краткий обзор современных методов измерения комплексной диэлектрической проницаемости материалов.

Кроме того, в главе проведён анализ научной литературы по эффективным методам расчёта электродинамических характеристик ВСС.

**Во второй главе** приводятся структуры ВСС, а именно П- и Н-волноводы с кусочно-слоистым диэлектрическим заполнением,

которые предполагается использовать в качестве измерительных ячеек (Рисунок 1).

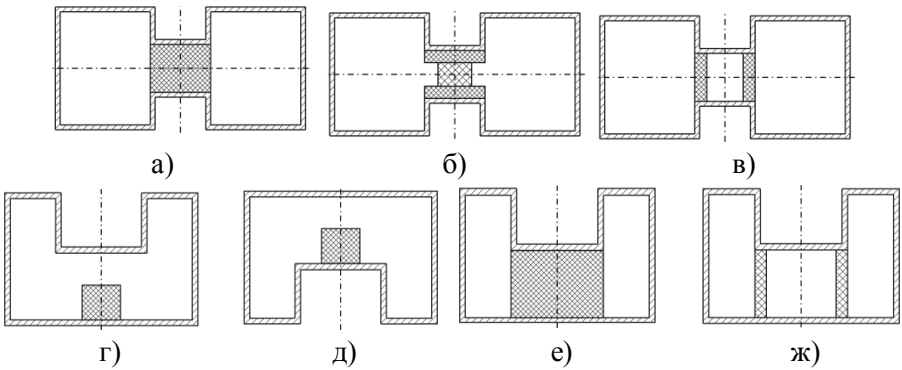


Рисунок 1.

Показано, что для решения задачи расчёта электродинамических характеристик гибридных типов волн, целесообразно применить МЧО. Этот метод позволяет эффективно рассчитывать критические волновые числа и постоянные распространения, а также получать выражения для компонентов электромагнитных полей гибридных типов волн в аналитическом виде, учитывающие особенности поведения электромагнитного поля на металлическом и диэлектрическом рёбрах ВСС.

С применением МЧО получены уравнения расчёта электродинамических характеристик гибридных типов волн: критических частот и продольных волновых чисел. В качестве элемента симметрии, с учётом конфигурации семейства ВСС на Рисунке 1, использовалась Г-образная область,

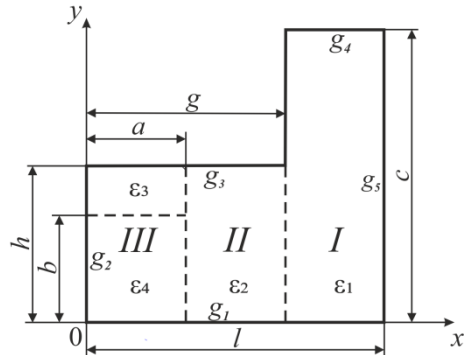


Рисунок 2.

представленная на Рисунке 2. Отмечается, что приведённая Г-образная область является универсальной и подходит для описания ряда других ВСС с кусочно-слоистым диэлектрическим заполнением.

Представлен вывод аналитического выражения, описывающего особенности поведения электромагнитных полей вблизи диэлектрического прямоугольного ребра на границе трёх диэлектриков.

В соответствии с МЧО, приравняв напряжённости электрических и магнитных компонентов полей на общих границах частичных областей, получили систему интегральных уравнений (СИУ) относительно четырёх неизвестных функций, заданных на линиях разделения частичных областей. Решение СИУ относительно четырёх неизвестных функций проводилось методом Галёркина. Базовые и весовые функции были представлены в виде полной системы ортогональных полиномов Гегенбауэра с весовыми множителями, определёнными с учётом влияния диэлектрического и металлического рёбер волновода на электромагнитное поле гибридных волн. В результате СИУ была сведена к однородной системе линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). Положив определитель СЛАУ равным нулю, получили трансцендентные уравнения, позволяющие рассчитать критические частоты и продольные волновые числа.

Разработан алгоритм расчёта и моделирования электромагнитных полей гибридных типов волн в критическом режиме. Показано, что расчёт структуры электромагнитного поля в критическом режиме сводится к поиску изолиний компоненты электрической индукции  $D_z$  для расчёта и визуализации магнитного поля ЕН-волны и компоненты магнитной индукции  $B_z$  для расчёта и визуализации электрического поля НЕ-волны.

Представлен алгоритм пространственного моделирования структуры гибридных типов волн на рабочей частоте. Для этого система дифференциальных уравнений относительно пространственных координат силовой линии сводилась к системе дифференциальных уравнений относительно длины силовой линии. Полученная система решалась численно методом Рунге-Кутты четвёртого порядка. Показано, что такой метод построения обладает важным преимуществом, он позволяет получать координаты, как

замкнутых, так и разомкнутых силовых линий, благодаря выбору длины силовой линии в качестве независимой переменной.

Приведена используемая классификация гибридных типов волн, распространяющихся в ВСС, приведённых на Рисунке 1. Классификация проведена на основе типа граничных условий на контуре Г-образной области (индексы граничных условий  $g_1$  и  $g_2$  на Рисунке 2 принимают значения 1 в случае магнитной стенки и 0 в случае электрической стенки). Гибридные типы волн были обозначены как  $HE_{g_1g_2}^p$  и  $EH_{g_1g_2}^p$ , где  $p$  – порядковый номер волны.

Проведены расчёты критических волновых чисел  $k$  и постоянных распространения  $\gamma$  для разного количества аппроксимирующих функций и членов в рядах матричных элементов СЛАУ. Показана внутренняя сходимость МЧО с учётом влияния металлических и диэлектрических рёбер волновода на структуры электромагнитных полей. Даны рекомендации по используемым приближениям расчётов. Показано, что третье приближение метода и 150 членов в рядах матричных элементов СЛАУ обеспечивают высокую точность результата.

**В третьей главе** производится анализ влияния диэлектрика на величины критических волновых чисел, постоянных распространения, а также на структуры электромагнитных полей. Проведён расчёт электродинамических характеристик гибридных волн в следующих структурах:

- Н-волновод с диэлектрическим образцом, заполняющим всё пространство между гребнями (Рисунок 1а); с диэлектрическим образцом ( $a/l = 0.1$ ,  $b/l = 0.1$ ), установленным между гребнями и зажатым между двух диэлектрических подложек с диэлектрической проницаемостью близкой к единице (Рисунок 1б); с двумя диэлектрическими пластинами ( $g/l - a/l = 0.05$ ), между которыми находится газообразный или жидкий диэлектрик (Рисунок 1в);
- П-волновод с диэлектрическим образцом ( $a/l = 0.1$ ,  $b/l = 0.21$ ), установленным под гребнем волновода (Рисунок 1г); с

диэлектрическим образцом ( $a/l = 0.1, b/l = 0.17$ ), установленным над гребнем волновода (Рисунок 1д); с образцом, заполняющим всё пространство под гребнем (Рисунок 1е); с двумя непроницаемыми диэлектрическими пластинами ( $g/l - a/l = 0.05$ ), между которыми находится газообразный или жидкий диэлектрик (Рисунок 1ж).

При расчётах использовался П-волновод с полосой пропускания 2.4 : 1 и геометрическими размерами:  $l = 1, g/l = 0.155, h/l = 0.375, c/l = 0.9$ , и Н-волновод с полосой пропускания 2.4 : 1 и геометрическими размерами:  $l = 1, g/l = 0.251, h/l = 0.197, c/l = 0.465$ .

Для перечисленных структур с различной величиной диэлектрической проницаемости заполняющих образцов были проведены расчёты первых восьми критических волновых чисел HE- и EH-волн. Установлено, что размещение диэлектрика в волноводе приводит к уменьшению критических волновых чисел, причём, чем больше геометрические размеры заполняющего образца, тем значительнее уменьшаются критические волновые числа. Показано, что для данных структур (Рисунок 1) наибольшее влияние диэлектрик оказывает на величину критического числа основной гибридной волны  $HE_{01}^1$ .

Рассчитаны постоянные распространения первых двух HE-волн и первой EH-волны, распространяющихся в ВСС на Рисунке 1 без учёта потерь электромагнитной энергии. Расчёт проводился на рабочей частоте. Установлено, что чем больше геометрические размеры исследуемого образца и чем больше величина диэлектрической проницаемости, тем сильнее увеличивается постоянная распространения.

Для оценки корректности и точности результатов, получаемых с использованием разработанных алгоритмов, проведено их сравнение с результатами, полученными с применением пакета прикладных программ, использующих в своей основе метод сеток. Показано, что результаты расчётов совпадают с высокой точностью. Средний процент расхождения результатов составляет 0.5%.

Для рассматриваемых П- и Н-волноводов проведено моделирование структур электрического поля НЕ-волн и магнитного поля ЕН-волн в критическом режиме. В частности, результаты расчёта структуры электромагнитных волн в Н- и П-волноводе (Рисунок 1а и Рисунок 1е) для  $\varepsilon_1 = 1$  и  $\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \varepsilon_4 = 8$  приведены на Рисунке 3.

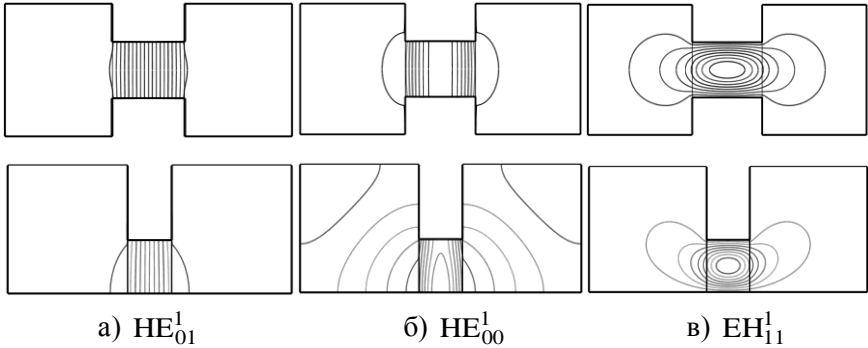


Рисунок 3.

Установлено, что электромагнитное поле «втягивается» в область расположения диэлектрика. Причём, чем больше величина диэлектрической проницаемости, тем сильнее искажается структура электромагнитного поля, и тем больше силовых линий оказывается в области размещения диэлектрика.

Для рассматриваемых волноводов (Рисунок 1) было проведено моделирование структур электромагнитного поля первых двух НЕ-волн и первой ЕН-волны на рабочих частотах для отрезков волновода протяжённостью  $\lambda_{\text{в}} / 2$ , где  $\lambda_{\text{в}}$  – длина волны в волноводе. В частности, на Рисунке 4 для Н-волновода приведены структуры: основной волны  $HE_{01}^1$  ( $kl = 3, \varepsilon_1 = 1, \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \varepsilon_4 = 8$ ), волны  $HE_{00}^1$  ( $kl = 4, \varepsilon_1 = 1, \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \varepsilon_4 = 8$ ) и волны  $EH_{11}^1$  ( $kl = 6, \varepsilon_1 = 1, \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \varepsilon_4 = 4$ ). На Рисунке 4  $\mathbf{D}$  – индукция электрического поля, а  $\mathbf{B}$  – индукция магнитного поля.

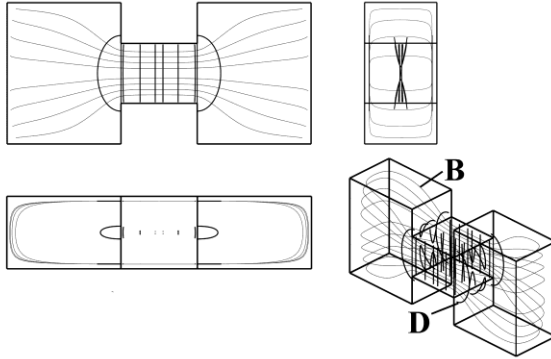
Анализ структур показал, что электромагнитное поле «втягивается» в диэлектрик, а структура поля имеет ряд особенностей. В сечении волновода  $z=0$ :  $D_z = B_z = 0$ , а в сечении волновода

$z = \lambda_g/4$ : компоненты поля  $D_x = D_y = B_x = B_y = 0$ , а компоненты поля  $D_z \neq 0$ ,  $B_z \neq 0$  и имеют максимальное по модулю значение.

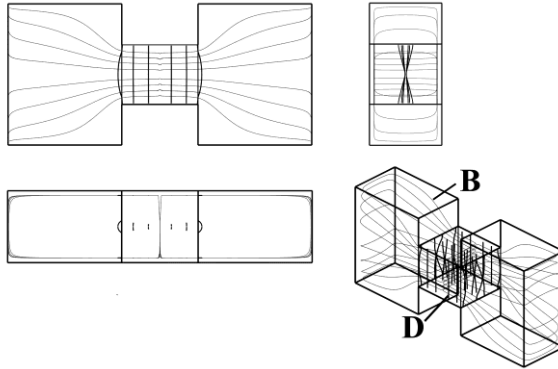
Проведённый в главе анализ, позволил произвести селекцию наиболее подходящих волноведущих структур, которые можно эффективно использовать в качестве измерительных ячеек. Кроме того, был выработан ряд рекомендаций по размещению диэлектрического образца внутри волновода для достижения максимальной точности измерений комплексной диэлектрической проницаемости. В частности, для достижения максимальной чувствительности измерительной ячейки исследуемый образец следует размещать в геометрическом центре волновода – в месте максимальной концентрации электромагнитной энергии основной волны, стремясь заполнить диэлектриком всё доступное пространство в области гребня.

**В четвёртой главе** приводится уравнение, позволяющее определять величину комплексной диэлектрической проницаемости  $\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon''$  по измеренной величине комплексной постоянной распространения  $\gamma = \beta - i\alpha$ , где  $\beta$  – фазовая постоянная,  $\alpha$  – коэффициент затухания. Для решения описанного комплексного уравнения, необходимо учитывать потери электромагнитной энергии гибридных волн в диэлектрике. В главе 4 приводятся методики расчёта потерь электромагнитной энергии гибридных типов волн в диэлектрике. Первая методика предполагает представление комплексной постоянной распространения как функции от комплексной диэлектрической проницаемости материалов. Полученная функция раскладывается в ряд Тейлора и может быть разделена на два выражения для определения фазовой постоянной и коэффициента затухания. Другая методика основана на методе Мюллера поиска комплексных корней СЛАУ. Проведено сравнение результатов, получаемых с применением двух методик, и установлено, что результаты расчётов хорошо согласуются. Однако методика, основанная на методе Мюллера, позволяет находить комплексные корни с большей точностью при наличии значительных потерь электромагнитной энергии в диэлектрике.

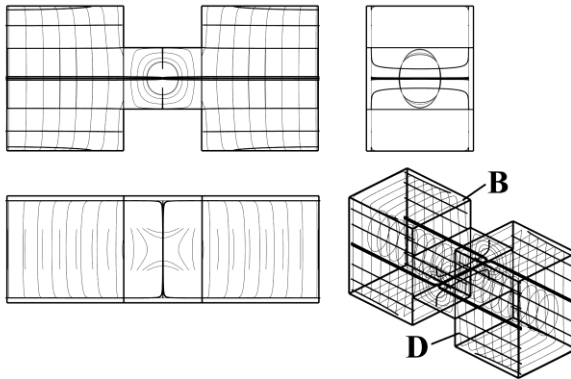




a)  $HE_{01}^1$  ( $kl = 3$ ;  $\gamma l = 7.59$ ).



б)  $HE_{00}^1$  ( $kl = 4$ ;  $\gamma l = 7.64$ ).



в)  $EH_{11}^1$  ( $kl = 6$ ;  $\gamma l = 5.02$ ).

Рисунок 4.

С помощью представленной методики производилось теоретическое определение мнимой и действительной частей комплексной диэлектрической проницаемости материалов по коэффициенту затухания и фазовой постоянной основной гибридной волны для ВСС с различным диэлектрическим заполнением. Результаты таких расчётов ( $kl=2.5$ ) для Н-волновода с полосой пропускания 3.6 : 1 и размерами:  $l=1$ ,  $g=0.25l$ ,  $c=0.43l$ ,  $h=0.084l$  представлены на Рисунке 5.

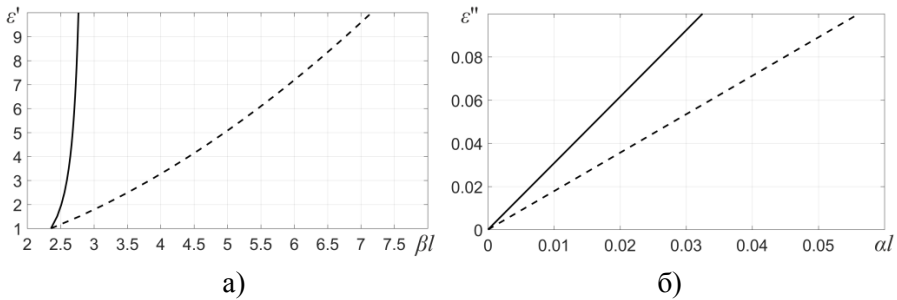


Рисунок 5.

Пунктирной линией на Рисунке 5 обозначен случай заполнения диэлектрическим образцом всего пространства между гребнями волновода (Рисунок 1а), а сплошной – случай, когда диэлектрический образец ( $a = g/2$ ,  $b = h/2$ ) зажимается между двумя подложками с диэлектрической проницаемостью близкой к единице (Рисунок 1б).

Установлено, что чем больше геометрические размеры образца, тем больше чувствительность и, как следствие, точность проводимых измерений.

Приведено описание лабораторной установки, использующейся для измерения комплексной диэлектрической проницаемости материалов (Рисунок 6). На рисунке 6 цифрами обозначены: 1 – векторный анализатор; 2 – коаксиальные кабели; 3 – измерительная ячейка; 4 – образец диэлектрика; 5- коаксиально-волноводный переход.

При проведении измерений использовался векторный анализатор цепей Agilent Technologies E8363B, а в качестве измерительной ячейки применялся Н-волновод WRD750.

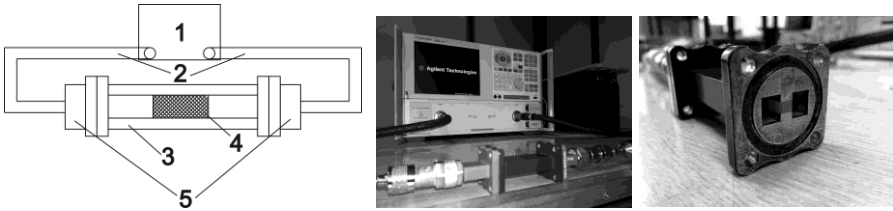


Рисунок 6.

Описан метод измерения действительной части диэлектрической проницаемости материалов, включающий следующие этапы: измерение разницы фазового сдвига основной волны в волноводе без диэлектрика  $\varphi$  и в волноводе с диэлектриком  $\varphi_\varepsilon$ ; определение фазовой постоянной волны в волноводе с диэлектриком  $\beta_\varepsilon$  по разности фаз  $d\varphi = \varphi_\varepsilon - \varphi$  и по известной величине фазовой постоянной в волноводе без диэлектрика  $\beta_{\text{возд}}$ ; нахождение действительной части диэлектрической проницаемости с применением разработанного алгоритма. Так как на практике, с использованием реально существующих приборов, измерить набег фазы можно только с точностью  $\pm 2\pi s$ ,  $s=1,2,3,\dots$ , то итоговая формула расчёта величины фазовой постоянной в волноводе с диэлектриком принимает вид:

$$\beta_\varepsilon = (d\varphi + 2\pi s + \beta_{\text{возд}} z_\varepsilon) / z_\varepsilon, \quad (1)$$

где  $z_\varepsilon < 0$ ,  $|z_\varepsilon|$  – длина образца.

Предложена методика однозначного определения фазового сдвига, основанная на измерении сдвига фазы образцов различной длины и решении Диофантового уравнения в целых числах относительно количества полных периодов сдвига фазы гибридной волны.

Описан процесс определения мнимой части диэлектрической проницаемости материалов, включающий следующие этапы: измерение параметров матриц рассеяния в воздушном волноводе ( $S_{11}$  и  $S_{12}$ ) и в волноводе с образцом ( $S'_{11}$  и  $S'_{12}$ ), определение коэффициента затухания волны  $\alpha$  в волноводе с образцом по параметрам матриц рассеяния (2), расчёт мнимой части диэлектрической проницаемости по представленным выражениям.

$$\alpha = \frac{\ln(1 + (S'_{11})^2 + (S'_{12})^2 - (S_{11})^2 - (S_{12})^2)}{2z_\varepsilon} \quad (2)$$

Приведены формулы оценки точности косвенных измерений комплексной диэлектрической проницаемости, а также показаны ошибки результатов теоретических расчётов комплексной диэлектрической проницаемости.

Приведены результаты измерений комплексной диэлектрической проницаемости образцов из эбонита, стеклотекстолита, плексигласа, тефлона и древесины. Продемонстрировано, что результаты измерений хорошо согласуются с результатами измерений данных материалов, приведёнными в литературе.

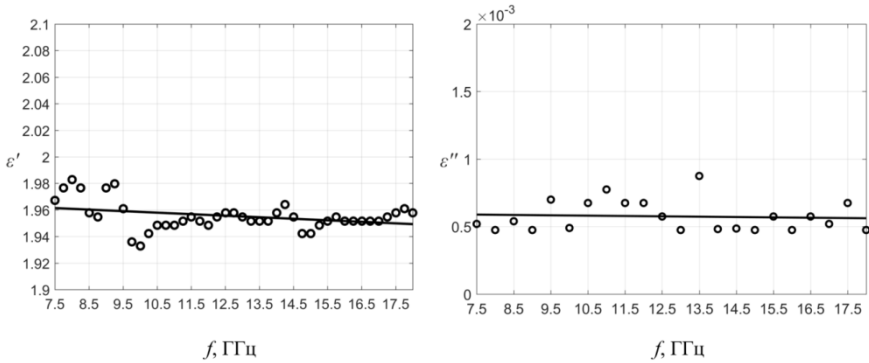


Рисунок 7.

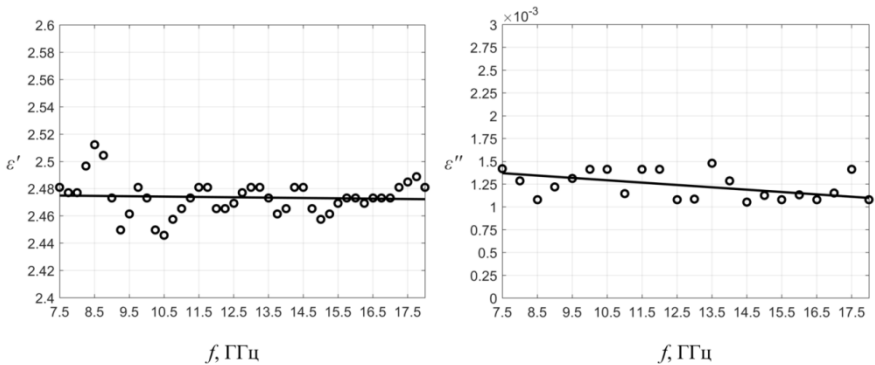


Рисунок 8.

На Рисунке 7 приведены результаты измерений комплексной диэлектрической проницаемости образца из тефлона (на частоте  $f = 10$  ГГц табличное значение  $\varepsilon = 2.0 - i0.0006$ ), а на Рисунке 8 образца из эбонита (на частоте  $f = 10$  ГГц табличное значение  $\varepsilon = 2.4 - i0.0012$ ). Символом  $\circ$  – обозначены результаты измерений по описанной методике, сплошная линия – их линейная интерполяция.

**В заключении приведены** основные результаты проведённых исследований. Показаны преимущества и перспективность представленной в работе методики измерений комплексной диэлектрической проницаемости.

### **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ.**

1. На основе МЧО с учётом влияния металлических и диэлектрических рёбер волновода на структуры электромагнитных полей, разработан и программно реализован алгоритм электродинамического анализа гибридных типов волн, распространяющихся в ВСС с неоднородным диэлектрическим заполнением. Созданное программное обеспечение позволяет определять следующие электродинамические характеристики электромагнитных волн: постоянные распространения, критические волновые числа, а также визуализировать структуры электромагнитных полей гибридных типов волн в критическом режиме и на рабочей частоте.
2. Проведены исследования сходимости и точности результатов, получаемых с использованием представленных алгоритмов. Установлена сходимость алгоритмов при расчёте электродинамических характеристик гибридных типов волн. Определены рекомендуемые для научных расчётов параметры ограничения.
3. Рассчитаны значения критических волновых чисел и постоянных распространения гибридных типов НЕ- и ЕН-волн, распространяющихся в различных ВСС с кусочно-слоистым диэлектрическим заполнением. Представленные в виде таблиц результаты позволяют проводить анализ характера поведения критических волновых чисел и постоянных распространения в зависимости от величины диэлектрической проницаемости, геометрических размеров образца и его расположения в ВСС.

4. Разработан алгоритм расчёта и визуализации структур электромагнитных полей НЕ- и ЕН-волн на рабочей частоте и в критическом режиме. Впервые визуализированы структуры гибридных типов волн в ВСС с неоднородным диэлектрическим заполнением. Силовые линии электромагнитного поля являются непрерывными, а их движение является плавным и не испытывает искажений, как внутри частичных областей, так и на их границе. Полученные результаты позволяют провести анализ поведения гибридных типов волн и их взаимодействия с диэлектрическими образцами, расположенными в ВСС.
5. Проведено сравнение полученных с помощью разработанной программы постоянных распространения с результатами расчёта, полученными с применением программного пакета, использующего в своей основе метод сеток. Сравнение результатов подтвердило эффективность и высокую точность разработанного алгоритма.
6. Представлена упрощённая формула, характеризующая особенности поведения электромагнитного поля на прямоугольном диэлектрическом ребре. Данная формула позволяет упростить аналитические выражения и сократить время счёта на ЭВМ.
7. Разработана методика расчёта потерь электромагнитной энергии распространяющихся волн. Рассчитаны коэффициенты затухания волн для случаев различного диэлектрического заполнения. Полученные результаты позволяют проанализировать влияние диэлектрического заполнения волновода на скорость затухания волны.
8. Решена и реализована в виде программы задача определения комплексной диэлектрической проницаемости материалов, заполняющих ВСС при известной величине постоянной распространения и размерах заполняющих образцов.
9. Разработана методика однозначного определения величины фазового сдвига гибридных типов волн в ВСС.
10. Разработана новая широкополосная методика измерения комплексной диэлектрической проницаемости материалов. Проведена оценка точности измерений. Продемонстрированы её преимущества.
11. Получены данные измерений для образцов из тефлона, древесины, плексигласа, эбонита и стеклотекстолита. Проведено сравнение

полученных данных для диэлектрических образцов со значениями комплексной диэлектрической проницаемости на обозначенной частоте, встречающимися в известной литературе. Продемонстрировано, что частные результаты хорошо согласуются, что говорит о высокой точности предложенной методики измерений.

### **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Донченко, А.В. П-волновод как измерительная ячейка устройств определения диэлектрической проницаемости материалов / А.В. Донченко, Г.Ф. Заргано // Физические основы приборостроения. - 2016. - Т. 5, N. 5. - С. 42-50.
2. Донченко, А.В. Электродинамический анализ электромагнитных полей волн гибридных типов в гребневом волноводе / А.В. Донченко, Г.Ф. Заргано, В.В. Земляков // Известия вузов. Радиофизика. - 2017. - Т. 60, N. 10. - С. 880–891.
3. Донченко, А.В. Гибридные типы волн в Н-волноводе с кусочно-слоистым диэлектрическим заполнением / А.В. Донченко, Г.Ф. Заргано, В.В. Земляков // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. - 2018. – N. 2. - С.60-69.
4. Donchenko, A.V. Electrodynamics analysis of electromagnetic fields of hybrid waves propagating in the single-ridged waveguide / A.V. Donchenko, G.F. Zargano, V.V. Zemlyakov // Journal of Electromagnetic Waves and Applications. – 2018. - Vol. 32. No. 6. - P. 739–749.
5. Донченко, А.В. Электродинамический анализ открытого желобкового волновода – перспективного элемента измерительной техники СВЧ / А.В. Донченко, Г.Ф. Заргано, В.В. Земляков, В.П. Ткаченко // Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации: Материалы 6-й Международной научно-технической конференции. - 2013. - С. 46-50.
6. Донченко, А.В. Ridged waveguide as a device for measuring the dielectric permittivity of materials / А.В. Донченко, Г.Ф. Заргано, В.В. Земляков // International Conference on Actual Problems of Electron Device Engineering (APEDE). - 2014. - С. 326- 333.
7. Донченко, А.В. Анализ электромагнитных полей гибридных типов волн в волноводах сложных сечений с кусочно-однородным диэлектрическим заполнением / А.В. Донченко, Г.Ф. Заргано, В.В. Земляков // Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации: Материалы 8-й Международной научно-технической конференции. - 2015. - С. 38 - 41.

8. Донченко, А.В. Электродинамический анализ гибридных типов волн в сложных волноведущих структурах с кусочно-слоистым диэлектрическим заполнением / А.В. Донченко, Г.Ф. Заргано // Труды международной научной конференции "Излучение и рассеяние электромагнитных волн". - 2015. - С. 95 – 99
9. Donchenko, A.V. Hybrid types of waves in the ridged waveguide with piecewise-layered dielectric filling / A.V. Donchenko, G.F. Zargano // International Conference on Actual Problems of Electron Device Engineering (APEDE). - 2016. - Т.1. - С. 260 - 265.
10. Донченко, А.В. Использование электромагнитных полей гибридных типов волн в П-волноводе для определения диэлектрической проницаемости материалов / А.В. Донченко, Г.Ф. Заргано // Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации: Материалы 9-й Международной научно-технической конференции. - 2016. - С. 69 – 72.
11. Donchenko, A.V. Electrodynamics Analysis of Electromagnetic Fields in the Ridge Waveguides with Piecewise-layered Dielectric Filling / A.V. Donchenko, G.F. Zargano, V.V. Zemlyakov // Progress In Electromagnetics Research Symposium - Spring (PIERS). - 2017. - P. 2081 – 2086.
12. Donchenko, A.V. The Investigation of Electromagnetic Field Structures of Hybrid Modes in the Ridged Waveguide / A.V. Donchenko, G.F. Zargano, V.V. Zemlyakov // Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW). - 2017. - P. 426 – 429.
13. Донченко, А.В. Методика измерений комплексной диэлектрической проницаемости в гребневом волноводе / А.В. Донченко, Г.Ф. Заргано, В.В. Земляков // Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы электронного приборостроения» (АПЭП-2018). - 2018. - Т. 1. - С. 350-355.
14. Donchenko, A.V. Measurements of the Permittivity of Materials Using the Double-Ridged Waveguide / A.V. Donchenko, G.F. Zargano, V.V. Zemlyakov // 14th International Scientific-Technical Conference APEIE. - 2018. - P. 29 – 32.

Подписано в печать 18.10.18 г. Формат 60x84/16.

Бумага офсетная № 1. Гарнитура Таймс.

Заказ №1301006. Печать оперативная. Усл. печ. л. 1.4. Тираж 100 экз.

ООО Южный технологический центр «Ориентир»

344002, г. Ростов-на-Дону, ул. Темерницкая, 41 «Б»