

Раевская Юлия Владимировна

ВНУТРЕННИЕ ЗАДАЧИ ДИФРАКЦИИ НА СТЫКАХ БАЗОВЫХ
ВОЛНОВЕДУЩИХ СВЧ И КВЧ СТРУКТУР

05.12.07 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Нижний Новгород – 2009

Работа выполнена на кафедре «Техника радиосвязи и телевидения»
Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Белов Юрий Георгиевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Радионов Александр Алексеевич

кандидат технических наук
Чижов Александр Иванович

Ведущая организация: ФГУП «ФНПЦ Научно-исследовательский
институт измерительных систем
им. Ю.Е. Седакова», г. Н.Новгород

Защита состоится 18 июня 2009 г. в 13.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.165.01 в Нижегородском государственном техническом университете им. Р.Е. Алексеева по адресу: 603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева.

Автореферат разослан ____ мая 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Назаров А.В.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность проблемы. Автоматизированное проектирование функциональных узлов СВЧ и КВЧ диапазонов требует изменения подхода к компоновке базовых элементов, образующих эти узлы. При этом на первый план выдвигается требование адекватности математической модели реальному СВЧ (КВЧ) устройству. Построение математических моделей на электродинамическом уровне строгости приводит к решению дифракционных задач о согласовании базовых элементов, образующих функциональные узлы и возникающих при декомпозиции последних [Л.1]. В качестве базовых элементов чаще всего фигурируют отрезки различных направляющих структур.

Адекватное математическое описание электромагнитных процессов, происходящих на границах между базовыми элементами, образующими функциональный узел, дает общая теория электромагнитного поля, основанная на решении краевых задач, базирующихся на уравнениях Максвелла. Несмотря на относительную простоту формулировок этих задач, их реализация требует предварительного решения целого ряда вопросов, первоочередными из которых являются: формирование базисов собственных функций (собственных волн) декомпозиционных элементов, оптимальный выбор реализации граничных условий, эффективный подход к алгебраизации функциональных уравнений, следующих из граничных условий.

В процессе декомпозиции рассматриваемое устройство разбивается на частичные области, поля в которых представляются в виде разложений по дискретным спектрам собственных функций, если краевые задачи для них однородные, или в виде непрерывного спектра [Л.2, Л.3] в противном случае. Стыкуемые волноведущие структуры могут содержать в полном спектре собственных волн комплексные волны, т.е. волны с комплексными волновыми числами в отсутствие диссипации энергии [Л.4, Л.5]. В связи с вышесказанным актуальной является проблема правильного учета непрерывного спектра собственных функций и собственных комплексных волн в базисах дифракционных задач (правильного их включения в представления полей дифракции на стыках волноведущих структур), обоснованной за-

писи краевых условий на границах частичных областей, оптимальной процедуры алгебраизации функциональных уравнений, получаемых из этих условий.

Цель работы и программа исследований. Цель диссертации – разработка критериев, обеспечивающих корректную постановку и решение внутренних дифракционных задач о стыках неоднородных электродинамических структур, являющихся базовыми при построении различных функциональных узлов СВЧ и КВЧ диапазонов.

Программа исследований, проводившихся в достижение поставленной цели, составляет:

- рассмотрение принципиальных вопросов, связанных с решением внутренних дифракционных задач (строгое обоснование торцевых граничных условий в задачах дифракции о стыках экранированных направляющих структур; обоснование правил алгебраизации функциональных уравнений, получаемых при реализации граничных условий на стыках экранированных направляющих структур; формулировка условий учета собственных комплексных волн и волн непрерывного спектра в проекционных базисах стыкуемых волноводов);

- разработка алгоритмов расчета базовых элементов функциональных узлов СВЧ и КВЧ диапазонов (элемента согласованной нагрузки для прямоугольного волновода; стыка неоднородных волноводно-щелевых линий; зондирующей системы установки для исследования быстропротекающих процессов; резонансной ячейки для радиоспектроскопа).

Методы исследования. Представленные в диссертационной работе теоретические результаты получены на основе метода частичных областей (МЧО) с использованием дискретного и непрерывного спектров собственных функций, матричным методом с использованием обобщенных матриц рассеяния.

Научная новизна. В результате выполнения работы:

- дано строгое обоснование записи торцевых граничных условий в задачах дифракции о стыках экранированных направляющих структур;

- сформулированы условия, при которых допустимо использование условий ортогональности собственных функций краевых задач для экранированных направляющих структур;

- показано, что в дифракционных задачах о стыках неоднородно заполненных направляющих структур в общем случае необходимо использовать условие ортогональности собственных волн этих структур;

- сформулированы правила учета собственных комплексных волн в проекционных базисах;

- разработаны алгоритмы и программы расчета базовых структур, используемых для построения согласованных нагрузок, полосовых фильтров, резонаторов, возбуждающих устройств СВЧ и КВЧ диапазонов.

Обоснованность и достоверность результатов работы. Теоретические результаты диссертационной работы получены строго обоснованным методом частных областей с использованием полных базисов функций краевых задач Штурма-Лиувилля [Л.6]. Контроль результатов осуществлялся путем исследования внутренней сходимости решений, проверки выполнения закона сохранения энергии, граничных условий и предельных переходов, а также сравнением с экспериментом.

Практическая ценность. Результаты исследований позволили:

- создать математические модели и алгоритмы расчета базовых элементов электродинамических структур; эти алгоритмы могут быть использованы для автоматизированного проектирования различных функциональных узлов СВЧ и КВЧ диапазонов;

- изучить влияние геометрических размеров базовых элементов и параметров диэлектрических включений в их составе на характеристики функциональных СВЧ и КВЧ узлов; выдать рекомендации по оптимизации конструкции этих базовых элементов.

Реализация и внедрение результатов. Пакеты программ расчета характеристик диэлектрического контактного излучателя и дифракции на стыке круглого

двухслойного экранированного волновода с полым, короткозамкнутым на конце переданы в научно-исследовательский институт измерительных систем (г. Н.Новгород); алгоритмы и результаты расчета КСВ для стыка прямоугольного волновода с прямоугольным коаксиалом переданы в Нижегородский научно-исследовательский приборостроительный институт.

Положения, выносимые на защиту.

1. Критерии использования в стыковочных дифракционных задачах условий ортогональности собственных функций и энергетических условий ортогональности.
2. Утверждение о необходимости использования в дифракционных базисах комплексных волн. Формулировка правил их учета.
3. Моделирование нерегулярного участка волноводно-щелевой линии как базового элемента типовых функциональных СВЧ-узлов.
4. Применение математического аппарата задач дифракции на стыке однородно заполненных круглых волноводов с неоднородно заполненными для зондирующего устройства в системах бесконтактной диагностики быстропротекающих процессов, определение оптимального продольного профиля излучателя зондирующего устройства.
5. Применение МЧО с непрерывным спектром собственных функций в задаче о расчете характеристик поглощающей ячейки ЭПР-радиоспектроскопа.
6. Моделирование элемента согласованной волноводной нагрузки на основе прямоугольного коаксиала с целью определения возможности применения ее в КВЧ диапазоне.

Публикации и апробация работы. По результатам диссертации опубликована 21 печатная работа, среди них 4 статьи в журналах, рекомендованных ВАК и 1 статья в сборнике «Труды НГТУ». Сделаны доклады на II, III, IV, V, VII Международных научно-технических конференциях «Физика и технические приложения волновых процессов» (2003-2006, 2008 гг.), Всероссийских научно-технических

конференциях «Информационные системы и технологии-2003, 2004, 2005», «Будущее технической науки» (2003-2005 г.), «IX нижегородской сессии молодых ученых. Технические науки» (2004 г.).

Объем и структура диссертации. Работа состоит из введения, пяти глав и заключения. Содержит 170 страниц печатного текста, включая библиографию из 118 наименований, 54 рисунка, 12 таблиц, 3 приложения, включая 2 акта внедрения результатов диссертации.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулирована цель диссертационной работы, обоснована ее актуальность, сформулированы задачи исследований, определена новизна полученных результатов и их практическая значимость, обоснована их достоверность, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, кратко изложено содержание диссертации.

В первой главе диссертации рассматриваются вопросы постановки и решения дифракционных задач о согласовании различных направляющих структур между собой. Дается строгое обоснование записи торцевых граничных условий в задачах дифракции на стыках экранированных направляющих структур, при использовании которых можно производить разложение дифракционного поля по полным системам потенциальных и вихревых собственных функций краевых задач для базовых направляющих структур.

В главе сформулированы критерии использования условий ортогональности собственных функций краевых задач для экранированных направляющих структур. Показано, что в задачах дифракции на стыках неоднородно заполненных направляющих структур в общем случае нельзя использовать условие ортогональности собственных функций краевых задач для согласуемых областей при алгебраизации функциональных уравнений, получаемых из граничных условий. В этом случае необходимо использовать условие ортогональности собственных волн этих структур (энергетическое условие ортогональности). Показано, что полный спектр базовых

направляющих структур в общем случае должен включать в себя комплексные волны. Поэтому при формировании проекционных базисов, по которым раскладывается дифракционное поле, необходимо проверять, существуют ли в рассматриваемом диапазоне частот комплексные волны.

В главе на примере задачи о стыке двух круглых двухслойных экранированных волноводов (рис.1) сформулированы правила включения в дифракционные базисы комплексных волн (КВ), если последние существуют в рассматриваемом диапазоне частот. В рассмотренной дифракционной задаче были рассчитаны значения коэффициентов отражения и прохождения на разных частотах при возбуждении стыка волноводов одной комплексной волной – прямой и парой комплексных волн. Численные результаты показали, что при возбуждении стыка парой комплексных волн, отраженные от стыка КВ возбуждаются с близкими по модулю амплитудами. Это объясняется тем, что функция вторичного источника, каким является плоскость стыка, близка к действительной функции координат [Л.7].

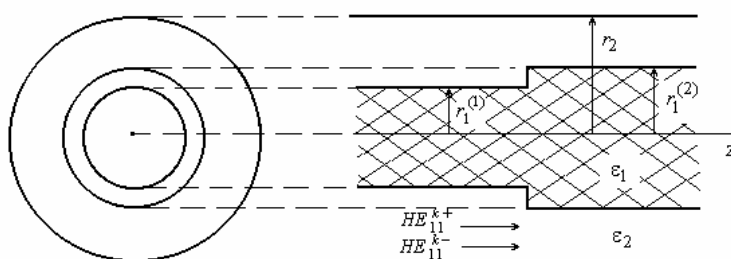
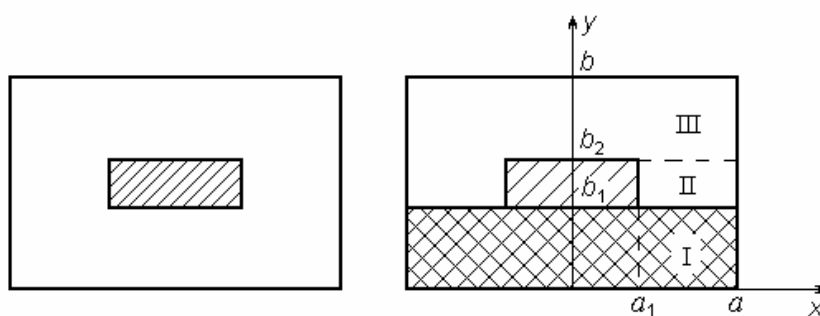


Рис.1

При возбуждении стыка одной комплексной волной вторичный источник описывается принципиально комплексной функцией поперечных координат, в результате чего отсутствует парное возбуждение КВ. На основе этих результатов делается вывод о необходимости попарного включения комплексных волн в дифракционные базисы.

Во второй главе диссертации описывается расчет элемента согласующего устройства для оконечной нагрузки прямоугольного волновода. В качестве согласованной нагрузки предлагается использовать прямоугольный коаксиальный волновод, нагруженный на диссипативную вставку. Чтобы оценить степень согласованности прямоугольного волновода с прямоугольным коаксиалом был рассчитан КСВ

стыка этих электродинамических структур в рабочем диапазоне основной волны H_{10} прямоугольного волновода. Расчет КСВ производился в одноволновом приближении с использованием аппарата волновых сопротивлений прямоугольного волновода на волне H_{10} и прямоугольного коаксиала на основной волне. Для нахождения волнового сопротивления прямоугольного коаксиала (рис.2а) использовался алгоритм расчета характеристик дисперсии и затухания экранированной микрополосковой линии (рис.2б). При расчетах диэлектрическая проницаемость подложки бралась равной ε_0 .



Задача расчета экранированной микрополосковой линии решалась методом частичных областей (МЧО), в результате использования которого получалась система функциональных уравнений относительно амплитудных коэффициентов собственных функций. Последняя сводилась к системе линейных алгебраических уравнений применением условия ортогональности собственных функций краевых задач для выделенных частичных областей. Из условия нетривиальности решений этой системы получалось дисперсионное уравнение. В главе приводятся результаты исследования внутренней сходимости разработанного алгоритма, проверка точности «сшивания» тангенциальных компонент поля на границах частичных областей.

Полученные из дисперсионного уравнения волновые числа были использованы для нахождения компонент электрического и магнитного полей, а они в свою очередь - для расчета напряжения и продольного потока мощности через поперечное сечение прямоугольного коаксиала, и, как следствие, волнового сопротивления прямоугольного коаксиала.

В результате проведенных исследований показано, что в одноволновом режиме работы прямоугольного волновода согласование его с прямоугольным коак-

сиалом можно производить на уровне сравнения волновых сопротивлений этих направляющих структур.

В третьей главе диссертации рассмотрена дифракционная задача расчета базового элемента частотно-селективных устройств СВЧ – стыка двух волноводно-щелевых линий (ВЩЛ) (рис.3). Расчет производился с использованием аппарата обобщенных матриц рассеяния многополюсников. Нахождение элементов обобщенных матриц рассеяния стыка двух ВЩЛ производилось с использованием МЧО. Предварительно был рассчитан спектр собственных волн ВЩЛ для различных значений ее параметров. Было показано, что комплексные волны существуют в широком частотном диапазоне (рис.4а,б).

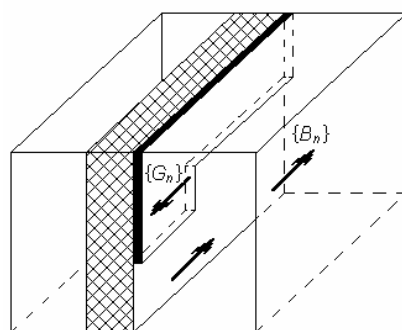


Рис.3

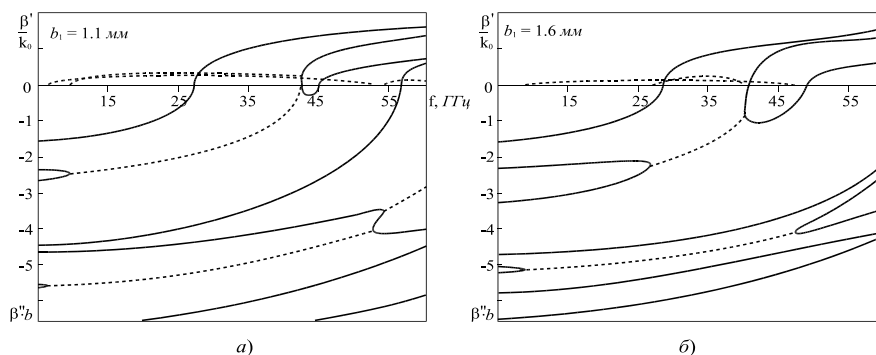


Рис.4

Решение дифракционной задачи о стыке двух ВЩЛ с использованием МЧО привело к системе функциональных уравнений, которая в дальнейшем была сведена к системе линейных алгебраических уравнений относительно амплитуд собственных волн. Алгебраизация функциональных уравнений в третьей главе диссертации выполнена с использованием условия энергетической ортогональности собст-

венных волн стыкуемых структур, так как последние имеют неоднородное заполнение.

Была произведена проверка корректности работы алгоритма. Сначала исследовалась сходимость результатов расчета дисперсии ВЩЛ, на следующем этапе проверялось выполнение закона сохранения энергии при передаче ее через стык, далее проводилась проверка работы алгоритма при предельном переходе к «нулевому» скачку ширины щели. На последнем этапе проверялась сходимость результатов решения дифракционной задачи.

Численные результаты расчета стыка двух ВЩЛ показали, что неправильный учет комплексных волн (учет только одной из пары возбуждаемых на неоднородности комплексных волн) в дифракционных базисах приводит к рассогласованию полей на стыке сопрягаемых линий (нарушается баланс энергии). Показано, что для получения корректных результатов учет комплексных волн должен быть парным.

Обобщенные матрицы рассеяния стыка регулярных ВЩЛ были получены по известным правилам [Л.1] с использованием результатов расчета спектра собственных волн ВЩЛ.

В качестве примера практического применения разработанного алгоритма расчета стыка ВЩЛ приведены результаты расчета АЧХ полосового фильтра на основе ВЩЛ со скачкообразным изменением ширины щели.

В четвертой главе диссертации приведены результаты исследования зондирующей системы КВЧ-интерферометра для бесконтактной диагностики быстропротекающих процессов в стволах орудий и для изучения движения фронта детонационной волны во взрывчатом веществе [Л.8, Л.9], (рис.5).

Излучатель зондирующей системы представляет собой диэлектрический стержень (диэлектрический волновод), помещенный внутрь ствола. Диэлектрический волновод служит для подвода зондирующего сигнала, а его открытый конец выполняет функции диэлектрической антенны, обеспечивающей излучение этого сигнала и прием отраженного сигнала от объекта исследования. Производился расчет характеристик распространения волн в сверхразмерном круглом двухслойном экранированном волноводе, который является адекватной электродинамической мо-

делью для описания взаимодействия поля диэлектрического волновода (ДВ) со стенками ствола.

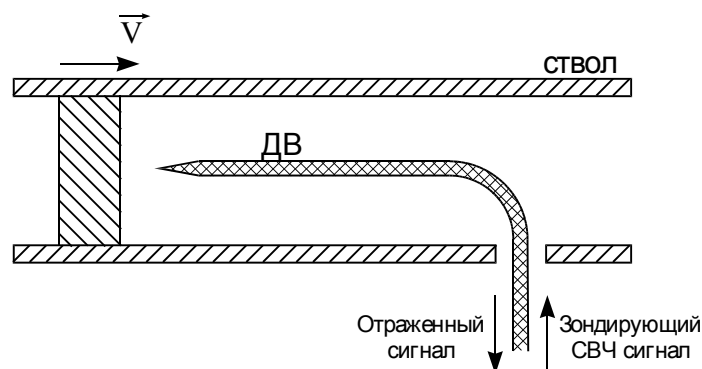


Рис.5

Для расчета поля излучения в рассматриваемой зондирующей системе дифракционная задача о стыке круглого двухслойного экранированного волновода с отрезком короткозамкнутого круглого полого волновода решалась для трех случаев: стык без плавного перехода; стыки с плавными переходами в виде конического сужения (рис.6а) и конического расширения (рис.6б) на конце ДВ.

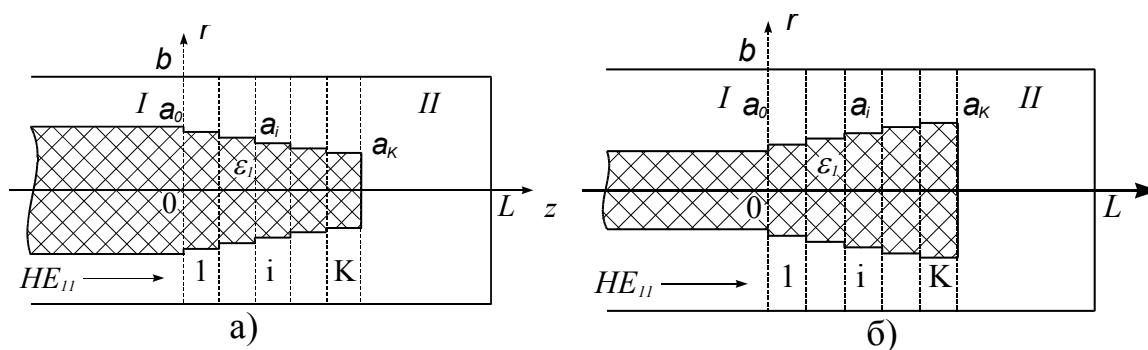


Рис.6

При решении задачи коническое сужение (или расширение) конца диэлектрического стержня аппроксимировалось ступенчатым. Из анализа результатов, полученных для трех различных вариантов продольного профиля конечного участка ДВ, был сделан вывод о том, что наиболее предпочтительной с точки зрения эффективного взаимодействия ДВ с отраженными от короткозамыкателя волнами является структура с ДВ, сужающимся на конце.

При исследовании зондирующей системы КВЧ интерферометра, предназначенного для изучения фронта детонационной волны в образце взрывчатого вещества (ВВ), антенна зондирующей системы представляет собой открытый конец ДВ, вплотную примыкающий к поверхности образца ВВ (контактная антенна). Для улучшения согласования антенны с областью пространства, куда происходит излучение (образцом ВВ), используют коническое расширение на конце ДВ (диэлектрический рупор). Для этого случая решалась задача об излучении контактной диэлектрической антенны в предположении, что последняя, вместе с образцом ВВ, располагается в цилиндрическом короткозамкнутом на конце экране достаточно большого диаметра. Экранированная модель позволяет свести расчет поля диэлектрического излучателя к решению задачи дифракции на стыке ДВ, расположенного в сверхразмерном полом круглом волноводе, с однородно заполненным короткозамкнутым на конце волноводом. Для расчетов использовался алгоритм расчета поля излучения в дифракционной задаче о стыке круглого двухслойного экранированного волновода с отрезком короткозамкнутого круглого полого волновода, но в указанной экранированной модели короткозамкнутый круглый полый волновод заменялся однороднозаполненным (образец взрывчатого вещества рассматривается как однородный диэлектрик).

В пятой главе диссертации рассмотрена дифракционная задача о расчете волноводного резонатора, используемого в качестве ячейки поглощения в ЭПР-радиоспектроскопах [Л.10]. Резонатор представляет собой отрезок прямоугольного волновода с диэлектрической ампулой, содержащей исследуемое вещество, (рис.7).

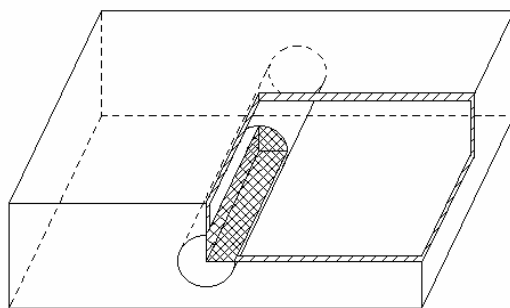


Рис.7

Задача решалась с использованием МЧО, причем в одной из частичных областей (диэлектрическая ампула), для которой нельзя сформулировать краевую задачу Штурма-Лиувилля, поля записывались в виде непрерывного спектра собственных функций краевой задачи для указанной области. Из полученной системы функциональных уравнений, с использованием условий ортогональности собственных функций частичных областей образовывались системы линейных алгебраических уравнений относительно амплитудных коэффициентов и интегральных уравнений относительно спектральных амплитуд. Для составления расчетного алгоритма был использован метод выделения «доминирующей части» непрерывного спектра [Л.11, Л.12]. В результате были получены две системы линейных однородных алгебраических уравнений, запись условий нетривиальности решений которых дала два детерминантных характеристических уравнения, которые решались совместно относительно неизвестных $\lambda_{рез}$ и T (T - пространственный период расположения наиболее интенсивных гармоник непрерывного спектра).

Численные исследования были проведены для колебания квази- H_{201} в двух приближениях. Были рассчитаны резонансные длины волн и значения продольного волнового числа при различных значениях радиуса диэлектрической ампулы, ее относительной диэлектрической проницаемости, различных поперечных размерах прямоугольного резонатора.

Был рассчитан коэффициент заполнения η , равный отношению среднеквадратичного магнитного поля в образце к среднеквадратичному полю в резонаторе (его вводят в спектроскопии для оценки влияния ампулы с исследуемым веществом на структуру магнитного поля в резонаторе).

При найденных резонансных зависимостях была рассчитана добротность резонатора. Ее величина определяет чувствительность ЭПР-радиоспектроскопа. Расчет добротности был произведен методом возмущений с учетом высокочастотных потерь в металле стенок и в диэлектрике.

В заключении к диссертации перечислены основные результаты, полученные в процессе ее выполнения.

В приложении приведены акты внедрения результатов диссертации.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Дано строгое обоснование торцевых граничных условий в задачах дифракции о стыках экранированных направляющих структур. Сформулированы условия выполнимости условий ортогональности собственных функций краевых задач для экранированных направляющих структур.
2. Показано, что при решении дифракционных задач о стыках неоднородно заполненных направляющих структур в общем случае необходимо использовать условие ортогональности собственных волн этих структур.
3. При невыполнении условий ортогональности собственных функций краевых задач, описывающих неоднородно заполненные направляющие структуры, собственные значения этих задач в общем случае включают комплексные величины, соответствующие комплексным волнам.
4. При формировании дифракционных базисов для решения стыковочных дифракционных задач необходимо учитывать комплексные волны. Учитываться КВ должны попарно, непарное введение КВ в дифракционные базисы приводит к принципиально неверным результатам (нарушается выполнение закона сохранения энергии).
5. Рассчитаны характеристики элемента согласованной волноводной нагрузки, образованного стыком прямоугольного волновода и прямоугольного коаксиала. Произведена оценка степени согласования прямоугольного волновода с прямоугольным коаксиалом на основной волне по рассчитанным значениям КСВ.
6. Рассчитаны характеристики базового элемента частотно-селективных устройств СВЧ - стыка неоднородных волноводно-щелевых линий с различными значениями ширины щелей. Сформулированы критерии оценки корректности результатов, получаемых на основе разработанных алгоритмов. Показано, что неучет комплексных волн или неправильное их введение в дифракционные базисы приводит к нарушению баланса энергии, а также к рассогласованию полей на стыке сопрягаемых линий.

7. Решена дифракционная задача о стыке однородно заполненного круглого волновода с неоднородно заполненным и стыке полого круглого волновода с неоднородно заполненным в системах бесконтактной диагностики быстропротекающих процессов.
8. Показано, что в системах для бесконтактной диагностики быстропротекающих процессов в стволах орудий предпочтительной формой излучателя (диэлектрического волновода) с точки зрения эффективного взаимодействия ДВ с отраженными от короткозамыкателя волнами является структура с заострением ДВ на конце.
9. Показано, что в системах для изучения движения фронта детонационной волны во взрывчатом веществе предпочтительной формой излучателя (диэлектрического волновода) с точки зрения эффективного взаимодействия ДВ с отраженными от короткозамыкателя волнами является структура с коническим расширением ДВ на конце.
10. На основе МЧО с непрерывным спектром собственных функций поставлена краевая задача для поглощающей ячейки ЭПР-радиоспектроскопа. Составлен алгоритм расчета поглощающей ячейки. Рассчитаны резонансные длины волн, добротность и коэффициент заполнения в зависимости от геометрических размеров поглощающей ячейки и диэлектрической проницаемости ампулы с исследуемым веществом.

ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ СЛЕДУЮЩИЕ РАБОТЫ:

1. Белов, Ю.Г. Расчет волновода с формой поперечного сечения вида «прямоугольник, дополненный секторами круга»/ Ю.Г. Белов, Ю.В. Ишенькина// Информационные системы и технологии. ИСТ-2003: тез. докл. Всерос. науч.-техн. конф. – Н. Новгород, 2003. – С.35-36.

2. Ишенькина, Ю.В. Расчет волновода со сложной формой поперечного сечения/ Ю.В. Ишенькина// Будущее технической науки Нижегородского региона: тез. докл. II регион. молодеж.-техн. форума. – Н. Новгород, 2003.- С.19-20.
3. Белов, Ю.Г. О расчете волноводов со сложной формой поперечного сечения методом частичных областей/ Ю.Г. Белов, Ю.В. Ишенькина // Физика и технические приложения волновых процессов: тез. докл. и сообщ. II Междунар. науч.-техн. конф. – Самара, 2003. – С.234.
4. Белов, Ю.Г. О расчете волноводов сложных сечений/ Ю.Г. Белов, Ю.В. Ишенькина// Информационные системы и технологии. ИСТ-2004: тез. докл. Всерос. науч.-техн. конф. – Н. Новгород, 2004. – С.32-33.
5. Ишенькина, Ю.В. Численные методы расчета волноводов со сложной формой поперечного сечения/ Ю.В. Ишенькина// Будущее технической науки: тез. докл. III Всерос. науч.-техн. конф. – Н.Новгород, 2004. – С.6-7.
6. Ишенькина, Ю.В. Применение метода Шварца для расчета волноводов со сложной формой поперечного сечения экрана/ Ю.В. Ишенькина// 9 Нижегородская сессия молодых ученых. Технические науки: тез. докл. – Н. Новгород, 2004. – С.90-91.
7. Белов, Ю.Г. Применение метода частичных областей с непрерывным спектром собственных функций для расчета волноводов со сложным сечением экрана/ Ю.Г. Белов, Ю.В. Ишенькина// Физика и технические приложения волновых процессов: тез. докл. и сообщ. III Междунар. науч.-техн. конф. – Волгоград, 2004. – С.245-246.
8. Раевская, Ю.В. К вопросу о постановке внутренних задач дифракции/Ю.В. Раевская// Информационные системы и технологии. ИСТ-2005: тез. докл. Всерос. науч.-техн. конф. – Н. Новгород, 2005. – С.29.
9. Белов, Ю.Г. Расчет волноводов сложных сечений методом конечных элементов/Ю.Г. Белов, И.Г. Луконин, Ю.В. Раевская// Информационные системы и технологии. ИСТ-2005: тез. докл. Всерос. науч.-техн. конф. – Н. Новгород, 2005. – С.29.
10. Раевская, Ю.В. Расчет прямоугольного резонатора с диэлектрическим стержнем и отверстиями в концах/ Ю.В. Раевская// Информационные системы и

- технологии. ИСТ-2005: тез. докл. Всерос. науч.-техн. конф. – Н. Новгород, 2005. – С.30.
11. Белов, Ю.Г. Исследование излучения диэлектрической антенны в круглом сверхразмерном волноводе/ Ю.Г. Белов, Р.В. Бударрагин, Ю.И. Орехов, Ю.В. Раевская// Физика и технические приложения волновых процессов: тез. докл. и сообщ. IV Междунар. науч.-техн. конф. – Н. Новгород, 2005. – С.194.
 12. Раевская, Ю.В. Расчет поглощающей ячейки для радиоспектроскопа/ Ю.В. Раевская// Физика и технические приложения волновых процессов: тез. докл. и сообщ. IV Междунар. науч.-техн. конф. – Н. Новгород, 2005. – С.154.
 13. Раевская, Ю.В. Об алгебраизации внутренних задач дифракции/Ю.В. Раевская// Будущее технической науки: тез. докл. IV Междунар. молодежной науч.-техн. конф. – Н.Новгород, 2005.
 14. Раевская, Ю.В. Об алгебраизации внутренних дифракционных задач, решаемых проекционными методами/ Ю.В. Раевская// Физика и технические приложения волновых процессов: тез. докл. и сообщ. V Междунар. науч.-техн. конф. – Самара, 2006. – С.124.
 15. Малахов, В.А. Согласованная нагрузка для прямоугольного волновода/ В.А. Малахов, Ю.В. Раевская// Физика и технические приложения волновых процессов: тез. докл. и сообщ. VII Междунар. науч.-техн. конф. – Самара, 2008. – С.136-137.
 16. Малахов, В.А. О приближенном решении некоторых краевых задач электродинамики / В.А. Малахов, Ю.В. Раевская// Физика и технические приложения волновых процессов: тез. докл. и сообщ. VII Междунар. науч.-техн. конф. – Самара, 2008. – С.143-144.
 17. Малахов, В.А. Согласующее устройство для прямоугольного волновода/ В.А. Малахов, А.С. Раевский, Ю.В. Раевская, Р.К. Стародубровский// Антенны.- Вып. 5(96), 2005. – С.58-63.
 18. Ишенькина, Ю.В. О расчете волноводов со сложной формой поперечного сечения экрана методом Шварца/ Ю.В. Ишенькина// Труды НГТУ. Радиоэлектронные и телекоммуникационные системы и устройства.- Т.44, Вып.9., 2004. – С.31-34.

19. Белов, Ю.Г. О расчете волноводов со сложной формой поперечного сечения методом частичных областей с непрерывным спектром собственных функций/ Ю.Г. Белов, Ю.В. Ишенькина// Антенны.- Вып. 5(96), 2005. – С.33-38.
20. Раевская, Ю.В. К вопросу о постановке внутренних задач дифракции/ Ю.В. Раевская// Антенны.- Вып. 5(96), 2005. – С.43-46.
21. Белов, Ю.Г. Исследование антенной системы КВЧ-интерферометра/ Ю.Г. Белов, Р.В. Бударрагин, Ю.И. Орехов, Ю.В. Раевская// Антенны.- Вып. 5(108), 2006. – С.62-67.

ЛИТЕРАТУРА

- Л.1. Автоматизированное проектирование устройств СВЧ/ В.В. Никольский, В.П. Орлов, В.Г. Феоктистов и др. [Под ред. В.В. Никольского]. – М.: Радио и связь, 1982. – 272 с.
- Л.2. Lewin, L. On the inadequacy of discrete mode matching techniques in some waveguide discontinuete problems// IEEE Trans. – 1968 – MTT-18, №7. – P.364-371.
- Л.3. Раевский, С.Б. Решение внутренних задач электродинамики с использованием непрерывного спектра в одной из частичных областей/С.Б. Раевский// Изв. вузов СССР – Радиоэлектроника. - 1980, -т.23, №9, С.27-32.
- Л.4. Clarricoats, P.J.V. Evanescent and propagating modes of dielectric-loaded circular waveguide/ P.J.V. Clarricoats, B.C. Taylor// Proc. IEEE/ - 1964. – v.111, №Т-6. – P.1951-1956
- Л.5. Раевский, С.Б. О существовании комплексных волн в некоторых двухслойных изотропных структурах/С.Б. Раевский// Изв.вузов – Радиофизика, 1972, т.15, №12, С.1926-1931.
- Л.6. Маделунг, Э. Математический аппарат физики/Э. Маделунг - М.: Гос. изд-во физ.-мат. литературы, 1961.-618 с.
- Л.7. Веселов, Г.И. Слоистые металло-диэлектрические волноводы/ Г.И. Веселов, С.Б. Раевский – М.: Радио и связь, 1988. – 247 с.

- Л.8. Физика быстропротекающих процессов; под ред. Н.А. Златина. – М.: Мир, 1971.
- Л.9. Лебедев, А.В. Радиоволновый метод измерения скорости горения взрывчатых материалов в герметичном объеме/ А.В. Лебедев, Б.Г. Лобойко, В.П. Филин, В.В. Шапошников // Хим. Физ. – 1998. - Т.17, № 9. - С.129-131.
- Л.10. Пул, Ч. Техника ЭПР-спектроскопии/ Ч. Пул – М.: Мир, 1970. – 428 с.
- Л.11. Радионов, А.А. Расчет дисперсионных характеристик и коэффициентов затухания прямоугольных гофрированных волноводов/ А.А. Радионов, С.Б. Раевский // Изв. вузов СССР – Радиоэлектроника. – 1977. - Т.20. № 9. - С. 69-73.
- Л.12. Белов, Ю.Г. Расчет резонаторов с использованием непрерывного спектра собственных функций/ Ю.Г. Белов, А.Н. Золин// Электродинамика и техника СВЧ и КВЧ. – 1996. – Т.4, №2. – С.61-64.