

На правах рукописи



Бударагин Роман Валерьевич

**МЕТОДЫ ПОПЕРЕЧНЫХ И ПРОДОЛЬНЫХ СЕЧЕНИЙ
ДЛЯ РАСЧЕТА НЕОДНОРОДНЫХ ВОЛНОВЕДУЩИХ СТРУКТУР**

Специальность 05.12.07 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Нижний Новгород - 2016

Работа выполнена на кафедре «Общая и ядерная физика» Института ядерной энергетики и технической физики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» (НГТУ).

Научный
консультант:

Радионов Александр Алексеевич, доктор технических наук, профессор

Официальные
оппоненты:

Митрофанова Татьяна Викторовна, доктор технических наук, доцент, Федеральный научно-производственный центр акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Полет», главный научный сотрудник

Мясников Евгений Николаевич, доктор физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волжский государственный университет водного транспорта», заведующий кафедрой «Физика»

Осипов Олег Владимирович, доктор физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики», проректор по информатизации и образовательным технологиям

Ведущая
организация:

Акционерное общество «Концерн «Автоматика», г. Москва

Защита состоится «29» сентября 2016 г. в 15⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д212.165.01 на базе Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева по адресу: 603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО НГТУ им. Р.Е. Алексеева и на сайте университета по адресу:

<http://www.ntu.ru/content/aspirantura-i-doktorantura/dissertacii>

Автореферат разослан «__» _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Белов Юрий Георгиевич

Актуальность темы и современное состояние исследований. Уменьшение длины рабочей волны при создании высокопроизводительных систем передачи и обработки информации сопровождается миниатюризацией и ужесточением допусков на геометрические параметры изготавливаемых функциональных элементов, вследствие чего традиционная элементная база сантиметровой части СВЧ-диапазона становится зачастую непригодной для использования в верхней части СВЧ-диапазона и КВЧ-диапазона, что сдерживает их активное освоение. Поэтому необходимо создание новых принципов построения элементной базы, разработка математического аппарата, методов расчета и оптимизации, адекватно отражающих свойства проектируемых высокочастотных узлов. Первоочередной задачей на пути решения сформулированной проблемы является расчет нерегулярных волноведущих структур.

Поперечные и продольные неоднородности вводятся как для улучшения направляющих свойств известных линий передачи и создания новых видов волноведущих структур, так и с целью получения требуемых параметров у разрабатываемых на их основе устройств.

При выборе метода расчета неоднородной волноведущей структуры, образующейся при создании какого-либо функционального узла, необходимо учитывать тип рассматриваемой неоднородности, частотный диапазон, в котором будет действовать разрабатываемый узел, а также возможности современных вычислительных систем. Для расчета таких структур в современных САПР применяются различные математические методы [Л.1].

К достоинствам аналитических методов решения следует отнести высокий уровень точности и наглядности получаемых результатов, и требующих от разработчика глубокого понимания физических процессов, происходящих в волноведущей структуре. Однако зачастую эти методы описывают лишь отдельные, наиболее существенные стороны процесса, поэтому имеют некоторые ограничения и нуждаются в обязательном сопоставлении с экспериментом.

Основным преимуществом численных методов является их универсальность и возможность использования для расчета сложных неоднородностей, например, волноводов, поверхность которых не вписывается в ортогональную систему координат. Однако эти методы не дают разработчику полного понимания физических процессов, происходящих внутри проектируемого узла, что может привести к получению неверного или

неоптимального решения, а их универсальность неизбежно приводит к большим затратам вычислительных ресурсов.

Поэтому для получения физически наглядных и математически надёжных результатов необходимо развивать численно-аналитические методы, в основе которых лежат математические модели, построенные на электродинамическом уровне строгости, и которые вобрали бы в себя преимущества как аналитических, так и численных методов расчета – универсальность, а также высокую точность и скорость вычислений.

Одним из основополагающих численно-аналитических методов является метод частичных областей (МЧО). Следует отметить, что выделение частичных областей (ЧО) с набором собственных функций (волн), обладающих свойством полноты, лежит в основе многих электродинамических методов решения как дифракционных задач, так и задач на определение собственных волн направляющей структуры, например, метода коллокаций, метода, основанного на интегральном соотношении Лоренца, метода поперечных сечений. Разновидностями МЧО являются метод частичных пересекающихся областей и метод переопределенных рядов.

Метод частичных областей может сочетаться с другими методами. Так, на сегодняшний день широкое распространение при расчете ступенчато-нерегулярных волноведущих структур получил метод декомпозиции или метод минимальных автономных блоков, основанный на МЧО с использованием многомодовой матрицы рассеяния.

Систематизация накопленного опыта позволяет усовершенствовать известные подходы к решению задач электродинамики на основе разбиения на ЧО. В работах [Л.2, Л.3] предлагается представлять электромагнитное поле в частичных областях, для которых не выполняется условие краевой задачи Штурма-Лиувилля, в виде непрерывного спектра собственных функций. При этом использование представления полей в форме непрерывного спектра значительно усложняет задачу. Для упрощения решения в [Л.4] был предложен приближенный метод выделения доминирующей составляющей непрерывного спектра.

Полнота базиса при решении дифракционных задач также является необходимым условием получения правильного результата. В частности большое значение имеет вопрос влияния комплексных волн [Л.5-7], присутствующих в спектре некоторых волноведущих структур, на характеристики узлов СВЧ- и КВЧ-диапазонов на основе этих структур.

Задачами, для которых наиболее часто применяются рассмотренные выше методы, являются задачи о скачкообразных неоднородностях в волноводах. Дальнейшее развитие рассмотренных методов видится в их применении для решения электродинамических задач со сложными (в частности плавными) некоординатными границами.

В работах [Л.8-10] и [Л.11-13] рассматриваются примеры использования МЧО для продольно-нерегулярных электродинамических структур, в том числе с некоординатными границами, и поперечно-неоднородных волноведущих структур, в том числе с плавным законом изменения параметров поперечного сечения, соответственно. Однако в этих работах не представлено общего подхода, а, следовательно, метода для расчета как поперечных, так и продольных неоднородностей.

В [Л.14] представлена модификация метода Галеркина для решения дифракционных задач, а для поперечно-неоднородных линий передачи в [Л.15] представлен спектральный подход, также основанный на методе Галеркина. Однако данный метод на практике легко реализуется лишь в случае, если форма ограничивающей поверхности соответствует какой-либо канонической системе координат.

В [Л.16] предложен метод расчета характеристик плавных переходов между двумя экранированными волноводами, основанный на интегральном соотношении Лоренца. Трудности в реализации метода связаны с выбором месторасположения вспомогательных источников.

Многообразие методов расчета, зачастую пригодных только для использования в своем классе задач, а иногда и при соблюдении некоторых условий, позволяет сделать вывод, что разработка эффективного строгого универсального метода расчета широкого спектра электродинамических задач, а также проектирование и исследование на его основе новых функциональных устройств СВЧ- и КВЧ-диапазонов с возможностью реализации САПР является задачей актуальной.

Цель диссертации – разработка метода расчета поперечно-неоднородных и продольно-нерегулярных волноведущих СВЧ- и КВЧ-структур с произвольным законом изменения геометрических параметров и параметров диэлектрического заполнения, создание эффективных алгоритмов и программных модулей для САПР функциональных узлов на основе этих структур.

В соответствии с результатами анализа современного состояния исследования и целью диссертации в работе представлены и решены следующие задачи:

1. Разработка единого подхода и, на его основе, строго обоснованного метода расчета характеристик широкого спектра неоднородных волноведущих структур СВЧ-, КВЧ- и оптического диапазонов, с произвольным законом изменения геометрических параметров и параметров диэлектрического заполнения.

2. Создание на основе разработанного метода математических моделей, эффективных алгоритмов и программ расчета характеристик неоднородных волноведущих структур и функциональных устройств на их основе, таких как: согласующие и волноводно-селектирующие переходы, зондирующие системы и эквиваленты антенн, периодические структуры и фильтры.

3. Создание на основе разработанного метода эффективных алгоритмов и программ расчета дисперсионных характеристик новых неоднородных волноведущих структур, а также исследование их направляющих свойств для построения элементной базы верхней части СВЧ-диапазона и КВЧ-диапазона.

Объектом исследования являются неоднородные волноведущие структуры и функциональные элементы на их основе.

Предметом исследования являются модели, методы и алгоритмы численного моделирования волновых процессов, протекающих в объекте исследования, для расчета характеристик функциональных устройств СВЧ-, КВЧ- и оптического диапазонов.

Методы исследования. Теоретические результаты настоящей работы базируются на строгих электродинамических методах: МЧО с использованием условия энергетической ортогональности, методе поперечных сечений и его модификации. Часть результатов получена с использованием математического моделирования с помощью известных пакетов САПР СВЧ. Экспериментальные исследования основаны на измерении по стандартным методикам электрических характеристик рассчитанных функциональных устройств.

Научная новизна и ценность диссертационной работы.

1. Разработан новый строго обоснованный метод – метод сечений – для расчета поперечно-неоднородных и продольно-нерегулярных волноведущих структур с произвольным законом изменения геометрических параметров и параметров диэлектрического заполнения для применения в задачах анализа и синтеза устройств СВЧ-, КВЧ- и оптического диапазонов.

2. Показана возможность представления поля в неоднородном по поперечному сечению волноводе в виде суперпозиции собственных волн волноводов сравнения – планарных экранированных волноводов.

3. В строгой электродинамической постановке рассчитаны дисперсионные характеристики и исследованы направляющие свойства новых полуоткрытых и экранированных металлодиэлектрических линий передачи верхней части СВЧ-диапазона и КВЧ-диапазона, с медленными поверхностными волнами, поле которых сконцентрировано вблизи неоднородности.

4. Предложено развитие метода сечений для расчета плавно-неоднородных волноведущих структур.

5. В строгой электродинамической постановке рассчитаны дисперсионные характеристики и исследован полный спектр собственных волн круглого экранированного волновода с секториальной диэлектрической вставкой.

6. В строгой электродинамической постановке решена задача дифракции волн на плавных и ступенчатых неоднородностях в круглом двухслойном экранированном волноводе, возникающих при создании зондирующих и частотно-избирательных устройств на базе рассматриваемого волновода.

7. В строгой электродинамической постановке решена задача дифракции на плавных и ступенчатых неоднородностях в экранированном диэлектрическом волноводе, возникающих при создании фильтрующих устройств на базе рассматриваемого волновода.

8. Для расчета периодических волноведущих структур предложен новый метод и критерий, которые позволяют из множества решений, удовлетворяющих теореме Флоке, выбирать единственное.

Обоснованность и степень достоверности. Обоснованность полученных в диссертации результатов обеспечена применением строго обоснованных методов расчета и подтверждена исследованием предельных переходов, а также сравнением с результатами, полученными ранее с помощью других методов, описанных в литературных источниках, или с данными эксперимента. Достоверность результатов подтверждается численными проверками внутренней сходимости разработанных алгоритмов, проверками выполнения граничных условий и закона сохранения энергии. Полученные результаты согласуются с современными научными представлениями и данными отечественных и

зарубежных источников, и обсуждались в научных изданиях и выступлениях на Международных и Всероссийских научно-технических конференциях.

Теоретическая значимость работы.

1. Созданы математические модели, более полно, по сравнению с существующими, отражающие реальные физические процессы, происходящие в исследуемых функциональных узлах на основе неоднородных волноведущих структур.

2. Предложен общий подход и метод расчета неоднородных волноведущих структур, в котором электромагнитное поле в нерегулярном участке рассматривается как результат дифракции собственных волн волноводов сравнения либо на поперечной, либо на продольной неоднородности.

3. Теоретически показана возможность использования спектра собственных волн экранированного планарного диэлектрического волновода как базиса при решении задач расчета собственных волн поперечно-неоднородных волноведущих структур.

4. В задачах расчета периодических волноведущих структур предложен критерий, который позволяет из множества решений, удовлетворяющих теореме Флоке, выбирать единственное.

Практическая значимость работы.

1. На основе представленного в диссертации метода продольных сечений разработан алгоритм и создан пакет прикладных программ расчета дисперсионных характеристик и структуры поля в поперечном сечении неоднородных волноведущих структур с произвольным законом изменения геометрических параметров и параметров диэлектрического заполнения, который позволил синтезировать согласующие устройства с заданными амплитудно-частотными характеристиками при проектировании микросборок S- и X-диапазонов на основе рассматриваемых структур.

2. Предложен новый класс реберно-диэлектрических линий передач верхней части СВЧ- и КВЧ-диапазонов, с медленными поверхностными волнами с концентрацией поля вблизи неоднородности.

3. Исследованы трансформации спектров собственных волн (включая комплексные волны) экранированных диэлектрических волноведущих структур и вопросы формирования дифракционного базиса при учете в диэлектрике джоулевых потерь.

4. Созданы программы расчета и оптимизации параметров многоступенчатых и плавных переходов в волноводах с плавно меняющейся экранирующей поверхностью,

которые легли в основу проектирования и оптимизации параметров мощных коаксиальных СВЧ-поглотителей и эквивалентов антенн.

5. На основе представленного в диссертации метода сечений предложена электродинамическая модель, программа расчета и оптимизации параметров конструкции зондирующей системы КВЧ-интерферометра, предназначенного для изучения характеристик движения габаритно-весовых макетов в ствольных системах и детонационных процессов во взрывчатых веществах, что позволило определить критерий выбора облучателей зондирующей системы для обеспечения высокой концентрации осевого излучения и линейности интерферограмм.

6. Созданы программы расчета частотно-избирательных устройств на базе длиннопериодных внутриволоконных решеток показателя преломления сердцевины оптического волоконного световода.

7. Создан пакет прикладных программ расчета электрических характеристик и оптимизации параметров функциональных СВЧ-устройств на базе планарного диэлектрического волновода.

Личный вклад автора. Личный вклад автора состоит в разработке методов, постановке научно-технических задач, разработке алгоритмов расчета и пакетов программ, получении и интерпретации теоретических и экспериментальных результатов. В работах, написанных в соавторстве, лично автору принадлежат: [1-4, 12, 17, 20, 24, 27] – разработка методов и методик расчета; [1-14, 16-27] – разработка алгоритмов и программ расчета на языках программирования С и С++, получение численных результатов; [9], [28] – проведение эксперимента и получение экспериментальных данных. В остальном вклад соавторов в работах примерно одинаков.

Материалы диссертационной работы изложены в 66-ти публикациях, в том числе 26 – в журналах, включенных в перечень изданий, рекомендуемых ВАК РФ для опубликования результатов диссертационных работ, 3 – в периодических изданиях, 37 – в сборниках тезисов докладов конференций. Получено авторское свидетельство на полезную модель. На программу, составленную на основе разработанных алгоритмов расчета характеристик исследуемых неоднородных электродинамических структур, получено свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на:

1. VI-ой Международной конференции “Электродинамика и техника СВЧ и КВЧ”, Самара, 1999.
2. Всероссийских научно-технических конференциях факультета информационных систем и технологий НГТУ, Н.Новгород, 2000, 2001.
3. LV-ой, LVI-ой, LVII-ой и LVIII-ой научных сессиях, посвященных Дню радио, “Радиотехника, электроника и связь, на рубеже тысячелетия”, Москва, 2000, 2001, 2002, 2003.
4. МНТК “Физика и технические приложения волновых процессов”, Самара, 2001, 2003, 2006, 2008, 2011; Волгоград, 2004; Н.Новгород, 2005, 2007.
5. Региональном молодежном научно-техническом форуме “Будущее технической науки Нижегородского региона”, Н.Новгород, 2002.
6. Всероссийских научно-технических конференциях “Информационные системы и технологии”, Н.Новгород, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007.
7. Международной конференции “XI Харитоновские тематические научные чтения”, Саров, 2009.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Метод сечений, основанный на обобщении метода частичных областей и метода поперечных сечений, для расчета продольно-нерегулярных и поперечно-неоднородных волноведущих структур.
2. Метод продольных сечений для расчета волноведущих структур с плавным законом изменения параметров поперечного сечения.
3. Развитие методов поперечных и продольных сечений для расчета резонансных волноведущих структур.
4. Развитие метода сечений для расчета периодических волноведущих структур.
5. Развитие метода поперечных сечений для расчета плавно-периодических волноведущих структур.
6. Алгоритмы и программы расчета ряда поперечно-неоднородных металлodieлектрических линий передачи верхней части СВЧ-диапазона и КВЧ-диапазона, функциональных узлов на базе прямоугольного экранированного волновода и круглого открытого диэлектрического волновода.
7. Результаты экспериментального исследования рассматриваемых в диссертации неоднородностей с целью подтверждения правомерности использования разработанных

методов, алгоритмов и программ для создания элементной базы СВЧ- и КВЧ-диапазонов.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы из 244 наименований и приложения, в котором приведены 4 акта внедрения результатов работы. Объем диссертации составляет 396 страниц, включая 389 страниц основного текста, 218 рисунков и 35 таблиц.

Содержание работы

Во введении проводится анализ степени разработанности темы, ставится цель диссертационной работы, обосновывается ее актуальность, формулируются задачи исследований, определяются новизна полученных результатов и их теоретическая и практическая ценность, формулируются основные положения, выносимые на защиту. Кратко изложено содержание и результаты диссертации.

В первой главе дается обоснование нового метода расчета – метода сечений – предлагаемого для расчета поперечно-неоднородных и продольно-нерегулярных волноведущих структур как обобщения метода частичных областей и метода поперечных сечений. Электромагнитное поле неоднородного участка рассматривается как результат дифракции собственных волн регулярных волноводов сравнения либо на продольной, либо на поперечной неоднородности.

Согласно предлагаемому методу *продольно-нерегулярный* участок волноводного тракта, показанный на рисунке 1, разбивается сечениями на области.

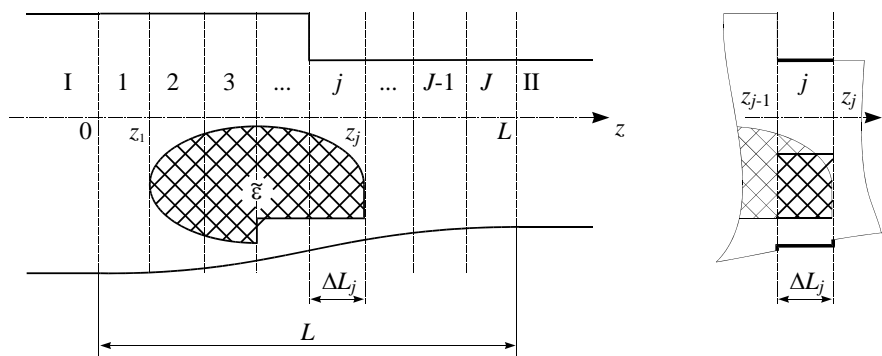


Рисунок 1

В каждой области j электромагнитное поле представляется суперпозицией прямых и обратных собственных волн регулярных волноводов (волноводов сравнения, соответствующих области j) с неизвестными амплитудными коэффициентами:

$$\begin{Bmatrix} \vec{E}^{(j)} \\ \vec{H}^{(j)} \end{Bmatrix} = \sum_{n=1}^{\infty} D_n^{(j)} \begin{Bmatrix} \vec{E}_n^{(j)} \\ \vec{H}_n^{(j)} \end{Bmatrix} e^{-i\beta_n^{(j)} z} + \sum_{n=1}^{\infty} F_n^{(j)} \begin{Bmatrix} \vec{E}_{-n}^{(j)} \\ \vec{H}_{-n}^{(j)} \end{Bmatrix} e^{i\beta_n^{(j)} z}. \quad (1)$$

В (1) обозначено: $D_n^{(j)}$, $F_n^{(j)}$ – неизвестные амплитудные коэффициенты волн; $\vec{E}_{\pm n}^{(j)} = E_{x_{\pm n}}^{(j)} \vec{i} + E_{y_{\pm n}}^{(j)} \vec{j}$, $\vec{H}_{\pm n}^{(j)} = H_{x_{\pm n}}^{(j)} \vec{i} + H_{y_{\pm n}}^{(j)} \vec{j}$ – векторные функции, описывающие поперечные компоненты электрического и магнитного поля собственных волн волноводов сравнения, соответствующих области j ; $\beta_n^{(j)}$ – продольные постоянные распространения этих волн. Записывая условия непрерывности тангенциальных составляющих напряженностей электрических и магнитных полей в каждом сечении $z = z_j$ двух стыкуемых волноводов сравнения, получаем систему линейных функциональных уравнений. Для волновода I ($j=0$) амплитудные коэффициенты $D_n^{(0)}$ определяются условиями возбуждения, $F_n^{(0)} = C_n$, а для волновода II $D_n^{(J+1)} = B_n$, $F_n^{(J+1)} = 0$.

Используя энергетическую ортогональность собственных волн регулярных волноводов сравнения, получаем систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) относительно неизвестных амплитудных коэффициентов волн, которая в матричной записи имеет вид:

$$\begin{bmatrix} E & -W^{(0)} & -W^{(0)}\Psi^{(1)} & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -W^{(0)T} & -E & \Psi^{(1)} & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & & & & & & & & \\ 0 & \dots & \Psi^{(j)} & E & -W^{(j)} & -W^{(j)}\Psi^{(j+1)} & \dots & 0 & 0 \\ 0 & \dots & W^{(j)T}\Psi^{(j)} & -W^{(j)T} & -E & \Psi^{(j+1)} & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & & & & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \Psi^{(J)} & E & -W^{(J)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & W^{(J)T}\Psi^{(J)} & -W^{(J)T} & -E & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C \\ D^{(1)} \\ F^{(1)} \\ \vdots \\ D^{(j)} \\ F^{(j)} \\ \vdots \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -I \\ -\tilde{I} \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где: E – единичная матрица с элементами $E_{n,q} = \delta_{n,q}$ ($\delta_{q,n}$ – символ Кронекера); C , $D^{(j)}$, $F^{(j)}$, B – векторы-столбцы неизвестных амплитудных коэффициентов; I – вектор-столбец с элементами $I_q = \delta_{q,0}$, \tilde{I} – вектор-столбец с элементами

$$\tilde{I}_q = \int_{S_0} (E_{x_q}^{(1)} H_{y_1}^{(0)} - E_{y_q}^{(1)} H_{x_1}^{(0)}) ds; \quad W^{(j)} \quad \text{– матрицы с элементами}$$

$$W_{q,n}^{(j)} = \int_{S_j} (E_{x_q}^{(j+1)} H_{y_n}^{(j)} - E_{y_q}^{(j+1)} H_{x_n}^{(j)}) ds; \quad W^T \quad \text{означает транспонирование матрицы;}$$

$\Psi^{(j)}$ – диагональная матрица, элементы которой $\Psi_{n,n}^{(j)} = e^{-i\beta_n^{(j)}\Delta L}$ учитывают набег фазы волны с номером n . Здесь всюду $j = 0, 1 \dots J$, $n = 1, 2 \dots N$, $q = 1, 2 \dots N$.

Уравнение (2) позволяет найти амплитудные коэффициенты (элементы обобщенной матрицы рассеяния) C_n , $D_n^{(j)}$, $F_n^{(j)}$, B_n волн в волноводах I, II и j -ом волноводе сравнения исследуемой неоднородности. Показано, что в случае, когда нерегулярность описывается гладкой функцией от продольной координаты, метод сечений приводит к системе дифференциальных уравнений метода поперечных сечений, что является строгим электродинамическим обоснованием последнего.

Для расчета *поперечно-неоднородных* волноведущих структур поперечное сечение волновода разбивается продольными сечениями на области (регулярные вдоль оси z экранированные плоскостойкие волноводы) так, как показано на рисунке 2, а. В диссертации теоретически показана возможность использования спектра собственных волн (LM - и LE -волн) экранированных плоскостойких волноводов для представления поля в выделенных областях. Предлагаемый подход был назван методом продольных сечений.

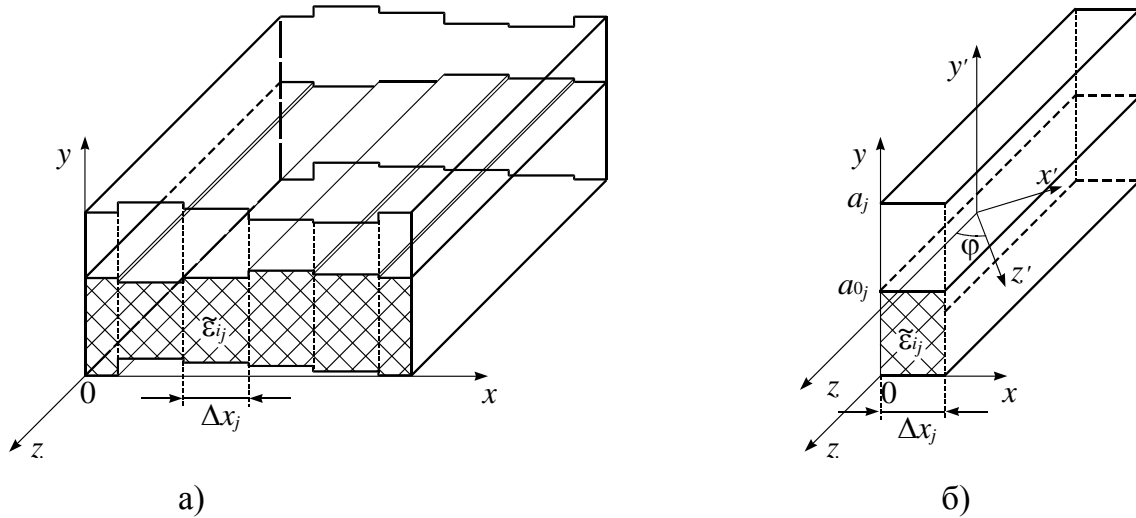


Рисунок 2

В каждой области j электромагнитное поле представляется набором прямых и обратных (по оси x) собственных волн экранированных плоскостойких волноводов (волноводов сравнения), соответствующих области j (см. рисунок 2, б), с неизвестными амплитудными коэффициентами:

$$\begin{Bmatrix} \vec{E}^{(j)} \\ \vec{H}^{(j)} \end{Bmatrix} = \sum_{n=1}^{\infty} A_n^{(j)} \begin{Bmatrix} \vec{E}_n^{(j)} \\ \vec{H}_n^{(j)} \end{Bmatrix} e^{-ik_{x_n}^j x} e^{-i\beta z} + \sum_{n=1}^{\infty} F_n^{(j)} \begin{Bmatrix} \vec{E}_{-n}^{(j)} \\ \vec{H}_{-n}^{(j)} \end{Bmatrix} e^{ik_{x_n}^j x} e^{-i\beta z} \quad (3)$$

где $A_n^{(j)}$, $F_n^{(j)}$ – неизвестные амплитудные коэффициенты волн, векторные функции $\vec{E}_{\pm n}^{(j)}$, $\vec{H}_{\pm n}^{(j)}$ описывают поперечные (к оси x) компоненты электрического и магнитного поля собственных волн плоскостойких областей (волноводов сравнения), κx_n^j – поперечные постоянные распространения LM - и LE -волн для j -ой области, β – продольная постоянная распространения этих волн и собственной волны волновода со сложным профилем.

Используя условие ортогональности собственных волн плоскостойких волноводов, получаем систему однородных алгебраических уравнений относительно неизвестных коэффициентов разложения $A_n^{(j)}$, $F_n^{(j)}$, которая в матричной записи имеет вид:

$$\begin{bmatrix} \Psi^{(0)} & -W^{(0)} & -W^{(0)}\Psi^{(1)} & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ -W^{(0)T}\Psi^{(0)} & -E & \Psi^{(1)} & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & & & & & & & \\ 0 & \dots & \Psi^{(j)} & E & -W^{(j)} & -W^{(j)}\Psi^{(j+1)} & \dots & 0 \\ 0 & \dots & W^{(j)T}\Psi^{(j)} & -W^{(j)T} & -E & \Psi^{(j+1)} & \dots & 0 \\ \vdots & & & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \Psi^{(j)} & E & -W^{(j)}\Psi^{(j+1)} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & W^{(j)T}\Psi^{(j)} & -W^{(j)T} & -\Psi^{(j+1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A^{(0)} \\ A^{(1)} \\ F^{(2)} \\ \vdots \\ A^{(j)} \\ F^{(j)} \\ \vdots \\ F^{(j+1)} \end{bmatrix} = 0, \quad (4)$$

где: $W^{(j)}$ – матрицы с элементами $W_{q,n}^{(j)} = \int_S (E_{y_q}^{(j+1)} H_{z_n}^{(j)} - E_{z_q}^{(j+1)} H_{y_n}^{(j)}) ds$, $\Psi^{(j)}$ –

диагональная матрица, элементы которой $\Psi_{n,n}^{(j)} = e^{-i\kappa x_n^j \Delta x}$ учитывают набег фазы волны с номером n . Здесь всюду $j = 0, 1, \dots, J$, $n = 1, 2, \dots, N$, $q = 1, 2, \dots, N$.

Приравнивание нулю определителя матрицы системы позволяет определить постоянные распространения β собственных волн рассматриваемой структуры. При этом

для волновых чисел выполняется следующее соотношение: $k_0^2 \tilde{\epsilon}_{ij} = \kappa x_n^{j,2} + \kappa y_n^{i,j,2} + \beta^2$.

В том случае, когда неоднородность описывается гладкой функцией поперечной координаты, метод сечений приводит к системе дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{d(Q_q(x))}{dx} + i\kappa x_q R_q(x) &= \sum_{n=1}^{\infty} Q_n(x) (S_{q,n} - S_{q,-n}), \\ \frac{d(R_q(x))}{dx} + i\kappa x_q Q_q(x) &= \sum_{n=1}^{\infty} R_n(x) (S_{q,n} + S_{q,-n}). \end{aligned} \quad (5)$$

Переменные $Q_n(x)$, $R_n(x)$ – амплитудные коэффициенты в разложениях полей в каждом сечении неоднородного участка по компонентам полей полного набора собственных волн волновода сравнения соответствующего сечения:

$$\vec{E}(x, y, z) = \sum_{n=1}^{\infty} Q_n(x) \vec{E}_n(x, y, z),$$
$$\vec{H}(x, y, z) = \sum_{n=1}^{\infty} R_n(x) \vec{H}_n(x, y, z).$$

Таким образом, в первой главе предложен электродинамически строгий метод расчета неоднородных волноведущих структур, приводящий либо к решению СЛАУ типа (2) или (4), либо к системе дифференциальных уравнений вида (5) относительно координаты, вдоль которой происходит изменение параметров нерегулярного участка. Метод пригоден для расчета характеристик широкого спектра неоднородных электродинамических структур, и не накладывает строгих ограничений на закон изменения параметров неоднородности.

Для расчета *продольно-нерегулярных* волноведущих структур метод сечений (в пределе для плавных переходов – метод поперечных сечений), в отличие от традиционного подхода, основанного на методе каскадного соединения многополюсников и МЧО, позволяет рассчитать элементы матрицы рассеяния рассматриваемой неоднородности в целом. Как показали численные результаты, предлагаемый метод в ряде случаев, например, при расчете плавных неоднородностей в высоком приближении, значительно экономичнее в использовании вычислительных ресурсов и обеспечивает тем самым более высокую точность результатов. Метод обеспечивает возможность рассчитать структуру распределения электромагнитного поля внутри неоднородного участка, что позволяет разработчику более наглядно и детально представить физические процессы, происходящие внутри проектируемого узла.

Для расчета *поперечно-неоднородных* волноведущих структур метод сечений (метод продольных сечений) зачастую является наиболее простым для реализации на ЭВМ методом расчета, а иногда и единственно возможным численно-аналитическим методом. Предлагаемый метод является наиболее простым и точным при расчете волноведущих структур, для которых классический подход требует введения непрерывного спектра собственных функций. Метод сечений также эффективен в случае одновре-

менного изменения как параметров диэлектрического заполнения, так и экранирующей поверхности.

Метод, предложенный в первой главе, использовался при расчетах ряда конкретных неоднородностей и функциональных устройств, рассмотренных в последующих главах диссертации.

Во второй главе с помощью предлагаемого в диссертации метода продольных сечений рассматриваются как известные, так и новые линии передачи, позволяющие существенно пополнить существующую базу элементов верхней части СВЧ-диапазона и КВЧ-диапазона. Показано, что металлодиэлектрические волноводы с медленными поверхностными волнами, поле которых сконцентрировано вблизи некоторой неоднородности, образуют новый класс линий передачи (см. рисунок 3).

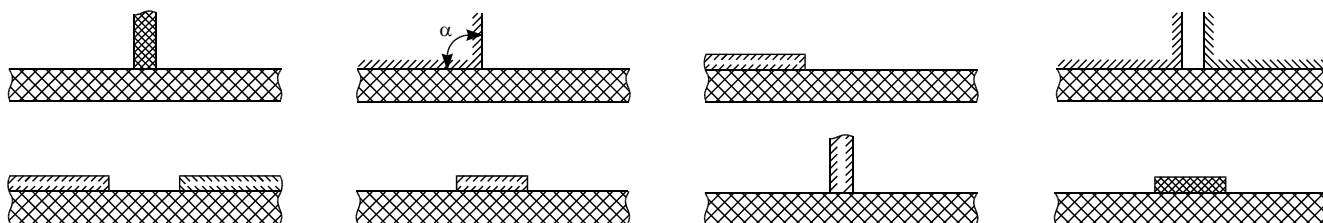


Рисунок 3

Установлено, что волны с концентрацией поля вблизи неоднородности могут существовать:

а) в неоднородных по поперечному сечению направляющих диэлектрических структурах, таких, как стыки полубесконечных и бесконечных диэлектрических пластин с различными значениями диэлектрической проницаемости (см. рисунок 4);

$(\beta/k_0)^2$

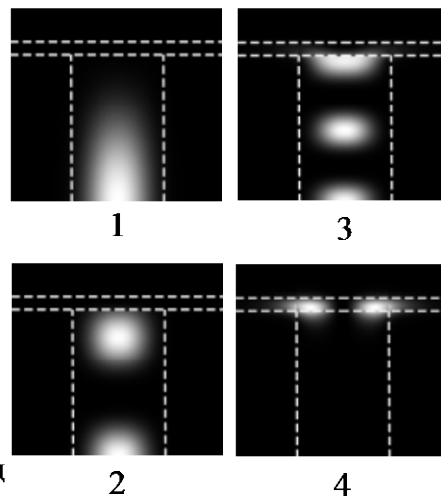
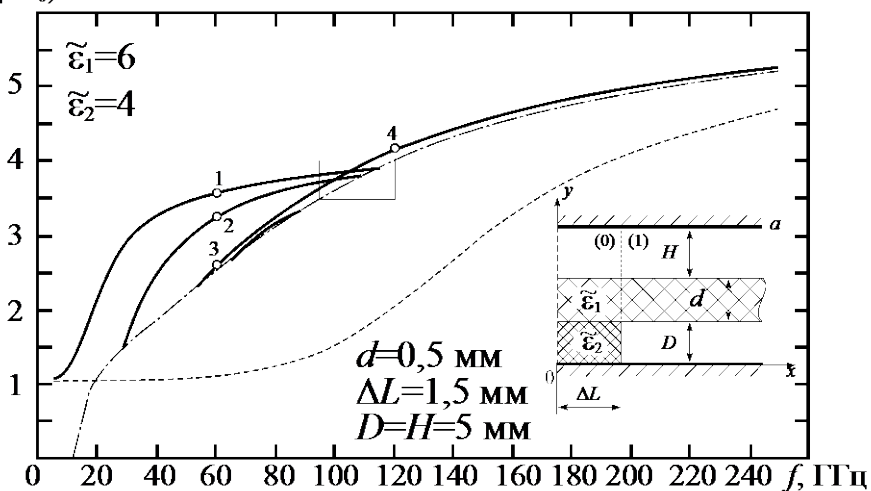


Рисунок 4

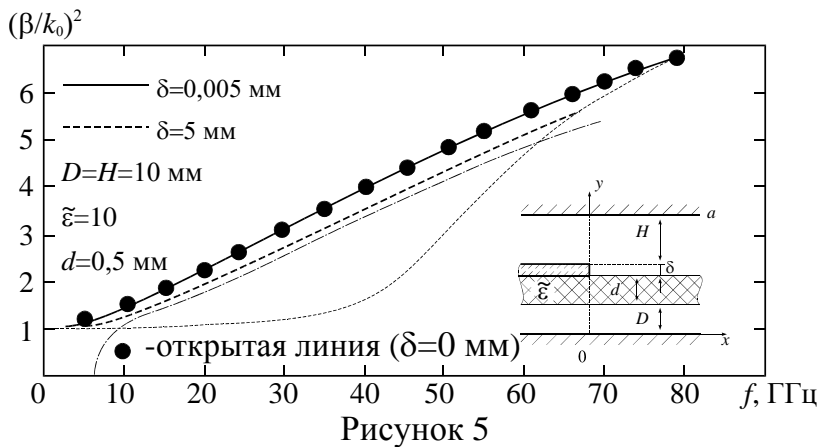


Рисунок 5

пластина – замедление волны и дополнительную концентрацию поля. Зачастую такая волна является единственной распространяющейся волной и обеспечивает этим одноволновый режим работы линии передачи (см. рисунок 5). Приводятся результаты экспериментального исследования реберно-диэлектрического волновода.

Показано, что волны с концентрацией поля вблизи неоднородности могут существовать также и в следующих линиях передачи:

- в щелевой линии (ЩЛ) с широкой щелью, где имеются две слабо связанные волны, которые образуются плавной трансформацией основной волны ЩЛ с узкой щелью при увеличении ширины этой щели (рисунок 6);
- в однополосковой линии передачи (ОЛП), где могут распространяться две слабо связанные волны, которые образуются плавной трансформацией основной волны ОЛП с узким проводником при увеличении ширины этого проводника (рисунок 7).

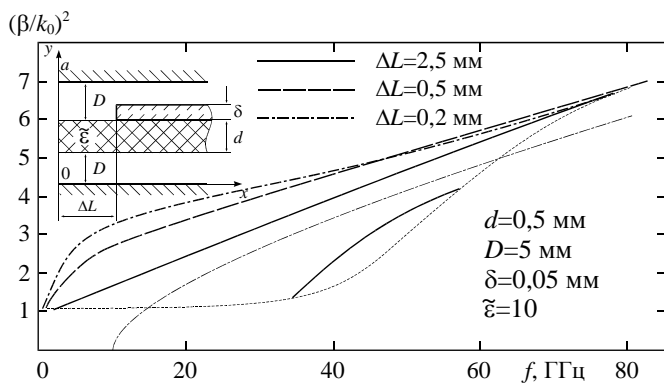


Рисунок 6

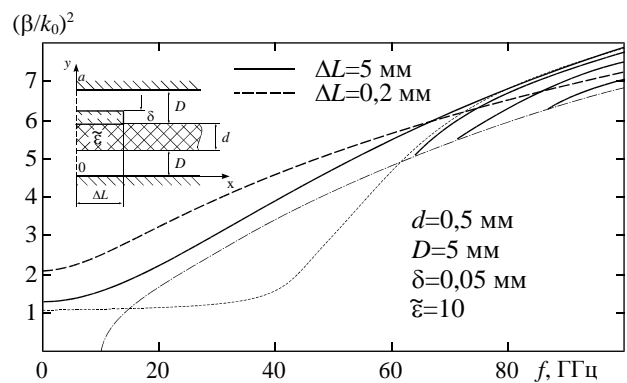


Рисунок 7

В данной главе представлены возможности метода продольных сечений для расчета волноводов со сложным профилем поперечного сечения. Представлены алгоритмы, результаты расчета, а также впервые проведено исследование направляющих свойств

круглого экранированного волновода с секториальной диэлектрической вставкой (КВСДВ) (см. рисунок 8).

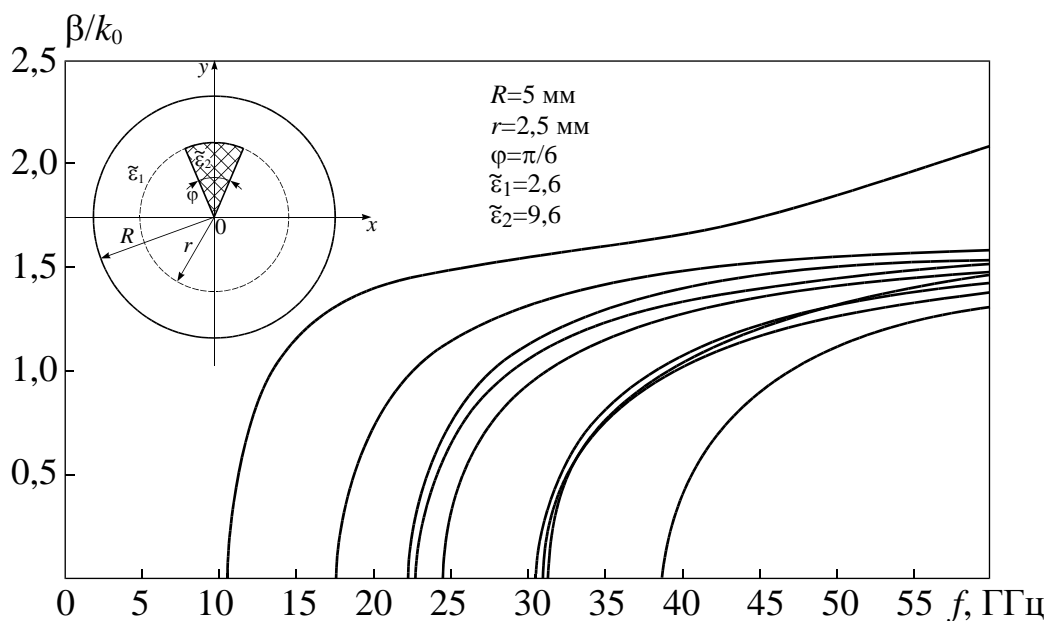


Рисунок 8

Классификацию волн КВСДВ предлагается производить по трансформации волн круглого однородно заполненного волновода (см. рисунок 9).

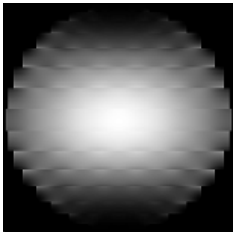


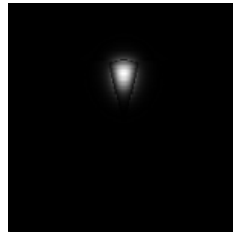
$\tilde{\epsilon}_1 = 2,6$			
$\tilde{\epsilon}_2 = 2,6$	$\tilde{\epsilon}_2 = 3,8$	$\tilde{\epsilon}_2 = 5,6$	$\tilde{\epsilon}_2 = 9,6$
квази- H_{11}			
$\beta = 1992,311$	$\beta = 2020,406$	$\beta = 2124,369$	$\beta = 2626,907$
			

Рисунок 9

Полученные во второй главе результаты расчетов методом продольных сечений по возможности сравнивались с результатами расчета другими методами, если такие имеются в открытой литературе.

В третьей главе рассматривается применение метода сечений для расчета волноводящих структур и резонаторов с плавно-нерегулярной экранирующей поверхностью.

Метод поперечных сечений применялся ранее в основном для расчета слабо-нерегулярных волноводящих структур в одноволновом приближении, что обеспечивало

низкую универсальность метода и невысокую точность расчетов, особенно необходимую в случае рассмотрения резонансных систем.

В главе на основе метода поперечных сечений с использованием метода конечных разностей предложен алгоритм и представлены результаты расчета плавного перехода в круглом экранированном волноводе. Представленный алгоритм обладает высокой универсальностью и точностью вычислений, которая обеспечивается учетом волн высших типов. Дополнительным преимуществом алгоритма является то, что точность выполнения закона сохранения энергии позволяет определить точность расчета плавно-неоднородной структуры. Проводится сравнение результатов с результатами, полученными на основе ступенчатой аппроксимации с помощью метода сечений. Даются рекомендации по использованию каждого из методов.

На основе метода сечений приведены алгоритмы и результаты расчета резонансных структур со сложной (в общем случае плавной) формой поперечного сечения. Возможность учета волн высших типов позволяет значительно точнее определять резонансную частоту, по сравнению с частотами, получаемыми на основе одноволновых моделей. Метод не накладывает жестких ограничений на геометрические и диэлектрические параметры резонансных структур, поэтому может применяться для расчета сложных трехмерных моделей, например, диэлектрических резонаторов, рассмотренных в шестой главе диссертации.

На примере коаксиальной линии передачи рассмотрены возможности метода сечений применительно к расчету нерегулярных двусвязных волноведущих структур. В случае плавных переходов особенность метода заключается во введении вырожденных областей, по полям которых раскладывается поле в стыкуемых волноводах сравнения. Представлены алгоритмы расчета ступенчатого, многоступенчатого и плавного переходов, которые легли в основу системы машинного проектирования и оптимизации параметров мощных коаксиальных СВЧ-поглотителей и эквивалентов антенн.

В четвертой главе рассматриваются вопросы моделирования и расчета характеристик плавно-нерегулярных участков в открытых и сверхразмерных волноведущих структурах.

Предложена электродинамическая модель, методика расчета и исследования зондирующей системы КВЧ-интерферометра, основанная на строгом решении задачи дифракции основной волны HE_{11} на плавной неоднородности в сферхразмерном круглом

двухслойном экранированном волноводе. Сверхразмерный экран обеспечивает принципиально многомодовый (до 120 волн высших типов) режим работы зондирующей системы. Расчет производился предложенным в первой главе методом сечений, т.к. в случае многоволнового приближения при расчете нерегулярных участков он дает наиболее точные и не требующие больших вычислительных затрат результаты. Исследования результатов сходимости показали, что для рабочей частоты интерферометра 93 ГГц, предложенная модель достаточно полно и адекватно отражает волновые процессы в открытой зондирующей системе.

На основе полученных результатов проведен анализ и оптимизация формы излучателя диэлектрической антенны (торец, заострение, расширение), обеспечивающей минимальные значения коэффициента отражения основной волны в подводящем тракте и достаточно высокую концентрацию осевого излучения.

При исследовании характеристик движения габаритно-весовых макетов с помощью КВЧ-интерферометра основным требованием к его зондирующей системе является линейность интерферограмм – зависимости разности фаз интерферирующих сигналов от расстояния до объекта. Исследования показали, что оптимальным с этой точки зрения является диэлектрический облучатель с заострением длиной около 8λ , который обеспечивает линейность интерферограмм при длинах пролета на порядок больше по сравнению со случаем использования диэлектрического облучателя в виде торца.

Применение метода сечений для расчета спектральных характеристик длиннопериодных внутриволоконных решеток показателя преломления основано на строгом электродинамическом решении задачи дифракции основной волны HE_{11} на периодической неоднородности показателя преломления сердцевины. При рассмотрении многопериодных решеток предлагаемый метод сечений комбинировался с методом минимальных автономных блоков, что позволило получить быстродействующий алгоритм расчета и оптимизации параметров по заданным частотным характеристикам фильтров на основе длиннопериодных внутриволоконных решеток.

В главе приведены результаты расчета длиннопериодных внутриволоконных решеток с синусоидальной функцией изменения показателя преломления сердцевины волоконного световода и функцией типа “меандр”. Исследовано влияние на частотные характеристики решеток изменение периода и показателя преломления сердцевины.

В пятой главе проведено исследование дисперсионных характеристик собственных волн круглого двухслойного экранированного волновода при отсутствии и наличии в диэлектрике джоулевых потерь.

Метод сечений как обобщение МЧО требует определения полного спектра собственных волн волноводов сравнения. В общем случае эти волноводы описываются не-самосопряженными электродинамическими операторами, и в спектре собственных волн таких волноводов могут присутствовать комплексные волны. Если расчет дисперсионных характеристик собственных волн с действительными или мнимыми постоянными распространения не составляет большой трудности, то вопрос о расчете комплексных волн (КВ) до сих пор остается открытым. Дисперсионные зависимости спектра комплексных волн, как правило, достаточно сложны, и расчет их, а также правильный учет КВ в волноводных задачах дифракции при построении САПР является задачей актуальной.

В главе показано, что введение малых потерь в волноведущую структуру позволяет более детально и наглядно рассмотреть вопрос формирования дифракционного базиса при решении волноводных задач дифракции. Особое внимание уделяется исследованию трансформации двузначных участков дисперсионных характеристик собственных волн (см. рисунок 10). Эта задача является практически важной, так как исключительно все волноведущие структуры характеризуются наличием потерь.

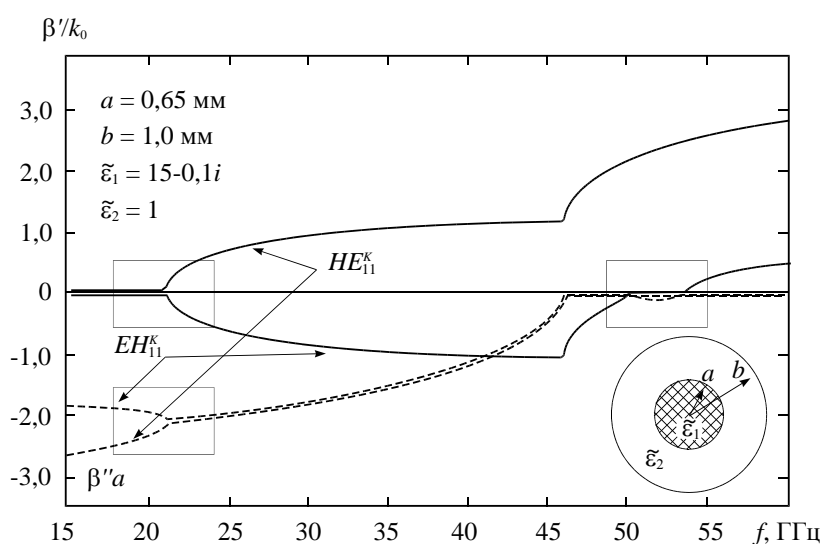


Рисунок 10

В главе на примере расчета задачи дифракции на ступенчатом и плавном переходах в круглом двухслойном экранированном волноводе исследуется влияние на результат расчета включение или исключение из дифракционного базиса спектра ком-

плексных волн (КВ), если они существуют в исследуемых волноводах в рассматриваемом частотном диапазоне.

Результаты расчетов показали, что неучет КВ приводит в некоторых случаях даже к качественно неверным результатам. Неправильный (непарный) учет КВ ведет не только к неверным результатам, но и к тому, что в структуре перестает выполняться закон сохранения энергии.

В шестой главе в строгой электродинамической постановке рассмотрена задача о собственных волнах диэлектрического волновода на подложке с джоулевыми потерями, помещенного в экран прямоугольной формы (ЭДВ), показанный на рисунке 11. Установлено, что перенос энергии распространяющейся волной в регулярном ЭДВ осуществляется, вообще говоря, двумя встречными продольными потоками, которые

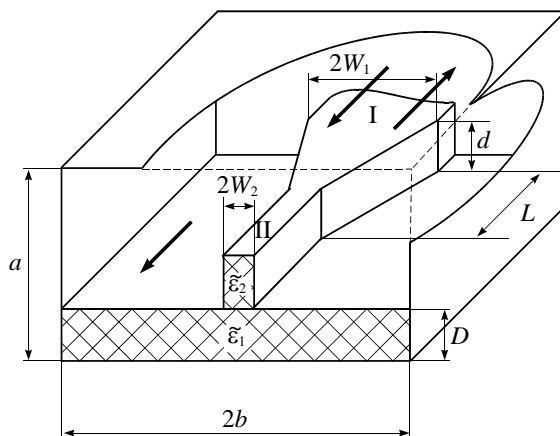


Рисунок 11

взаимодействуют друг с другом через поперечные потоки энергии. Причем поперечные потоки существуют только при наличии джоулевых потерь (пусть очень малых) в диэлектрике.

В главе представлен алгоритм и приведены результаты решения задач дифракции на скачкообразных и плавных нерегулярностях в ДВ, расположенном симметрично на диэлектрической подложке и заключенном в идеально проводящий экран прямоугольной формы. Рассматриваются скачок ширины ДВ, отрезок ДВ конечной длины, плавный переход произвольного профиля между ДВ различной ширины. Эти задачи являются базовыми при расчетах функциональных элементов. В качестве примера результатов расчета таких функциональных элементов приводятся характеристики нескольких фильтрующих структур, построенных на основе сочленения описываемых скачкообразных нерегулярностей.

Показано, что при строгом решении задачи дифракции существенное влияние на решение оказывают дисперсионные характеристики ЭДВ, содержащие двузначный участок в области распространяющихся волн одного из сочленяемых волнопроводов. Как известно, с физической точки зрения эти участки означают наличие обратных волн в регулярных структурах. Это влияние проявляется в резком изменении амплитуд распростра-

няющихся волн в волноводах именно в том диапазоне частот, где существует этот участок.

С использованием метода сечений представлены результаты расчета характеристик несколько вариантов фильтрующих структур на основе экранированных ДВ и диэлектрических резонаторов (ДР) (рисунок 12).

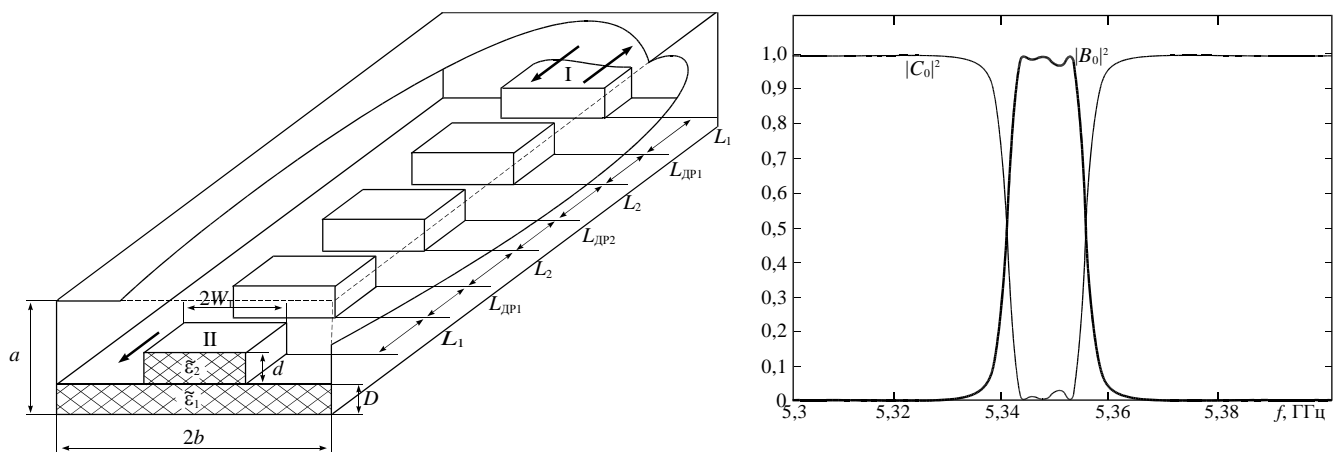


Рисунок 12

Показано, что ДР в форме параллелепипедов, расположенные на диэлектрической подложке внутри экранированного волновода, перспективны при создании малогабаритных полосовых фильтров, т.к. позволяют использовать несколько типов колебаний в одном ДР.

В седьмой главе представлен новый алгоритм нахождения собственных волн в периодических электродинамических структурах.

Периодические структуры (ПС) являются важнейшими элементами радиотехнических, акустических, механических и других устройств. Будучи реализованными в виде решеток малого периода, они играют большую роль в технике КВЧ-, субмиллиметрового и оптического диапазонов длин волн. В диапазоне СВЧ ПС являются неотъемлемой частью фазированных антенных решеток.

Во многих работах рассмотрение свойств ПС ведется с использованием пространственных гармоник – составляющих разложений полей собственных волн по продольному волновому числу. Эти гармоники в отдельности, вообще говоря, не удовлетворяют базовым уравнениям и/или граничным условиям, а их определение, особенно для ПС со сложным законом изменения параметров ячейки, не является задачей тривиальной.

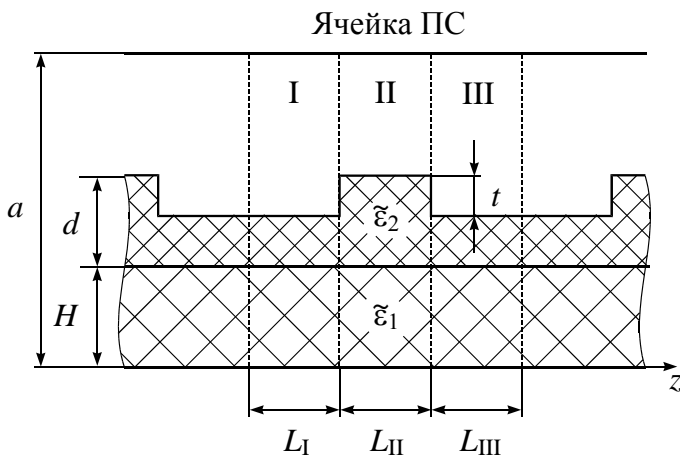


Рисунок 13

В главе описан новый алгоритм нахождения собственных волн в периодических электродинамических структурах (рисунок 13). Он основан на методе сечений и на введении понятия согласованного решения граничной задачи электродинамики, и позволяет из множества решений, удовлетворяющих теореме Флоке, выбрать единственное.

Согласно предлагаемому методу ячейка ПС разбивается сечениями на области. Поле в каждой области представляется в виде (1). В сечениях $z = 0$ и $z = L_I + L_{II} + L_{III} = L$ на электромагнитное поле накладывается условие Флоке:

$$\begin{aligned}\vec{E}(x, y, z + L) &= e^{-i\beta L} \vec{E}(x, y, z), \\ \vec{H}(x, y, z + L) &= e^{-i\beta L} \vec{H}(x, y, z).\end{aligned}$$

В результате алгебраизации системы приходим к однородной СЛАУ, равенство определителя нулю которой позволяет найти β - постоянные распространения собственной волны ПС.

В случае плавно-нерегулярных периодических волноведущих структур, метод приводит к системе линейных дифференциальных уравнений относительно продольной координаты, которую необходимо решать при граничных условиях, следующих из теоремы Флоке.

Для отбора решений вводится параметр:

$$w(z) = \sqrt{\frac{R}{R_0}} \cdot e^{-i\frac{\Psi - \Psi_0}{2}}$$

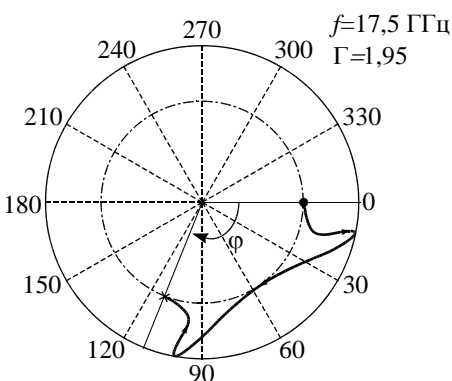


Рисунок 14

где $\int_{S_1} [\vec{E}(x, y, z) \vec{H}(x, y, z)] d\vec{s} = R \cdot e^{-i\Psi}$, $R_0 \neq 0$ и Ψ_0 -

значения R и Ψ , при $z = 0$.

Тогда конец вектора, представляющего функцию $w(z)$ в полярных координатах, опишет в комплексной плоскости годограф, типичный вид которого показан на рисунке 14.

Если при обходе по часовой стрелке значение полного угла $\Psi - \Psi_0$ совпадет со

значением $2\beta L$, то β будет считаться истинным, или согласованным решением граничной задачи – в противном случае найденное значение β будет называться *ложным решением*.

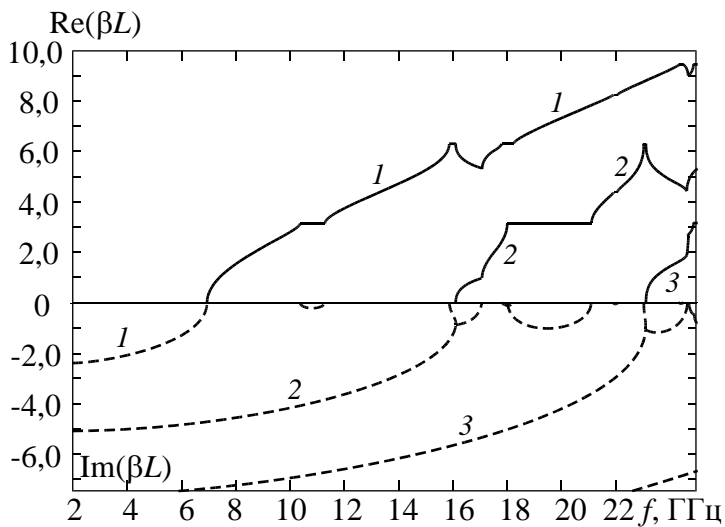


Рисунок 15

В главе рассматривается задача о собственных волнах в ПС и о возможности их применения в фильтрующих и других частотно-разделительных структурах. Характерной особенностью этих волн является наличие на дисперсионных кривых ограниченных областей с мнимой или комплексной постоянной распространения (см. рисунок 15). ПС с такими

волнами широко используются в технике: будучи включенными на проход они обеспечивают существование чередующихся полос пропускания и запираения.

В строгой электродинамической постановке рассчитаны двумерные и трехмерные экранированные диэлектрические структуры, периодические вдоль продольной оси. Показано, что дисперсионные зависимости, соответствующие собственным волнам этих структур, имеют сложный вид: участки, отвечающие распространяющимся волнам, чередуются с участками, где существуют комплексные волны. При этом комплексные волны, у которых действительная часть постоянных распространения зависит от частоты, характеризуются наличием вихревых потоков энергии в продольной плоскости.

В заключение главы отмечается, что полученные результаты могут стать основой нового подхода при разработке частотно-разделительных устройств, суть которого заключается в расчете и исследовании собственных волн ПС со сложной ячейкой, совпадающей по структуре с частотно-разделительным устройством.

Основные выводы и результаты

1. Предложены и обоснованы на электродинамическом уровне строгости физические и математические модели волноводных неоднородностей, позволившие разработать методы расчета направляющих характеристик ряда волноведущих линий передачи и функциональных узлов на их основе для верхней части СВЧ-диапазона, КВЧ-диапазона и диапазона оптических частот.

2. Разработан универсальный метод – метод сечений – для расчета как поперечно-неоднородных, так и продольно-нерегулярных волноведущих структур, в основе которого лежит представление поля как результата дифракции собственных волн волноводов сравнения либо на поперечной, либо на продольной неоднородности.

3. Для волноведущих структур с плавным законом изменения профиля поперечного сечения разработан метод продольных сечений, приводящий к решению системы дифференциальных уравнений с соответствующими граничными условиями.

4. С помощью метода сечений разработаны алгоритмы и созданы пакеты программ расчета как известных, так и новых линий передачи, позволяющих существенно пополнить существующую базу элементов верхней части СВЧ-диапазона и КВЧ-диапазона.

5. На основе метода поперечных сечений с использованием метода конечных разностей предложен алгоритм и представлены результаты расчета задачи дифракции в волноводах с плавно-нерегулярной экранирующей поверхностью. Проведено сравнение полученных результатов с результатами, полученными на основе ступенчатой аппроксимации плавно-нерегулярного участка. Даются рекомендации по использованию каждого из методов.

6. На основе метода сечений предложен новый подход для расчета характеристик резонансных структур со сложным (в общем случае плавным) профилем поперечного сечения.

7. Предложена электродинамическая модель, методика расчета и исследования зондирующей системы КВЧ-интерферометра, предназначенного для изучения движения габаритно-весовых макетов и детонационных процессов. Проведенный анализ позволил определить и оптимизировать форму излучателя диэлектрической антенны, обеспечивающую минимальное значение коэффициента отражения основной волны в подводящем тракте и достаточно высокую концентрацию осевого излучения.

8. Предложен метод расчета спектральных характеристик длиннопериодных внутриволоконных решеток (ДПВР) показателя преломления, основанный на строгом электродинамическом решении задачи дифракции волны HE_{11} на неоднородности показателя преломления сердцевины. Решения дифракционных задач для базовых неоднородностей, полученные с помощью представленного алгоритма, могут быть использова-

ны в задачах синтеза по заданным частотным характеристикам фильтров на основе ДПВР.

9. Проведено исследование дисперсионных характеристик собственных волн круглого двухслойного экранированного волновода при отсутствии и наличии в нем джоулевых потерь, введение которых позволяет более детально и наглядно рассмотреть вопрос формирования дифракционного базиса при решении волноводных задач дифракции.

10. В строгой электродинамической постановке с использованием метода сечений решена задача о расчете собственных волн планарного диэлектрического экранированного волновода с джоулевыми потерями в диэлектрическом заполнении. Показано, что распространяющиеся в такой структуре волны имеют встречные продольные потоки энергии. Дано физическое толкование этого и ряда других явлений.

11. С использованием трехмерных электродинамических моделей рассматриваются фильтрующие структуры на основе планарных экранированных диэлектрических волноводов (ДВ) и диэлектрических резонаторов (ДР). Показано, что в дифракционных задачах существенное влияние на решение оказывают участки дисперсионных характеристик ДВ, соответствующие обратным волнам. Подчеркивается перспективность построения малогабаритных фильтров на основе ДР, поддерживающих несколько колебаний в одном резонаторе.

12. Описан новый метод и приведен алгоритм нахождения собственных волн в периодических электродинамических структурах. Он позволяет из множества решений, удовлетворяющих теореме Флоке, выбирать единственное. Предложен критерий отбора такого решения.

13. С использованием метода сечений рассчитаны двумерные и трехмерные экранированные диэлектрические структуры, периодические вдоль продольной оси. Показано, что дисперсионные зависимости, соответствующие собственным волнам этих структур, имеют участки, отвечающие комплексным волнам. Комплексные волны, у которых действительная часть постоянных распространения зависит от частоты, характеризуются наличием вихревых потоков энергии в продольной плоскости.

14. На основе метода поперечных сечений предложен новый подход для расчета направляющих свойств структур с плавно-периодическим законом изменения геометрии.

ческих параметров и параметров диэлектрического заполнения вдоль продольной координаты.

По теме диссертации опубликованы следующие статьи:

1. **Бударагин, Р.В.** Расчет плавно-нерегулярного участка волноводного тракта / Р.В. Бударагин, А.А. Радионов // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2000. – Т. 3. – № 2. – С.14-17.
2. **Бударагин, Р.В.** Методы расчета волноводов с плавно-нерегулярной экранирующей поверхностью / Р.В. Бударагин, А.А. Радионов // Антенны. – 2004. – № 6 (85). – С. 25-30.
3. **Бударагин, Р.В.** Метод расчета волноводов со сложным поперечным сечением / Р.В. Бударагин, А.А. Радионов // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2010. – Т. 13. – № 3. – С. 23-25.
4. **Бударагин, Р.В.** Метод расчета собственных волн экранированных волноводов со сложной плавно изменяющейся формой поперечного сечения / Р.В. Бударагин, А.А. Радионов // Радиотехника и электроника. – 2012. – Т. 57. – № 2. – С. 168-174.
5. **Бударагин, Р.В.** Дифракция на диэлектрической неоднородности в прямоугольном экранированном волноводе / Р.В. Бударагин, Н.А. Новоселова, С.Б. Раевский // Антенны. – 2015. – № 4 (215). – С.46-54.
6. **Бударагин, Р.В.** О методике расчета задачи дифракция на диэлектрической неоднородности в экранированном волноводе методом частичных областей / Р.В. Бударагин // Антенны. – 2016. – № 4 (227). – С. 83-90.
7. **Бударагин, Р.В.** Метод сечений для расчета собственных волн экранированных волноводов / Р.В. Бударагин // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2016. – Т. 19. – № 1. – С. 20-26.
8. **Темнов, В.М.** Электродинамический анализ волноведущих диэлектрических структур / В.М. Темнов, А.А. Титаренко, Р.В. Бударагин // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2001. – Т. 4. – № 4. – С. 21-27.
9. **Темнов, В.М.** Краевые волны в направляющих металло-диэлектрических структурах / В.М. Темнов, Р.В. Бударагин, А.А. Титаренко // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2002. – Т. 5. – № 1. – С. 44-53.

10. **Темнов, В.М.** Краевые волны в диэлектрических и металло-диэлектрических волноводах / В.М. Темнов, Р.В. Бударагин // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2002. – Т. 5. – № 4. – С.12-21.
11. **Темнов, В.М.** Металло-диэлектрические волноводы с краевыми волнами – новый класс линий передачи для интегральных схем СВЧ и КВЧ диапазонов / В.М. Темнов, Р.В. Бударагин // Известия Академии инженерных наук им. А.М. Прохорова. Технология материалов и компонентов электронной техники. – М., 2004. – Т. 7. – С. 149-165.
12. **Бударагин, Р.В.** Расчет собственных волн круглого экранированного волновода с секториальной диэлектрической вставкой / Р.В. Бударагин, А.А. Радионов // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2012. – Т. 15. – № 4. – С. 14-18.
13. **Бударагин, Р.В.** Расчет плавных переходов в круглом экранированном волноводе / Р.В. Бударагин, А.А. Радионов, А.А. Титаренко // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2000. – Т. 3. – № 2. – С. 27-30.
14. **Бударагин, Р.В.** Расчет плавных переходов в коаксиальной линии передач / Р.В. Бударагин, А.А. Радионов, А.А. Титаренко // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2001. – Т. 4. – № 2. – С. 53-57.
15. **Темнов, В.М.** Метод расчета многослойных и градиентных круглых оптических волноводов / В.М. Темнов, А.А. Титаренко, Р.В. Бударагин // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2001. – Т. 4. № 1. – С. 26-30.
16. **Белов, Ю.Г.** Исследование антенной системы КВЧ-интерферометра / Ю.Г. Белов, Р.В. Бударагин, Ю.И. Орехов, Ю.В. Раевская // Антенны. – 2006. – № 5 (108). – С. 62-67.
17. **Белов, Ю.Г.** Расчет контактной диэлектрической антенны для КВЧ интерферометра / Ю.Г. Белов, Р.В. Бударагин, И.Г. Луконин, Ю.И. Орехов // Антенны. – 2007. – № 2 (117). – С. 47-51.
18. **Бударагин, Р.В.** Исследование микроволновой зондирующей системы для бесконтактной диагностики быстропротекающих процессов / Р.В. Бударагин, Ю.И. Орехов // Антенны. – 2005. – № 5 (96). – С.47-51.
19. **Белов, Ю.Г.** Оптимизация конструкции антенной системы микроволнового интерферометра для диагностики быстропротекающих процессов / Ю. Г. Белов, Р.

- В. Бударагин, А. И. Ермолаев, Ю. И. Орехов // Антенны. – 2009. – № 11 (150). – С.59-64.
20. **Бударагин, Р.В.** Электродинамический расчет длиннопериодных волоконных решеток / Р.В. Бударагин, А.С. Раевский // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2012. – Т. 15. – № 2. – С. 42-48.
21. **Бударагин, Р.В.** Учет комплексных волн в волноводных задачах дифракции / Р.В. Бударагин, С.Б. Раевский, А.А. Титаренко // Антенны. – 2004. – №6 (85). – С. 47-53.
22. **Темнов, В.М.** Электродинамика экранированного диэлектрического волновода / В.М. Темнов, Р.В. Бударагин // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2003. – Т. 6. – № 3. – С. 24-32.
23. **Бударагин, Р.В.** Дифракция на скачкообразном переходе в экранированном диэлектрическом волноводе / Р.В. Бударагин, В.М. Темнов // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2004. – Т. 7. – № 3. – С. 14-19.
24. **Бударагин, Р.В.** Электродинамический расчет функциональных узлов на основе экранированного диэлектрического волновода / Р.В. Бударагин, В.М. Темнов // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2004. – Т. 7. – № 4. – С. 50-55.
25. **Бударагин, Р.В.** Электродинамический анализ нерегулярностей на основе экранированного диэлектрического волновода / Р.В. Бударагин, В.М. Темнов // Радиотехника и электроника. – 2006. – Т. 51. – № 6. – С. 645-658.
26. **Темнов, В.М.** К теории периодических структур / В.М. Темнов, Р.В. Бударагин // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2005. – Т. 8. – № 2. – С. 33-44.
27. **Бударагин, Р.В.** Расчет волноводов с периодически меняющейся экранированной поверхностью на основе модифицированного метода поперечных сечений / Р.В. Бударагин, А.А. Радионов // Антенны. – 2009. – № 8 (147). – С. 47-51.

По теме диссертации получены следующие свидетельства:

28. **Темнов, В.М.** Реберно-диэлектрический волновод / В.М. Темнов, Р.В. Бударагин, А.А. Титаренко. Свидетельство на полезную модель №26688, зарег. 10.12.2002.
29. **Бударагин, Р.В.** Программа расчета дифракционного поля на торце круглого диэлектрического волновода с использованием базиса Гаусса Лагерра / Р.В. Будар-

гин, В.А. Малахов // Государственный реестр программ для ЭВМ. Свидетельство № 2012614866 от 31.05.2012 г.

Литература

- Л.1 **Неганов, В.А.** Электродинамика и распространение радиоволн / В.А. Неганов, О.В. Осипов, С.Б. Раевский, Г.П. Яровой. Изд-во Радиотехника, 2009. – 744с.
- Л.2. **Раевский, С.Б.** Решение внутренних задач электродинамики с использованием непрерывного спектра в одной из частичных областей / С.Б. Раевский // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 1980. – Т. 33. – № 9. – С. 27-32.
- Л.3. **Радионов, А.А.** Расчет дисперсионных характеристик и коэффициента затухания прямоугольного гофрированного волновода / А.А. Радионов, С.Б. Раевский // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 1977. – Т. 20. – № 9. – С. 69-73.
- Л.4. **Белов, Ю.Г.** Расчет волноводов со сложной формой поперечного сечения методом частичных областей с непрерывным спектром собственных функций / Ю.Г. Белов, Ю.В. Ишенькина // Антенны. – 2005. – № 5 (96). – С. 33-38.
- Л.5. **Раевский, А.С.** Комплексные волны во внутренних задачах дифракции / А.С. Раевский, С.Б. Раевский, А.А. Титаренко // Радиотехника и электроника. – 2003. – Т. 48. – №12. – С. 1427-1435.
- Л.6. **Малахов, В.А.** Комплексные волны в проекционных методах решения электродинамических задач / В.А. Малахов, А.С. Раевский, А.А. Титаренко // Антенны. – 2007. – № 11 (126). – С. 19-29.
- Л.7. **Малахов, В.А.** Комплексные волны в волноводно-щелевой линии и новый подход к оценке корректности решений электродинамических задач, поставленных в незамкнутой форме / В.А. Малахов, А.С. Раевский // Радиотехника и электроника. – 2001. – Т. 46. – № 5. – С. 517-521.
- Л.8. **Веселов, Г.И.** Метод частичных областей для дифракционных задач с некоординатными границами / Г.И. Веселов, В.М. Темнов // Изв. вузов. Радиофизика. – 1984. – Т. 27. – № 7. – С. 919-924.
- Л.9. **Темнов, В.М.** Электродинамический анализ ступенчатых переходов в плоском волноводе с частичным диэлектрическим заполнением / В.М. Темнов, А.А. Титаренко // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 1998. – Т. 1. – № 4. – С. 17-23.

- Л.10. **Темнов, В.М.** Моделирование многоступенчатых и плавных переходов для устройств КВЧ и оптического диапазонов / В.М. Темнов, А.А. Титаренко // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2002. – Т. 5. – № 2. – С. 32-38.
- Л.11. **Калмык, В.А.** Особенности собственных волн экранированных многослойных круглых волноводов / В.А. Калмык, А.А. Титаренко, Д.В. Тюрин // Антенны. – 2004. – №1 (80). – С. 42-45.
- Л.12. **Катин, С.В.** Расчет многослойных планарных диэлектрических волноводов с потерями / С.В. Катин, А.А. Титаренко // Антенны. – 2006. – №5 (82). – С. 24-27.
- Л.13. **Темнов, В.М.** Метод расчета многослойных и градиентных круглых оптических волноводов / В.М. Темнов, А.А. Титаренко // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2001. – Т. 4. – № 2. – С. 53-57.
- Л.14. **Агалаков, А.Н.** Применение модифицированного метода Галеркина к решению задач дифракции / А.Н. Агалаков, С.Б. Раевский, А.А. Титаренко // Радиотехника и электроника. – 2011. – Т. 56. – № 7. – С. 773-781.
- Л.15. **Агалаков, А.Н.** Спектральный метод расчета прямоугольных экранированных волноводов с произвольным анизотропным заполнением / А.Н. Агалаков, С.Б. Раевский, А.А. Титаренко // Радиотехника и электроника. – 2013. – Т. 58. – № 6. – С.1-11.
- Л.16. **Данилов, И.Н.** Метод расчета характеристик передачи плавных переходов между двумя экранированными волноводами, основанный на интегральном соотношении Лоренца / И.Н. Данилов, В.К. Майстренко // Антенны. – 2015. – № 2 (213). – С. 35-46.

Подписано в печать . . . 2016. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 2,0. Уч.-изд. л. 2,0. Тираж 100 экз. Заказ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева.
Типография НГТУ им. Р.Е. Алексеева.
Типография НГТУ: 603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24.