

На правах рукописи



Мительман Юрий Евгеньевич

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЙ МЕТОД АНАЛИЗА МНОГОСЛОЙНЫХ
ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ СТРУКТУР

05.12.07 «Антенны, СВЧ–устройства и их технологии»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2012

Работа выполнена в ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (г. Екатеринбург).

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Шабунин Сергей Николаевич

Официальные оппоненты: **Войтович Николай Иванович**
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой конструирования и
производства радиоаппаратуры
ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский
государственный университет»,
г. Челябинск

Николаев Павел Васильевич
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
начальник лаборатории СВЧ устройств
ОАО «НТЦ «Завод Ленинец»,
г. Санкт-Петербург

Ведущая организация: Открытое акционерное общество
**«Опытное конструкторское бюро
«Новатор»** (г. Екатеринбург)

Защита диссертации состоится 18 мая 2012 года в 16 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.285.11 на базе ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 32, ауд. Р-217.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью, просим направлять в адрес диссертационного совета.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

Автореферат разослан 14 апреля 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент

С.М. Зраенко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Многослойные цилиндрические направляющие структуры используются в качестве линий передачи электромагнитной энергии, равно как и в качестве базовых элементов сложных устройств СВЧ (полосно-пропускающие фильтры, фильтры типов волн, аттенюаторы, направленные ответвители и др.), а также элементов антенных систем. При этом присутствие нескольких слоев материала в конструкции может быть обусловлено не только конструкцией содержащих их трактов, но и необходимостью защиты от внешнего воздействия, технологическими особенностями производства элементов и т.д.

Как правило, при анализе линий передачи интерес представляет комплексное волновое число (постоянная распространения), характеризующее одновременно и дисперсионные свойства линии передачи и ослабление поля волны в продольном направлении. Также для анализа могут быть использованы вторичные электродинамические характеристики, опирающиеся на волновые числа и их частотные зависимости, такие как коэффициент перекрытия по частоте, критические частоты, наклоны дисперсионных характеристик и т.д.

Наличие многослойного заполнения или укрытия в направляющей структуре значительно усложняет расчет ее характеристик, а, следовательно, и ее анализ и проектирование устройств на ее основе. О сложности и важности исследований в области электродинамики многослойных цилиндрических структур говорит ряд работ ученых, внесших свой вклад в развитие этого направления. Среди отечественных ученых отметим Г.В. Кисунько, Л.А. Вайнштейна, Б.А. Попереченко, Л.М. В.Ф. Взятыхшева, С.Б. Раевского, Г.И. Веселова, В.В. Никольского; за рубежом это направление развито Л. Фелсеном, Н. Маркувицом, К. Уолтером, Р. Кингом и Г. Смитом, Дж. К. Саусвортом и многими другими учеными, занимавшимися аналитическими и численными методами электродинамики цилиндрических структур.

В абсолютном большинстве существующих работ для составления дисперсионных уравнений использовался метод сшивания полей и его модификация в виде метода частичных областей, в котором частные решения волновых уравнений в рассматриваемой структуре определяются граничными условиями на границах однородных слоев. При использовании проекционных методов решения дифференциальных уравнений, получают систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). Однако при увеличении количества слоев матрица, из которой определяется решение СЛАУ, становится плохо обусловленной, что затрудняет быстрый и точный поиск решения.

Анализ высших типов волн многослойной коаксиальной линии в литературе остается практически не освоенным, за исключением расчетов критической частоты первого высшего типа волны.

К недостаткам используемых методов следует отнести невозможность строгого учета граничных условий на поверхности реальных проводников. Обычно используются приближенные граничные условия Леонтовича. Такой подход оправдан при высоких проводимостях металла стенок, однако, при средних значениях, характерных, например, для графита и похожих материалов упрощение дает ощутимые

погрешности. То есть для существующих приближенных методов ограничен круг решаемых ими задач.

Все это говорит о необходимости создания универсального электродинамического метода анализа многослойных цилиндрических структур как о важной задаче, имеющей существенное значение для теории и практики проектирования направляющих систем.

Целью данной работы является разработка нового электродинамического метода анализа многослойных направляющих цилиндрических структур, позволяющего получить универсальный инструмент для проектирования и исследования широкого класса линий передачи и устройств на их основе. Для достижения этой цели решаются следующие **задачи**:

- построение универсальной математической модели для анализа указанных многослойных цилиндрических направляющих систем;
- получение и исследование численных результатов решения дисперсионных уравнений исследуемых направляющих структур и проверка корректности разработанной модели.

Методы исследования.

В диссертации для получения матричного описания эквивалентных линий используется метод тензорной функции Грина, математические методы линейной алгебры. Для составления и решения дисперсионных уравнений применяется метод поперечного резонанса и численные методы решения трансцендентных уравнений.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. На основе модели эквивалентных радиальных линий передачи, методов теории цепей СВЧ и уравнений поперечного резонанса разработан электродинамический метод анализа многослойных цилиндрических направляющих систем, отличающийся универсальностью по отношению к граничным условиям на внутренней и внешней поверхностях структуры и к числу слоев в анализируемой структуре, а также строгостью граничных условий на проводящих поверхностях.

2. На основе авторского метода поиска корней трансцендентных уравнений поперечного резонанса составлены алгоритмы расчета дисперсионных характеристик собственных волн круглого волновода и коаксиальной линии с трехслойным заполнением, открытого диэлектрического двухслойного волновода и однопроводной линии с двухслойным покрытием, иллюстрирующие эффективность и универсальность разработанного электродинамического метода при расчете характеристик различных по структуре поперечного сечения линий передачи.

3. При составлении дисперсионных уравнений относительно комплексных волновых чисел в линиях передачи с потерями в металле использованы строгие граничные условия. Получены решения соответствующих дисперсионных уравнений. Показано влияние применения приближенных граничных условий Леонтовича на результаты расчета коэффициента затухания.

4. Доказана возможность использования универсальной математической модели для анализа круглого волновода, коаксиальной линии, диэлектрического волновода и однопроводной линии с потерями и без них с необходимостью замены в алгоритмах лишь граничных условий на внутренней и внешней областях в форме концевых сопротивлений и проводимостей эквивалентных линий при переходе от

одной линии к другой, что облегчает исследование и проектирование широкого класса направляющих структур.

5. Впервые применены зависимости коэффициентов перекрытия по частоте для выбора оптимальных размеров линий передачи, что повышает эффективность использования рабочего частотного диапазона одноволнового режима работы.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Универсальный метод определения параметров направляемых волн, основанный на решении задачи возбуждения волноводных структур сторонними токами, отличающийся универсальностью и позволяющий получать быстродействующие алгоритмы анализа многослойных цилиндрических структур с произвольным количеством слоев.

2. Методика составления и решения трансцендентных дисперсионных уравнений с использованием модели эквивалентных радиальных линий передачи и условий поперечного резонанса для многослойных цилиндрических направляющих структур, облегчающая алгоритмизацию расчета электродинамических характеристик многослойных цилиндрических направляющих систем.

3. Результаты расчета дисперсионных характеристик и коэффициентов затухания для многослойных круглых, коаксиальных, диэлектрических волноводов и однопроводных линий и их анализ.

4. Методика выбора параметров заполнения исследуемых направляющих структур с целью создания линий передачи с заданными электрическими характеристиками, основанная на анализе зависимостей коэффициента перекрытия и позволяющая эффективнее использовать частотный ресурс линии.

Достоверность научных положений обусловлена использованием строгой постановки и решения электродинамической задачи, сравнением с известными частными случаями, проверкой с помощью предельных аналитических переходов к классическим решениям, сравнением с программой численного моделирования методом конечных элементов.

Практическая ценность результатов.

1. Разработаны алгоритмы расчета дисперсионных характеристик и коэффициентов затухания собственных волн

- круглого экранированного волновода с трехслойным заполнением;
- коаксиального волновода с трехслойным заполнением;
- двухслойного открытого диэлектрического волновода;
- однопроводной линии с двухслойным укрытием.

Предложенные алгоритмы основаны на использовании матричных методов и позволяют получать компактные программы независимо от числа слоев структур в среде MatLAB

2. Созданы компьютерные программы для расчета характеристик экранированных и открытых цилиндрических структур, на основе которых могут быть построены САПР микроволновых устройств.

3. Предложен способ выбора оптимальных параметров диэлектрического стержня для использования круглого волновода во вращающихся сочленениях, позволяющий упростить процесс их проектирования и разработать новые устройства с их использованием.

4. Рассчитаны коэффициенты затухания в однопроводных линиях на основе магистральных газо- и нефтепроводов, показывающие возможность их использования для систем мониторинга и передачи информации.

5. Определены ограничения применимости упрощенных формул для расчета коэффициентов затухания, основанных на использовании граничных условий Леонтовича, в линиях, содержащих проводящие поверхности, что позволит увеличить точность расчета их характеристик.

Использование результатов работы.

Научные результаты, положения и выводы диссертации использованы в ОАО «Завод радиоаппаратуры» для создания электродинамических моделей подземных и надземных трубопроводов с учетом влияния защитного покрытия.

Результаты диссертации использованы в институте математики и механики УрО РАН для создания быстродействующих алгоритмов синтеза антенных решеток при выполнении работ по программе Президиума РАН «Математическая теория управления» при финансовой поддержке УрО РАН (проект №09-П-1-1013).

Результаты исследований и разработок, полученных в диссертационной работе, используются в учебном процессе ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» при чтении лекций, проведении лабораторного практикума и выполнении дипломного проектирования.

Апробация работы.

Основные результаты работы докладывались на конференциях «Радиовысотометрия» (2004, 2007, Каменск-Уральский), «Радиолокация. Навигация. Связь» (2005, Воронеж), «Связь-Пром» (2005-2008, Екатеринбург), отчетных конференциях молодых ученых УГТУ-УПИ (2005-2009, Екатеринбург), научно-технических интернет конференциях УрФУ (УГТУ-УПИ) (2005-2011, Екатеринбург), конференциях «Физика и технические приложения волновых процессов» (2008, Самара, 2010, Миасс), конференции Регионального Уральского отделения АИН (2010, Екатеринбург).

Публикации.

Результаты работы по теме диссертации опубликованы в 22 научных трудах. Из них 2 статьи в журналах из списка ВАК, 19 тезисов в сборниках трудов конференций.

Структура и объем диссертации.

Работа состоит из введения, четырех глав и заключения, содержит 162 страницы текста, включая оглавление, список литературы из 99 наименований, 90 рисунков, 2 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** приведен краткий обзор существующих методов анализа цилиндрических направляющих структур. Показана актуальность темы работы, сформулированы объект, предмет исследования и цель работы; поставлены задачи для достижения цели; отмечены новизна полученных результатов, их теоретическая значимость и прикладная ценность. Сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** на основе полученного общего решения задачи возбуждения цилиндрической структуры (рис. 1) сторонними токами создается универсальная

математическая модель для анализа регулярных цилиндрических радиально кусочно-неоднородных направляющих систем. Решена задача возбуждения цилиндрической структуры с применением спектрального разложения в интеграл-ряд Фурье соответственно по непрерывному спектру продольных волновых чисел h и дискретному спектру азимутальных индексов m как продольных составляющих напряженностей электрического и магнитного полей, так и составляющих возбуждающего тока.

Используя представление электромагнитного поля в виде суперпозиции электрических и магнитных волн относительно оси z , систему уравнений Максвелла можно свести к паре систем уравнений. Например, для E -волн имеем

$$\begin{cases} -\frac{d}{dr}(\dot{E}_{zmh}^e) = -j\frac{\gamma^2 Z_0}{\epsilon r k_0^2} (k_0 r \dot{H}_{\phi mh}^e) - \frac{h Z_0}{\epsilon k_0} j_{rmh}^{\text{э ст}} - j_{\phi mh}^{\text{м ст}}, \\ \frac{d}{dr}(k_0 r \dot{H}_{\phi mh}^e) = j\frac{\epsilon k_0^2}{Z_0 \gamma^2} r \left[k^2 - h^2 - \left(\frac{m}{r}\right)^2 \right] \dot{E}_{zmh}^e + k_0 r j_{zmh}^{\text{э ст}} - \frac{m h k_0}{\gamma^2} j_{\phi mh}^{\text{э ст}} + \\ + \frac{\epsilon k_0}{\gamma^2 Z_0} m j_{rmh}^{\text{м ст}}. \end{cases} \quad (1)$$

где $\dot{H}_{\phi mh}^e$, \dot{E}_{zmh}^e , $j_{rmh}^{\text{э ст}}$, $j_{\phi mh}^{\text{э ст}}$, $j_{zmh}^{\text{э ст}}$, $j_{rmh}^{\text{м ст}}$, $j_{\phi mh}^{\text{м ст}}$ – спектральные составляющие напряженности магнитного и электрического полей, стороннего электрического и магнитного токов соответственно, γ – поперечное волновое число.

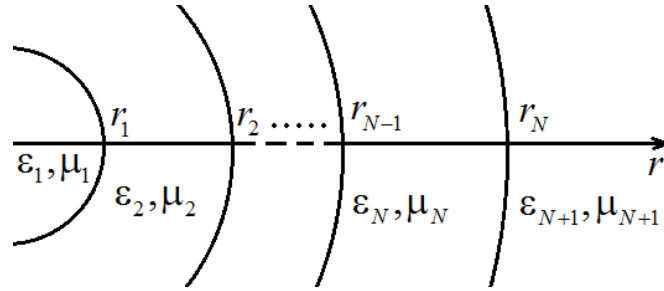


Рис. 1 Радиально-неоднородная цилиндрическая структура

Воспользовавшись заменой $V_E = \dot{E}_{zmh}^e$, $I_E = -k_0 r \dot{H}_{\phi mh}^e$ систему уравнений (1) можно свести к системе телеграфных уравнений

$$\begin{cases} -\frac{d}{dr} V_E = j Z_E \chi I_E + v_{\text{ст}}^E, \\ -\frac{d}{dr} I_E = j Y_E \chi V_E + i_{\text{ст}}^E, \end{cases} \quad (2)$$

где V_E , I_E , Z_E , Y_E , – соответственно напряжение, ток, волновые сопротивление и проводимость эквивалентной E -линии; $v_{\text{ст}}^E$ и $i_{\text{ст}}^E$ – эквивалентные напряжения и токи источников;

$\chi = \sqrt{k^2 - h^2 - \left(\frac{m}{r}\right)^2}$ – постоянная распространения в эквивалентной радиальной линии. Аналогичные уравнения можно записать для H -линий. Таким образом, используя методы теории цепей СВЧ неоднородную структуру можно заменить эквивалентной электрической схемой (рис.2). Вводятся матрицы передачи слоев и границ. Граничные условия задаются эквивалентными концевыми нагрузками.

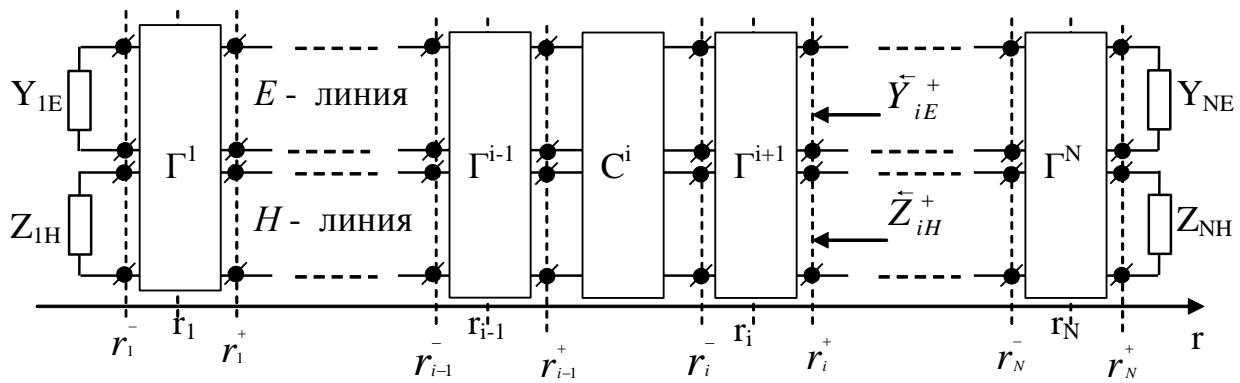


Рис. 2 Эквивалентная схема радиальных линий передачи

Предложенная модель позволяет использовать уравнения поперечного резонанса (3), записанные в заданном опорном сечении в слое p , в качестве дисперсионных уравнений для собственных волн направляющей структуры в отличие от повсеместно используемого способа получения дисперсионных уравнений при наложении граничных условий на границах раздела слоев диэлектриков на общее решение волновых уравнений.

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{pH}(m, h) + \bar{Z}_{pH}(m, h) &= 0, \\ \bar{Y}_{pE}(m, h) + \bar{Y}_{pE}(m, h) &= 0.\end{aligned}\tag{3}$$

Стрелки над сопротивлениями и проводимостями означают направление расчета от опорного сечения. Само по себе опорное сечение выбирается произвольно. Пересчет направленных модальных сопротивлений и проводимостей эквивалентных линий в многослойных структурах производится от внешней и внутренней границ по рекуррентным формулам теории длинных линий с помощью матриц передачи однородных слоев и границ между ними.

Разработанная в рамках главы математическая модель может быть использована для расчета волновых чисел собственных волн многослойных цилиндрических направляющих систем различных конфигураций внутренних и внешних границ. При этом переход в алгоритмах от одной структуры к другой будет заключаться лишь в смене выражений для концевых сопротивлений и проводимостей эквивалентных радиальных линий передачи, что существенно упрощает этот процесс по сравнению с имеющимися методами.

Во **второй главе** разработанная модель применяется для анализа круглых металлических волноводов со слоистым магнетодиэлектрическим заполнением. Для иллюстрации эффективности и корректности разрабатываемого метода выведены соотношения для расчета волновых чисел в круглом металлическом волноводе с трехслойным заполнением. Выбор количества слоев обусловлен относительной простотой вывода соотношений и, в то же время, широкими возможностями как для сравнения с существующими данными в известных частных случаях, так и для получения качественно новых результатов. На основе результатов предыдущей главы были составлены алгоритмы для численного моделирования этой направляющей системы.

Для круглого экранированного волновода получены дисперсионные характеристики первых 6 распространяющихся типов волн (рис. 3). По данным

характеристикам можно наблюдать явление инверсии критических частот (вместо волны HE_{11} основной становится волна E_{01}). Также можно наблюдать различие дисперсионных свойств: замедление волны E_{01} , имеющей большую плотность потока мощности вблизи стенки волновода (внутри диэлектрического слоя), проявляется сильнее с ростом частоты, чем, у волны HE_{11} , имеющей меньшую долю мощности в диэлектрическом слое.

Для основной волны круглого волновода были посчитаны коэффициенты перекрытия в зависимости от параметров диэлектрического заполнения (рис. 4). По данным зависимостям легко определить соотношения радиусов диэлектрического стержня, при которых происходит инверсия критических частот низшей моды и первого высшего типа. При применении материала с достаточно большой диэлектрической проницаемостью практически при любой толщине стержня основной волной в волноводе будет волна E_{01} . Если при этом радиус стержня будет составлять примерно половину от радиуса волновода, то можно получить для этой волны достаточно большое значение коэффициента перекрытия (больше данного показателя для основного типа волны в круглом полном волноводе).

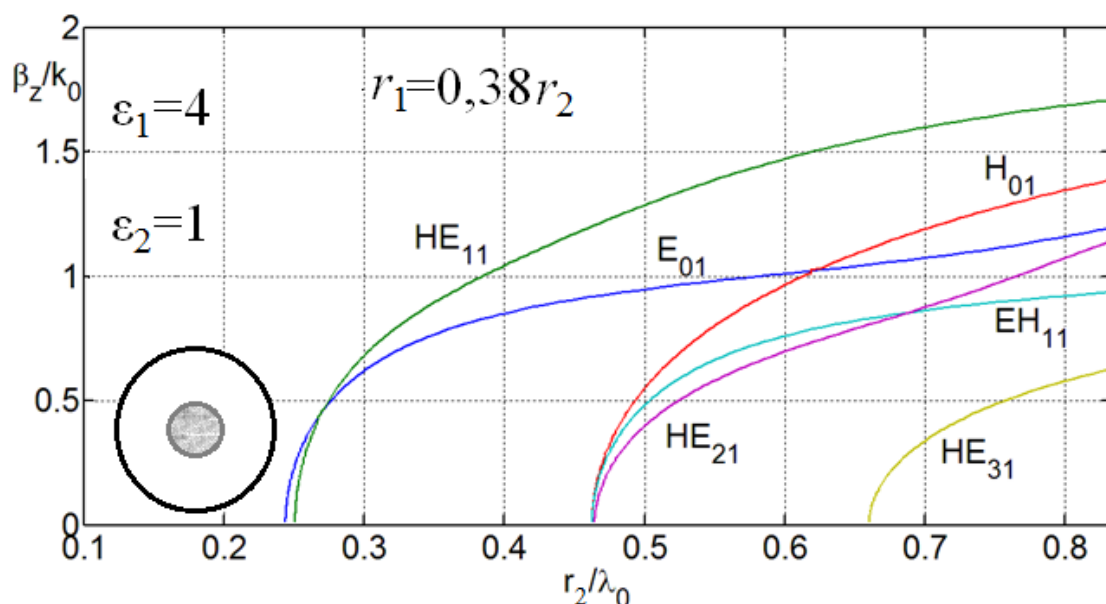


Рис. 3 Дисперсионные характеристики собственных волн в круглом экранированном волноводе с многослойным диэлектрическим заполнением

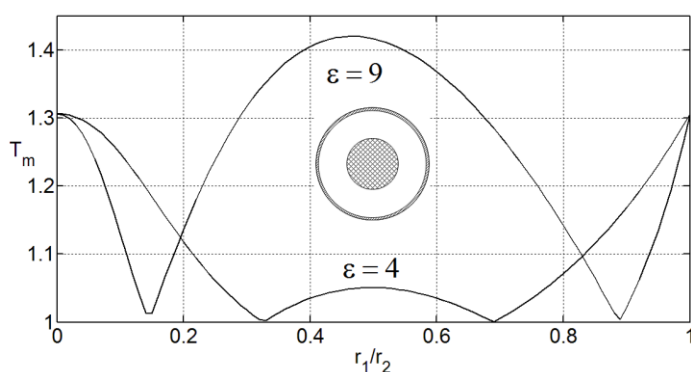


Рис. 4 Коэффициент перекрытия по частоте основной волны двухслойного круглого волновода с диэлектрическим стержнем

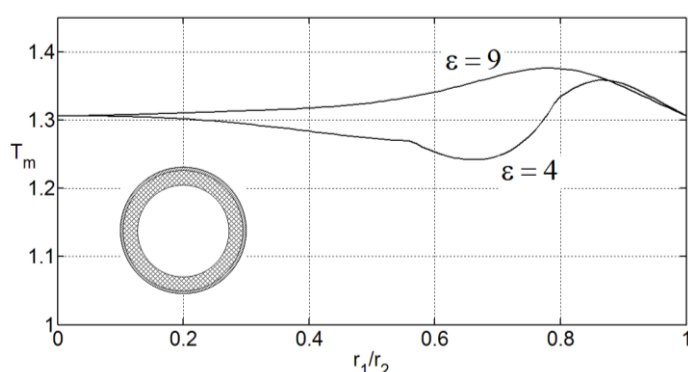


Рис. 5 Коэффициент перекрытия по частоте основной волны двухслойного круглого волновода с диэлектрической втулкой

Судя по зависимостям коэффициента перекрытия на рис. 5, в случае наличия в волноводе диэлектрической втулки первые типы волн не изменяют порядка следования критических частот. Этот эффект отмечался и в работах 80-х годов прошлого века, однако численного подтверждения тому не было.

С введением неидеальных материалов в направляющую систему необходимо выполнять поиск волновых чисел из решений дисперсионных уравнений на комплексной плоскости. В работе для этого используется метод оврагов на поверхности, образованной над комплексной плоскостью модулем левой части уравнений поперечного резонанса (3). Такой способ является достаточно ресурсоемким, и не обеспечивает нахождение всех возможных корней дисперсионного уравнения без знания их приближенных значений, однако позволяет достаточно точно определять эти корни для широкого диапазона конфигураций направляющих систем. В некоторых из последних работ по данной теме предлагается, например, использовать для решения дисперсионных уравнений на комплексной плоскости комбинацию методов Мюллера и вариации фазы, что, по мнению авторов, устранил приведенные недостатки. Рассчитанные частотные зависимости коэффициента затухания круглого металлического волновода с неидеальными металлическими стенками приведены на рис. 6. На графиках видны как хорошо известные принципы изменения затухания при изменении частоты, так и аномальная дисперсия волны H_{01} .

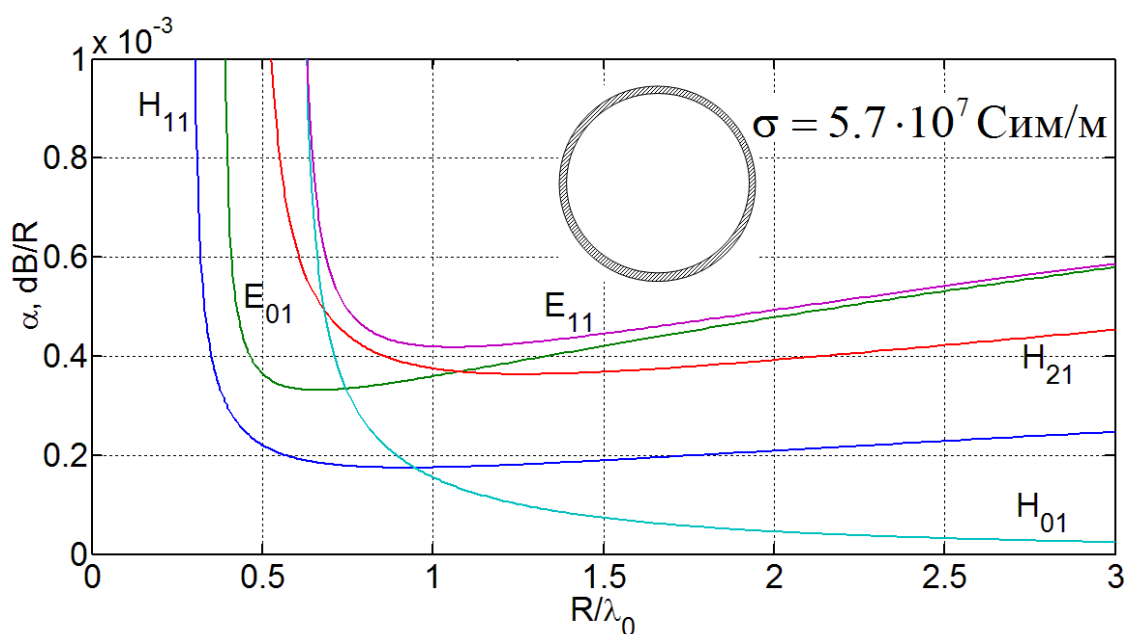


Рис. 6 Частотные зависимости коэффициента затухания в круглом полном медном волноводе

На современном этапе развития вычислительных средств, при расчете линий передачи все чаще используются пакеты трехмерного электродинамического моделирования. Для проверки корректности результатов численного моделирования в работе был использован пакет Ansoft HFSS 13. Результаты расчета дисперсионных характеристик, полученные с помощью указанного пакета, приведены на рис. 7. Зависимости, полученные с помощью программы HFSS и с помощью расчета методом эквивалентных линий, практически одинаковы, за исключением того, что программа HFSS не отслеживает тип волны, перескакивая с одной кривой на другую. Также необходимо отметить значительное различие в требуемых

вычислительных ресурсах для расчета частотных зависимостей. Так, определение волновых чисел первых нескольких типов волн трехслойного волновода при помощи пакета Matlab с использованием уравнения поперечного резонанса и метода эквивалентных линий требует меньше вычислительных ресурсов (меньше времени для расчета при прочих равных условиях) примерно в 30-50 раз. Это объясняется необходимостью довольно сложной дискретизации электрически большой структуры при использовании метода конечных элементов в HFSS.

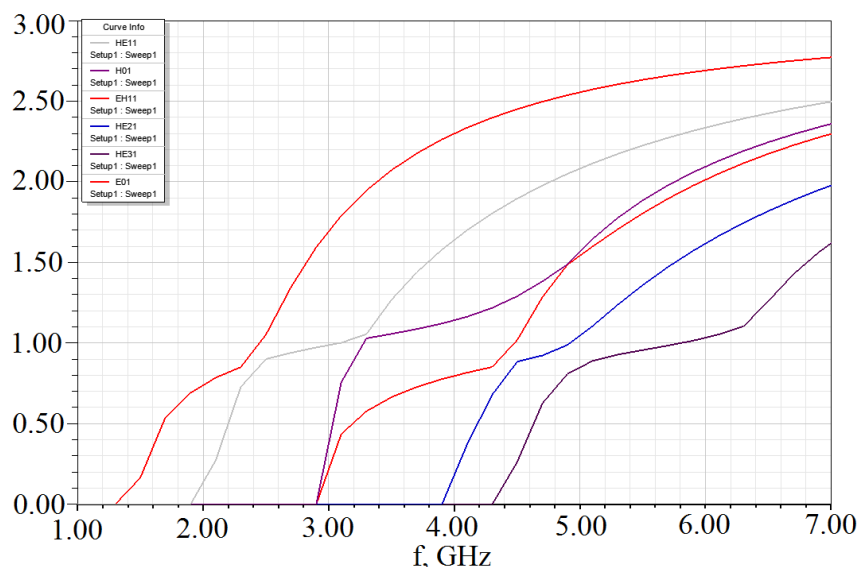


Рис. 7 Дисперсионные характеристики круглого волновода с диэлектрическим стержнем, вычисленные в среде HFSS: $\epsilon_1 = 9$, $\epsilon_2 = 1$, $r_1 = 0,38r_2$, $r_2 = 33$ мм

Полученные характеристики доказывают эффективность и корректность разработанного метода при анализе экранированных многослойных направляющих систем.

В **третьей главе** проведен анализ коаксиальной линии с радиально неоднородным магнитодиэлектрическим заполнением. Структура анализируется аналогично круглому волноводу. При этом в эквивалентных радиальных линиях для круглого волновода изменяются проводимости и сопротивления на внутренних их концах. Соответственно, достаточно в вычислительном алгоритме заменить выражения для расчета этих проводимостей, в остальном оставив его неизменным. Это в очередной раз подтверждает удобство, гибкость и универсальность разработанной модели для расчета характеристик цилиндрических структур.

Для определения характеристик T -волны, являющейся основной для исследуемой коаксиальной линии передачи необходимо использовать метод, несколько отличный от метода анализа собственных H и E волн. Это связано с отсутствием продольных компонент векторов напряженностей электрического и магнитного поля у T -волны.

Волна T является основной в коаксиальной линии передач с однородным заполнением. При неоднородном заполнении волновода появляется связь между эквивалентными радиальными H и E линиями и эта волна преобразуется в волну типа квази- T . В электромагнитном поле квази- T волны присутствует хотя бы одна продольная составляющая векторов напряженностей электрического или магнитного поля.

При неоднородном заполнении линии передачи все волны с азимутальным индексом $m \neq 0$ преобразуются в гибридные. Критическая частота первой высшей волны H_{11} (HE_{11}) ограничивает сверху рабочий диапазон частот одномодового режима работы. Для первичной проверки результатов численного моделирования использовано известное выражение для ее приближенного вычисления, полученное в приближении коаксиальной линии с волной H_{11} как изогнутого прямоугольного волновода с волной H_{20} :

$$f_{кр}^{H_{11}} = \frac{c}{\pi \cdot (r_0 + r_3) \cdot \sqrt{\epsilon_9}}, \quad (4)$$

В случае неоднородного трехслойного заполнения предлагается использовать следующее выражение для эквивалентной диэлектрической проницаемости в стационарном приближении

$$\epsilon_9 = \frac{\epsilon_1 \cdot \epsilon_2 \cdot \epsilon_3 \cdot \lg \frac{r_3}{r_0}}{\epsilon_2 \cdot \epsilon_3 \cdot \lg \frac{r_1}{r_0} + \epsilon_1 \cdot \epsilon_3 \cdot \lg \frac{r_2}{r_1} + \epsilon_1 \cdot \epsilon_2 \cdot \lg \frac{r_3}{r_2}}. \quad (5)$$

При помощи этой проницаемости также можно приближенно определить коэффициент замедления.

На рис. 8 приведены дисперсионные характеристики для неоднородно заполненной коаксиальной линии. При неоднородном заполнении коаксиальной линии происходит расщепление частотных зависимостей постоянных распространения вырожденных волн EH_{11} и H_{01} . Т.к. силовые линии вектора напряженности электрического поля волны H_{01} имеют наибольшую концентрацию в области среднего слоя, в которую введен диэлектрик, данная волна испытывает большее замедление (имеет меньшую фазовую скорость) по сравнению с волной EH_{11} . Из-за этого, при увеличении диэлектрической проницаемости материала среднего слоя, различие частотных зависимостей постоянных распространения этих волн увеличивается.

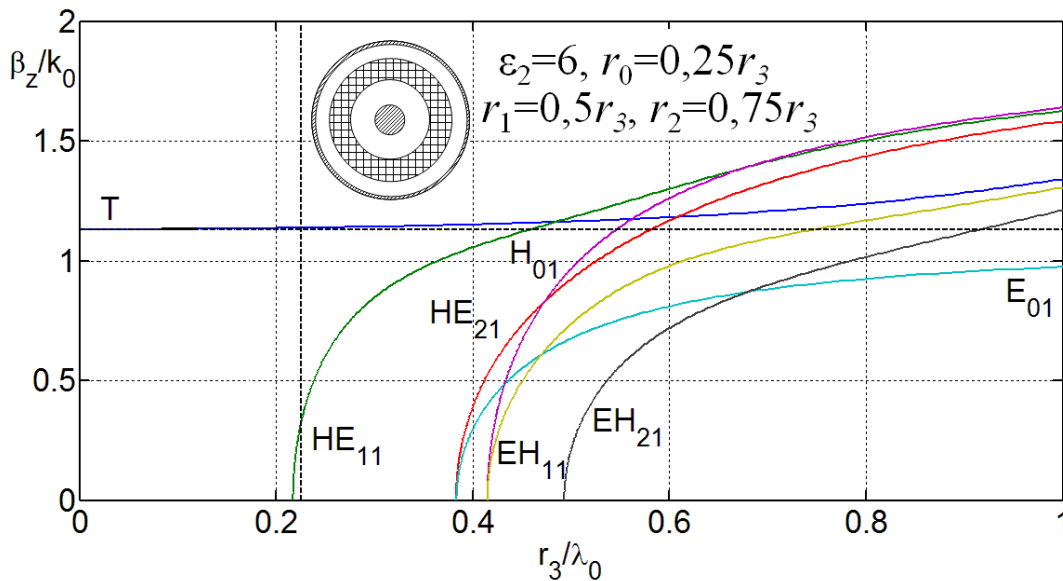


Рис. 8 Дисперсионные характеристики собственных волн в коаксиальном волноводе с многослойным диэлектрическим заполнением

При дальнейшем увеличении диэлектрической проницаемости материала среднего слоя различие частотных зависимостей постоянных распространения волн EH_{11} и H_{01} продолжает увеличиваться. Постоянная распространения квази- T волны в области низких частот достаточно точно соответствует известному квазистационарному приближению (прерывистая линия). Если структура поперечного сечения линии неоднородна (используется слоистый диэлектрик), то квази- T волна частично вырождается в E -волну, т.к. появляется продольная составляющая вектора напряженности электрического поля $E_z \neq 0$ за счет перераспределения энергии в диэлектрических слоях. На малых частотах эта составляющая очень мала и отвечающее ей решение дисперсионного уравнения будет очень близким к решению для T -волны. Далее, при росте частоты, будет возрастать амплитуда E_z , и поведение квази- T волны становится близким к поведению E -волны. Волна E_{01} , остается «быстрой» в достаточно широком частотном диапазоне. Это можно объяснить тем, что амплитуда поля данной волны возрастает около внутреннего и внешнего проводников и диэлектрический слой, расположенный на некотором расстоянии от них слабо влияет на фазовую скорость этой волны. Данный эффект становится заметнее при дальнейшем увеличении диэлектрической проницаемости среднего слоя.

Важным является рассмотрение изменения критических условий в полой коаксиальной линии с изменением соотношения диаметров внутреннего и внешнего проводников (рис. 9). Из представленных зависимостей можно видеть, как с уменьшением диаметра внутреннего проводника (движение влево по оси абсцисс), критические частоты высших типов волн приближаются к таковым в круглом полном волноводе. При этом наибольшее влияние наличие внутреннего проводника и его размеры оказывают на критические условия E -волн, т.к. введение металлической поверхности, расположенной вдоль волновода, приводит к нарушению граничных условий для продольной и азимутальной составляющих напряженности электрического поля.

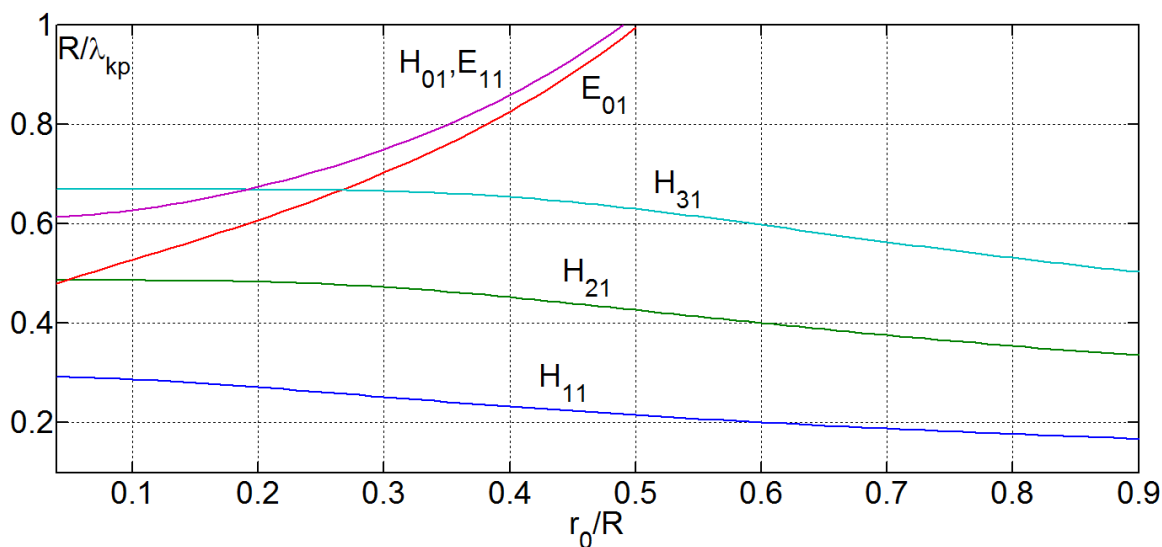


Рис. 9 Критические условия собственных волн в полном коаксиальном волноводе

Полученные результаты могут быть использованы для проектирования и исследования многослойных коаксиальных линий передачи и устройств на их основе.

В четвертой главе проведен анализ открытых многослойных цилиндрических направляющих структур: открытых диэлектрических волноводов, однопроводных линий передачи, полосковых линий на цилиндрической подложке и щелевых линий на основе круглого волновода.

С использованием разработанного метода дисперсионные уравнения для двухслойного диэлектрического волновода получены с помощью замены концевых сопротивлений и проводимостей в эквивалентных радиальных линиях на основе решений предыдущих глав.

Для иллюстрации эффективности предложенного метода рассмотрим характеристики одномодовой оптоволоконной линии со стандартными размерами и параметрами заполнения в области низких частот (рис. 10, а). Эти зависимости ведут себя так же, как и в однородном диэлектрическом волноводе с параметрами оболочки в воздухе, т.е. направляющие свойства сердцевины проявляются слабо. Отметим различие в поведении дисперсионных кривых волн E_{01} и H_{01} , несмотря на равенство их критических частот. Кроме того, можно наблюдать отличие дисперсионных характеристик волн EH_{11} и HE_{12} . До недавнего времени эти волны считались вырожденными, как и вообще все волны EH_{1n} и $HE_{1,n+1}$. Однако в последних работах показано, что дисперсионные характеристики волн $HE_{1,n+1}$, начиная с определенных частот, удаленных от критических частот волн EH_{1n} , тянутся вдоль линии $\tilde{\beta}_z = 1$ в пределах точности получаемых результатов. Этот вывод сделан на основе аналитического исследования дисперсионного уравнения вблизи критических частот указанных типов волн. Таким образом, критические частоты волн $HE_{1,n+1}$ оказываются неявно выраженными и нельзя строго говорить о вырождении волн EH_{1n} и $HE_{1,n+1}$.

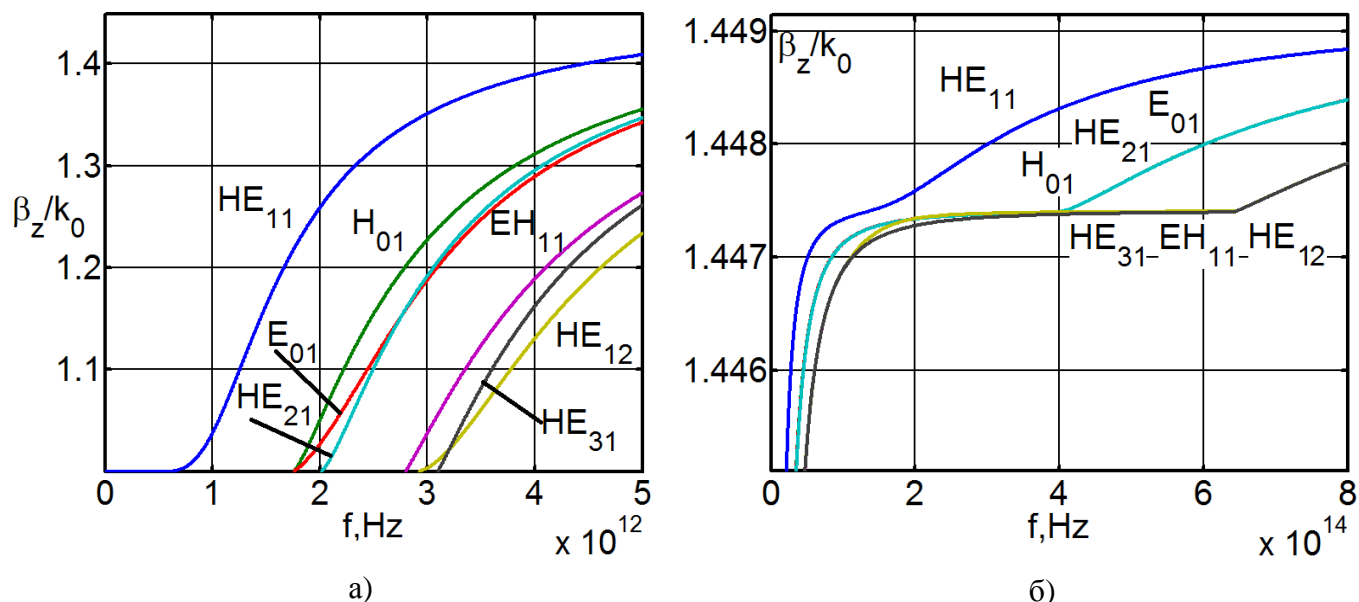


Рис. 10 Дисперсионные характеристики оптоволоконной линии с $\epsilon_1=2,10$, $\epsilon_2=2,095$, $r_1=4$ мкм, $r_2=62,5$ мкм в воздухе с $\epsilon_3=1$

В области высоких частот (на которых и работают оптоволоконные линии) зависимости имеют существенно отличающийся характер (рис. 10, б). Естественно такой характер обусловлен проявляющимися направляющими свойствами сердцевины. И в области частот инфракрасного диапазона оптоволоконная линия

ведет себя как диэлектрический волновод с параметрами сердцевины в безграничной среде с параметрами оболочки.

В качестве однопроводной линии передачи исследовалась труба магистрального нефтепровода во влажной и сухой почве. Целью ее анализа была оценка возможности создания устройств обнаружения несанкционированных неоднородностей вблизи трубопровода (незаконных врезок) на основе радиолокационных методов. Судя по приведенным на рис. 11 зависимостям постоянных распространения возможно создание устройства обнаружения с дальностью работы примерно 10-20 км.

Существенное отличие поиска решений для однопроводной линии от всех предыдущих заключается в конкретизации способа возбуждения цилиндрической структуры. Предложенный метод позволяет произвольно выбирать способы возбуждения. Здесь задаем в явном виде возбуждение при помощи кольца магнитного тока, охватывающего проводящий цилиндр. Это позволяет сразу выделить из спектра очевидно основную волну, не отвлекаясь на другие типы, а также проиллюстрировать эффективность метода при решении задач с заданными сторонними источниками.

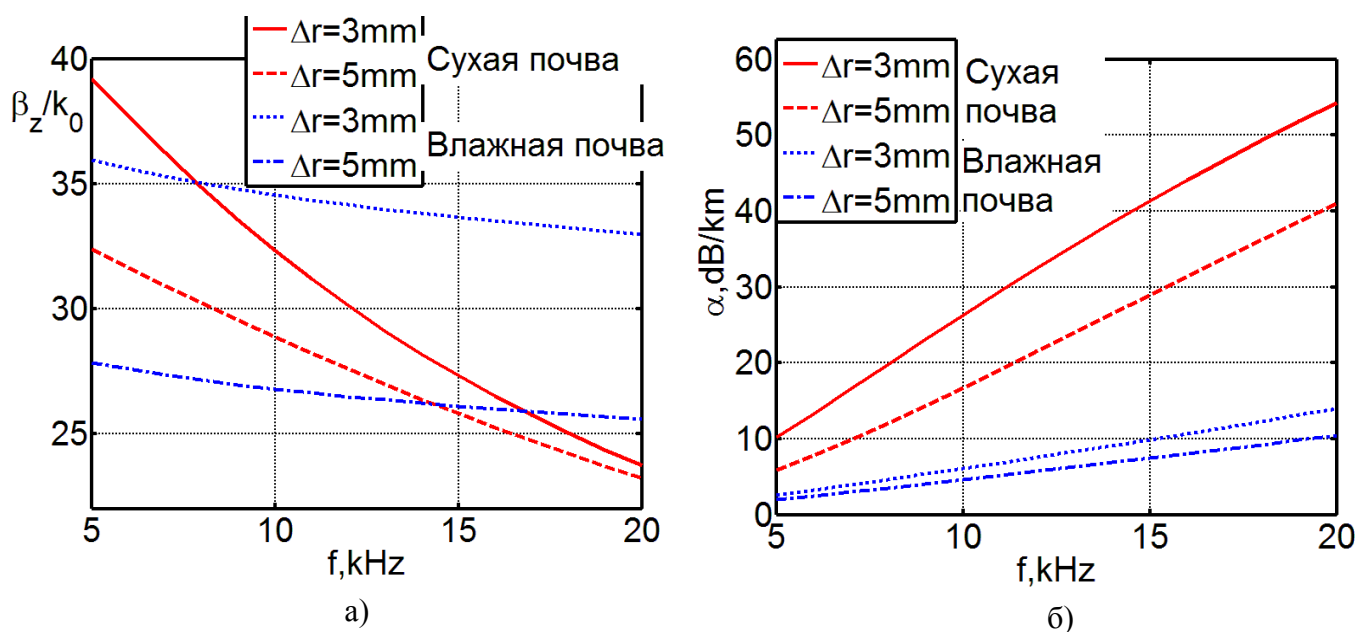


Рис. 11 Коэффициенты фазы (а) и затухания (б) основного типа волны внешней части стальной трубы диаметром 1 м со слоем диэлектрика ($\epsilon=2,08$) толщиной Δr во влажной почве с параметрами $\epsilon=20$, $\sigma=0,05$ сим/м и сухой почве с параметрами $\epsilon=5$, $\sigma=0,001$ сим/м

Аналогичным образом решаются задачи для микрополосковой линии на цилиндре и для щелевой линии на основе круглого волновода. Приведены дисперсионные уравнения для определения постоянных распространения. Полученные результаты могут быть использованы для создания антенных систем.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработана математическая модель радиально-неоднородной цилиндрической структуры, основанная на использовании эквивалентных радиальных линий передачи, отличающаяся универсальностью применения к расчету характеристик разнообразных волноведущих систем с произвольным числом слоев и параметрами материалов.

2. Получены выражения для расчета элементов матриц передачи восьмиплюсников слоев и границ, а также конечных нагрузок в эквивалентных радиальных линиях при всех возможных вариантах границ – внешнее неограниченное пространство, внешняя и внутренняя идеально проводящая цилиндрическая поверхность, импедансная поверхность, поверхность из магнитодиэлектрика.

3. Разработана методика составления дисперсионных уравнений для цилиндрических направляющих структур различных конфигураций поперечного сечения, основанная на рекуррентных соотношениях для расчета направленных модальных параметров эквивалентных линий. Произведены предельные переходы и упрощения для проверки корректности используемого электродинамического метода.

4. На основе полученных расчетных соотношений созданы программы расчета критических частот собственных волн круглых и коаксиальных волноводов с трехслойным магнитодиэлектрическим заполнением. Составлены алгоритмы расчета дисперсионных характеристик собственных волн исследуемых многослойных структур.

5. Для анализа направляющей системы впервые исследованы зависимости коэффициента перекрытия для различных типов волн от конфигурации ее поперечного сечения. Полученные результаты использованы для формирования рекомендаций к материалам заполнения линии передачи и соотношениям размеров слоев в зависимости от цели ее использования.

6. Впервые получены численные решения дисперсионных уравнений относительно коэффициента затухания, обусловленного потерями в металле стенок в строгой постановке задачи без использования приближенных граничных условий Леонтовича. Показано, что для круглого волновода с проводимостью стенок 10^2 Сим/м при $R/\lambda_0 \geq 1,1$ погрешность составляет более 10 %. Для коаксиальной линии на длинах волн менее $10^4 \times R$, погрешность составит не более 1% для большинства используемых в технике проводников.

7. На основе предложенного универсального метода выведены дисперсионные уравнения для полосковой линии с укрытием на цилиндрической подложке и щелевой линии на основе круглого многослойного экранированного волновода.

8. Полученные при анализе трубы магистрального нефтепровода в качестве однопроводной линии передачи в среде с потерями результаты позволяют судить о технической возможности создания устройства для обнаружения несанкционированных объектов вблизи реальных магистральных газо- и нефтепроводов, расположенных в земле. Предварительная оценка показывает, что дальность работы систем обнаружения может составлять 10-20 км.

9. Проведенное сравнение результатов расчета постоянных распространения с помощью широко применяемого пакета трехмерного электродинамического моде-

лирования Ansoft HFSS показало, что несмотря на приемлемое совпадение результатов наблюдается эффект перескакивания графиков с одного типа волн на другой. Это существенно ограничивает в отличие от предложенного метода возможности анализа данным пакетом многомодовых направляющих систем. Кроме того, время расчета дисперсионных характеристик многослойных цилиндрических структур предложенным методом в 30-50 раз меньше.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Мительман Ю.Е., Шабунин С.Н. Волноведущие свойства цилиндрических слоистых металлодиэлектрических структур // «Радиовысотометрия – 2004»: труды первой всероссийской научно-технической конференции. Екатеринбург: изд. АМБ, 2004. С. 197-201.

2. Мительман Ю.Е., Опарин В.А., Шабунин С.Н. Электродинамические свойства цилиндрических металлодиэлектрических структур // Радиолокация. Навигация. Связь. XI международная научно-техническая конференция. В 3-х томах. Воронеж: НПФ «Саквоее», 2005. Т. 3. С. 2027-2034.

3. Yu. Mitelman, V. Oparin, S. Shabunin. Electromagnetic properties of the cylindrical magnetodielectric structures // Proc. Of the XI International Scientific-Research Conference “Radiolocation, Navigation, Communications”. Russia, Voronezh: NPF “Sakvooe”, 2005. P. 571-578.

4. S. Daylis, Yu. Mitelman, S. Shabunin. Waveguide and radiation properties of the cylindrical dielectric structures // Научные труды международной научно-практической конференции «Связь-пром 2005». Екатеринбург: ЗАО «Компания Реал-Медиа», 2005. С. 268-276.

5. **Мительман Ю.Е., Шабунин С.Н. Определение постоянных распространения в круглом слоистом волноводе // Вестник УГТУ-УПИ. Серия радиотехническая. Теория и практика радиолокации земной поверхности. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2005. №19(71). С. 165-169.**

6. Мительман Ю.Е., Шабунин С.Н. Исследование волноводных свойств слоистых цилиндрических структур // Технические науки: сборник аннотаций научно-исследовательских работ студентов. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2006. С. 21.

7. Мительман Ю.Е., Шабунин С.Н. Линии передачи с Т и квази-Т волнами на основе цилиндрической слоистой структуры // Радиовысотометрия-2007: сборник трудов Второй научно-технической конференции. Екатеринбург: ИД «Третья столица», 2007. С. 366-372.

8. Мительман Ю.Е. Исследование волноводных свойств однопроводных линий передачи в среде с потерями // Научные труды МНПК «СВЯЗЬ-ПРОМ 2008». Екатеринбург: ЗАО «Компания Реал-Медиа», 2008. С. 333-335.

9. Мительман Ю.Е., Сычугов С.Г. Использование нефте- и газопроводов в качестве однопроводных линий передачи // Научные труды МНПК «СВЯЗЬ-ПРОМ 2008». Екатеринбург: ЗАО «Компания Реал-Медиа», 2008. С. 336-338.

10. Мительман Ю.Е., Иванов В.И. Использование трубопровода в земле как однопроводной линии передачи // Научные труды XVI Уральской международной конференции молодых ученых по приоритетным направлениям развития науки и

техники: сборник статей. В 4-х частях. Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2009. Ч. 4. С. 153-154.

11. Мительман Ю.Е., Шабунин С.Н., Щипачев А.А. Преимущества и недостатки аналитических и численных методов расчета постоянных распространения волн в слоистых цилиндрических структурах // Сборник научных трудов международной заочной конференции, посвященной 15-летию со дня создания Регионального Уральского отделения Академии Инженерных Наук им. А.М. Прохорова. Екатеринбург: ИВТОБ, 2010. С. 121-124.

12. Мительман Ю.Е., Князев С.Т., Шабунин С.Н. Применение аппарата функций Грина радиально слоистых структур к решению задач возбуждения, излучения и дифракции волн // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. Самара: Издательство «Самарский университет», 2010. С. 31-37.

Подписано в печать 08.04. 2012

Плоская печать

Формат 60x84/16

Заказ

Бумага писчая

Тираж 100

Отпечатано на кафедре полиграфии и web-дизайна ФГАОУ ВПО УрФУ
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 32